МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе _____ В. В. Зубов

Методические указания к выполнению лабораторных работ и курсовой работы

Б1.В.07 ПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры
Технической механики
(название кафедры)
Зав. кафедрой _____
(подпись)
Волков Е.Б.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 13.09.2024
(Дата)

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 00899356C4B8E7194321D0149160B2398C
Владелец: Зубов Владимир Владимирович
Действителен: с 26.06.2024 до 19.09.2025

Рассмотрена методической комиссией факультета
Горно-механического
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение……4
Методические рекомендации для самостоятельной работы……..…..5
Методические рекомендации для лабораторных занятий…….....11
Методические рекомендации для выполнения
курсового проекта..……15
Библиографический список……...22

ВВЕДЕНИЕ

Мехатроника является новой и динамично развивающейся отраслью науки и техники. Она базируется на знаниях и достижениях в областях механики, электроники и компьютерного управления и представляет собой более высокий уровень развития современного машиностроения.

Электропривод переменного тока стал доминирующим в новых разработках технологического оборудования, а частотнорегулируемый электропривод с асинхронным короткозамкнутым двигателем широко применяется и выпускается многими электротехническими фирмами мира. Совместно с компьютерными средствами управления привод переменного тока имеет большие функциональные возможности и адаптирован ко всем объектам применения, где ранее использовался привод постоянного тока.

Гидропривод позволяет с достаточно высокой точностью ограничить усилия на выходном звене заданной величиной и, таким образом, не только выполнить требование технологического процесса, но и предохранить сам модуль и обслуживаемую им систему от перегрузки.

Изучение данной дисциплины позволит студентам в полной мере усвоить конструкцию и особенности основных элементов различных приводов и сформировать базу знаний, необходимых для проектирования мехатронных и робототехнических устройств.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа – это вид учебной деятельности, выполняемый студентом без непосредственного контакта с преподавателем или управляемый преподавателем опосредовано через специальные учебные материалы; неотъемлемое обязательное звено процесса обучения, предусматривающее, прежде всего, индивидуальную работу студентов в соответствии с установкой преподавателя или учебника, программы обучения.

В процессе самостоятельной деятельности студент должен научиться выделять познавательные задачи, выбирать способы их решения, выполнять операции контроля за правильностью решения поставленной задачи, совершенствовать навыки реализации теоретических знаний.

Самостоятельная работа студента под руководством преподавателя протекает в форме делового взаимодействия: студент получает непосредственные указания, рекомендации преподавателя об организации самостоятельной деятельности, а преподаватель выполняет функцию управления через учет, контроль и коррекцию ошибочных действий.

Успешность самостоятельной работы в первую очередь определяется степенью подготовленности студента. По своей сути самостоятельная работа предполагает максимальную активность студентов в различных аспектах: организации умственного труда, поиске информации, стремлении сделать знания убеждениями. Психологические предпосылки развития самостоятельности студентов заключаются в их успехах в учебе, положительном к ней отношении, заинтересованности и увлеченности предметом, пони мании того, что при правильной организации самостоятельной работы приобретаются навыки и опыт творческой деятельности.

Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, зачетам и экзаменам.

Самостоятельная работа предназначена не только для овладения дисциплиной, но и для формирования навыков самостоятельной работы вообще, в учебной, научной, профессиональной деятельности, способности принимать на

себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т. д.

Самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы. Никакие знания, не подкрепленные самостоятельной деятельностью, не могут стать подлинным достоянием человека. Кроме того, самостоятельная работа имеет воспитательное значение: она формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации.

Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов используется:

- организация индивидуальных планов обучения с привлечением студентов к научно-исследовательской работе и по возможности к реальному проектированию по заказам предприятий;
- включение самостоятельной работы студентов в учебный план и расписание занятий с организацией индивидуальных консультаций на кафедрах;
- создание комплекса учебных и учебно-методических пособий для выполнения самостоятельной работы студентов;
- разработка системы интегрированных межкафедральных заданий;
- ориентация лекционных курсов на самостоятельную работу;
- рейтинговый метод контроля самостоятельной работы студентов;
- коллегиальные отношения преподавателей и студентов;
- разработка заданий, предполагающих нестандартные решения;
- индивидуальные консультации преподавателя и перерасчет его учебной нагрузки с учетом самостоятельной работы студентов;
- проведение форм лекционных занятий типа лекции-беседы, лекции-дискуссии, где докладчиками и содокладчиками выступают сами студенты, а преподаватель выполняет роль ведущего. Такие занятия предполагают предварительную самостоятельную проработку каждой конкретной темы выступающими студентами по учебным пособиям, консультации с преподавателем и использование дополнительной литературы.

Тема 1.

Устройство, основные свойства и принцип работы гидро- и пневмоприводов. Классификация и характеристики. Расчет и выбор гидро-приводов.

Тема 2.

Источники питания гидравлических приводов. Аккумуляторы для гидравлических приводов. Насосы подачи.

Тема 3.

Электрогидравлический привод. Гидроусилители. Прямое и непрямое управление.

Тема 4.

Исполнительные двигатели гидроприводов мехатронных систем.

Тема 5.

Упрощенная математическая модель и структура гидроприводов.

Тема 6.

Следящий привод с электрическим управлением и дроссельным регулированием скорости

Тема 7.

Понятие электропривода. Уравнение движения электропривода. Электродвигатели постоянного тока и их характеристики. Режимы работы электропривода

Тема 8.

Электродвигатели переменного тока и их характеристики. Многодвигательный электропривод.

Тема 9.

Переходные процессы в электрических приводах. Пусковой режим работы электрических приводов различного типа

Тема 10.

Регулирование скорости электроприводов постоянного тока с различным видом возбуждения

Тема 11.

Регулирование скорости электропривода изменением питающего напряжения

Тема 12.

Импульсное регулирование скорости привода постоянного тока

Тема 13.

Электрический привод по системе "генератор-двигатель"

Тема 14.

Регулирование скорости приводов на двигателях переменного тока

Тема 15.

Регулирование скорости асинхронных двигателей в каскадных схемах

Тема 16.

Электропривод на шаговом двигателе. Конструкция шагового двигателя и принцип работы. Управление шаговым приводом

Тема 17.

Управление приводом в разомкнутых системах. Автоматическое управление пуском

Тема 18.

Управление приводом в разомкнутых системах. Автоматическое управление торможением

Вопросы для самоконтроля:

1. Автоматическое управление электроприводом в разомкнутой системе. Системы автоматического пуска.

2. Автоматический пуск двигателя в функции различных параметров управления. Контактные и бесконтактные схемы пуска.
3. Автоматическое управление электроприводом в разомкнутой системе. Системы автоматического торможения.
4. Автоматическое торможение двигателя в функции различных параметров управления. Контактные и бесконтактные схемы торможения.
5. Конструкция, устройство и принцип действия шагового двигателя.
6. Схема включения и принцип функционирования шагового двигателя.
7. Принцип построения систем управления шаговым приводом.
8. Управление усилием на выходном звене исполнительного механизма.
9. Управление скоростью движения выходного звена исполнительного механизма.
10. Напорный и редукционный клапаны, регулируемый дроссель и регулятор расхода.
11. Гидравлические характеристики гидроприводов.
12. Гидрозамок. Позиционирование штока гидроцилиндра.
13. Объемный гидромотор.
14. Применение аккумуляторов в гидравлических приводах.
15. Определение рабочего объема и давления зарядки гидроаккумулятора.
16. Совместная работа двух исполнительных механизмов. Применение клапана последовательности и делителя потока.
17. Устройство ввода и обработки электрического сигнала электрогидравлического привода.
18. Измерение электрических величин электрогидравлического привода.
19. Основные способы управления пневмоцилиндрами.
20. Пневмоцилиндры одностороннего и двухстороннего действия.
21. Логические функции и их реализация в пневмосистемах.
22. Средства пневмоавтоматики, реализующие логические функции.
23. Принцип управления пневмоцилиндрами по времени и давлению.
24. Следящий привод с электрическим управлением и дроссельным регулированием скорости.

25. Линейная математическая модель следящего гидропривода с электрическим управлением.
26. Электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Схема включения, характеристики и режимы работы.
27. Электродвигатели постоянного тока с последовательным и смешанным возбуждением. Схемы включения, характеристики и режимы работы.
28. Асинхронные двигатели. Типы асинхронных двигателей. Схемы включения, характеристики и режимы работы.
29. Синхронный двигатель. Схема включения и особенности функционирования. Характеристики и режимы работы.
30. Переходные процессы в электрических приводах. Переходные характеристики.
31. Пуск электропривода постоянного тока на двигателе с независимым возбуждением.
32. Пуск электропривода постоянного тока на двигателе с последовательным возбуждением.
33. Пусковой режим электропривода на асинхронном двигателе.
34. Переходные процессы в системе «Управляемый преобразователь – двигатель».
35. Регулирование скорости электроприводов. Реостатное регулирование скорости двигателей постоянного тока с различными видами возбуждения.
36. Регулирование скорости электропривода постоянного тока шунтированием обмотки якоря.
37. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока изменением потока возбуждения.
38. Регулирование скорости электропривода изменением питающего напряжения.
39. Регулирование скорости электропривода с использованием ЭМУ.
40. Регулирование скорости электропривода посредством магнитного усилителя.
41. Регулирование скорости электропривода посредством транзисторного усилителя.

42. Регулирование скорости электропривода с использованием тиристорного преобразователя напряжения.
43. Управляемый вентильный электропривод постоянного тока. Реверсивная и нереверсивная схемы включения тиристорного преобразователя.
44. Регулирование скорости электропривода с помощью импульсного регулятора напряжения.
45. Регулирование скорости асинхронных двигателей реостатным методом.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Лабораторное занятие - это основной вид учебных занятий, направленный на экспериментальное подтверждение теоретических положений. В процессе лабораторного занятия студенты выполняют одну или несколько лабораторных работ (заданий) под руководством преподавателя в соответствии с изучаемым содержанием учебного материала. Выполнение обучающимися лабораторных работ направлено на:

- обобщение, систематизацию, углубление теоретических знаний по конкретным темам учебной дисциплины;

- формирование умений применять полученные знания в практической деятельности, формирование компетенций;

- развитие аналитических, проектировочных, конструктивных умений;

- выработку самостоятельности, ответственности и творческой инициативы.

При проведении лабораторных занятий учебная группа может делиться на подгруппы численностью не менее 8 человек, а в случае индивидуальной подготовки и менее.

Ведущей дидактической целью лабораторных занятий является экспериментальное подтверждение и проверка существенных теоретических положений. Основными целями лабораторных занятий являются:

- установление и подтверждение закономерностей;

- проверка формул, методик расчета;

- установление свойств, их качественных и количественных характеристик;

- ознакомление с методиками проведения экспериментов;

- наблюдение за развитием явлений, процессов и др.

В ходе лабораторных занятий у студентов формируются практические умения и навыки обращения с различными приборами, установками, лабораторным оборудованием, а также исследовательские умения (наблюдать, сравнивать, анализировать, устанавливать зависимости, делать выводы и обобщения, самостоятельно вести исследования, оформлять результаты).

Лабораторные занятия как вид учебной деятельности должны проводиться в специально оборудованных лабораториях, где выполняются лабораторные работы (задания). Необходимые структурные элементы лабораторного занятия:

- инструктаж, проводимый преподавателем;

- самостоятельная деятельность обучающихся; - обсуждение итогов выполнения лабораторной работы (задания).

Перед выполнением лабораторного задания (работы) проводится проверка знаний обучающихся их теоретической готовности к выполнению задания.

Лабораторное задание (работа) может носить репродуктивный, частично-поисковый и поисковый характер. Работы, носящие репродуктивный характер, отличаются тем, что при их проведении студенты пользуются подробными инструкциями, в которых указаны: цель работы, пояснения (теория, основные характеристики), оборудование, аппаратура, материалы и их характеристики, порядок выполнения работы, таблицы, выводы (без формулировок), контрольные вопросы, учебная и специальная литература.

Работы, носящие частично-поисковый характер, отличаются тем, что при их проведении обучающиеся не пользуются подробными инструкциями, им не задан порядок выполнения необходимых действий, от обучающихся требуется самостоятельный подбор оборудования, выбор способов выполнения работы, инструктивной и справочной литературы. Работы, носящие поисковый характер, отличаются тем, что обучающиеся должны решить новую для них проблему, опираясь на имеющиеся у них теоретические знания.

По каждому лабораторному заданию (работе) преподавателем учебной дисциплины разрабатываются методические указания по их проведению, которые рассматриваются на заседании ПЦК. По лабораторной работе репродуктивного характера методические указания содержат:

- тему занятия;

- цель занятия;

- пояснения (теория, основные характеристики);

- используемое оборудование, аппаратуру, материалы и их характеристики;

- порядок выполнения конкретной работы;

- таблицы для заполнения; - выводы (без формулировок);

- контрольные вопросы; - учебную и специальную литературу.

По лабораторной работе частично-поискового характера методические указания содержат:

- тему занятия; - цель занятия;

- пояснения (теория, основные характеристики).

Форма организации обучающихся для проведения лабораторного занятия фронтальная, групповая и индивидуальная определяется преподавателем, исходя из темы, цели, порядка выполнения работы. При фронтальной форме организации занятий все обучающиеся выполняют одну и ту же работу. При групповой форме организации занятий одна и та же работа выполняется бригадами по 2-5 человек. При индивидуальной форме организации занятий каждый обучающийся выполняет индивидуальное задание.

Результаты выполнения лабораторного задания (работы) оформляются обучающимися в виде отчета. Оценки за выполнение лабораторного задания (работы) являются показателями текущей успеваемости студентов по учебной дисциплине.

Лабораторные занятия

1. Устройство, основные свойства и принцип работы гидро- и пневмоприводов. Исследование гидропривода при управлении скоростью движения выходного звена исполнительного механизма. Исследование гидропривода на позиционирование штока гидроцилиндра. Исследование гидропривода с объемным гидромотором. Исследование принципов управления пневмоцилиндрами одностороннего и двухстороннего действия. Исследование гидропривода при совместной работе двух исполнительных механизмов. Исследование пневмопривода при прямом и непрямом управ-

лении по скорости и по положению.Исследование возможности реализации логических функций в пневмосистемах.

2. Источники питания гидравлических и пневматических приводов. Аккумуляторы для гидро и пнревмоприводов. Насосы подачи, резервуары, преобразователи. Техника монтажа гидро- и пневмоапаратуры.
3. Исследование электрогидравлического привода при прямом и непрямом управлении. Исследование электрогидравлического привода, управляемого по времени и давлению при совместной работе двух гидроцилиндров.
4. Исполнительные двигатели гидроприводов мехатронных систем. Дроссели и регуляторы расхода. Фильтры и технология фильтрации. Вспомогательные и измерительные элементы.
5. Упрощенная математическая модель и структура гидроприводов. Линейная математическая модель гидропривода с электрическим управлением.
6. Следящий привод с электрическим управлением. Дроссельное регулирование скорости следящего привода. Исполнительные устройства логических систем управления гидро- и пневмоприводов.
7. Исследование электропривода на двигателе постоянного тока при ручном управлении в статическом режиме
8. Исследование электропривода на асинхронном двигателе с фазным ротором при ручном управлении в статическом режиме. Исследование электропривода на асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором при ручном управлении в статическом режиме. Исследование электропривода на синхронном двигателе
9. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока с различным видом возбуждения
10. Импульсное регулирование скорости привода постоянного тока
11. Электрический привод по системе "генератор-двигатель"
12. Регулирование скорости асинхронных двигателей в каскадных схемах
13. Электропривод на шаговом двигателе. Конструкция шагового двигателя и принцип работы. Управление шаговым приводом
14. Управление приводом в разомкнутых системах. Автоматическое управление пуском электропривода. Пуск двигателя в функции скорости, в функции тока и времени
15. Управление приводом в разомкнутых системах. Автоматическое управление торможением. Динамическое торможение двигателя в функции

скорости и времени. Автоматическое управление торможением противовключением.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Требования к содержанию и оформлению курсового проекта

Курсовой проект должен состоять из расчётно-пояснительной записки и графической части. Расчётно-пояснительная записка выполняется на листах стандартного формата А4 (297х210 мм) объёмом 20-30 страниц.

Пояснительная записка. Объем текстовой части должен быть не менее 25-30 страниц машинописного текста формата А4.

В структуре пояснительной записки выделяют:

- титульный лист;
- задание на выполнение курсовой работы;
- реферат;
- содержание;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

Обязательные структурные элементы выделены полужирным шрифтом. Остальные структурные элементы включаются в записку по усмотрению исполнителя.

Титульный лист является первой страницей пояснительной записки и служит источником информации, необходимой для обработки и поиска документа. Титульный лист выполняется в соответствии с ГОСТ 7.32-2001 «Отчет о научно- исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Задание на выполнение курсового проекта является неотъемлемой частью пояснительной записки и оформляется в соответствии с требованиями.

Реферат должен содержать:

– сведения о количестве страниц документа, количестве иллюстраций, таблиц, приложений, количестве использованных источников;

– сведения о графической части проекта (работы): количество листов, формат листов;

– перечень ключевых слов;

– текст реферата.

Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста документа, которые в наибольшей мере характеризуют его содержание. Ключевые слова приводятся в именительном падеже и печатаются или пишутся прописными буквами в строку через запятые.

В тексте реферата должна быть отражена сущность выполненной работы (объект исследования или разработки, цель работы, методы исследования, полученные результаты, основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики, область применения, экономическая эффективность или значимость работы).

Оформление реферата согласно ГОСТ 7.9

Содержание включает введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование) и заключение с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы.

Нормативные ссылки содержат перечень стандартов, на которые в тексте дана ссылка.

Перечень ссылочных стандартов начинают со слов: «В настоящей записке использованы ссылки на следующие стандарты».

В перечень включают обозначения стандартов и их наименования в порядке возрастания регистрационных номеров обозначения.

Структурный элемент «Определения» содержит определения, необходимые для уточнения или установления терминов, используемых в пояснительной записке.

Перечень определений начинают со слов: «В настоящей записке применяют следующие термины с соответствующими определениями».

Перечень обозначений и сокращений, условных обозначений, символов, единиц физических величин и терминов располагается столбцом. Слева в алфавитном порядке приводят сокращения, условные обозначения, символы, единицы физических величин и термины, справа – их детальную расшифровку.

Во введении, объемом не более двух страниц, должны содержаться оценка современного состояния решаемой научно-технической проблемы, обоснование и исходные данные для разработки темы, аргументация актуальности и новизны темы, цель и задачи работы.

Заголовок введения не нумеруется.

В структуре основной части, как правило, выделяется 4 раздела (главы) (1, 2, 3), а в их составе подразделы (параграфы) (1.1, 1.2, …, 2.3, 2.4 и т.п.). Отсутствие в главе составляющих ее вопросов делает выделение главы, в большинстве случаев, нецелесообразным. Название глав и вопросов должны быть сформулированы, по возможности, кратко и отражать их содержание. Название вопросов (параграфов) не должны повторять название глав. Не допускаются названия в предложном падеже, например, "О методе построения …".

В первой части курсовой работы студент производит обоснование необходимости решения поставленной задачи.

Во второй части (расчетной) части приводится решение поставленной задачи.

В заключении, объемом не более двух страниц, должны быть сформулированы краткие выводы, полученные в процессе выполнения работы, оценки полноты решений поставленных задач, отражены перспективы развития рассмотренных вопросов. Запрещается в заключении вместо выводов приводить аннотацию работы.

Список использованных источников дается в порядке появления ссылок на источники в тексте. Правила библиографического описания источников должны соответствовать ГОСТ 7.1. Примеры оформления приведены в приложении 4. При использовании в тексте выдержек из источника, цитат, мнения специалистов и т.п. делается ссылка в квадратных скобках с указанием порядкового номера источника по списку использованных источников. При необходимости разрешается дополнять ссылку номером страницы. Например [5] или [5, с. 324]. На все источники в тексте должны быть ссылки.

Приложения выделяются, если есть объемные табличные, графические материалы, листинги модулей и т.п. В приложение могут быть также вынесены вспомогательные расчеты, типовые бланки, скриншоты интерфейсных форм. Приложения должны иметь название, отражающие их содержание, и порядковый номер, на который в тексте основной части обязательно должны быть даны ссылки.

Графическая часть (при наличии) выполняется на листах формата А1 в карандаше, туши или выполненных с помощью печатающей техники. При оформлении необходимо учитывать требования соответствующих ГОСТов.

Текст работы оформляется в виде пояснительной записки в соответствии с требованиями ГОСТ 7.32-2001 (ISO 5966-82) «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления».

Изложение должно быть последовательным, логичным, конкретным. Стиль изложения: строгий, научный, Поэтому не допускается использование сленга, в том числе программистского. Также не допускается использование повелительного наклонения, например, «нажмите кнопку, и вы ощутите радость от того, что у вас все получилось».

Страницы текста записки и включенные в записку иллюстрации, таблицы и распечатки с ЭВМ должны соответствовать формату А4 (210х297 мм). Допускается представлять иллюстрации и таблицы на листах формата А3.

Записка должна быть выполнена с применением печатающих устройств ЭВМ на одной стороне листа белой бумаги через один интервал.

Шрифт основного текста, заголовков, подписей рисунков и таблиц пояснительных записок, выполненных на печатающих устройствах ПЭВМ, должен иметь гарнитуру «Times New Roman», рекомендуемый размер 14, но не менее 12 пунктов, обычное начертание. В заголовках разрешается использовать гарнитуру «Arial», начертание курсивное, полужирное или полужирный курсив.

В таблицах, при необходимости, разрешается понижение размера шрифта до 12 пунктов.

Текст записки следует печать, соблюдая следующие размеры полей: левое - 30 мм, правое - 15 мм, верхнее – и нижнее - 20 мм. Печатать на одной стороне листа через полтора интервала.

Вне зависимости от способа выполнения пояснительной записки качество напечатанного текста и оформление иллюстраций, таблиц, распечаток с ЭВМ должно удовлетворять требованию их четкого воспроизведения.

При оформлении записки необходимо соблюдать равномерную плотность, контрастность и четкость изображения по всему тексту. В записке должны быть четкие, нерасплывшиеся линии, буквы, цифры и знаки. Все линии, буквы, цифры и знаки должны быть одинаково черными по всему тексту.

Опечатки, описки и графические неточности допускается исправлять подчисткой или закрашиванием белой краской и нанесением на том же месте

исправленного изображения машинописным способом или от руки черными чернилами или черной тушью.

Фамилии, названия учреждений, организаций, фирм, название изделий имена собственные в записке приводят на языке оригинала. Допускается транслитерировать имена собственные и приводить названия организаций в переводе на русский язык с добавлением (при первом упоминании) оригинального названия.

Защита и оценивание курсового проекта

Аттестационная оценка курсового проекта учитывает функциональную полноту и качество решения поставленных задач, качество оформления отчёта, степень соблюдения стандартов, рекомендаций настоящих методических указаний и непосредственно саму защиту работы (ответы на вопросы преподавателя, уровень понимания и владения представленными программами).

В соответствии с графиком сдачи курсовых работ, составленным на кафедре, студент предоставляет расчётно-пояснительную записку и графическую часть, выполненную в едином переплете.

Защита курсового проекта проводится в присутствии комиссии, назначенной заведующим кафедры, с участием руководителя курсовой работы. В состав комиссии могут входить доценты, преподаватели по изучаемой дисциплине. На защите могут присутствовать сторонние лица без права участия в процедуре защиты.

В процессе защиты студент выступает с докладом (5-7 мин.).

Примерная схема доклада следующая:

– наименование темы курсовой работы, ее актуальность;
– состав основных разделов курсовой работы;
– краткое описание проблемы, анализ путей ее решения и обоснования метода решения задачи;
– решение задачи;
– анализ решения;
– выводы по курсовой работе.

Студент должен ответить на замечания, отмеченные в отзыве руководителя, а также на заданные вопросы. При ответе на вопросы в процессе защиты

студент может использовать пояснительную записку, графическую и презентационную части курсовой работы.

При оценке работы учитывается:

– актуальность темы;
– методы исследования, применяемые в работе;
– доклад;
– полнота раскрытия темы;
– использование в курсовой работе специальных и технических дисциплин;
– содержание и качество пояснительной записки;
– ответы на вопросы;
– отзыв и оценка руководителя.

Основными критериями оценки работы являются:

– способность студента к самостоятельному решению технических задач;
– использование современных методов при решении поставленных задач;
– оригинальность и новизна принятых решений;
– знание ГОСТов и нормативных документов;
– умение пользоваться справочной литературой, компьютером.

Работы студентов оцениваются по пятибалльной шкале.

Положительная оценка (отлично, хорошо, удовлетворительно) заносится в экзаменационную ведомость, зачетную книжку студента.

При получении неудовлетворительной оценки студент выполняет курсовой проект по новой теме или, по решению заведующего кафедрой, перерабатывает прежнюю в сроки, установленные заведующим кафедрой. В случае неявки автора на защиту по уважительной причине, возможно назначение дополнительной даты защиты.

Оценка «неудовлетворительно» проставляется только в экзаменационную ведомость.

Примерные темы курсовых проектов

1. САУ высокомоментным электроприводом, работающим в режиме переменных нагрузок.

2. Система автоматической стабилизации тока электродвигателя для привода, работающего в режиме переменной нагрузки на валу.
3. САУ электроприводом на асинхронном двигателе с частотным преобразователем.
4. Система частотно-токового управления электроприводом на асинхронном двигателе.
5. САУ импульсным электроприводом постоянного тока.
6. САУ синхронным двигателем для привода поворотного устройства.
7. САУ вентильно-индукторным электроприводом.
8. САУ следяще-копировальным электроприводом.
9. Релейная САУ следящим приводом.
10. САУ следящим приводом с переменным дифференцированием.
11. САУ следящим приводом на асинхронном двигателе.
12. Многоканальная САУ следящим приводом.
13. САУ двухкоординатным приводом металлорежущего станка.
14. САУ электрическим приводом с коррекцией по стабилизации скорости.
15. САУ вентильно-индукторным электроприводом.
16. САУ электрическим приводом со стабилизацией по мощности.
17. САу электрическим приводом со стабилизацией по усилию.
18. Система автоматической оптимизации режимов работы электрического привода.
19. Двухканальная САУ электрическим приводом постоянного тока.
20. САУ электроприводом, оптимальная по быстродействию
21. САУ гидравлическим приводом.
22. САУ пневматическим приводом.
23. САУ электрогидроводом.
24. САУ следящим гидроприводом с дроссельным регулированием скорости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шапран А. А. Приводы мехатронных и робототехнических устройств. Электрический привод : конспект лекций / А. А. Шапран. - Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 83 с.

2. Москакленко В. В. Электрический привод: Учебник / В. В. Москаленко. – М. : НИЦ ИНФРА-М, 2015. – 400 с. http://znanium.com/bookread2.php?book=443646

3. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК : проектирование мехатронных систем на ПК / С. Г. Герман-Галкин. - Москва : КОРОНА-Век, 2008. - 367 с.

4. Юревич Е. И. Основы робототехники : рекомендовано УМО вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 652000 "Мехатроника и робототехника" (специальность 210300 "Роботы и робототехнические системы") / Е. И. Юревич. - 3-е изд. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. - 359 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе _____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.07 ПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры
Технической механики
(название кафедры)
Зав. кафедрой _____
(подпись)
Волков Е.Б.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 1 от 13.09.2024
(Дата)

Рассмотрена методической комиссией факультета
Горно-механического
(название факультета)
Председатель _____
(подпись)
Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)
Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)

Екатеринбург

Оглавление

1. Понятие «электропривод». Уравнение движения электропривода. Электродвигатели постоянного тока и их характеристики. Режимы работы электропривода 4
2. Электродвигатели переменного тока и их характеристики. Многодвигательный электропривод 15
3. Переходные процессы в электрических приводах. Пусковой режим работы электрических приводов различного типа 20
4. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока с различным видом возбуждения 26
5. Регулирование скорости электропривода изменением питающего напряжения 32
6. Импульсное регулирование скорости привода постоянного тока 39
7. Электрический привод по системе «генератор-двигатель» 45
8. Регулирование скорости приводов на двигателях переменного тока 48
9. Регулирование скорости асинхронных двигателей в каскадных схемах 52
10. Электропривод на шаговом двигателе. Конструкция шагового двигателя и принцип работы. Управление шаговым приводом 59
11. Управление приводом в разомкнутых системах. Автоматическое управление пуском и торможением 64
12. Автоматическое управление приводом в замкнутых системах 71

1. Понятие «электропривод». Уравнение движения электропривода. Электродвигатели постоянного тока и их характеристики. Режимы работы электропривода

Основные понятия и определения. Управление представляет собой организацию того или иного процесса, которая обеспечивает достижение определенных целей.

Система управления — совокупность всех устройств, обеспечивающих управление каким-либо объектом или процессом. Если управление осуществляется без непосредственного участия человека, то система управления называется автоматической. Систему автоматического управления (САУ) образуют устройство украшения и объект управления.

Если отдельные операции управления осуществляет человек или группа людей, то такие системы управления называются автоматизированными. Для выполнения этих операций человек должен получать информацию о процессе управления и иметь в своем распоряжении соответствующие органы управления объектом или процессом.

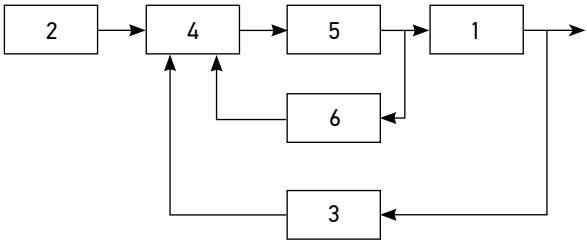


Рис. 1.1. Схема системы автоматического управления

Обобщенная схема САУ показана на рис. 1.1. На ней обозначены: *1*– объект управления; *2* — источник информации о задачах управления; *3* — устройства информации о ходе и результатах управления; *4* — устройство обработки информации и выработки сигнала управления; *5* — исполнительное устройство; *6* — устройства информации о функционировании исполнительного устройства.

В отдельных случаях задачей управления является обеспечение постоянства некоторой физической переменной: температуры, скорости вращения, давления — или ее изменение во времени по определенному закону. Такой частный вид управления обычно называется *регулированием*.

Система автоматического регулирования (САР) по аналогии с системой автоматического *управления* состоит из *регулируемого объекта* и *регулятора*. В состав систем автоматического регулирования кроме регулятора входят и другие необходимые для их функционирования устройства. К ним относятся:

- датчики регулируемых переменных, с помощью которых получают информацию об их текущих значениях;
- задатчики регулируемых переменных, с помощью которых системе задается требуемый уровень регулируемой переменной;
- измерительные устройства, с помощью которых определяется отклонение текущего (фактического) значения регулируемой переменной от ее заданного значения;
- устройства сопряжения, позволяющие соединить все элементы и устройства системы регулирования в единый комплекс.

В систему регулирования входят элементы и устройства, обеспечивающие защиту, блокировку и сигнализацию при ее работе, а в современных системах регулирования — дополнительно тестирование, диагностику и резервирование.

Различают следующие виды САР:

- *системы автоматической стабилизации,* обеспечивающие поддержание регулируемой величины на заданном уровне с требуемой точностью. К таким системам относятся, например, системы поддержания температуры в нагревательной печи, система регулирования скорости вращения двигателей и многие другие. Системы стабилизации делятся на астатические и статические. *Астатические системы стабилизации* обеспечивают поддержание регулируемой переменной в статическом режиме на неизменном уровне при изменениях возмущающего воздействия. *Статическими*

системами называются такие, в которых в установившемся режиме происходит изменение регулируемой переменной при изменении возмущающего воздействия. Другими словами, астатические САР обеспечивают регулирование переменных в установившемся режиме без ошибки, т.е. осуществляют регулирование переменной строго с заданным уровнем, а статические САР — с некоторой ошибкой;

— следящие системы, которые осуществляют изменение регулируемой величины во времени по произвольному закону. Примерами такой системы могут служить системы слежения локатором за целью или система радиоантенны, обеспечивающая связь с космическими объектами;
— системы программного регулирования, которые обеспечивают изменение регулируемой переменной во времени по определенной программе, например, системы числового программного управления станками;
— системы адаптации, обеспечивающие оптимальное регулирование переменной по заданному показателю качества при изменяющихся условиях работы объекта регулирования. К таким системам относятся самонастраивающиеся, самоорганизующиеся и самообучающиеся системы.

Системы с одним входным каналом и одной регулируемой (выходной) переменной носят название одномерных, а с несколькими входными и несколькими выходными — многомерными.

Объект управления (регулирования) при его функционировании подвергается различным воздействиям. Со стороны системы управления на него действует управляющее (регулирующее) воздействие, обеспечивающее требуемое регулирование заданной переменной.

Со стороны окружающей среды и сопредельных объектов и систем объект подвергается различным возмущающим воздействиям, которые могут иметь как определенный, так и случайный характер. К возмущающим воздействиям обычно относят и различные аварийные ситуации: исчезновение или колебания питающего напряжения, поломку в рабочей машине, выход из строя элемента системы управления и т.д. Основная задача систем управления состоит именно в том, чтобы при всех возможных возмущающих воздействиях, действующих на объект управления, обеспечить должным образом его управление.

Понятие о регулировании координат электропривода. Для управления движением исполнительных органов рабочих машин и производственных механизмов и обеспечения требуемых режимов самого ЭП необходимо регулирование ряда переменных, например скорости, ускорения и положения исполнительного органа рабочей машины, токов в цепях двигателей, момента на их валу, магнитного потока электрических машин и т.д.

Типичным примером регулирования переменных, которые в ЭП часто называют координатами, может служить ЭП пассажирского лифта. При пуске и остановке кабины лифта для обеспечения комфортности пассажиров ускорение и замедление ее движения не должны быть выше допустимого уровня. Перед остановкой скорость кабины должна снижаться, т.е. она должна регулироваться. Пониженная скорость движения кабины требуется и для осуществления наладки или ревизии электрооборудования лифта. Кабина с заданной точностью должна останавливаться на требуемом этаже, т.е. необходимо обеспечивать заданное положение кабины лифта. Такое управление движением кабины лифта обеспечивается за счет регулирования соответствующих координат (переменных) ЭП лифта.

При изготовлении бумаги, тканей, кабельных изделий, различных пленок, прокатке металлов требуется обеспечение определенного натяжения материалов, что также осуществляется с помощью ЭП. Регулирования координат требуют и многие другие рабочие машины и механизмы: подъемные краны, металлообрабатывающие станки, транспортеры, насосные агрегаты, роботы и манипуляторы и т.д.

Кроме того, при работе самого ЭП необходимо обеспечить определенные допустимые режимы работы его элементов. Так, например, при пуске, реверсе или торможении двигателей часто требуется ограничивать их токи до допустимых уровней.

Процесс регулирования этих и других координат всегда связан с целенаправленным воздействием на двигатель, что и должна обеспечивать его система управления.

Регулирование скорости движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов может осуществляться с помощью ЭП в виде стабилизации скорости, изменения скорости в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом (слежение) или по заранее заданной программе (программное движение).

Регулирование положения характеризуется процессом перемещения исполнительных органов рабочих машин и механизмов в заданную точку пространства или плоскости и их установку там

(фиксирование) с заданной точностью. Такое их перемещение из одной точки плоскости или пространства (позиции) в другую называется позиционированием и обеспечивается соответствующим регулированием положения вала двигателя.

Регулирование момента и тока двигателей производится в тех случаях, когда ЭП должен обеспечивать требуемое ускорение или замедление движения исполнительных органов или создавать необходимое натяжение в обрабатываемом материале или изделии.

Сюда же относятся и случаи, когда требуется ограничивать момент ЭП для предотвращения поломки рабочей машины или механизма при внезапном стопорении движения исполнительного органа (например, при копании грунта, бурении скважин, заклинивании механической передачи и т.д.).

Регулирование (ограничение) тока и момента двигателей требуется также для обеспечения нормальных условий работы самих двигателей. Так, при пуске двигателей постоянного тока обычного исполнения по соображениям нормальной работы их коллекторно-щеточного узла ток должен быть ограничен на уровне 2...3 $I_{ном}$. Необходимость ограничения тока возникает и при пуске мощных двигателей постоянного и переменного тока, когда большие пусковые токи двигателей могут привести к недопустимому снижению напряжения питающей сети.

Структуры и принципы построения систем управления электроприводом. Система управления ЭП является его составной частью. В соответствии со структурной схемой ЭП, представленной на рис. 1.2, и содержащимся в ГОСТ 50869-92 определением в состав ЭП *6* входит электрический двигатель *1*, который вырабатывает механическую энергию МЭ за счет потребляемой от источника *3* электрической энергии ЭЭ. Параметры и объемы поступающей на двигатель энергии регулируются силовым преобразователем электроэнергии *2*, за счет чего обеспечивается управление двигателем.

Сигнал управления $U_у$ силовым преобразователем вырабатывается устройством управления *4*, в состав которого в общем случае входят устройства получения, преобразования, хранения, распределения и выдачи информации, блоки сопряжения, регуляторы переменных (координат), различные функциональные блоки управления и т.д. Устройство управления *4* и преобразователь *2* образуют систему управления электропривода *5*.

Устройство управления *4* вырабатывает сигнал управления $U_у$ с помощью сигнала задания (уставки) $U_з$, задающего характер дви-

жения исполнительного органа *7* рабочей машины *8*, и ряда дополнительных сигналов $U_{дс}$, дающих информацию о реализации технологического процесса рабочей машины, характере движения исполнительного органа, работе отдельных элементов ЭП, возникновении аварийных ситуаций и т.д. Эти сигналы поступают на устройство управления от различных датчиков, которые на рис. 1.2 не показаны.

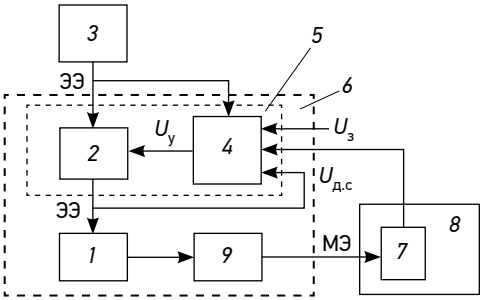


Рис. 1.2. Схема управления электроприводом

Сигнал задания (уставки) $U_з$ электропривод получает от внешней по отношению к нему системы управления более высокого уровня, например автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Тем самым следует различать систему управления электропривода как его составную часть и систему управления электроприводом (электроприводами), являющуюся внешней для ЭП системой и поставляющую электроприводу необходимую для его функционирования информацию.

В некоторых ЭП функции регулирования координат (обычно скорости вращения) ЭП выполняет механическая передача *9,* которая в этом случае может представлять собой электромагнитную или гидравлическую управляемые муфты, вариатор скорости, коробку передач.

В зависимости от выполняемых функций, вида и количества регулируемых координат и степени автоматизации технологических процессов реализация ЭП может быть самой разнообразной (рис. 1.3).

Все ЭП делятся на две группы: неавтоматизированные и автоматизированные.

Неавтоматизированные — это такие ЭП, управление которыми выполняет человек (оператор) с помощью простых средств.

Он осуществляет пуск и остановку ЭП, изменение скорости и ее реверсирование в соответствии с заданным технологическим циклом. Для помощи оператору ЭП снабжен необходимыми элементами защиты, блокировок и сигнализации.

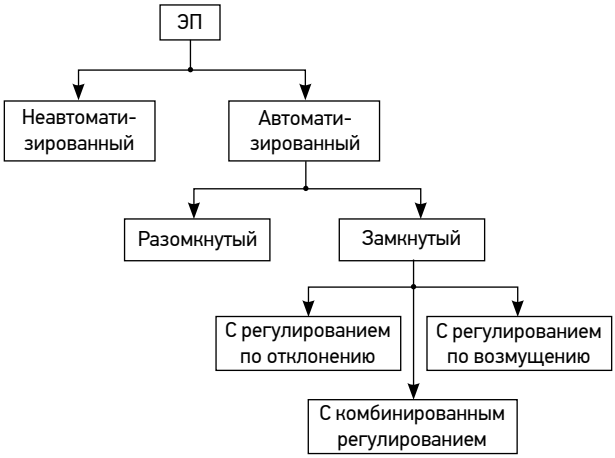


Рис. 1.3. Виды электроприводов

В автоматизированном ЭП операции управления в соответствии с требованиями технологического процесса выполняются системой управления (см. рис. 1.2). На оператора возлагаются функции по включению и отключению ЭП, наладке и контролю за его работой (отметим еще раз, что при работе ЭП в общем комплексе автоматизированного производства внешние команды поступают от управляющих устройств более высокого уровня, например АСУ производством).

Все автоматизированные ЭП делятся, в свою очередь, еще на две группы: разомкнутые и замкнутые. Рассмотрим характерные признаки работы этих ЭП на примере регулирования скорости ЭП.

Работа разомкнутого ЭП характеризуется тем, что все внешние возмущения — в рассматриваемом примере момент нагрузки — влияют на выходную координату ЭП — его скорость. Другими словами, разомкнутый ЭП не отстроен от влияния внешних возмущений, все изменения которых отражаются на его работе. Разомкнутый ЭП по этой причине не обеспечивает высокого качества регулирования координат, хотя и отличается в то же время простой схемой.

Разомкнутые ЭП обычно применяются для обеспечения пуска, торможения или реверса двигателей. В схемах управления таких ЭП используется информация о текущих скорости, времени, тока (момента) или пути, что позволяет автоматизировать указанные процессы.

Замкнутый ЭП, как и любая система автоматического регулирования, может быть реализован по принципу отклонения с использованием обратных связей или по принципу компенсации внешнего возмущения. Основным отличительным признаком замкнутых систем является полное или частичное устранение влияния внешнего возмущения на регулируемую координату ЭП. В силу этого обстоятельства замкнутый ЭП обеспечивает более качественное управление движением исполнительного органа рабочей машины, хотя его схемы оказываются более сложными.

Принцип компенсации иллюстрирует рис. 1.4, *а*. Основным признаком такой замкнутой структуры ЭП является наличие цепи, по которой на вход ЭП вместе с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$ подается сигнал $U_м = k_м M_с$, содержащий информацию о моменте сопротивления (нагрузке) $M_с$. В результате этого управление ЭП осуществляется сигналом $U_Δ$, который автоматически изменяется в нужную сторону при колебаниях момента нагрузки, обеспечивая с помощью системы управления поддержание скорости вращения ω ЭП на заданном уровне.

Электроприводы по схеме рис. 1.4, *а* выполняются относительно редко из-за отсутствия простых и надежных датчиков момента нагрузки $M_с$ и других возмущающих воздействий и необходимости вводить соответствующие каналы информации по всем возможным возмущениям.

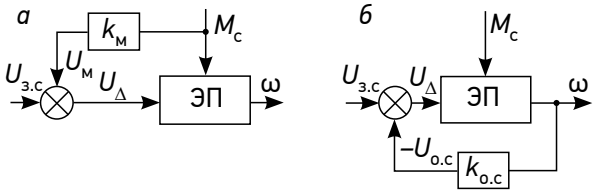


Рис. 1.4. Замкнутые структуры электропривода:
а — схема с компенсацией внешнего возмущения;
б — схема с обратной связью

В связи с этим подавляющее большинство замкнутых структур ЭП используют принцип отклонения (обратной связи). Он

характеризуется наличием цепи обратной связи, соединяющей выход ЭП с его входом, откуда и пошло название замкнутых схем. Применительно к рассматриваемому примеру регулирования скорости признаком этой замкнутой структуры является цепь обратной связи (рис. 1.4, *б*), по которой информация о текущем значении скорости, сигнал обратной связи $U_{\text{о.с}} = k_{\text{о.с}}\omega$, подается на вход ЭП, где он вычитается из сигнала задания скорости $U_{\text{з.с}}$ Управление осуществляется сигналом отклонения $U_{\Delta} = U_{\text{з.с}} - U_{\text{о.с}}$ (его также называют сигналом рассогласования или ошибки). Этот сигнал при отличии фактической скорости от заданного уровня автоматически изменяется необходимым образом и устраняет (частично или полностью) с помощью системы управления ЭП эти отклонения. Тем самым управление скоростью осуществляется с учетом результата управления.

В общем случае состояние ЭП определяется набором переменных, к числу которых относятся токи и момент двигателя, скорости и положение элементов ЭП и исполнительного органа рабочей машины и ряд других. Эти переменные в ЭП обычно называются переменными состояния. Наилучшее качество управления в ЭП получается в том случае, когда осуществляется регулирование каждой переменной по заданному критерию.

Если требуется регулирование других координат ЭП или технологического процесса, то используются обратные связи по этим координатам. В дальнейшем изложении именно таким замкнутым системам уделено основное внимание.

Все виды применяемых в замкнутом ЭП обратных связей делятся на положительные и отрицательные, линейное и нелинейные, жесткие и гибкие. Положительной называется такая обратная связь, сигнал которой направлен согласно (складывается) с задающим сигналом, в то время как сигнал отрицательной связи направлен ему встречно (знак «минус» на рис. 1.4, *б*).

Жесткая обратная связь характеризуется тем, что она действует как в установившемся, так и переходном (динамическом) режиме ЭП. Сигнал гибкой обратной связи вырабатывается только в переходных режимах ЭП и служит для обеспечения требуемого их качества, например устойчивости движения, допустимого перерегулирования и т.д.

Линейная обратная связь характеризуется пропорциональной зависимостью между регулируемой координатой и сигналом обратной связи, в то время как при реализации нелинейной связи эта зависимость нелинейная.

В зависимости от вида регулируемой координаты ЭП используются все названные выше связи по скорости, положению, току, напряжению, магнитному потоку, ЭДС.

Однако на пути реализации такого управления часто возникают технические и экономические трудности, связанные с необходимостью установки большого числа датчиков переменных, что усложняет ЭП и удорожает его стоимость. Поэтому в современных ЭП часто отказываются от прямого измерения переменных состояния с помощью различных датчиков и переходят к их вычислению с помощью специального устройства, получившего название наблюдателя.

Основу наблюдателя образует совокупность моделей звеньев ЭП — двигателя, преобразователя, механической передачи, устройств управления — и исполнительного органа рабочей машины, выполненных на базе операционных усилителей или средств микропроцессорной техники. Выходные сигналы (напряжения) этих моделей отражают приближенные значения переменных или, как говорят, дают оценку реальных значений переменных, поскольку модели не учитывают реальных возмущений, действующих на ЭП и рабочую машину, нестабильности параметров ЭП и влияния других факторов функционирования ЭП.

Для повышения точности получаемых оценок переменных состояния значение выходной регулируемой переменной ЭП сравнивают с помощью обратной связи с ее оценкой по полной модели ЭП и исполнительного органа и затем в функции выявленной разницы (ошибки) корректируют показания отдельных моделей. Совокупность полной модели и обратной связи по выходной регулируемой переменной ЭП образует наблюдающее устройство.

Рассмотренные выше схемы отражают структуру системы управления отдельного ЭП. Многие технологические процессы предусматривают объединение в единый комплекс нескольких рабочих машин и механизмов, должным образом между собой взаимодействующих. Наилучший результат работы такого единого технологического комплекса достигается только при его автоматизации, в чем ЭП принадлежит основная роль. За счет соответствующего управления ЭП обеспечивается требуемая последовательность всех технологических операций, достигаются наилучшие (оптимальные) режимы работы промышленного оборудования и самого ЭП, осуществляются необходимые блокировки и защиты.

Для управления технологическими комплексами все шире используются ЭВМ. Они позволяют быстро проводить обработку

большого объема информации о ходе технологического процесса, вырабатывать управляющие воздействия на ЭП рабочих машин и механизмов в соответствии с заданной программой. Особенно широкие возможности открываются при осуществлении автоматизации сложных технологических процессов в использовании микропроцессорной техники управления.

Контрольные вопросы

1. Дайте математическое выражение скоростной и механической характеристики двигателя постоянного тока.
2. Как влияет величина сопротивления якорной цепи на механическую характеристику двигателя?
3. Чем характерен режим рекуперативного торможения двигателя?
4. Как осуществляется режим динамического торможения?
5. Как осуществляется реверс двигателя постоянного тока?
6. Как осуществляется пуск двигателей постоянного тока с различными видами возбуждения?
7. Дайте математическое выражение переходной характеристики привода постоянного тока.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

2. Электродвигатели переменного тока и их характеристики. Многодвигательный электропривод

Типовые узлы и схемы релейно-контакторного управления асинхронными двигателями строятся по тем же принципам, что и схемы управления двигателями постоянного тока.

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно пускаются прямым подключением к сети без ограничения пусковых токов. В этих случаях они управляются с помощью магнитных пускателей, которые одновременно обеспечивают и некоторые виды их защиты.

Схема управления асинхронным двигателем с использованием магнитного пускателя (рис. 2.1) включает в себя магнитный пускатель, состоящий из контактора *KM* и трех встроенных в него тепловых реле защиты *KK*. Схема обеспечивает прямой (без ограничения тока и момента) пуск двигателя, отключение его от сети, а также защиту от коротких замыканий (предохранители *FA*) и перегрузки (тепловые реле *KK*).

Для пуска двигателя замыкают выключатель *QF* и нажимают кнопку пуска *SB*1. Получает питание катушка контактора *KM*, который включившись, своими главными силовыми контактами в цепи статора двигателя подключает его к источнику питания, а вспомогательным контактом шунтирует кнопку *SB*1. Происходит разбег двигателя по его естественной характеристике. Для отключения двигателя нажимается кнопка остановки *SB*2, контактор *KM* теряет питание и отключает двигатель от сети. Начинается процесс торможения двигателя выбегом под действием момента нагрузки на валу.

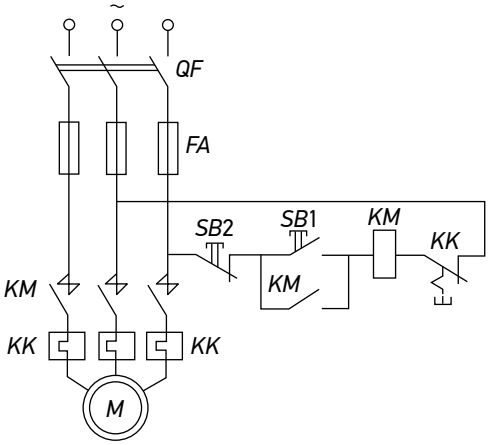


Рис. 2.1. Схема управления асинхронным двигателем с использованием нереверсивного магнитного пускателя

Реверсивная схема управления асинхронным двигателем. Основным элементом схемы является реверсивный магнитный пускатель, который включает в себя два линейных контактора *KM*1 и *KM*2 и два тепловых реле защиты *KK* (рис. 2.2). Схема обеспечивает прямой пуск и реверс двигателя, а также торможение противовключением при ручном (неавтоматическом) управлении.

В схеме предусмотрена защита от перегрузок двигателя (реле *KK*) и коротких замыканий в цепи статора (автоматический выключатель *QF*) и управления (предохранители *FA*). Кроме того, схема управления обеспечивает и нулевую защиту от исчезновения (снижения) напряжения сети (контакторы *KM*1 и *KM*2).

Пуск двигателя при включенном автоматическом выключателе *QF* в условных направлениях «Вперед» или «Назад» осуществляется нажатием соответственно кнопок *SB*1 или *SB*2. Это приводит к срабатыванию контактора *KM*1 или *KM*2, подключению двигателя к сети и его разбегу.

Для реверса или торможения двигателя нажимается кнопка *SB*3, что приводит к отключению включенного до сих пор контактора (например, *KMT*), после чего нажимается кнопка *SB*2. Это приводит к включению контактора *KM*2 и подаче на АД напряжения источника питания с другим порядком чередования фаз. Магнитное поле двигателя изменяет свое направление вращения на противоположное, и начинается процесс реверса, состоящий из двух этапов: торможения противовключением и разбега в противоположную сторону.

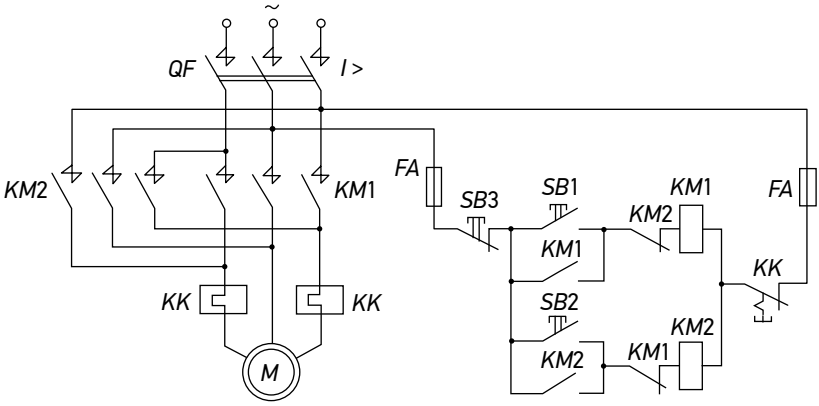


Рис. 2.2. Схема управления асинхронным двигателем с использованием реверсивного магнитного пускателя

В случае необходимости только торможения двигателя при достижении им нулевой скорости должна быть вновь нажата кнопка *SB*3, что приведет к отключению двигателя от сети и возвращению схемы в исходное положение. Если кнопка *SB*3 нажата не будет, то это приведет к разбегу двигателя в другую сторону, т.е. к его реверсу.

Во избежание короткого замыкания в цепи статора, которое может возникнуть в результате одновременного ошибочного нажатия кнопок *SB*1 и *SB*2, в реверсивных магнитных пускателях иногда предусматривается специальная механическая блокировка. Она представляет собой рычажную систему, которая предотвращает втягивание одного контактора, если включен другой. В дополнение к механической блокировке в схеме используется типовая электрическая блокировка, применяемая в реверсивных схемах управления. Она предусматривает перекрестное включение размыкающих контактов аппарата *KM*1 в цепь катушки аппарата *KM*2, и наоборот.

Отметим, что повышению надежности и удобства в эксплуатации способствует использование в схеме воздушного автоматического выключателя *QF*. Его наличие исключает возможность работы привода при обрыве одной фазы, при однофазном коротком замыкании, как это может иметь место при установке предохранителей, а также он не требует замены элементов (как в предохранителях при сгорании их плавкой вставки).

Схема управления многоскоростным асинхронным двигателем. Эта схема (рис. 2.3) обеспечивает получение двух скоростей двигателя путем соединения секций (полуобмоток) обмотки статора в треугольник или двойную звезду, а также его реверсирование. Защита электропривода осуществляется тепловыми реле *KK*1 и *KK*2 и предохранителями *FA*.

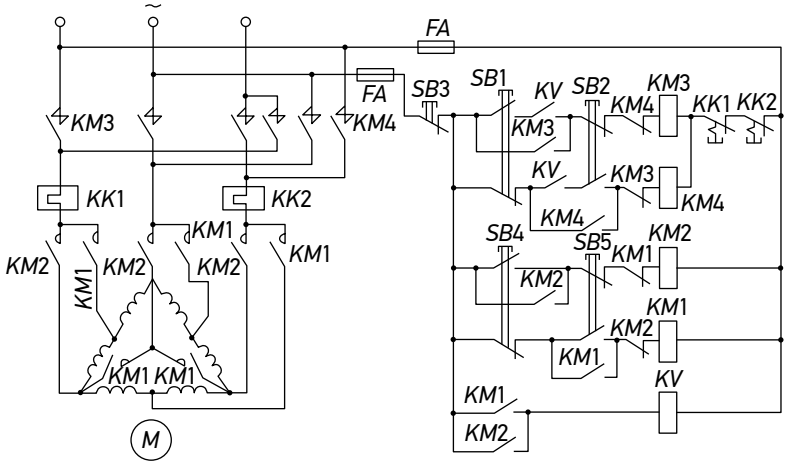


Рис. 2.3. Схема управления
двухскоростным асинхронным двигателем

Для пуска двигателя на низкую скорость вращения нажимается кнопка *SB*4, после чего срабатывает контактор *KM*2 и блокировочное реле *KV*. Статор двигателя оказывается включенным по схеме треугольника, а реле *KV*, замкнув свои контакты в цепях катушек аппаратов *KM*3 и *KM*4, подготавливает подключение двигателя к источнику питания. Нажатие кнопки *SB*1 или *SB*2 приводит к включению соответственно в направлении «Вперед» или «Назад».

После разбега двигателя до низкой скорости может быть осуществлен его разгон до высокой скорости. Для этого нажимается кнопка *SB*5, что приведет к отключению контактора *KM*2, включению контактора *KM*1 и пересоединению тем самым секций обмоток статора с треугольника на двойную звезду.

Остановка двигателя производится нажатием кнопки *SB*3, что вызовет отключение всех контакторов от сети и торможение двигателя выбегом.

Применение в схеме двухцепных кнопок управления не допускает одновременного включения контакторов *KM*1 и *KM*2, *KM*3 и *KM*4. Этой же цели служит перекрестное включение размыкающих блок-контактов контакторов *KM*1 и *KM*2, *KM*3 и *KM*4 в цепи их катушек.

Контрольные вопросы

1. Что такое критическое скольжение и критический момент двигателя?
2. Как осуществляется динамическое торможение асинхронного двигателя?
3. Дайте характеристики режима торможения противовключением.
4. Как осуществляется реверс асинхронного двигателя?
5. Особенности двухдвигательного привода с общим механическим валом.
6. Свойства двухдвигательного привода с общим электрическим валом.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

3. Переходные процессы в электрических приводах. Пусковой режим работы электрических приводов различного типа

Переходный процесс или переходный режим в электрическом приводе характеризуется переходом от одного установившегося состояния к другому, когда изменяются ток, момент сопротивления и скорость двигателя. Типичными переходными режимами работы электропривода являются пусковой режим и режим торможения.

Схема пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением по принципу времени. Эта схема (рис. 3.1, *а*) содержит кнопки управления *SB*1 (пуск) и *SB*2 (останов) двигателя, линейный контактор *KM*1, обеспечивающий подключение двигателя к сети, и контактор ускорения *KM*2 для выключения (шунтирования) пускового резистора $R_д$. В качестве датчика времени в схеме использовано электромагнитное реле времени *KT*. При подключении схемы к источнику питания напряжением *U* происходит возбуждение двигателя и срабатывает реле *KT*, размыкая свой размыкающий контакт в цепи катушки контактора *KM*2 и подготавливая двигатель к пуску.

Пуск двигателя начинается после нажатия кнопки *SB*, в результате чего получает питание контактор *KM*1, который своим главным силовым контактом подключает двигатель к источнику питания. Двигатель начинает разбег с резистором $R_д$ в цепи якоря, с помощью которого ограничивается пусковой ток двигателя. Одновременно замыкающий блок-контакт контактора *KM*1 шунтирует кнопку *SB*1, и она может быть отпущена, а размыкающий блок-контакт *KM*1 разрывает цепь питания катушки реле време-

ни *КТ*. Через интервал времени $\Delta t_{к.т}$ после прекращения питания катушки реле времени, называемый выдержкой времени, размыкающий контакт *КТ* замкнется в цепи катушки контактора *КМ*2, последний включится и главным контактом закоротит пусковой резистор $R_д$, в цепи якоря. Таким образом, при пуске двигатель в течение времени $\Delta t_{к.т}$ разгоняется по искусственной характеристике *1* (рис. 3.1, *б*), а после шунтирования резистора $R_д$ — по естественной *2*. Величина сопротивления резистора $R_д$ выбрана таким образом, что в момент включения двигателя ток I_1 в цепи и соответственно момент M_1 не превосходят допустимого уровня.

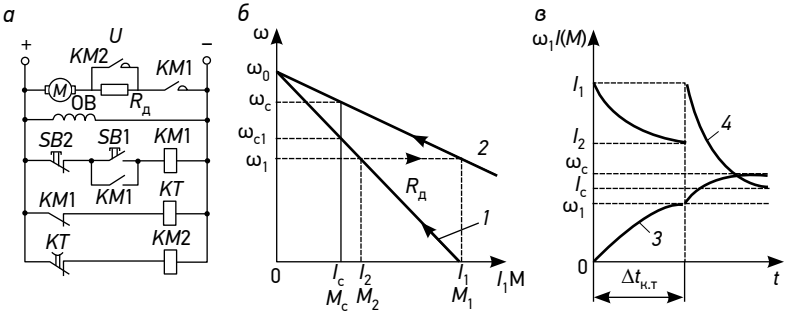


Рис. 3.1. Схема пуска двигателя:
а — по принципу времени, *б* — характеристики двигателя,
в — кривые переходного процесса

За время $\Delta t_{к.т}$ после начала пуска скорость вращения двигателя достигает величины ω_1, а ток в цепи якоря снижается до уровня I_2 (рис. 3.1, *в*). После шунтирования Д происходит бросок тока в цепи якоря от I_2 до I_1, который не превышает допустимого уровня. Изменение скорости, тока и момента во времени происходит по экспоненте.

Останов двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB*2, что приведет к отключению якоря двигателя от источника питания и его торможению под действием момента сопротивления на его валу. Такой способ останова двигателя получил название «торможение выбегом».

Схема пуска двигателя в две ступени по принципу ЭДС и динамического торможения по принципу времени. В этой схеме (рис. 3.2, *а*) в качестве датчика ЭДС использован якорь двигателя, к которому подключены катушки контакторов ускорения *КМ*1 и *КМ*2,

обеспечивающих шунтирование пусковых резисторов $R_{у1}$ и $R_{у2}$. С помощью регулировочных резисторов $R_{у1}$ и $R_{у2}$ эти контакторы могут быть настроены на срабатывание при определенных скоростях двигателя.

Для осуществления торможения в схеме предусмотрен резистор $R_{д3}$, подключение и отключение которого осуществляется контактором торможения *KM*3. Для обеспечения выдержки времени используется электромагнитное реле времени *KT*, размыкающий контакт которого включен в цепь катушки контактора торможения *KM*2.

После подключения схемы к источнику питания происходит возбуждение двигателя, а аппараты схемы остаются в исходном положении. Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB*1, что приводит к срабатыванию линейного контактора *KM* и подключению двигателя к источнику питания. Двигатель начинает разбег с включенными резисторами $R_{Д1} + R_{Д2}$ в цепи якоря по характеристике *1* (рис. 3.2, *б*). По мере увеличения скорости двигателя растет его ЭДС и соответственно напряжение на катушках контакторов *KM*1 и *KM*2. При скорости ω_1 срабатывает контактор *KM*1, закорачивая своим контактом первую ступень пускового резистора $R_{Д2}$, и двигатель переходит на характеристику *2*. При скорости ω_2 срабатывает контактор *KM*2, шунтируя вторую ступень пускового резистора $R_{Д2}$. Двигатель выходит на естественную характеристику *3* и заканчивает свой разбег в точке установившегося режима с координатами $\omega_с - M_с$, определяемой пересечением естественной характеристики *3* двигателя и характеристики нагрузки.

Для перехода к режиму торможения нажимается кнопка *SB*2. Катушка контактора *KM* теряет питание, размыкается замыкающий силовой контакт *KM* в цепи якоря двигателя, и он отключается от источника питания. Размыкающий блок-контакт *KM* в цепи катушки контактора торможения *KM*3 замыкается, последний срабатывает и своим главным контактом подключает резистор $R_{Д3}$ к якорю *M*, переводя двигатель в режим динамического торможения по характеристике *4* (рис. 3.2, *б*). Одновременно размыкается замыкающий контакт контактора *KM* в цепи реле времени *KT*, оно теряет питание и начинает отсчет времени. Через интервал времени, который соответствует снижению скорости двигателя до нуля, реле времени отключается и своим контактом разрывает цепь питания контактора *KM*3. Резистор $R_{Д3}$ отключается от якоря *M* двигателя, торможение заканчивается, и схема возвращается в свое исходное положение.

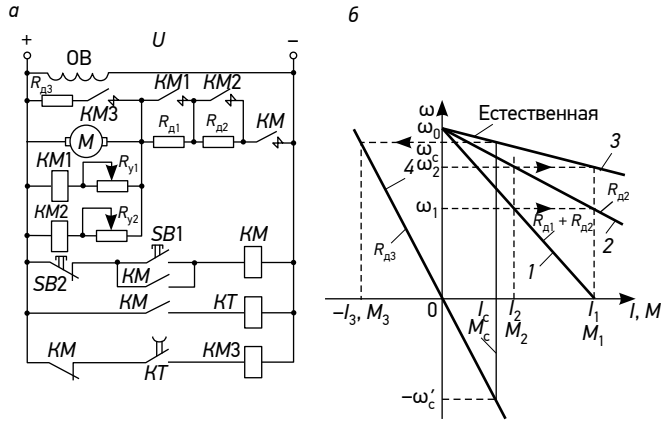


Рис. 3.2. Схема пуска двигателя по принципу ЭДС и динамического торможения:
а — по принципу времени, *б* — характеристики двигателя

Применение динамического торможения обеспечивает более быстрый останов двигателя и тем самым быстрое прекращение движения исполнительного органа рабочей машины.

Схема управления пуском двигателя по принципу времени, реверсом и торможением противовключением по принципу ЭДС. В этой схеме (рис. 3.3, *а*) предусмотрено два линейных контактора *КМ*1 и *КМ*2, обеспечивающих его вращение в условных направлениях «Вперед» и «Назад». Главные контакты этих аппаратов образуют реверсивный контактный мостик, с помощью которого можно изменить полярность напряжения на якоре *М* и тем самым осуществлять торможение противовключением и реверс (изменение направления вращения) двигателя. В якорной цепи помимо пускового резистора $R_{Д1}$ включен резистор противовключения $R_{Д2}$, который управляется контактором противовключения *КМ*3.

Управление двигателем при торможении противовключением и реверсе осуществляется с помощью двух реле противовключения *KV*1 и *KV*2. Их назначение в том, чтобы в режиме противовключения для ограничения тока в якоре до допустимого уровня обеспечить ввод в цепь якоря в дополнение к пусковому резистору $R_{Д1}$ резистор противовключения $R_{Д2}$, что достигается выбором точки присоединения катушек реле *KV*1 и *KV*2 к резистору ($R_{Д1} + R_{Д2}$).

Пуск двигателя в любом направлении осуществляется в одну ступень в функции времени. При нажатии, например кнопки *SB*1,

срабатывает контактор *КМ*1 и подключает якорь *М* к источнику питания. За счет падения напряжения на резисторе $R_{Д1}$ от пускового тока срабатывает реле времени *КТ*, размыкающее свой контакт в цепи контактора *КМ*4.

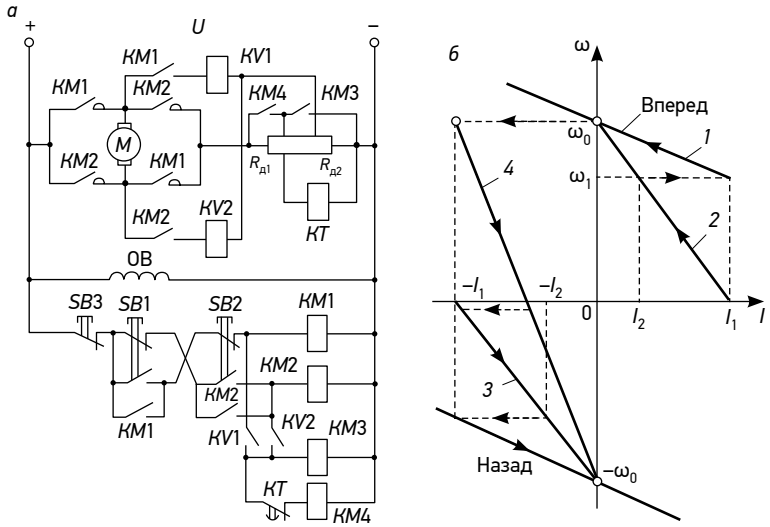


Рис. 3.3. Схема управления:
а — пуском и реверсом двигателя, *б* — характеристики двигателя

Включение *КМ*1 приведет также к срабатыванию реле *KV*1, которое замкнет свой замыкающий контакт в цепи контактора противовключения *КМ*3. Это вызовет включение *КМ*3, что приведет к закорачиванию ненужного при пуске резистора противовключения $R_{Д2}$ и одновременно катушки реле времени *КТ*. Двигатель начнет разбег по характеристике *2* (рис. 3.3, *б*), а реле времени *КТ*– отсчет выдержки времени.

По истечении выдержки времени реле *КТ* замкнет свой контакт в цепи катушки контактора *КМ*, он включится, закоротит пусковой резистор $R_{Д1}$, и двигатель выйдет на свою естественную характеристику *1*.

Для осуществления торможения нажимается кнопка *SB*2, в результате чего отключаются контактор *КМ*1, реле *KV*1, контакторы *КМ*3 и *КМ*4 и включается контактор *КМ*2. Напряжение на якоре двигателя изменяет свою полярность, и двигатель переходит в режим торможения противовключением с двумя резисторами в цепи

якоря $R_{Д1}$ и $R_{Д2}$. Несмотря на замыкание контакта *KM*2 в цепи реле *KV*2, оно в результате оговоренной выше настройки не включается и тем самым не дает включиться аппаратам *KM*3 и *KM*4 и зашунтировать резисторы $R_{Д1}$ и $R_{Д2}$.

Перевод двигателя в режим противовключения соответствует его переходу с естественной характеристики *1* на искусственную характеристику *4* (рис. 3.3, *б*). Во всем диапазоне скоростей $0<\omega<\omega_0$ на этой характеристике двигатель работает в режиме противовключения.

По мере снижения скорости двигателя растет напряжение на катушке реле *KV*2, и при скорости, близкой к нулю, оно достигнет напряжения срабатывания. Если к этому моменту времени кнопка *SB*2 будет отпущена, то отключается контактор *KM*2, схема возвращается в исходное положение, и на этом процесс торможения заканчивается.

Если же при достижении малой скорости кнопка *SB*2 остается нажатой, то включается реле *KV*2 и процесс пуска двигателя повторяется, но уже в противоположную сторону. Таким образом, реверсирование двигателя включает в себя два этапа: торможение противовключением и пуск в противоположном направлении. Второй этап реверса изображен на рис. 3.3 переходом двигателя с характеристики *4* на характеристику *3*, соответствующую обратной полярности напряжения на якоре двигателя и наличию в якоре добавочного резистора $R_{Д1}$.

Контрольные вопросы

1. Дайте переходную характеристику скорости и момента двигателя.
2. Характер пусковых диаграмм двигателей постоянного тока.
3. Особенности получения пусковых диаграмм асинхронных двигателей.
4. Переходный процесс в системе «*управляемый преобразователь — двигатель*».

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.

4. Регулирование скорости электроприводов постоянного тока с различным видом возбуждения

Регулирование скорости электроприводов осуществляется в тех случаях, когда требуется обеспечить движение исполнительных органов рабочих машин с высокими показателями качества — большим диапазоном регулирования координат и точностью их поддержания, заданным качеством переходных процессов, а также высокой экономичностью или оптимальным (наилучшим) функционированием технологического оборудования и самого электропривода.

Для обеспечения такого управления в структуру электропривода входит силовой управляемый полупроводниковый преобразователь электроэнергии -выпрямитель, регулятор напряжения, преобразователь частоты, а схема управления строится с использованием обратных связей по регулируемым координатам (переменным). Другими словами, силовая часть такого электропривода имеет структуру «*преобразователь — двигатель*», в которой двигатель питается от управляемого преобразователя.

Важной характеристикой большинства современных замкнутых систем управления является возможность гибкой настройки их параметров, программирования и перепрограммирования алгоритмов управления электропривода, что обеспечивается применением микропроцессорных средств управления. Использование микропроцессорных средств позволяет также повышать надежность функционирования электроприводов и технологического оборудования за счет диагностики при их работе, резервирования каналов управления и т.д.

Характеристики разомкнутых электроприводов, построенных по системе «*преобразователь — двигатель*» (П-Д), могут имеют относительно невысокую жесткость из-за наличия внутреннего со-

противления преобразователя и самого двигателя. Для получения значительных диапазонов и высокой точности регулирования скорости требуется иметь более жесткие характеристики, которые можно подучить лишь в замкнутой системе П-Д. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования (или ограничения) тока и момента, что также требует перехода к замкнутой системе П-Д. Рассмотрим принципы построения и действия замкнутых схем регулирования скорости, тока, момента и положения с использованием различных обратных связей.

Замкнутая система П-Д с отрицательной обратной связью по скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Основу системы составляет разомкнутая схема П-Д. На валу двигателя находится датчик скорости — тахогенератор ТГ (рис. 4.1, *а*), выходное напряжение которого $U_{ТГ} = \gamma a$, пропорциональное скорости двигателя, является сигналом обратной связи. Коэффициент пропорциональности γ носит название коэффициента обратной связи по скорости и может регулироваться за счет изменения тока возбуждения тахогенератора $I_{ТГ.}$

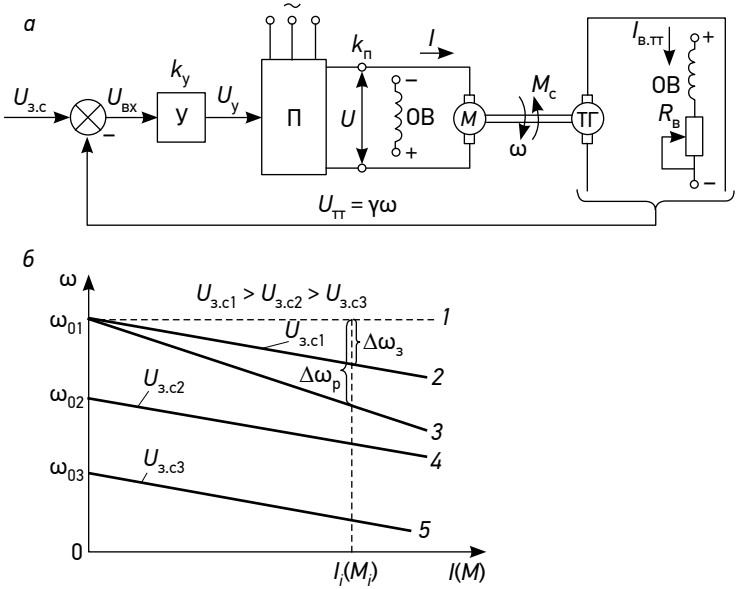


Рис. 4.1. Замкнутая система с обратной связью по скорости:
а — схема; *б* — характеристики

Сигнал обратной связи $U_{ТГ}$ сравнивается с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$, и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки) $U_{вх}$ подается на вход усилителя *У*, который с коэффициентом $k_у$, усиливает сигнал рассогласования $U_{вх}$ и подает его в виде сигнала управления $U_у$ на вход преобразователя П, в качестве которого используется управляемый выпрямитель. Усилитель в этой схеме является пропорциональным регулятором скорости.

Для получения формул характеристик двигателя в замкнутой системе воспользуемся выражениями для электромеханической ω (*M*) и механической ω (*I*) характеристик двигателя в разомкнутой схеме и соотношениями, следующими из рассмотрения рис. 4.1, *а*

$$\omega(I) = \frac{E_п}{k_Ф} = \frac{I(R_я + R_п)}{k_Ф};$$

$$\omega(M) = \frac{E_П}{k_Ф} = \frac{M(R_я + R_п)}{k_Ф};$$

$$U_{вх} = U_{з.с} - \gamma\omega;$$

$$U_у = k_у U_{вх};$$

$$E_п = k_п U_у;$$

где $E_п$ — ЭДС преобразователя; k — конструктивный коэффициент двигателя; Ф — магнитный поток двигателя; I — ток якоря двигателя; $R_я$, $R_п$ — соответственно сопротивление якоря двигателя и преобразователя: M — момент двигателя.

Заменяя последовательно $E_п$ на ее выражение $U_у$ и $U_{вх}$, и далее, после несложных преобразований получаем следующие формулы для характеристик двигателя в замкнутой системе:

$$\omega = \frac{k_у k_п U_{з.с}}{c(1 + k_с)} - \frac{I(R_я + R_п)}{c(1 + k_с)};$$

$$\omega = \frac{k_у k_п U_{з.с}}{c(1 + k_с)} - \frac{M(R_я + R_п)}{c^2(1 + k_с)};$$

где $c = k_Ф$; $k_с = \gamma k_у k_п / c$ — общий коэффициент усиления замкнутой системы П-Д.

Для анализа жесткости получаемых характеристик сопоставим перепады скорости в разомкнутой $\Delta\omega_p$ и замкнутой $\Delta\omega_з$ системах при одном и том же токе или моменте:

$$\Delta\omega_р = \frac{I_у(R_я + R_п)}{c};$$

$$\Delta\omega_з = \frac{I_у(R_я + R_п)}{c(1+k_с)} = \Delta\omega_р(1+k_с).$$

Так как всегда $k_с > 0$, то $\Delta\omega_з < \Delta\omega_р$, т.е. жесткость получаемых характеристик в замкнутой системе больше жесткости характеристик в разомкнутой системе. Сами характеристики, показанные на рис. 4.1, *б*, представляют собой прямые параллельные линии *2*, *4* и *5*, расположение которых определяется уровнем задающего сигнала по скорости $U_{з.с}$ и соответственно скоростью холостого хода ω_0. Здесь же для сравнения приведена характеристика двигателя в разомкнутой (прямая *3*) системе.

Для нахождения предельной по жесткости характеристики устремим коэффициент усиления системы $к_с$ в бесконечность. Видно, что при $k_c \to \infty \Delta w_з \to 0$, т.е. в пределе в данной замкнутой системе может быть получена абсолютно жесткая характеристика, которая изображена на рис. 4.1, *б* в виде штриховой линии *1*.

Рассмотрим физическую сторону процесса регулирования скорости в данной системе. Предположим, что двигатель работает под нагрузкой в установившемся режиме и по каким-то причинам увеличился момент нагрузки M_c. Так как развиваемый двигателем момент стал меньше момента нагрузки, его скорость начнет снижаться, и соответственно будет снижаться сигнал обратной связи по скорости $U_{ТГ} = \gamma\omega$. Это, в свою очередь, вызовет увеличение сигналов рассогласования U_m и управления U_y и приведет к повышению ЭДС преобразователя, а следовательно, напряжения и скорости двигателя.

При уменьшении момента нагрузки обратная связь действует в другом направлении, приводя к снижению ЭДС преобразователя. Таким образом, благодаря наличию обратной связи осуществляется автоматическое регулирование ЭДС преобразователя и тем самым подводимого к двигателю напряжения, за счет чего получаются более жесткие характеристики электропривода. В разомкнутой системе, напротив, при изменении момента нагрузки ЭДС

преобразователя не изменяется, в результате чего жесткость характеристик электропривода оказывается меньше.

Для получения жестких характеристик в системе П-Д кроме обратной связи по скорости используются также отрицательная обратная связь по напряжению и положительная обратная связь по току двигателя и их сочетания.

Схема управления, обеспечивающая ограничение тока и момента двигателя постоянного тока с помощью нелинейной отрицательной обратной связи по току. В качестве датчика тока в этой схеме (рис. 4.2, *а*) используется шунт с сопротивлением $R_ш$, падение напряжения на котором пропорционально току якоря I. В результате сигнал обратной связи по току

$$U_{о.т} = \beta I;$$

где β — коэффициент обратной связи по току, Ом.

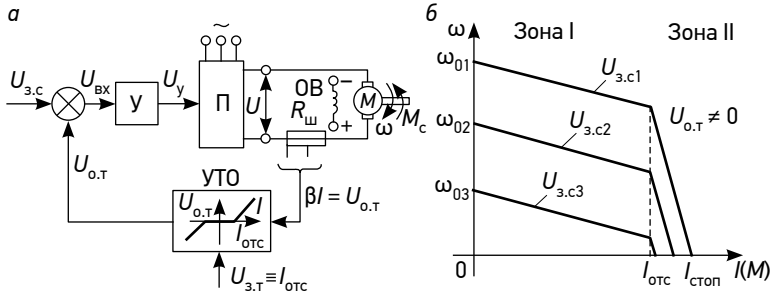


Рис. 4.2. Замкнутая система с обратной связью по току:
а — схема; *б* — характеристики

Отметим, что в качестве шунта $R_ш$ часто используется обмотка дополнительных полюсов или компенсационная обмотка двигателя.

Сигнал обратной связи U_{BJ} поступает на узел токоограничения УТО, называемый также узлом токовой отсечки, вместе с сигналом задания тока $U_{з.т}$. Этот сигнал определяет уровень тока отсечки $I_{отс}$, с которого начинается регулирование (ограничение) тока.

Работа УТО в соответствии с его характеристикой $U_{о.т}(I)$ (рис. 4.2, *а*) происходит следующим образом. При токе в якоре, меньшем заданного тока отсечки, т.е. пока $I \le I_{отс}$, сигнал обратной связи на выходе УТО равен нулю. Другими словами, схема в диапазоне

тока $0...I_{отс}$ является разомкнутой и двигатель имеет характеристики, изображенные на рис. 4.2, *б* в зоне I.

При $I > I_{отс}$ на выходе УТО появляется сигнал отрицательной обратной связи $U_{о.т} = \beta I$. Электропривод становится замкнутым и начинает работать в зоне II (рис. 4.2, *б*). Для пояснения вида характеристик электропривода в этой зоне запишем выражение для сигнала рассогласования

$$U_{вх} = U_{з.с} - \beta I;$$

При увеличении тока I сигнал $R_{ш}$ уменьшается, что вызовет уменьшение сигнала $U_{у}$ и $E_{п}$. Это приведет к уменьшению напряжения на двигателе U и соответствующему снижению тока в якоре двигателя. Характеристики двигателя становятся крутопадающими (мягкими), что и отражает эффект регулирования (ограничения) тока и соответственно момента. При увеличении коэффициента усиления системы характеристики в зоне II все ближе приближаются к вертикальным линиям. Уровень ограничения тока определяется задающим сигналом (уставкой) $U_{з.т}$. Ток при нулевой скорости двигателя получил название тока стопорения $I_{стоп}$.

Контрольные вопросы

1. В чем принцип реостатного регулирования скорости?
2. Приведите математическую зависимость скорости от сопротивления якорной цепи.
3. Дайте реостатные характеристики двигателя.
4. Как осуществляется регулирование скорости изменением потока возбуждения?
5. Какие бывают схемные решения регулирования скорости шунтированием обмотки якоря?

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

5. Регулирование скорости электропривода изменением питающего напряжения

Замкнутая схема электропривода с двигателем постоянного тока и обратными связями по скорости и току. Эта схема обеспечивает получение характеристик двигателя, имеющих различную жесткость участков, — высокую для точного поддержания скорости на заданном уровне, и малую, что требуется для ограничения тока и момента двигателя в переходных процессах. Это определяется использованием в схеме двух нелинейных обратных связей по скорости и току (рис. 5.1, *а*). Для создания нелинейности цепей обратных связей использованы рассмотренный ранее узел УТО и узел ограничения скорости УСО, характеристики которых показаны внутри соответствующих условных изображений. Нелинейность обратных связей приводит к разделению области механических характеристик (рис. 5.1, *б*) на три зоны: I, II и III.

В зоне I в диапазоне токов 0... $I_{отс}$ действует только обратная связь по скорости, обеспечивая жесткие характеристики электропривода. В зоне II при $I > I_{отс}$ вступает в действие обратная связь по току и характеристики становятся мягче. При дальнейшем увеличении тока и уменьшении скорости ниже скорости отсечки $\omega_{отс}$ перестает действовать обратная связь по скорости и за счет действия обратной связи по току характеристики становятся еще мягче (зона III), обеспечивая требуемое ограничение тока и момента.

Схема управления с подчиненным регулированием координат. Эффективное и качественное регулирование координат в системе П-Д обеспечивает принцип подчиненного регулирования. Напомним, что этот принцип предусматривает регулирование каждой координаты с помощью своего отдельного регулятора и соответствующей обратной связи. Тем самым регулирование каждой координаты происходит в своем замкнутом контуре, и требуемые

характеристики электропривода в статике и динамике могут быть получены за счет выбора схемы и параметров регулятора этой координаты и цепи ее обратной связи.

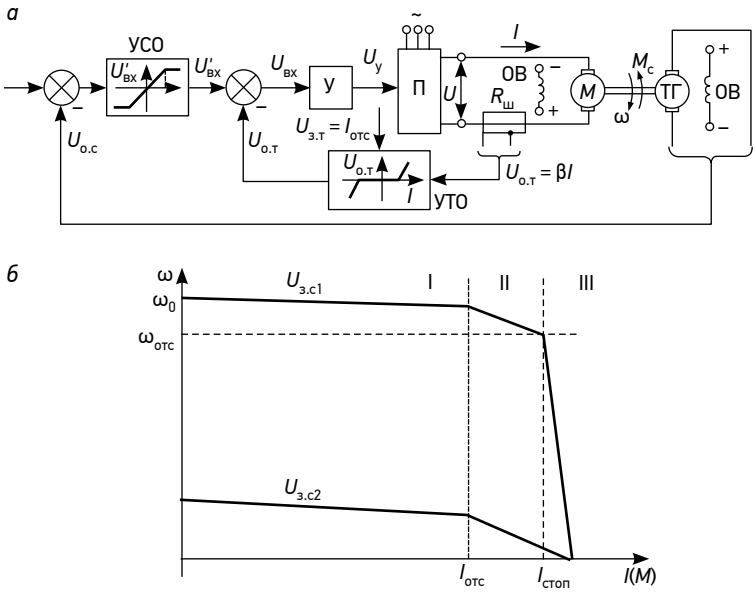


Рис. 5.1. Замкнутая система
с обратными связями по скорости и току:
а — схема, *б* — характеристики

Управление внутренним контуром с помощью выходного сигнала внешнего контура определяет еще одно ценное свойство таких систем. Оно заключается в возможности простыми средствами ограничивать любую регулируемую координату, например ток и момент, на заданном уровне. Для этого требуется всего лишь ограничить сигнал, поступающий с внешнего контура.

Рассмотрим схему электропривода (рис. 5.2, *а*) с подчиненным регулированием, выходной регулируемой координатой которого является скорость. Управляющая часть схемы состоит из двух замкнутых контуров регулирования: тока (момента), содержащего регулятор тока РТ и датчик тока ДТ, и скорости, содержащего регулятор скорости РС и датчик скорости (тахогенератор) ТГ.

Регуляторы тока и скорости в большинстве схем электропривода этого типа выполняются на базе операционных усилителей (ОУ).

Включение в цепи РС задающего сигнала скорости $U_{з.с}$ и его обратной связи — резисторов $R1$ и $R_{о.с.1}$ — обеспечивает изменение (усиление или ослабление) этого сигнала с коэффициентом $k_2 = R_{о.с.1}/R1$. Аналогично изменение сигнала обратной связи по скорости $U_{о.с}$ происходит с коэффициентом $k_1 = R_{о.с.1}/R2$. Такой регулятор получил название пропорционального (П) регулятора скорости.

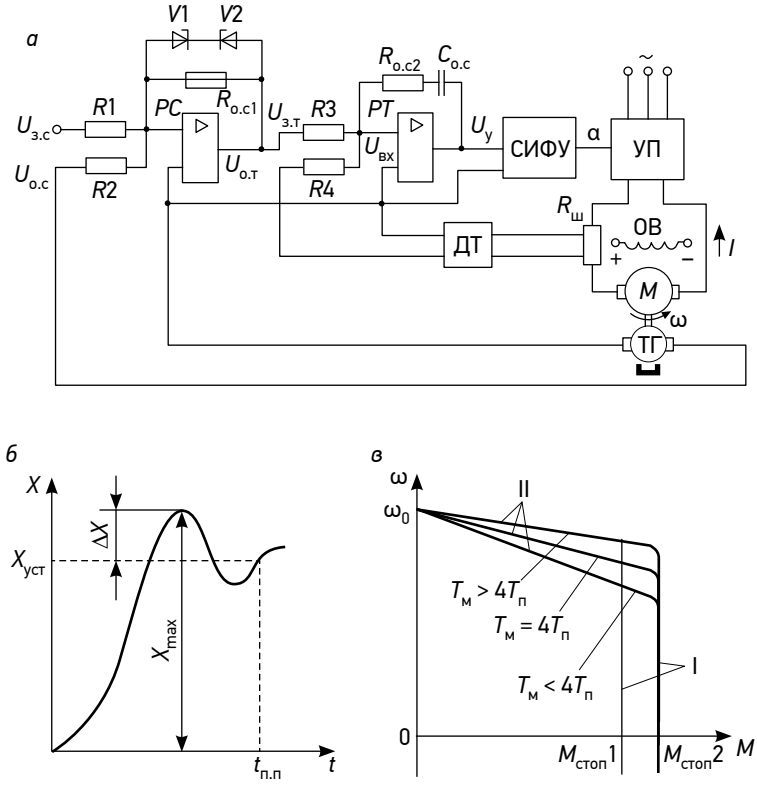


Рис. 5.2. Электропривод с подчиненным регулированием координат: *а* — схема, *б* — динамические характеристики, *в* — статические характеристики

При включении в цепи ОУ конденсаторов (реактивных электрических элементов) его функциональные возможности по преобразованию электрических сигналов становятся шире. Так, схема *PT* с включением в цепь обратной связи конденсатора $C_{о.с}$ последовательно с резистором $R_{о.с.2}$ позволяет получить сигнал U_y на выходе *PT* в виде суммы двух составляющих

$$U_{\text{у}} = k_{\text{з}} U_{\text{вх}} + \frac{1}{T} \int U_{\text{вх}} dt.$$

Сигнал U_y содержит пропорциональную и интегральную составляющие входного сигнала $U_{\text{вх}}$, т.е. *PT* является в этом случае пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором. По каким же критериям и условиям выбираются схема и параметры цепей того или иного регулятора? Основным условием здесь является желаемый (заданный) характер переходных процессов при регулировании координат. Из всех возможных видов обычно выбирают график с затухающими колебаниями. Такой график является оптимальным в том смысле, что он позволяет обеспечить устойчивые переходные процессы при небольших длительностях и перерегулированиях. Распространенной настройкой регуляторов такого вида является так называемый технический оптимум, при котором перерегулирование $\Delta X = X_{\max} - X_{\text{уст}}$ составляет 4,3 % установившегося уровня, а время переходного процесса $t_{\text{п.п}} = 4{,}1\ T_{\text{п}}$, где $T_{\text{п}}$ — электромагнитная постоянная времени тиристорного преобразователя, принимаемая обычно равной 0,01 с. В теории электропривода разработаны методы расчета параметров цепей *PC* и *PT*, обеспечивающих такой характер регулирования координат электропривода.

Как уже отмечалось, схема подчиненного регулирования координат позволяет простыми средствами ограничивать координаты электропривода на заданном уровне. В схеме для ограничения тока и момента в цепь обратной связи *PC* включены стабилитроны *VD*1 и *VD*2. В результате этого выходное напряжение *PC*, являющееся входным задающим сигналом (уставкой) тока $U_{\text{з.т}}$, ограничивается, тем самым ток и момент двигателя не могут превзойти заданного уровня.

На рис. 5.2, *в* приведены статические характеристики электропривода с подчиненным регулированием координат и настройкой на «технический оптимум». Их особенность — наличие вертикального участка I, обеспечивающего ограничение тока и момента, и участка II с высокой жесткостью характеристики, определяемой соотношениями двух постоянных времени — электромеханической двигателя $T_{\text{м}}$ и электромагнитной $T_{\text{п}}$ преобразователя.

В схемах подчиненного регулирования используется и другой критерий настройки регуляторов по так называемому симметричному оптимуму, который позволяет получить абсолютно жесткие статические характеристики на участке II (рис. 5.2, *в*), но переходные процессы в этом случае характеризуются большим

перерегулированием, доходящим до 55%. При настройке на «симметричный оптимум» *РС* выполняется как ПИ-регулятор. При необходимости регулирования положения вала двигателя схема на рис. 5.2, *а* дополняется контуром положения, включающим в себя регулятор положения и датчик положения вала двигателя.

Отметим в заключение, что в силу своих больших функциональных возможностей схемы с подчиненным регулированием координат нашли очень широкое распространение в регулируемом электроприводе как постоянного, так и переменного тока.

Замкнутая схема управления электроприводом по системе «*источник тока — двигатель постоянного тока*». В электроприводах с двигателями постоянного тока нашли применение источники питания двигателей со свойствами источника тока. Такие электроприводы в разомкнутой структуре обладают свойствами источника момента, регулируемого по цепи возбуждения, а при введении обратной связи по скорости позволяют получать характеристики, пригодные и для целей регулирования скорости.

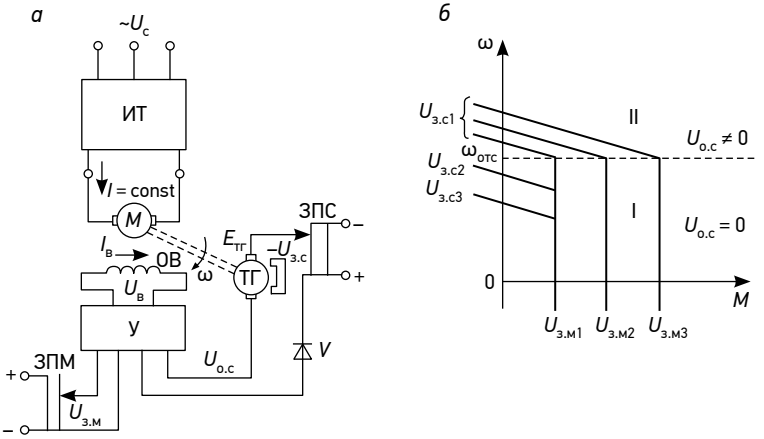


Рис. 5.3. Замкнутая система
при питании двигателя от источника тока:
а — схема, *б* — характеристики

Силовую часть этой схемы (рис. 5.3, *а*) образуют источник тока ИТ и якорь двигателя *М*, обмотка возбуждения которого ОВ подключена к усилителю У, имеющему два входа. По первому входу на усилитель с потенциометра ЗПМ поступает задающий сиг-

нал момента U_{3M}, уровень которого определяет величину момента на вертикальном участке механической характеристики (рис. 5.3, *б)*.

На второй вход У по цепи, состоящей из тахогенератора ТГ, диода *V* задающего потенциометра скорости ЗПС, подается сигнал нелинейной отрицательной обратной связи по скорости $U_{о.с}$. Цепь обратной связи собрана и настроена таким образом, что диод *V* начнет пропускать ток по ней только тогда, когда ЭДС тахогенератора превышает задающий сигнал по скорости $U_{з.с}$, что произойдет при скоростях, больших $\omega_{отс}$. При скоростях $\omega < \omega_{отс}$ диод *V* закрыт и обратная связь по скорости не действует ($U_{о.с} = 0$). Нелинейный характер обратной связи по скорости определяет наличие двух зон на плоскости механических характеристик рис. 5.3, *б*. При $\omega < \omega_{отс}$ (зона I) $U_{о.с} = 0$ и на вход У подается неизменный по величине сигнал задания момента $U_{з.м}$. Напряжение возбуждения на его выходе $U_в$, ток возбуждения $I_в$ и определяемый им момент *M* постоянны, что и определяет вертикальные участки характеристик на рис. 5.3, *б*.

При $\omega > \omega_{отс}$ (зона II на рис. 5.3, *б*) открывается диод *V* и на входе *У* появляется сигнал обратной связи по скорости, противоположный по знаку сигналу $U_{з.м}$. Суммарный сигнал U_y на входе *У* станет равным

$$U_у = U_{з.м} - U_{о.с} = U_{з.м} - \gamma\omega.$$

Как видно, при увеличении скорости сигнал U_y на входе *У* будет снижаться, пропорционально ему будут уменьшаться напряжение $U_в$ на выходе У, ток возбуждения $I_в$ двигателя и тем самым его момент. Механические характеристики приобретают вид наклонных прямых, показанных на рис. 5.3, *б*. Таким образом, рассматриваемая схема электропривода обеспечивает регулирование двух координат — скорости и момента. Величина сигнала $U_{3М}$ определяет уровень момента двигателя в зоне I характеристик, а величина сигнала $U_{3С}$ — уровень скорости двигателя. Жесткость механических характеристик в зоне II определяется общим коэффициентом усиления электропривода.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия электромашинного усилителя?
2. Дайте схему транзисторного и магнитного усилителей управления скоростью.

3. В чем принцип тиристорного регулирования скорости двигателей?
4. Приведите схемы нереверсивного и реверсивного способов тиристорного управления скоростью электроприводом.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод: учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И., Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

6. Импульсное регулирование скорости привода постоянного тока

В качестве примера рассмотрим схему реализации реального замкнутого электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.

Схема управления серийного электропривода типа ЭТЗР. Для привода механизмов различных металлообрабатывающих станков, требующих регулирования скорости при мощности до 11 кВт, используется серийный комплектный электропривод типа ЭТЗР (рис. 6.1) с двигателями серий ПБСТ, 2П или ПГТ. Электропривод этого типа выполнен в виде замкнутой системы регулирования скорости с отрицательной обратной связью по скорости, которая в зависимости от настройки обеспечивает относительный перепад скорости в пределах 0,5–10 % при изменении момента нагрузки от $0,1M_{\text{ном}}$, до $M_{\text{ном}}$. В электроприводе обеспечивается также регулирование (ограничение) тока с помощью устройства токоограничения УТО. Для обеспечения устойчивости и требуемого качества переходных процессов электропривода в схеме применены гибкие обратные связи по скорости двигателя и результирующему сигналу управления $U_{\text{у}2}$.

Якорь двигателя, имеющего встроенный тахогенератор *BR*, получает питание от реверсивного тиристорного преобразователя с двумя комплектами тиристоров *VS*1–*VS*6, составляющих выпрямительную и инверторную группы. Управление этими группами осуществляется с использованием согласованного совместного принципа.

Для уменьшения переменной составляющей уравнительного тока, протекающей между выпрямительной и инверторной группами, в схеме используются ограничительные реакторы *L*1 и *L*2. Включение в цепь якоря сглаживающего реактора *L*3 позволяет исключить режим прерывистого тока и повысить использование двигателя по току.

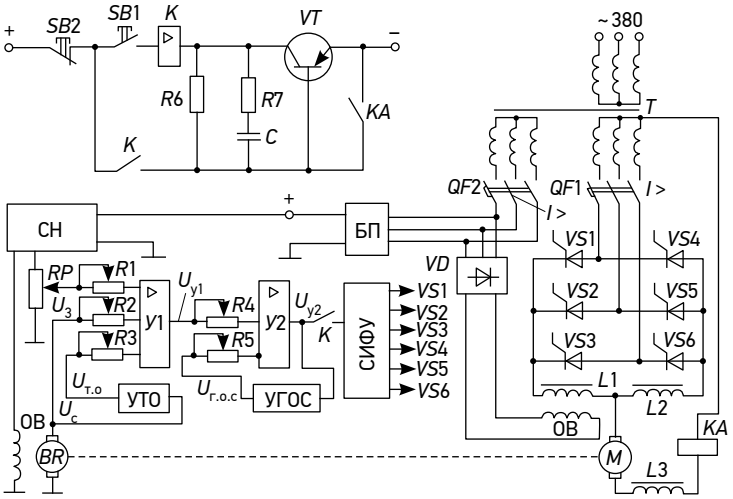


Рис. 6.1. Схема серийного электропривода типа ЭТЗР

Управление тиристорами *VS*1–*VS*6 обеспечивается транзисторной схемой импульсно-фазового управления СИФУ, работающей по вертикальному принципу. Она имеет три канала, каждый из которых работает на два тиристора, включенных в одну фазу.

Питание электропривода осуществляется от трехфазного трансформатора *T* с двумя вторичными обмотками. К одной из них, имеющей нулевой вывод, подключена силовая часть привода, а ко второй — обмотка возбуждения ОВ (через выпрямитель *VD*) и блок питания БП, от которого питается схема управления. Обмотка ОВ тахогенератора получает питание от стабилизатора напряжения СН.

В состав схемы управления электропривода входят промежуточный усилитель У1, усилитель мощности (эмитгерный повторитель) У 2, узел токоограничения УТО, узел гибкой обратной связи УГОС, задающий потенциометр *RP*, кнопки управления *SB*1 и *SB*2 и пусковое реле *K*.

Сигнал управления U_{y1} формируется как алгебраическая сумма сигналов задающего $U_з$, обратной связи по скорости $U_с$ и токоограничения $U_{т.о}$, для выработки которого используется нелинейная положительная обратная связь по скорости двигателя. При токе якоря, меньшем тока отсечки, работает только контур регулирования скорости. При токе якоря, превышающем ток отсечки, за счет нелинейности цепи токоограничения отрицательная обратная связь по скорости ДПТ отключается и начинает действовать положи-

тельная обратная связь, обеспечивая ограничение тока и момента на заданном уровне.

Для обеспечения необходимого качества переходных процессов электропривода в схеме используется гибкая обратная связь, действующая только в переходных процессах. Сигнал корректирующей гибкой обратной связи $U_{г.о.с}$ вместе с сигналом управления $U_{у1}$ поступает на вход усилителя мощности *У*2 и после усиления в виде результирующего сигнала $U_{у2}$ подается на вход СИФУ через замыкающий контакт пускового реле *K*. Управление реле осуществляется с помощью кнопок управления: *SB*1 при пуске двигателя *SB*2 и при его остановке. Реверсирование двигателя осуществляется путем изменения полярности задающего сигнала $U_з$.

В электроприводе типа ЭТЗР реализуется ряд защит, блокировок и сигнализаций. Токовое реле *KA*, катушка которого включена в цепь якоря двигателя, а контакт — в цепь питания реле *K*, обеспечивает максимальную токовую защиту электропривода. При его срабатывании отключается реле *K*, с тиристоров снимаются сигналы управления и двигатель отключается от источника питания.

Автоматические выключатели *QF*1 и *QF*2 осуществляют максимальную токовую защиту силовой части тиристорного преобразователя, обмотки возбуждения двигателя и схемы управления.

Схема электропривода с микропроцессорным управлением. Рассмотрим схему электропривода с двигателем постоянного тока для регулирования положения исполнительного органа робототехнического устройства с микропроцессорным управлением (рис. 6.2, *а*). Электропривод должен обеспечивать перемещение и точное позиционирование исполнительного органа робота, для чего в нем используется обратная связь по положению. Для обеспечения высокой точности позиционирования в ЭП осуществляется также регулирование тока (момента) и скорости.

Рисунок (6.2, *а*) иллюстрирует характерный пример выполнения схем, когда в них применяются как аналоговые, так и цифровые узлы и устройства управления. Такие схемы, получившие название цифроаналоговых, сочетают в себе лучшие свойства тех и других устройств.

Силовая часть электропривода образована трехфазным мостовым реверсивным тиристорным преобразователем ТП, питаемым от трансформатора ТР.

Схема управления построена по принципу подчиненного регулирования координат. Регулирование тока производится аналоговым

пропорционально-интегральным регулятором тока РТ, на вход которого поступают сигналы обратной связи по току от датчика тока ДТ и задания тока $U_{з.т}$, с выхода регулятора скорости.

Аналоговый П-регулятор скорости РС формирует сигнал задания тока $U_{з.т.}$ на основе своего задающего сигнала $U_{з.с.}$, поступающего на него с внешнего по отношению к нему контура положения, и сигнала обратной связи по скорости, вырабатываемой тахогенератором ТГ. Стабилитроны *VD*1 и *VD*2 ограничивают сигнал на выходе РС, чем обеспечивается ограничение тока и момента двигателя.

Регулирование положения осуществляется с помощью микропроцессорной системы, включающей в себя микропроцессор МП, устройства памяти ОЗУ и ПЗУ, устройства сопряжения УС1–УС3, цифровой датчик положения ДП, цифроаналоговый преобразователь ЦАП. Сигнал задания положения $S_{з.п.}$ поступает (задается) с терминала Т, подключаемого к микропроцессорной системе через УС3. Тем самым микропроцессорная система выполняет роль регулятора положения РП.

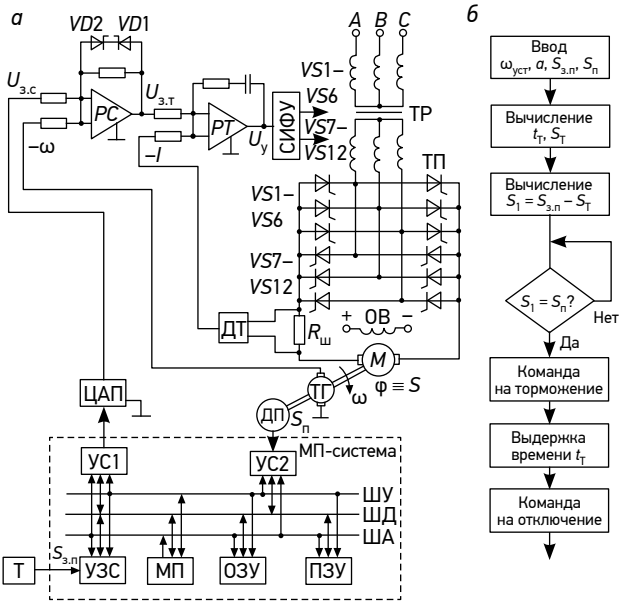


Рис. 6.2. Электропривод с микропроцессорным управлением:
а — схема, *б* — фрагмент программы

Работа цифрового регулятора положения в микропроцессорной системе может основываться на одном из двух принципов. Первый из них предусматривает реализацию статической характеристики РП в виде параболы, которая обеспечивает оптимальный график движения электропривода. Такой регулятор можно реализовать программным путем, записав в ПЗУ эту нелинейную характеристику РП.

Второй принцип работы РП основан на вычислении момента начала торможения электропривода, что также позволяет получить требуемую точность регулирования положения. Рассмотрим данный способ подробнее.

Реализация способа основана на том, что при известных скорости $\omega_{уст}$ и ускорении

$$a = \frac{M - M_c}{J}$$

могут быть рассчитаны время $t_Т$ и путь $S_Т$, на участке торможения электропривода в конце отработки заданного перемещения $S_{з.п}$ по следующим формулам:

$$t_Т = \frac{\omega_{уст}}{a};$$

$$S_Т = \frac{\omega_{уст}^2}{2a}.$$

Алгоритм работы микропроцессорной системы при выработке сигнала на торможение приведен на рис. 6.2, *б*. Для его реализации в микропроцессорную систему вводятся данные по величинам $\omega_{уст}$, α, $S_{з.п}$ и сигнал $S_п$ датчика положения ДП, пропорциональный текущему положению вала двигателя и исполнительного органа. Микропроцессорная система производит вычисление $t_Т$ и $S_Т$ и разности $S_1 = S_{з.п} - S_з$. Затем сопоставляются величины разности S_1 с сигналом датчика положения $S_п$. Как только S_1 станет равной $S_п$, от микропроцессорной системы выдается команда на торможение электропривода, начинается отсчет выдержки времени $t_Т$, по истечении этого интервала выработается команда на отключение электропривода.

Контрольные вопросы

1. В чем принцип импульсного изменения параметров схемы управления?
2. Дайте схемное решение реализации способа импульсного изменения параметров.
3. Приведите математические зависимости и временные диаграммы импульсного способа регулировки скорости.
4. Объясните характер использования логических функций для управления скоростью электропривода.
5. Принцип регулирования скорости привода импульсным изменением параметров.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

7. Электрический привод по системе «генератор — двигатель»

В зависимости от вида регулируемой координаты ЭП используются связи по скорости, положению, току, напряжению, магнитному потоку, ЭДС.

Во многих случаях требуется обеспечивать регулирование скольких координат ЭП, например тока (момента) и скорости двигателя. При этом для регулирования требуется источник питающего напряжения большой мощности, который бы позволял изменять скорость привода в широком диапазоне. Для решения такой задачи нашел применение привод постоянного тока, работающий по системе «*генератор — двигатель* (Г–Д)».

В этом случае система управления ЭП выполняется по одной из следующих структурных схем.

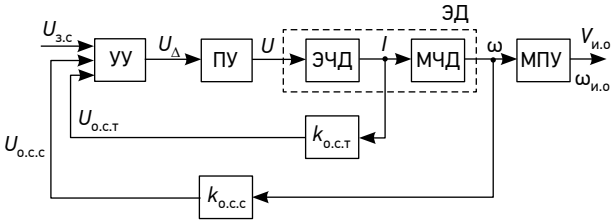


Рис. 7.1. Схема с общим усилителем

Схема с общим усилителем (рис. 7. 1). Для удобства описания работы схемы двигатель ЭД условно представлен двумя частями: электрической ЭЧД и механической МЧД. Схема предназначена для регулирования двух координат: тока I и скорости двигателя ω, а тем самым и скорости движения исполнительного органа $\omega_{и.о}$ или $V_{и.о}$. В этой схеме сигналы обратных связей по току $U_{о.м.т}$

и скорости $U_{о.с.с}$ подаются на вход управляющего устройства УУ, где вместе с задающим сигналом скорости $U_{з.с}$ алгебраически суммируются. Сигнал ошибки U_{Δ} далее подается на вход преобразователя ПУ, который своим выходным напряжением U управляет двигателем ЭД. Схема отличается простотой реализации, но не позволяет регулировать координаты ЭП независимо друг от друга.

В этой схеме за счет использования нелинейных обратных связей, называемых в теории ЭП отсечками, удается в некотором диапазоне изменения координат осуществлять их независимое регулирование, что частично устраняет указанный недостаток.

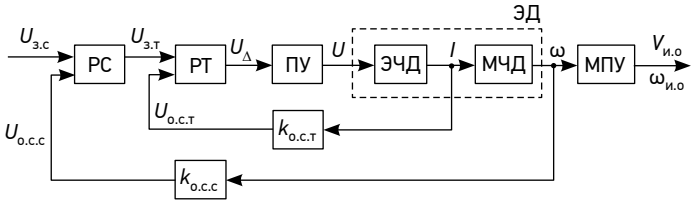


Рис. 7.2. Схема с подчиненным регулированием координат

Схема с подчиненным регулированием координат (рис.7.2). Схема отличается от предыдущей тем, что в ней регулирование каждой координаты осуществляется своими регуляторами тока РТ скорости РС, которые вместе с соответствующими обратными связями образуют замкнутые контуры. Они располагаются таким образом, что входным, задающим сигналом для внутреннего контура тока $U_{з.т.}$ является выходной сигнал внешнего по отношению к нему контура скорости. Таким образом, внутренний контур тока подчинен внешнему контуру скорости — основной регулируемой координаты ЭП.

Достоинство такой схемы заключается в возможности оптимальной настройки регулирования каждой координаты, в силу чего она находит в настоящее время основное применение в ЭП. Кроме того, подчинение контура тока контуру скорости позволяет простыми средствами осуществлять ограничение тока и момента, для чего необходимо лишь ограничить на соответствующем уровне сигнал на выходе регулятора скорости.

При необходимости регулировать положение вала двигателя в схемы рис. 7.1 и 7.2 вводится соответствующая обратная связь по положению вала двигателя или исполнительного органа.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику режимам работы системы «Г-Д».
2. Объясните пусковой режим в системе «Г-Д».
3. Назовите способы регулирования скорости в системе «Г-Д».
4. Дайте схемное решение и приведите механические характеристики регулировки скорости в системе «Г-Д».

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

8. Регулирование скорости приводов на двигателях переменного тока

Типовые схемы управления асинхронным двигателем с фазным ротором. Схемы управления двигателя с фазным ротором, которые рассчитаны в основном на среднюю и большую мощность, должны предусматривать ограничение токов при их пуске, реверсе и торможении с помощью добавочных резисторов в цепи ротора. За счет включения резисторов в цепь ротора можно также увеличить момент при пуске, вплоть до уровня критического (максимального).

Обычно системы автоматического управления приводов на асинхронных двигателях решают задачу автоматического пуска, регулирования скорости и автоматического торможения, представляя собой единое схемное решение. Рассмотрим некоторые типовые схемы управления асинхронными двигателями.

Схема одноступенчатого пуска асинхронного двигателя в функции тока и динамического торможения в функции скорости. Схема (рис. 8.1) включает в себя контакторы *KM*1, *KM*2 и *KM*3; реле тока *KA*; реле контроля скорости *SR*, промежуточное реле *KV*; понижающий трансформатор для динамического торможения *T*; выпрямитель *VD*. Максимальная токовая защита осуществляется предохранителями *FA*1 и *FA*2, защита от перегрузки двигателя — тепловыми реле *KK*1 и *KK*2.

Схема работает следующим образом. После подачи с помощью автоматического выключателя *QF* напряжения для пуска двигателя нажимается кнопка *SB*1, включается контактор *KM*1, силовыми контактами которого статор двигателя подключается к сети. Бросок тока в цепи ротора вызовет включение реле тока *KA* и размыкание цепи контактора ускорения *KM*2. Тем самым разбег двигателя начнется с пусковым резистором $R_{Д2}$ в цепи ротора.

Включение контактора *KM*1 приводит также к шунтированию кнопки *SB*1, размыканию цепи катушки контактора торможения

*KM*3 к включению промежуточного реле напряжения *KV*, что, тем не менее, не приведет к включению контактора *KM*2, так как до этого в данной цепи разомкнулся контакт реле *KA*.

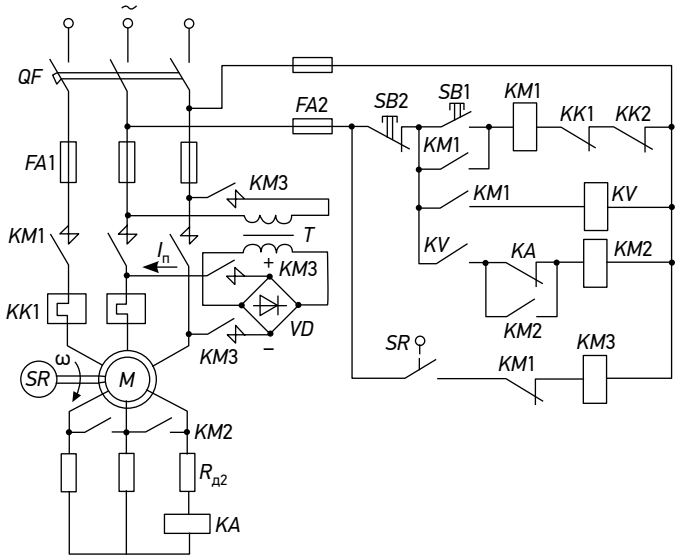


Рис. 8.1. Схема управления пуском
и динамическим торможением
асинхронного двигателя с фазным ротором

По мере увеличения скорости двигателя уменьшаются ЭДС и ток в роторе. При некотором значении тока в роторе, равном току отпускания реле *KA*, оно отключится и своим размыкающим контактом замкнет цепь питания контактора *KM*2. Ток включится, зашунтирует пусковой резистор R&, и двигатель выйдет на свою естественную характеристику.

Отметим, что вращение двигателя вызовет замыкание контакта реле скорости *SR* в цепи контактора *KM*3, однако он не сработает, так как до этого разомкнулся контакт контактора *KM*1.

Для перевода двигателя в тормозной режим нажимается кнопка *SB*2. Контактор *KM*1 теряет питание и отключает *АД* от сети переменного тока. Благодаря замыканию контактов *KM*1 включится контактор торможения *KM*3, контакты которого замкнут цепь питания обмотки статора от выпрямителя *VD*, подключенного к трансформатору *T*, и тем самым двигатель переводится в режим

динамического торможения. Одновременно с этим потеряют питание аппараты *KV* и *KM*2, что приведет к вводу в цепь ротора резистора *RД*2. Двигатель начинает тормозиться.

При скорости двигателя, близкой к нулю, реле контроля скорости *SR* разомкнет свой контакт в цепи катушки контактора *KM*3. Он отключится и прекратит торможение двигателя. Схема придет в исходное положение и будет готова к последующей работе.

Принцип действия схемы не изменится, если катушку реле тока *KA* включить в фазу статора, а не ротора.

Панель типа ПДУ6220. Эта панель входит в состав нормализованной серии панелей управления двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором и обеспечивает пуск двигателей в две ступени и динамическое торможение по принципу времени (рис. 8.2).

При подаче на схему напряжений постоянного 220 В и переменного 380 В тока (замыкание рубильников *Ql*, *Q*2 и автомата *QF*) включается реле времени *KT*1, чем подготавливается двигатель к пуску с полным пусковым резистором в цепи ротора. Одновременно с этим, если рукоятка командоконтроллера находится в нулевой (средней) позиции и максимально-токовые реле *FA*1—*FA*3 не включены, включится реле защиты *KV* от понижения питающего напряжения и подготовит схему к работе.

Пуск двигателя осуществляется по любой из двух искусственных характеристик или естественной характеристике, для чего рукоятка *SA* должна устанавливаться соответственно в положение 1, 2 или 3. При переводе рукоятки в любое из указанных положений *SA* включаются линейный контактор *KM*2, подключающий двигатель к сети, контактор управления тормозом *KM*5, подключающий к сети катушку *YA* электромагнитного тормоза, который при этом растормаживает двигатель, и реле времени *KT*3, управляющее процессом динамического торможения. При переводе *SA* в положение 2 или 3 включаются контакторы ускорения *KM*3 и *KM*4 и двигатель начинает разгоняться.

Торможение двигателя происходит при переводе рукоятки *SA* в нулевое (среднее) положение. При этом отключатся контакторы *KM*2 и *KM*5 и включится контактор динамического торможения *KM*1, который подключит двигатель к источнику постоянного тока. В результате этого будет идти интенсивный процесс комбинированного (механического и динамического) торможения двигателя, которое закончится после отсчета реле *KT3* своей выдержки времени, соответствующей времени торможения.

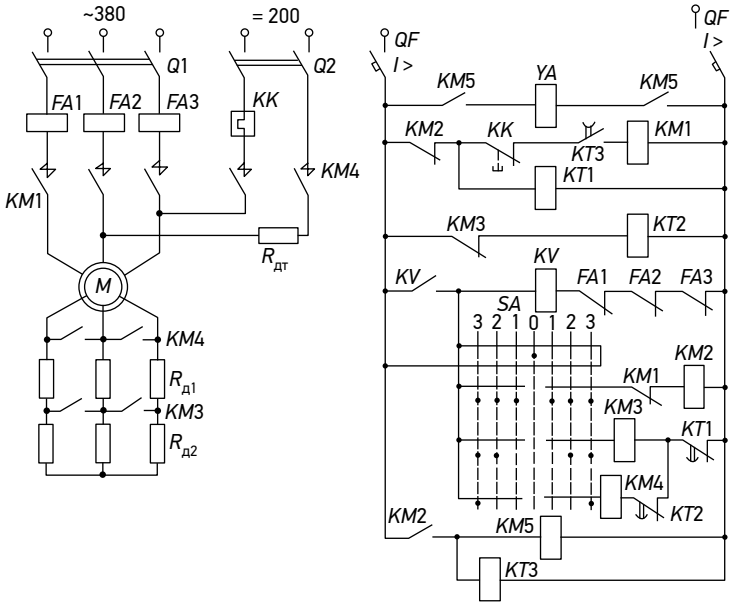


Рис. 8.2. Схема асинхронного электропривода
с использованием типовой панели управления

Контрольные вопросы

1. Как осуществляется регулирование скорости изменением активного и индуктивного сопротивлений?
2. Дайте схему автотрансформаторного способа регулировки скорости.
3. В чем принцип тиристорного способа регулирования скорости?
4. В чем состоит способ регулирования скорости изменением частоты питающего напряжения?

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

9. Регулирование скорости асинхронных двигателей в каскадных схемах

Схемы управления двигателя с использованием тиристорных пусковых устройств. Эффективным методом формирования желаемых графиков изменения тока и момента двигателя в переходных режимах является регулирование напряжения на его статоре с помощью тиристорных пусковых устройств (ТПУ). Чаще всего это делается для ограничения тока и момента двигателя при пуске («мягкий» способ пуска), хотя с помощью этих устройств можно обеспечить и повышение момента двигателя при пуске («жесткий» способ пуска).

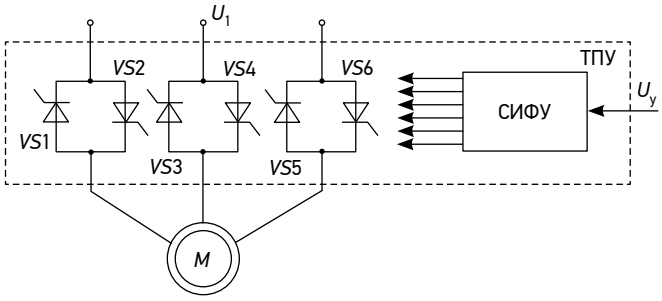


Рис. 9.1. Схема асинхронного электропривода с тиристорным пусковым устройством

Упрощенная схема электропривода, иллюстрирующая этот метод, приведена на рис. 9.1. Тиристорное пусковое устройство включается между источником питания (сетью переменного тока) с напряжением U_1, и статором двигателя. В нереверсивном ТПУ его силовую часть образуют три пары встречно-параллельно включенных тиристоров $VS1-VS6$, управление которыми осуществляется

импульсами напряжения, поступающими на них от системы импульсно-фазового управления СИФУ. Ограничение тока и момента осуществляется за счет снижения подводимого к двигателю напряжения, что достигается соответствующим изменением во времени угла управления тиристорами. Напряжение при пуске может изменяться по различным законам — линейно нарастать от нуля до сетевого, быть пониженным в течение всего времени пуска или изменяться по так называемому бустерному варианту, при котором для облегчения пуска двигателя на него вначале подается скачком некоторое напряжение, которое затем продолжает нарастать уже по линейному закону. В замкнутой системе может быть обеспечено и поддержание тока статора на заданном уровне.

Добавление в схему рис. 9.2 еще двух пар тиристоров позволяет получить реверсивную схему управления двигателем, обеспечивающую возможность вращения двигателя в двух направлениях. На базе схемы ТПУ может быть обеспечено и динамическое торможение двигателя.

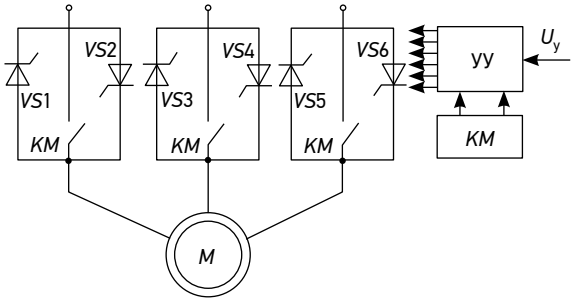


Рис. 9.2. Схема асинхронного электропривода
с гибридным тиристорным пусковым устройством

Дополнительными положительными свойствами обладают *гибридные* ТПУ, которые получаются добавлением в схему рис. 9.1 электромагнитного контактора, как это показано на рис. 9.2. В такой схеме тиристорная часть обеспечивает регулирование напряжения при пуске, а после его завершения включается контактор *КМ* и подключает двигатель к сети напрямую. Это повышает экономичность и надежность работы электропривода. В схеме тиристоры не имеют охладителей, а контактор — дугогасительных камер, что обусловливает их небольшие массу и габаритные размеры.

Схема квазичастотного регулирования скорости двигателя. На базе схемы рис. 9.1 может быть реализовано так называемое квазичастотное регулирование скорости двигателя. Схема, иллюстрирующая такое регулирование, показана на рис. 9.3. В ее состав входит блок квазичастотного управления БКЧУ, который с помощью схемы управления СИФУ обеспечивает периодическое подключение двигателя к источнику питания и его отключение. За счет изменения частоты и длительности интервалов включения и отключения двигателя могут быть получены механические характеристики, позволяющие регулировать скорость двигателя или его момент при пуске. Особенностью квазичастотного управления являются вибрации и шум при работе двигателя, а также повышенные потери мощности, что вызывает дополнительный нагрев двигателя и требует определенного завышения его мощности в случае регулирования скорости.

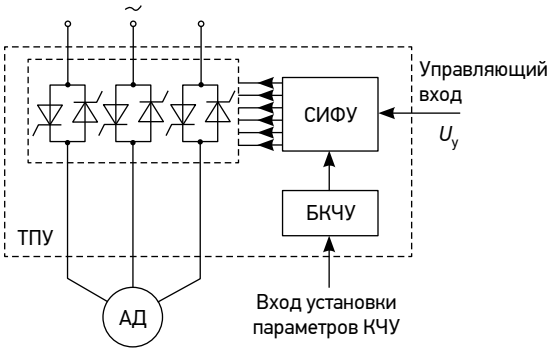


Рис. 9.3. Схема асинхронного электропривода
с квазичастотным управлением

Типовые узлы и схемы управления электроприводов с синхронными двигателями. Релейно-контакторные схемы управления синхронными двигателями, кроме обычных операций по включению и отключению (торможению) двигателя и ограничению пусковых токов, должны обеспечивать управление током возбуждения двигателей, имеющих обмотку возбуждения. При пуске применяются два способа такого управления: с «глухоподключенной» (постоянно включенной) обмоткой возбуждения и с подключением обмотки в конце пуска перед синхронизацией двигателя с сетью. Первый вариант характеризуется более простой схемой и исполь-

зуется при легких условиях пуска двигателя — небольших моментах и инерционных массах нагрузки электропривода. Второй вариант реализуется с помощью более сложной схемы управления, но зато может обеспечивать пуск двигателя при значительных моментах сопротивления и инерционности нагрузки электропривода.

Типовой узел управления током возбуждением двигателя в функции скорости. В этой схеме подключение обмотки возбуждения к источнику питания $U_В$ осуществляется контактором *KM*2 (рис. 9.4, *а*), который управляется реле скорости *KR*. Катушка реле связана с частью разрядного резистора $R_р$ через диод *VD*.

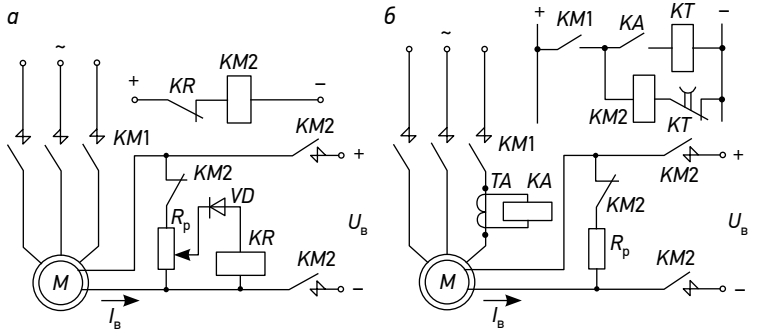


Рис. 9.4. Узлы схем управлением возбуждением синхронного двигателя:
а — с использованием принципа скорости, *б* — тока

При включении контактора *KM*1 (его цепи управления на рисунке не показаны) обмотка статора двигателя подключается к сети переменного тока и образует вращающееся магнитное поле, которое вызовет появление момента двигателя, под действием его он начнет разбег и наведет ЭДС в обмотке возбуждения двигателя. Под действием ЭДС по катушке реле *KR* начнет протекать выпрямленный ток, оно включится и разомкнет цепь питания контактора *KM*2. Тем самым разбег двигателя будет происходить без тока возбуждения с закороченной на разрядный резистор $R_р$ обмоткой возбуждения.

При подсинхронной скорости ток в катушке реле *KR* станет меньше тока отпускания, оно отключится и вызовет тем самым включение контактора *KM*2. Контактор *KM*2 подключит обмотку возбуждения к источнику питания, далее происходит процесс синхронизации двигателя с сетью.

Схема управления возбуждением двигателя в функции тока. Эта схема (рис. 9.4, *б*) содержит реле тока *KA*, обмотка которого питается от трансформатора тока *TA*, и реле времени *KT*. При подключении двигателя к сети контактором *KM*1 в цепи обмотки статора возникает бросок пускового тока, что приводит к срабатыванию реле *KA*. Контакт этого реле замыкает цепь питания реле времени *KT*, что вызовет отключение контактора возбуждения *KM*2. Разбег двигателя, как и в предыдущем случае, осуществляется с закороченной на разрядный резистор $R_р$ обмоткой возбуждения.

В конце пуска при подсинхронной скорости двигателя и уменьшении тока в статоре реле *KA* отключается и катушка реле времени *KT* теряет питание. Через заданную выдержку времени включается контактор *KM*2, через его контакты обмотка возбуждения подключается к источнику питания $U_В$, после чего двигатель втягивается в синхронизм.

Отметим, что в рассмотренных схемах после срабатывания контактора возбуждения *KM*2 разрывается цепь разрядного резистора $U_р$, что облегчает тепловой режим его работы и повышает экономичность схемы.

Электротехническая промышленность выпускает типовые панели и шкафы управления двигателя разных типов. Рассмотрим в качестве примера схему одной из таких панелей.

Схема панели типа ПУ 7502 управления двигателем низкого напряжения. Панель (рис. 9.5) обеспечивает прямой (без токоограничения) пуск с глухоподключенным источником питания обмотки возбуждения (возбудителем) *G* и форсировку возбуждения при снижении уровня питающего напряжения. В схеме предусмотрены также защиты: тепловая (реле *KK* и трансформаторы тока *TA*1 и *TA*2), токовая (автоматы *QF*1 и *QF*2), от снижения напряжения сети переменного тока (реле *KV*2, *KVJ*) и постоянного тока (реле *KV*1).

Пуск двигателя может быть осуществлен только при нормальных уровнях питающих схему напряжений постоянного и переменного тока. В этом случае, если рукоятка командоконтроллера *SA* находится в среднем положении и включены автоматы *QF*1 и *QF*2, срабатывают реле напряжения *KV*2, *KV*3 и реле времени *KT*, что подготавливает схему к пуску двигателя.

При переводе рукоятки *SA* в положение «Включено» срабатывает реле *KV*1 и катушка линейного контактора *KM*1 подключается к источнику питания, к обмотке статора двигателя подводится напряжение переменного тока, и тот начинает разбег. При под-

синхронной скорости происходит возбуждение возбудителя *G*, имеющего независимую (НОВ) и последовательную (ПОВ) обмотки возбуждения, и соответственно двигателя, который втягивается в синхронизм.

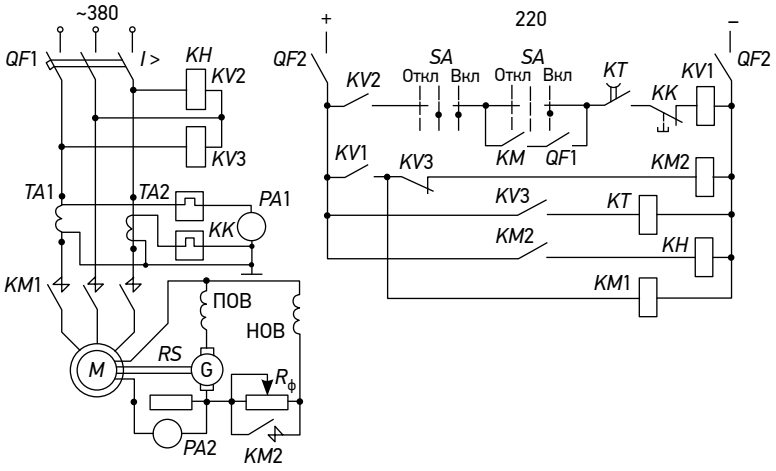


Рис. 9.5. Схема синхронного электропривода с использованием типовой панели управления

Схема управления обеспечивает увеличение (форсирование) тока возбуждения двигателя при резком снижении питающего напряжения, что позволяет сохранять максимальный момент двигателя и тем самым его перегрузочную способность. При нормальном уровне питающего напряжения реле напряжения *KV*3 включено, цепь катушки контактора *KM*2 разомкнута и резистор форсировки $R_ф$ введен в цепь тока возбуждения двигателя.

При резком снижении напряжения реле *KV*3 отключается, замыкает цепь катушки контактора форсировки *KM*2, который включается и своим контактом шунтирует резистор $R_ф$, вызывая тем самым увеличение тока возбуждения двигателя. О включении *KM*2 сигнализирует указательное реле *KH*.

Для контроля тока статора двигателя в схеме предусмотрен амперметр *PA*1, а тока возбуждения двигателя — амперметр *PA*2, питаемый от шунта *RS*.

Контрольные вопросы

1. Назначение каскадных схем.
2. Дайте схемные решения и объясните принцип функционирования каскадных схем.
3. Приведите механические характеристики регулировки скорости в каскадных схемах.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

10. Электропривод на шаговом двигателе. Конструкция шагового двигателя и принцип работы. Управление шаговым приводом

Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В электроприводах таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели (ШД) различных типов, образующие основу дискретного электропривода. Дискретный электропривод используется для металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), роботов и манипуляторов, в гибком автоматизированном производстве, электронной и часовой промышленности, газорезательных и сварочных автоматах, приборах времени, нажимных устройствах прокатных станов, лентопротяжных и регистрирующих устройствах, в медицинской технике, в производстве элементов микроэлектроники и т.д.

Распространение дискретного электропривода определяется еще и тем, что он естественным образом сочетается с микропроцессорными средствами управления, которые все шире применяются во всех отраслях техники.

Электропривод с ШД в настоящее время используется на мощности от долей ватта до нескольких киловатт, что определяется мощностью серийно выпускаемых ШД. Расширение шкалы мощности дискретного ЭП может быть достигнуто использованием в нем серийных АД, которые за счет соответствующего управления могут работать в шаговом режиме.

Шаговый двигатель по принципу своего действия является синхронным двигателем. Однако в отличие от последнего магнитное поле ШД перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно,

шагами. Это достигается за счет импульсного возбуждения обмоток ШД с помощью электронного коммутатора, который преобразует одноканальую последовательность управляющих импульсов в многофазную систему напряжений, прикладываемых к обмоткам (фазам) ШД.

Дискретному характеру напряжения на фазах ШД соответствует дискретное вращение (перемещение) электромагнитного поля в воздушном зазоре, вследствие чего движение ротора состоит из последовательных элементарных поворотов, или шагов.

Угловое перемещение α ШД в общем случае определяется выражением $\alpha = 2\pi(pn)$, где p — число пар полюсов ротора; n — число переключений (тактов) в цикле, равное числу фаз ШД при симметричной и удвоенному числу фаз при несимметричной коммутации.

Как видно, шаговое перемещение ротора соответствует последовательности управляющих импульсов, при этом каждому импульсу соответствует одно переключение обмотки ШД (один такт коммутации) и один шаг ротора. Суммарный угол поворота ШД пропорционален числу импульсов, а его скорость — частоте коммутации обмоток f_k: $\omega = \alpha f_k$.

Для реверса ШД при симметричной схеме коммутации необходимо изменить полярность напряжения обмотки, которая была отключена на данном такте коммутации. Тогда ротор ШД совершит шаг в противоположном направлении.

Основным режимом работы шагового привода является динамический. В отличие от обычного синхронного двигателя, ШД рассчитаны на вхождение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение. Благодаря этому в шаговом электроприводе обеспечивается пуск, торможение, реверс и переход с одной частоты управляющих импульсов на другую. Пуск ШД осуществляется скачкообразным или постепенным увеличением частоты входного сигнала от нуля до рабочей, торможение — снижением ее до нуля, а реверс — изменением последовательности коммутации обмоток ШД.

Обеспечение заданного характера переходных процессов является для электропривода с ШД основной и наиболее сложной задачей, так как вследствие электромагнитной инерции обмоток ТТТД, механической инерции его ротора и момента нагрузки на валу при резких изменениях частоты следования импульсов управления ротор ШД может не успеть отработать полностью все импульсы. Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД из неподвижного состояния без выпадения из син-

хронизма (пропуска шагов), называется частотой приемистости. Чем выше электромагнитная и механическая инерция ШД и больше момент его нагрузки, тем меньше частота приемистости.

Современные ШД различны по конструктивному исполнению. В зависимости от числа фаз и устройства магнитной системы ШД бывают одно-, двух- и многофазными с активным или пассивным ротором.

Развитие дискретного электропривода привело к созданию специальных видов ШД — линейных, волновых, с малоинерционным и катящимся роторами.

На базе цилиндрических линейных ШД созданы двухкоординатные линейно-поворотные ТТТД, суммирующие на своем валу два независимых движения — вращательное и поступательное.

Важным достижением в области дискретного электропривода является создание так называемых многокоординатных ШД, осуществляющих перемещение исполнительных органов по трем координатам в пространстве. Двигатели такого рода, отличаясь высокой точностью позиционирования и скоростью, используются в приводах манипуляторов, роботов и автоматических линиях станков.

Обобщенная функциональная схема регулируемого электропривода с ШД показана на рис. 10.1. Основная ее часть, обычно называемая разомкнутой схемой, выделена штриховой линией.

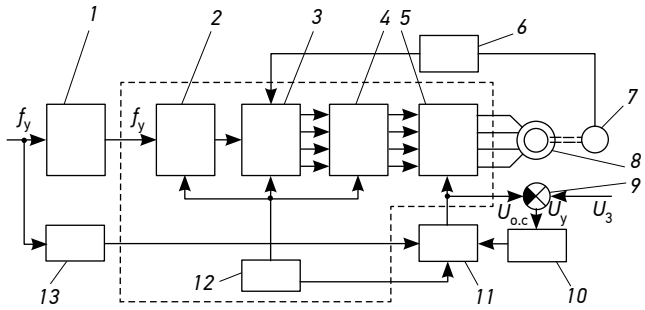


Рис. 10.1. Схема электропривода с шаговым двигателем

Сигнал управления f_y в виде импульсов напряжения поступает на вход блока *2* от программного или другого внешнего командного устройства. Блок *2* видоизменяет эти импульсы, формируя их по длительности и амплитуде, как необходимо для нормальной работы последующих блоков схемы управления. Распределитель импульсов *3* преобразует последовательность сформированных

импульсов, например, в четырехфазную систему однополярных импульсов напряжения, соответствующую числу фаз (обмоток) двигателя.

Импульсы с выхода распределителя *3* усиливаются с помощью промежуточного усилителя *4* и поступают на коммутатор *5*, питающий обмотки ШД *8*. Обычно коммутатор питается от источника *12* постоянного тока (выпрямителя) и обеспечивает в обмотках ШД пульсирующий ток одного направления.

Рассмотренная разомкнутая схема управления ШД не всегда обеспечивает высокие динамические свойства, точность и энергетические показатели электропривода. Поэтому современные схемы управления ШД содержат дополнительные узлы, с помощью которых характеристики электропривода улучшаются. К таким узлам (рис. 4.14) относятся частотно-импульсный регулятор напряжения *11*, усилитель обратной связи по току *10*, блок электронного дробления шага *13*, блок плавного разгона и торможения (задатчик интенсивности) *1*, датчик положения ротора и скорости 7 и цифровой регулятор *6*.

Регулятор *11* и усилитель *10*, связанные с узлом сравнения *9*, служат для автоматической стабилизации тока в обмотках ШД и поддержания момента ШД, что существенно улучшает энергетические показатели его работы. Стабилизация тока осуществляется введением отрицательной обратной связи по току, с помощью которой за счет регулирования частоты переключения регулятора *11* (частотно-импульсная модуляция) изменяется среднее значение напряжения питания и тем самым регулируется ток в обмотках ШД.

Та же задача формирования тока в обмотках ШД решается при использовании коммутатора *5*, обладающего свойствами источника тока. В этом случае отпадает надобность в обратной связи по току и блоках *10* и *11*.

Для улучшения качества движения ШД при низких частотах и повышения точности отработки входных импульсов управления с помощью блока *13* уменьшается единичный шаг ШД.

Улучшение динамических свойств дискретного ШД, в частности увеличение диапазона рабочих частот входного сигнала, значительно превышающих частоту приемистости ШД, может быть достигнуто введением в схему блока *1*, обеспечивающего разгон и торможение ШД с заданным темпом, при котором еще не происходит пропуска управляющих импульсов. При использовании блока *1* область рабочих частот шагового электропривода может быть увеличена в 2–3 раза.

Возможности дискретного электропривода расширяются при создании замкнутых схем управления, выполняемых с помощью датчика *7* и регулятора *6.* В таком дискретном приводе информация о действительном положении вала и скорости ШД поступает на вход цифрового регулятора *6*, который обеспечивает заданный характер движения привода.

Перспективы дальнейшего развития электропривода с ШД связаны с использованием микропроцессорных средств управления. В этом случае функции всех показанных на рис. 10.1 блоков управления, за исключением силового коммутатора, датчиков скорости и положения, выполняет микропроцессор по соответствующей программе.

Контрольные вопросы

1. Конструктивные особенности шагового двигателя.
2. Принцип работы шагового двигателя.
3. Дайте функциональную схему системы управления приводом на шаговом двигателе.
4. Фазоимпульсные и шагоимпульсные системы управления.
5. Особенности структурных решений системы управления шаговым приводом.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.

11. Управление приводом в разомкнутых системах. Автоматическое управление пуском и торможением

К разомкнутым относятся схемы управления электропривода, в которых не используются обратные связи по его координатам или технологическим параметрам. Тем самым управление в таких схемах осуществляется без контроля за фактическим изменением регулируемых координат, т.е. без учета результатов управления. Эти схемы, отличаясь простотой реализации, используются в тех случаях, когда не требуется высокое качество управления движением электроприводов, в частности для пуска, реверса и торможения двигателей и при невысоких требованиях к точности и диапазону регулирования переменных (координат) двигателей.

В таких схемах управления в основном используются релейно-контакторная аппаратура и полупроводниковые коммутационные аппараты (бесконтактные пускатели).

Автоматизация работы этих схем осуществляется за счет использования информации о времени, токе, скорости или ЭДС двигателей и положении их вала, которая получается от соответствующих датчиков или самого двигателя. Тот или иной вид используемой при автоматизации работы схемы информации определяет *принципы управления,* к которым относятся принципы времени, тока, скорости, ЭДС и положения (пути). Часто в разомкнутых схемах используется сочетание принципов управления: например, пуск двигателя осуществляется по принципу времени, а его торможение — по принципу ЭДС или скорости.

Разомкнутые схемы применяются и для регулирования скорости при невысоких требованиях к качеству регулирования. Силовая часть таких электроприводов строится по структуре «управляемый

преобразователь — двигатель», а задача регулирования (ограничения) тока и момента двигателей в переходных процессах решается за счет включения в схему управления дополнительного устройства, называемого задатчиком интенсивности. Это устройство, обеспечивая плавное изменение в переходных процессах управляющего воздействия на двигатель (напряжения, его частоты или того и другого) по линейному или экспоненциальному законам, обеспечивает формирование требуемых графиков координат (переменных) электропривода.

Разомкнутые схемы, кроме функций управления, обеспечивают защиту электроприводов, питающей сети и технологического оборудования при возникновении различных аномальных режимов — коротких замыканиях, перегрузке двигателей, исчезновении питающего напряжения или обрыве фазы питающей сети, а также соответствующую сигнализацию. Для этого они содержат аппараты и устройства, находящиеся во взаимодействии с устройствами управления двигателями. Такие схемы управления, защиты и сигнализации серийно выпускаются электротехнической промышленностью в виде панелей, шкафов и блоков управления и других подобных комплектных устройств.

Схема управления асинхронным двигателем, обеспечивающая прямой пуск в функции времени. Пуск двигателя осуществляется нажатием кнопки *SB*1 (рис. 11.1), после чего срабатывает линейный контактор *KM*, подключающий двигатель к источнику питания. Одновременно с этим замыкание контакта *KM* в цепи реле времени *KT* вызовет его срабатывание и замыкание его контакта в цепи контактора торможения *KM*1. Однако последний не срабатывает, так как перед этим разомкнулся в этой цепи размыкающий контакт *KM*.

Для остановки двигателя нажимается кнопка *SB*3. Контактор *KM* отключается, размыкая свои контакты в цепи статора двигателя и отключая тем самым его от сети переменного тока. Одновременно с этим замыкается контакт *KM* в цепи аппарата *KM*1 и размыкается контакт *KM* в цепи реле *KT*. Это приводит к включению контактора торможения *KM*, подаче в обмотки статора постоянного тока от выпрямителя *V* через резистор $R_{\text{Т}}$ и переводу двигателя в режим динамического торможения.

Реле времени *KT*, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени. Через интервал времени, соответствующий времени останова двигателя, реле *KT* размыкает свой контакт в цепи кон-

тактора *KM*1, тот отключается, прекращая подачу постоянного тока в цепь статора. Схема возвращается в исходное положение.

Интенсивность динамического торможения регулируется резистором $R_т$, с помощью которого устанавливается необходимый постоянный ток в статоре двигателя.

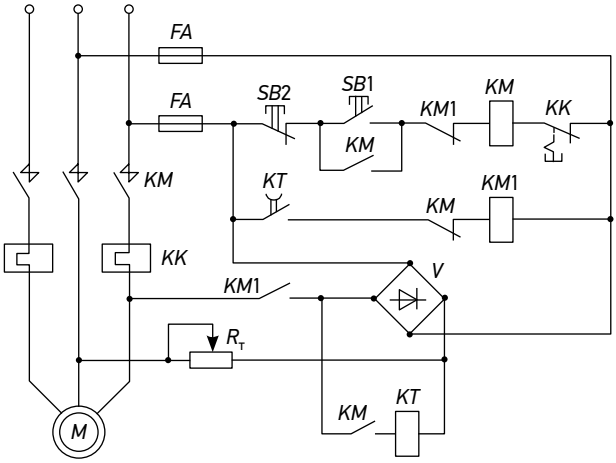


Рис. 11.1. Схема управления пуском асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Для исключения возможности одновременного подключения статора к источникам переменного и постоянного тока в схеме использована типовая блокировка с помощью размыкающих контактов *KM* и *KM*1, включенных перекрестно в цепи катушек этих аппаратов.

Схема пуска двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением по принципу тока. В схеме (рис. 11.2) используется реле тока *KA*, катушка которого включена в цепь якоря *M*, а размыкающий контакт — в цепь питания контактора ускорения *KM*2. Реле тока настраивается таким образом, чтобы его ток отпускания соответствовал току T_2. В схеме используется также дополнительное блокировочное реле $KV_с$ временем срабатывания большим, чем у реле *KA*.

Работа схемы при пуске происходит следующим образом. После нажатия на кнопку *SB*1 срабатывает контактор *KM*1, двигатель подключается к источнику питания и начинает свой разбег. Бро-

сок тока в якорной цепи после замыкания главного контакта контактора *КМ*1 вызовет срабатывание реле тока *КА,* которое разомкнет свой размыкающий контакт в цепи контактора *КМ*2. Через некоторое время после этого срабатывает *КУ* и замыкает свой замыкающий контакт в цепи контактора *КМ*2, подготавливая его к включению.

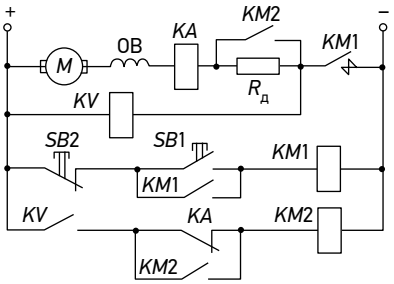


Рис. 11.2. Схема пуска двигателя по принципу тока

По мере разбега двигателя ток якоря снижается до значения тока переключения I_2. При этом токе отключается реле тока и замыкает свой размыкающий контакт в цепи катушки контактора *КМ*2. Последний срабатывает, его главный контакт закорачивает пусковой резистор $R_Д$ в цепи якоря, а вспомогательный контакт шунтирует контакт реле тока *КА*. Поэтому вторичное включение реле тока *КА* после закорачивания $R_Д$ и броска тока не вызовет отключения контактора *КМ*2; двигатель продолжит разбег по своей естественной характеристике.

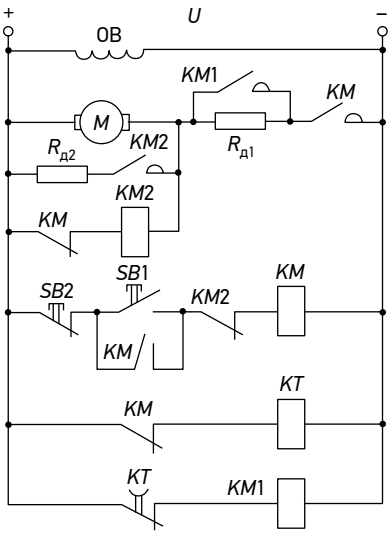


Рис. 11.3. Схема пуска двигателя по принципу времени и динамического торможения по принципу ЭДС

Схема пуска двигателя в одну ступень по принципу времени и динамического торможения по принципу ЭДС. Управление двигателем при пуске происходит по аналогии со схемой рис. 11.1. При включении двигателя в этой схеме (рис. 11.3) и работе от источника питания размыкающий контакт линейного контактора *KM* в цепи контактора торможения *KM*2 разомкнут, что предотвращает перевод двигателя в режим торможения.

Торможение осуществляется нажатием кнопки *SB*2. Контактор *KM*, потеряв питание, отключает якорь двигателя от источника питания и замыкает своим контактом цепь питания катушки контактора *KM*2. Последний от действия наведенной в якоре ЭДС срабатывает и замыкает якорь *M* на резистор торможения $R_{Д2}$. Процесс динамического торможения происходит до тех пор, пока при небольшой скорости двигателя его ЭДС не станет меньше напряжения отпускания контактора *KM*2. Тот отключится, и схема вернется в исходное положение.

Схема одноступенчатого пуска асинхронного двигателя в функции времени и торможения противовключением в функции ЭДС. После подачи напряжения включается реле времени *KT* (рис. 11.4), которое своим размыкающим контактом разрывает цепь питания контактора *KM*3, предотвращая тем самым его включение и преждевременное закорачивание пусковых резисторов в цепи ротора.

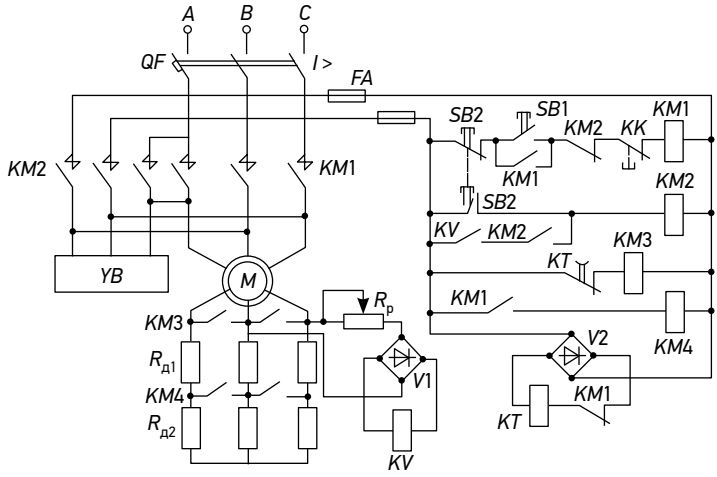


Рис. 11.4. Схема управления пуском и торможением противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором

Включение двигателя производится нажатием кнопки *SB*1, после чего включается контактор *KM*1. Статор двигателя подсоединяется к сети, электромагнитный тормоз *YB* растормаживается, и начинается разбег двигателя. Включение *KM*1 одновременно приводит к срабатыванию контактора *KM*4, который своим контактом шунтирует ненужный при пуске резистор противовключения $R_{Д2}$, а также разрывает цепь катушки реле времени *KT*. Последнее, потеряв питание, начинает отсчет выдержки времени, после чего замыкает свой контакт в цепи катушки контактора *KM*3, который срабатывает и шунтирует пусковой резистор $R_{Д1}$ в цепи ротора, и двигатель выходит на свою естественную характеристику.

Управление торможением обеспечивает реле торможения *KV*, контролирующее уровень ЭДС (скорости) ротора. С помощью резистора $R_р$ оно отрегулировано таким образом, что при пуске, когда скольжение двигателя $0 < s < 1$, наводимая в роторе ЭДС будет недостаточна для включения, а в режиме противовключения, когда $1 < s < 2$, уровень ЭДС достаточен для его включения.

Для осуществления торможения двигателя нажимается сдвоенная кнопка *SB*2, размыкающий контакт которой разрывает цепь питания катушки контактора *KM*1. После этого двигатель отключается от сети и разрывается цепь питания контактора *KM*4 и замыкается цепь питания реле *KT*. В результате этого контакторы *KM*3 и *KM*4 отключаются и в цепь ротора двигателя вводится сопротивление $R_{Д1} + R_{Д2}$.

Нажатие кнопки *SB*2 приводит одновременно к замыканию цепи питания катушки контактора *KM*2, который, включившись, вновь подключает двигатель к сети, но уже с другим чередованием фаз сетевого напряжения на статоре. Двигатель переходит в режим торможения противовключением. Реле *KV* срабатывает и после отпускания кнопки *SB*2 будет обеспечивать питание контактора *KM*2 через свой контакт и замыкающий контакт этого аппарата.

В конце торможения, когда скорость будет близка к нулю и ЭДС ротора уменьшится, реле ЛТК отключится и своим размыкающим контактом разомкнет цепь катушки контактора *KM*2. Последний, потеряв питание, отключит двигатель от сети, и схема придет в исходное положение. После отключения *KM*2 тормоз *YB*, потеряв питание, обеспечит фиксацию (торможение) вала двигателя.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип пуска двигателя в функции скорости?
2. Дайте схему автоматического пуска двигателя в функции тока.
3. Как осуществляется автоматический пуск двигателя в функции времени?
4. Контактные и бесконтактные способы автоматического управления пуском.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

12. Автоматическое управление приводом в замкнутых системах

Замкнутая схема «*тиристорный регулятор напряжения — асинхронный двигатель*» (ТРН-АД) с использованием обратной связи по его скорости (рис. 12.1, *а*). Силовую часть ТРИ образуют три пары встречно-параллельно соединенных тиристоров *VS*1–*VS*6.

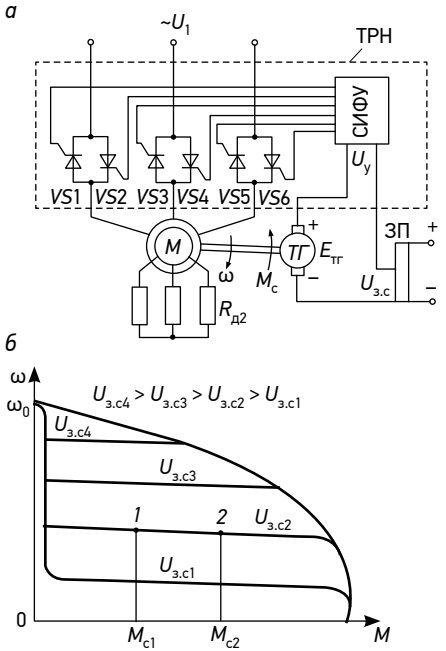


Рис. 12.1. Замкнутая система асинхронного электропривода с использованием тиристорного регулятора напряжения:
а — схема, *б* — характеристики

Управляющие электроды тиристоров подсоединены к выходам СИФУ ТРН, которая распределяет управляющие импульсы на все тиристоры и осуществляет их сдвиг в зависимости от входного сигнала управления $U_{\text{у}}$. К валу двигателя, который в этой схеме имеет фазный ротор, для реализации обратной связи по скорости подсоединен тахогенератор ТГ. Его ЭДС $E_{\text{ТГ}}$ сравнивается с задающим напряжением скорости $U_{\text{з.с}}$, снимаемым с задающего потенциометра ЗП, причем эти напряжения действуют навстречу друг другу, а их разность образует сигнал управления

$$U_{\text{у}} = U_{\text{з.с}} - E_{\text{ТГ}} = U_{\text{з.с}} - \gamma\omega,$$

который поступает на вход СИФУ. При увеличении сигнала угол управления тиристорами уменьшается, подаваемое на двигатель напряжение увеличивается, и наоборот. Важно отметить, что при снижении скорости двигателя в цепи ротора увеличиваются потери мощности (потери скольжения), которые вызывают дополнительный нагрев двигателя, снижая экономичность работы электропривода. Для облегчения теплового режима двигателя при его работе на пониженных скоростях в цепь ротора двигателя включен добавочный резистор $R_{\text{Д2}}$, наличие которого позволяет также расширить диапазон регулирования скорости.

Рассмотрим работу электропривода при изменении момента нагрузки $M_{\text{с}}$ на валу двигателя и постоянном задании скорости $U_{\text{з.с.2}}$. Допустим, что в исходном положении двигатель работал в т. *1* при моменте нагрузки $M_{\text{с1}}$ (рис. 12.1, *б*), а затем произошло его увеличение до значения $M_{\text{с2}}$.

При увеличении нагрузки на валу двигателя его скорость начнет снижаться, соответственно начнет уменьшаться и ЭДС тахогенератора $E_{\text{ТГ}}$. Уменьшение $E_{\text{ТГ}}$ вызывает увеличение напряжения управления $U_{\text{у}}$, что приведет к уменьшению угла управления тиристорами α и увеличению тем самым подаваемого на двигатель напряжения. Момент двигателя будет увеличиваться и в т. *2* сравняется с $M_{\text{с2}}$. Таким образом, увеличение момента нагрузки привело к небольшому снижению скорости двигателя.

При уменьшении момента нагрузки $M_{\text{с}}$ будет автоматически снижаться напряжение на двигателе и тем самым поддерживаться его скорость вращения на заданном уровне.

Изменяя с помощью потенциометра ЗП значение задающего напряжения $U_{\text{з.с.}}$, можно получить ряд механических характери-

стик электропривода с относительно высокой жесткостью и необходимой перегрузочной способностью двигателя.

Используя уравнения связи выходного U_1 и входного управляющего $U_у$ напряжений ТРН

$$U_1 = k_{т.р.н} U_у,$$

а также момента двигателя и приложенного к нему напряжения в относительной форме

$$M^* = \frac{M}{M_{ном}} = U_1^* = \frac{U_1}{U_{1ном}},$$

получаем после несложных преобразований

$$\gamma = \frac{U_{1ном}(\sqrt{M_{с2}^*} - \sqrt{M_{с1}^*})}{k_{т.р.н}\Delta\omega};$$

где перепад скорости $\Delta\omega$ соответствует изменению момента нагрузки в пределах $M_{с2}$—$M_{с1}$.

Если в схеме рис. 12.1, *а* используется усилитель сигнала $U_у$ (пропорциональный регулятор скорости) с коэффициентом усиления $k_у$, то последняя формула принимает следующий вид:

$$\gamma = \frac{U_{1ном}(\sqrt{M_{с2}^*} - \sqrt{M_{с1}^*})}{k_{т.р.н} k_у \Delta\omega}.$$

Замкнутая схема импульсного регулирования скорости АД с помощью резистора в цепи ротора. В схеме электропривода (рис. 12.2, *а*) с импульсным регулированием сопротивления в цепи выпрямленного тока ротора для получения жестких характеристик использована отрицательная обратная связь по скорости двигателя.

В роторную цепь двигателя включен неуправляемый трехфазный выпрямитель В, к выходу которого подключен резистор $R_{Д2}$. Параллельно резистору включен управляемый ключ, выполняемый, как правило, на основе полупроводниковых приборов.

Управление ключом происходит от широтно-импульсного модулятора ШИМ, на вход которого поступают сигналы задания $U_{з.с}$ и обратной связи $U_{о.с}$ по скорости. При поступлении на вход блока ШИМ сигнала ошибки $U_у = U_{з.с} - U_{о.с}$ он начинает генерировать импульсы управления. Эти импульсы с помощью схемы

управления ключом *СУК* распределяются по полупроводниковым приборам ключа и вызывают периодическое включение и закорачивание резистора $R_{Д2}$.

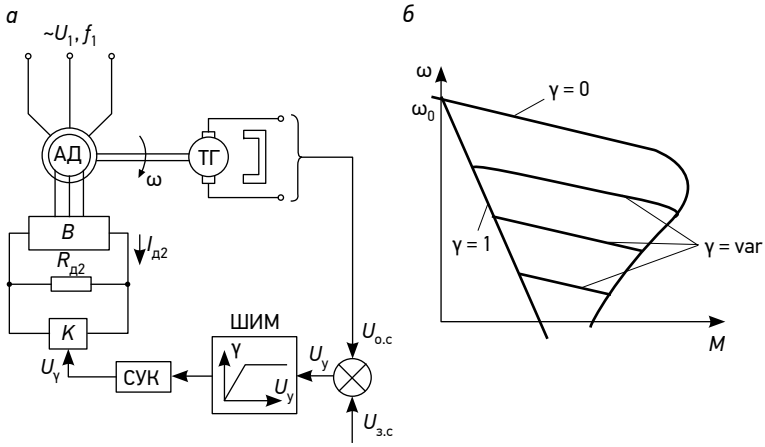


Рис. 12.2. Замкнутая система асинхронного электропривода с импульсным регулированием сопротивления в роторной цепи: *а* — схема, *б* — характеристики

Принцип получения жестких характеристик ЭП соответствует рассмотренному выше механизму действия обратной связи по скорости и состоит в следующем. Допустим, что двигатель работает в установившемся режиме при каком-то заполнении (скважности) ключа K и соответствующем эквивалентном сопротивлении цепи ротора. Пусть по каким-то причинам произошло увеличение момента нагрузки двигателя, в результате чего начнет снижаться его скорость. Тогда для сигнала управления $U_{у}$ он начнет повышаться, что вызовет увеличение заполнения работы ключа K и уменьшение тем самым эквивалентного сопротивления в цепи ротора $R_2 = (1 - \gamma)R_{Д2}$. Это, в свою очередь, приведет к увеличению тока в роторе и момента двигателя и прекращению снижения скорости, что соответствует жестким характеристикам электропривода, показанным на рис. 12.2, *б*. В схеме может быть достигнуто регулирование (ограничение) тока и момента, для чего она должна быть дополнена контуром регулирования тока. В этом случае механические характеристики имеют вертикальный участок, соответствующий заданному уровню ограничения тока и момента.

Следует отметить, что работа этого электропривода, как и в случае использования ТРН, характеризуется при регулировании скорости двигателя увеличением в цепи ротора потерь мощности, пропорциональных скольжению, что должно учитываться при выборе двигателя и добавочного резистора.

Замкнутые ЭП с использованием преобразователей частоты. В общем случае частотное управление двигателя, реализуемое с помощью преобразователей частоты, может быть осуществлено по трем вариантам:

— параметрическое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение подаваемого на двигатель напряжения;
— частотно-токовое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение тока двигателя;
— векторное управление, связанное с регулированием мгновенных значений питающих напряжений и токов с целью формирования электромагнитного момента двигателя нужной величины.

Замкнутый электропривод с параметрическим частотным управлением. С использованием этого принципа построены многие частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. В них за счет различных обратных связей и функциональных блоков формируются жесткие рабочие участки механических характеристик двигателя для качественного регулирования его скорости, ограничиваются ток и момент и обеспечивается требуемое соотношение между регулируемыми частотой и напряжением.

Обобщенная схема такого электропривода представлена на рис. 12.3, *а*.

В качестве силового преобразователя применяется преобразователь частоты со звеном постоянного тока, состоящий из неуправляемого выпрямителя В и инвертора напряжения, выполненного на шести силовых модулях, состоящих из транзистора и диода. Между выпрямителем и инвертором включен фильтр, состоящий из реактора L и конденсатора C, обеспечивающий сглаживание выходного напряжения выпрямителя и необходимую циркуляцию реактивной энергии в силовой части схемы.

Инвертор работает в режиме широтно-импульсной модуляции и преобразует нерегулируемое напряжение постоянного тока

на выходе фильтра в регулируемое по частоте и амплитуде напряжение на статоре двигателя *М*. Силовая схема электропривода нереверсивная и не предусматривает электрического торможения.

Управление инвертором осуществляется сигналами f_y и U_y, определяющими значения выходных частоты и напряжения преобразователя частоты. Формирование этих сигналов осуществляется схемой управления, в состав которой входят регулятор скорости РС, регулятор тока РТ, датчики скорости ТГ и тока ДТ, суммирующие усилители (пропорциональные регуляторы) $\sum_1$ и $\sum_2$; блок ограничения БО сигнала РС, функциональный преобразователь ФП, задатчик интенсивности ЗИ.

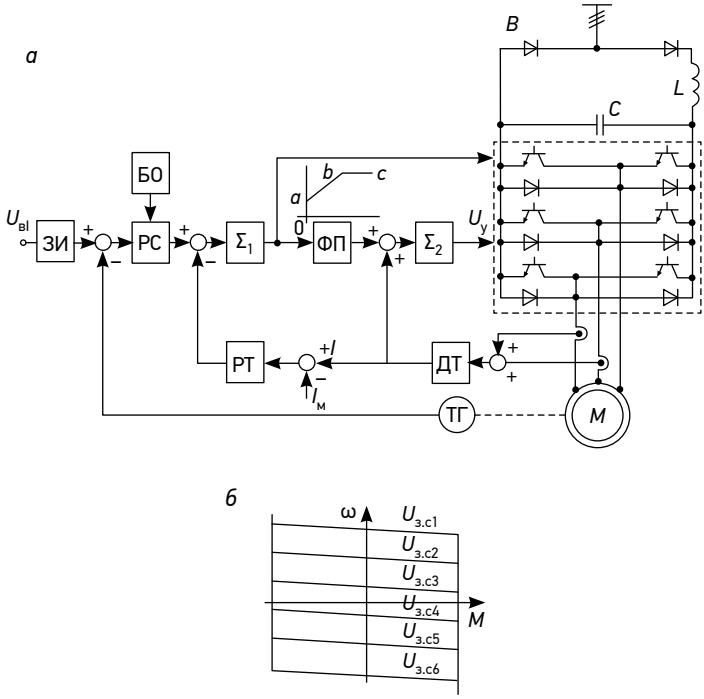


Рис. 12.3. Асинхронный электропривод при частотном управлении: *а* — схема, *б* — характеристики

Регулятор скорости РС в совокупности с задатчиком интенсивности ЗИ и сумматором $\sum_1$ обеспечивают требуемое регулирование скорости и ускорения двигателя в установившемся и переходных режимах работы электропривода с помощью сигнала f_y.

Ограничение тока статора и момента двигателя производится регулятором тока РТ, когда ток статора двигателя меньше тока уставки $I_м$, сигнал на выходе РГ равен нулю и схема управления обеспечивает режим поддержания заданной скорости. Когда ток статора превысит уставку тока $I_м$, резко увеличивается сигнал на выходе РТ, из-за чего резко снижается и сигнал на выходе сумматора $\sum_1$. Это приводит к уменьшению частоты и напряжения на статоре двигателя и тем самым к ограничению тока статора и момента двигателя.

Функциональный преобразователь ФП, характеристика которого в виде ломаной линии 0*abc* показана над его условным изображением на рис. 12.3, *а*, обеспечивает требуемое соотношение между частотой и выходным напряжением преобразователя частоты. Отрезком 0*a* создается начальное напряжение на выходе преобразователя, необходимое для преодоления падения напряжения на обмотке статора двигателя при малых частотах напряжения. Участок *ab* обеспечивает пропорциональное изменение частоты и напряжения (закон частотного управления $U/f = \text{const}$), при котором магнитный поток двигателя поддерживается постоянным. На участке *bc* величина напряжения на статоре остается неизменной, хотя при этом его частота может увеличиваться.

Для уменьшения влияния падения напряжения в цепи статора на величину магнитного потока двигателя и тем самым на его момент в схеме предусмотрена положительная обратная связь по току (так называемая *IR*-компенсация), сигнал которой поступает на вход сумматора $\sum_2$. При увеличении нагрузки двигателя возрастает его ток и увеличивается сигнал $U_у$, за счет чего возрастает выходное напряжение преобразователя, тем самым компенсируется падение напряжения в обмотке статора.

В современных электроприводах этого типа реализация блоков управления схемы рис. 12.3, *а* осуществляется с использованием микропроцессорных средств, а настройка их параметров и характеристик производится программным путем. Получаемые в этой схеме механические характеристики двигателя при различных сигналах задания скорости $U_{з.с}$ показаны на рис. 12.3, *б*.

В ряде случаев требуемое регулирование скорости может быть получено и в разомкнутой схеме без обратной связи по скорости. В этом случае в схеме отсутствуют РС и ТГ, а сигнал с выхода ЗИ непосредственно поступает на вход сумматора $\sum_1$; во всем остальном схема остается без изменения.

Схема частотно-токового управления АД. Схема электропривода представлена на рис. 12.4. Тиристоры *VS*1—*VS*6 образуют схему управляемого выпрямителя УВ, а тиристоры *VS*7–*VS*12 — схему автономного инвертора тока АИТ. Между этими блоками включен реактор *L* большой индуктивности с тем, чтобы придать инвертору свойства источника тока. Конденсаторы *C*1–*C*6 с диодами *VD*1–*VD*6 образуют цепи искусственной коммутации тиристоров *VS*7–*VS*12. Остальные элементы схемы имеют следующее назначение: СУВ и СУИ — схемы управления тиристорами выпрямителя и инвертора; РТ, ДТ — соответственно регулятор и датчик тока статора; ДС — датчик скорости; УО — усилитель-ограничитель; ФП — функциональный преобразователь. Схема работает следующим образом.

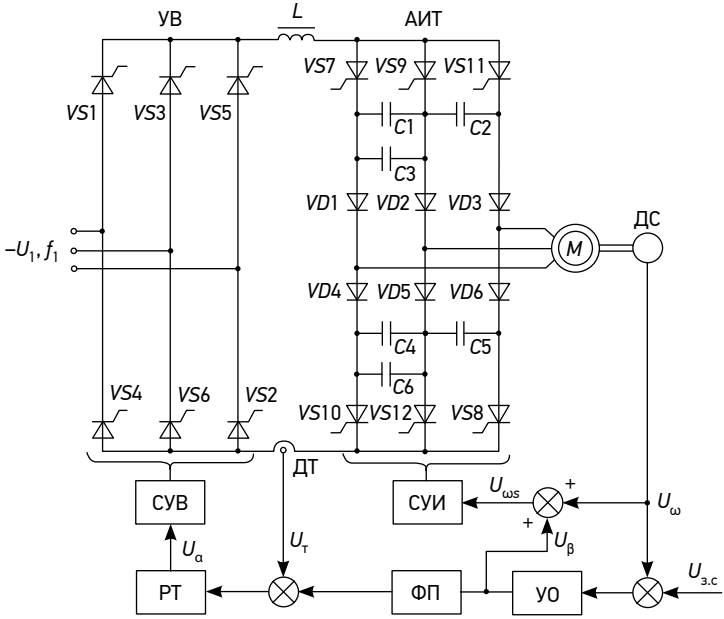


Рис. 12.4. Схема асинхронного электропривода при частотно-токовом управлении

Задающий сигнал $U_{з.с}$ задает частоту переключения тиристоров инвертора и тем самым частоту тока статора двигателя *M*. После вычитания из сигнала $U_{з.с}$ сигнала обратной связи по скорости U_{ω} получается сигнал U_{β}, пропорциональный относительной ча-

стоте ротора $\beta = f_1/f1_{ном}$ (величину β называют также абсолютным скольжением двигателя). Она связана со скольжением *s* двигателя следующим соотношением: $\beta = \alpha s$, где $\alpha = f_1/f1_{ном}$.

Сигнал U_β, пройдя через УО, вместе с сигналом U_ω поступает на вход СУИ. Частота на выходе инвертора определяется сигналом $U_{\omega s} = U_\omega + U_\beta$; СУИ настроена таким образом, что пока УО работает в линейной зоне, частота на выходе инвертора будет постоянной и независимой от нагрузки. Двигатель при этом имеет жесткие механические характеристики.

Сигнал U_β после прохождения через ФП является также сигналом для контура регулирования тока. Так как этот сигнал пропорционален абсолютному скольжению, то и ток двигателя при всех частотах будет ему пропорционален.

При резких изменениях задающего сигнала или при значительных перегрузках двигателя УО входит в зону ограничения (постоянства) своего выходного сигнала U_β, ограничивая тем самым на требуемом уровне и задание для тока. Двигатель при этом работает при любой скорости с постоянными значениями абсолютного скольжения и тока, т.е. механическая характеристика становится абсолютно мягкой.

В результате двигатель имеет характеристики, аналогичные показанным на рис. 12.4, *б*.

Схема позволяет осуществлять торможение двигателя с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть, для чего инвертор переводится в режим выпрямления, и выпрямитель — в режим инвертирования тока.

Схемы векторного управления асинхронными двигателями. При необходимости получения высокого качества и диапазонов регулирования переменных асинхронного электропривода в установившемся и переходных режимах применяются так называемые схемы векторного управления, в которых решение этих задач обеспечивается за счет формирования электромагнитного момента двигателя. Принцип формирования момента может быть показан следующим образом.

Уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя может иметь различные формы записи в зависимости от используемых в этих уравнениях переменных и выбранной системы координат для их представления. При построении систем векторного управления процессы в двигателе удобно рассматривать в системе координат $X - Y$, в которой ось X совпадает по направлению

с потокосцеплением ротора ψ_2 и вращается с его скоростью. В этом случае уравнение электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя имеет вид:

$$M = \frac{3pL_{12}\psi_2 i_{1y}}{2L_2};$$

где p — число пар полюсов двигателя; L_{12} — взаимоиндуктивность между статором и ротором; i_{1y} — составляющая тока статора по оси Y; L_2 — полная индуктивность ротора.

Так как составляющая тока статора i_{1y} по оси X определяет потокосцепление ротора ψ_2, то отсюда следует, что за счет регулирования i_{1x} и i_{ly} можно обеспечивать формирование момента двигателя. Составляющая i_{1x} может рассматриваться как намагничивающая реактивная составляющая тока статора двигателя, а i_{1y} — его активная составляющая, идущая на создание момента двигателя.

Отметим, что приведенное уравнение по своему виду аналогично формуле момента двигателя постоянного тока. В нем ψ_2 отражает магнитный поток двигателя постоянного тока, а i_{2y} — ток его якоря.

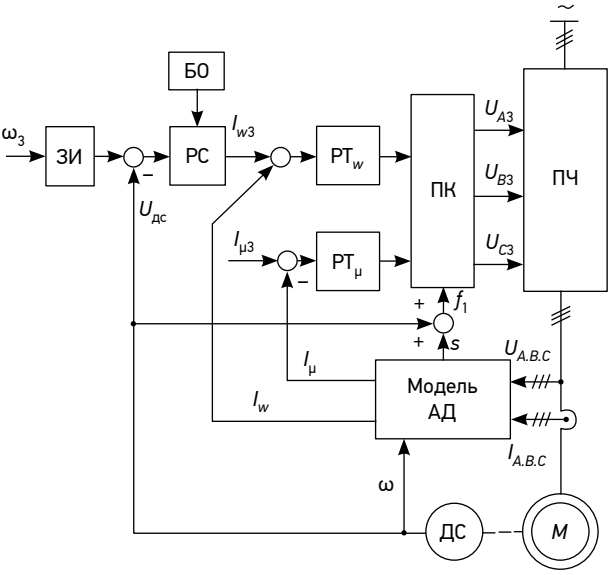


Рис. 12.5. Схема асинхронного электропривода при частотном векторном управлении

Принцип построения схемы векторного управления иллюстрирует рис. 12.5. Асинхронный двигатель *M*, на валу которого установлен датчик скорости (тахогенератор) ДС, получает питание от преобразователя частоты ПЧ. Регулирование момента производится регуляторами $РТ_w$ активной I_w и $РТ_\mu$, реактивной I_μ составляющих тока. Значения этих переменных получаются косвенным путем с помощью модели асинхронного двигателя «модель АД», на вход которой подаются сигналы фазных токов I_A, I_B, I_C, напряжений U_A, U_B, U_C и угловой скорости двигателя. Модель двигателя выдает информацию о скольжении двигателя *s* и составляющих токов I_w и I_μ.

Регулирование скорости производится по принципу подчиненного регулирования координат с использованием ПИ-регулятора скорости РС, задатчика интенсивности ЗИ и блока токоограничения БО. Управление ПЧ осуществляется системой трехфазных напряжений U_{A3}, U_{B3}, U_{C3}, которые формируются преобразователем координат ПК на основе сигналов регуляторов $РТ_W$ и $РТ_\mu$ и сигнала, пропорционального частоте f_1.

Векторное регулирование момента асинхронного двигателя обеспечивает его точное поддержание во всем диапазоне регулирования скорости, включая режимы работы электропривода на упор и его очень низкие «ползучие» скорости, что выгодно отличает его от параметрического (скалярного) регулирования.

Контрольные вопросы

1. Дайте схемы контактного и бесконтактного способов динамического торможения в функции скорости и времени.
2. Как осуществляется управление торможением противовключением и реверс двигателя?
3. Приведите схемное решение бесконтактного способа автоматического управления торможением.

Литература

1. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. — М. : Академия, 2004.
2. Москаленко В. В. Электрический привод : учебник. — М. : Академия, 2007.
3. Зимин Е. Н., Яковлев В. И. Автоматическое управление электроприводами. — М. : Высш. шк., 1999.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по учебно-методической работе

_____В. В. Зубов

Лабораторный практикум

Б1.В.08 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры

Технической механики

(название кафедры)

Зав. кафедрой _____

(подпись)

Волков Е.Б.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 1 от 13.09.2024

(Дата)

Рассмотрена методической комиссией факультета

Горно-механического

(название факультета)

Председатель _____

(подпись)

Осипов П.А.

(Фамилия И.О.)

Протокол № 2 от 18.10.2024

(Дата)

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ» 3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ» 5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОПАРЫ» 8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ» 12
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИЗУЧЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕРМОСТАТА» 23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКОВ ЦВЕТА И СВЕТА» 26

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ»

Цель работы – проведение исследований по работе прибора для измерения давления – датчика давления.

Теоретическая часть

Конструкция датчика избыточного давления представлена на рис.1 Преобразователь выполнен в цилиндрическом корпусе 3, в нижней части которого расположен штуцер 4, предназначенный для присоединения к линии измеряемого давления. В верхней части корпуса расположена «обойма» 9, которая крепится в корпусе с помощью специальных защелок, позволяющих ей вращаться вокруг своей оси (относительно корпуса 3). Для фиксации положения обоймы относительно корпуса служит крышка 10, которая навинчивается на наружную резьбу верхней части корпуса 3. На обойме установлена приборная часть 2 электрического соединителя типа DIN43650C. В кабельной части 1 соединителя производится подсоединение проводов внешних электрических цепей с помощью винтовых зажимов (клемм) без применения пайки. Во входном отверстии 5 приемной полости штуцера преобразователя предусмотрена резьба для установки гидравлического дросселя, предназначенного для предотвращения повреждения мембраны чувствительного элемента преобразователя в случае возникновения гидроудара.

В штуцере преобразователя размещен чувствительный элемент 6. В качестве чувствительного элемента применен тензопреобразователь, на котором размещена тензочувствительная полупроводниковая схема из четырех тензорезисторов, соединенных в мост Уитсона.

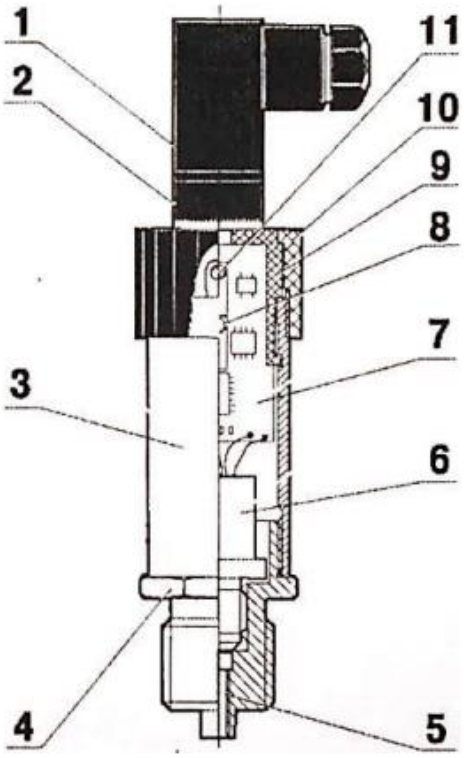


Рисунок 1

Под действием давления измеряемой среды мембрана чувствительного элемента прогибается. Тензорезисторы, деформируясь, изменяют свое сопротивление. В результате происходит разбалансировка моста пропорционально измеряемому давлению. Разбалансированный сигнал в виде

электрического сигнала преобразуется электронным блоком, расположенным в корпусе преобразователя, в выходной унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление.
5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.
6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Подготовить стенд к работе
2. Включить компрессор .
3. Подключить пневматическую трубку от компрессора в быстросъемный разъем на тыльной стенке модуля набор датчиков давления а1.
4. С помощью регулятора давления установить величину давления 0,1 Мпа на компрессоре.
5. Занести показания манометра и датчика давления в таблицу 1
6. С помощью регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 МПа.
7. Занести показания манометра и датчика давления в таблицу
8. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,4 МПа.
9. Выключить компрессор. Принять показания манометра за истинное значение давления. Вычислить абсолютную и относительную погрешность датчика давления.
10. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе
11. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Таблица 1 Результаты исследования работы датчика давления

Номер измерения	Р манометра кПа	Р датчика давления кПа	ΔР датчика давления кПа
1			
2			
3			
4			
5			

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ»

Цель работы: проведение исследований по работе прибора для измерения давления – датчика дифференциального давления.

Теоретическая часть

Датчики дифференциального (перепада) давления применяются для преобразования перепада давления (разности давлений) в унифицированный выходной сигнал напряжения, тока или индуктивности. Наиболее популярными являются датчики с унифицированным токовым выходом 4-20 мА.

Устройство датчика и принцип работы.

Основным элементом датчика дифференциального давления служит измерительная мембрана, изготовленная из упругого металла. К ней крепятся чувствительные тензоризисторы, которые способны измерять величину ее деформации. Мембрану датчика и рабочая среда изолированы друг от друга, через защитные эластичные перепонки к ней передается давление. Специальная жидкость заполняет полости, которые расположены между ними.

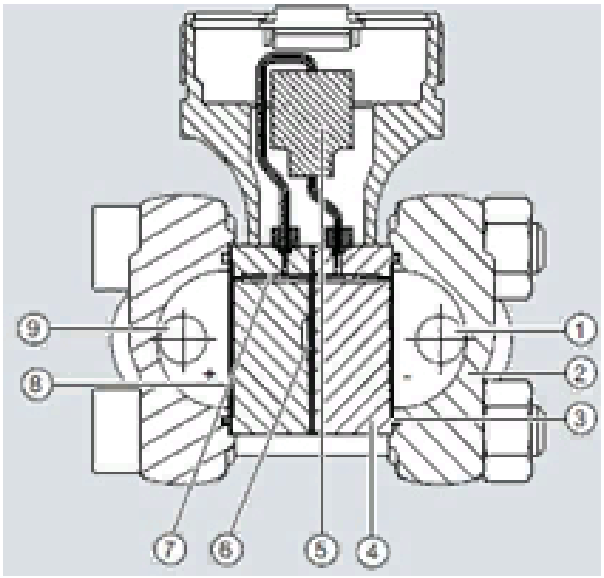


Рисунок 1 - Устройство датчика дифференциального давления : 1 - входное давление Р- ; 2 - фланцевые соединения подключениями к процессу; 3 - О-кольцо; 4 - корпус измерительной ячейки ; 5 - тонкий металлический проводник ; 6- перегрузочная мембрана ;7 - наполнительная жидкость ; 8 - разделительная мембрана ; 9 - входное давление Р+

Датчики, способные измерять дифференциальное давление, работают следующим образом: на защитные перепонки прибора воздействует давление рабочей среды, что в виде импульса передается на измерительную мембрану, которая оказывает влияние на тензисторы и влечет за собой изменение величины сопротивления. Электроника датчика фиксирует подобные модификации и на выходе преобразует их в аналоговый сигнал определенного значения.

Особенности приборов

Дифференциальные датчики от обычных преобразователей напора отличает ряд характерных отличительных черт. У дифференциальных датчиков 2 защитные мембраны, поэтому давление передается с двух сторон одновременно. В их конструкции предусмотрены 2 штуцера: минусовой и плюсовой. Когда измеряется

давление в рабочей среде, и показатели от напора на штуцер со знаком плюс превышают показатели минусового штуцера, то разница будет зафиксирована прибором с плюсовым значением, и наоборот.

Области применения приборов.

Сферы применения датчиков давления на сегодняшний день достаточно широка. Приборы данного типа используют в системах газоснабжения, вентиляции, водоподготовки, в нефтехимической, химической промышленности, на фармацевтическом производстве.

Измерение разницы напора в различных жидкостных средах необходимо для нормальной работы вентиляционных систем, а также устройств кондиционирования. Датчиками дифференциального давления пользуются для контроля загрязнённости систем фильтрации, управления демпферами, для регулирования и индикации воздушных потоков.

Принцип работы и строение датчика давления.

Главным элементом для такого датчика служит измерительная мембрана. Она изготавливается из упругого материала. Измеряется величина её деформации при помощи чувствительных тензорезисторов. Сама мембрана находится в изоляции от рабочих сред, давление на нее, оказывается, через защитные эластичные перепонки. Расположенные между мембраной и перепонками полости заполнены специальной жидкостью.

Давление оказывается из рабочей среды на перепонки, а они, в свою очередь, давят на измерительную мембрану. Мембрана передаёт импульс тензорезисторам, где меняется величина сопротивления. Эти слабые колебания улавливает встроенная электроника и преобразует их в аналоговый сигнал на выходе.

Особенности данных датчиков.

Отличием от прочих преобразователей напора является то, что дифференциальные датчики имеют две защитные мембраны и измеряют давление с двух сторон сразу. Также в них установлены плюсовой и минусовой штуцеры. Таким образом, прибор отражает разницу давления по обе стороны датчика.

Сферы применения приборов.

Данные датчики применяются при устройстве систем вентиляции, водоподготовки, газоснабжения.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.

2 . Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»

3 . Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.

4. Подключить защитное заземление .

5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.

6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.

7. Провести эксперимент.

8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.

9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

1. подготовить стенд к работе
2. включить компрессор .
3. подключить пневматическую трубку от компрессора в быстросъемный разъем на тыльной стенке «модуля набор датчиков давления» А2.
4. С помощью регулятора давления увеличить значение давления на 0,1 Мпа на компрессоре.
5. Занести показания манометра и датчика давления А2 в таблицу
6. Повторить пункты 4-5 до достижения давления 0,4 МПа.
7. Выключить компрессор.
8. Проанализировать результаты, сделать выводы по проделанной работе
9. Подготовить отчет и представить его преподавателю.

Номер измерения	Р манометра кПа	Р А2 датчика давления кПа
1		
2		
3		
4		
5		

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОПАРЫ»

Цель работы: изучение термопар как устройства для контактного контроля над температурой объекта.

Теоретическая часть

Термопара – термоэлемент, представляющий собой пару проводников из различных материалов, соединенных на одном конце. На свободных концах в результате действия термоэлектрического эффекта наводится ЭДС.

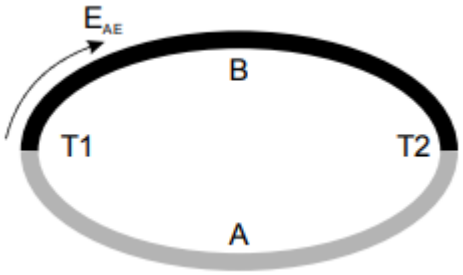


Рисунок 1

Термоэлектрический эффект, он же Эффект Зеебека – явление возникновения ЭДС в замкнутой электрической цепи (рис.1), состоящей из последовательно соединённых разнородных проводников (A и B), контакты между которыми находятся при различных температурах (T1 и T2).

Непосредственное практическое значение применительно к термопарам имеют следующие термоэлектрические законы.

Первый закон:

Возникающее в термопаре термо-ЭДС зависит от температуры спаев и не зависит от распределения температур по длине проводника (закон промежуточных температур Магнуса).

Иная его формулировка: термо-ЭДС термопары AB с температурами спаев T1 и T2 равна алгебраической сумме двух термо-ЭДС этой же термопары с температурами спаев T1 и T3, T3 и T2:

$$EAA(T1T2) = EAA(T1T3) + EAA(T3T2) \quad (1)$$

Это правило позволяет не заботиться о термостатировании термопары по всей ее длине и используется для градуировки термопар и определения поправок на температуру холодного спая.

Второй закон:

Если цепь состоит из трех проводников ABC, то термо-эдс термопары AB со спаями при температурах T1 и T2 равняется алгебраической сумме термо-эдс термопар AC и CB, спаи которых находятся при тех же температурах.

$$EAA(T1T2) = EAA(T1T2) + ECC(T1T2) \quad (2)$$

Этот закон ("промежуточных металлов") позволяет использовать удлинительные концы к термопарам и присоединять термопару к приборам с другими проводниками.

Нетрудно сообразить, что присоединенный в термостате к обоим проводам (A и B) термопары медный провод, который ведет к измерительному прибору (провод C в приведенной формуле) не меняет величины возникшей

электродвижущей силы термопары AB, поскольку эффекты от спаев CA и CB, находящихся при одной температуре компенсируют друг друга.

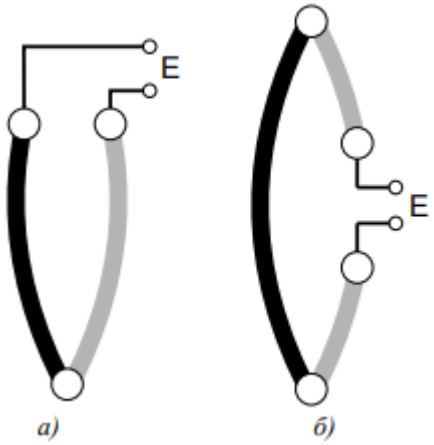


Рисунок 2

Таким образом, термопара может образовывать устройство или его часть, использующее термоэлектрический эффект для измерения температуры. В сочетании с электроизмерительным прибором термопара образует термоэлектрический термометр. Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам термоэлектродов (рис. 2,а), либо в разрыв одного из них (рис. 2,б). В местах подключения проводников термопары к измерительной системе возникают дополнительные термо-ЭДС, которые взаимно компенсируется при равенстве температур вспомогательных спаев.

Так как термо-ЭДС термопары зависит от разности температур холодного и горячено концов,

для успешного преобразования ЭДС в температуру необходимо так же контролировать температуру холодного спая. На практике при измерении температур широко используется техника «компенсации холодного спая»: температура холодного спая измеряется другим датчиком температуры, а затем величина термо-ЭДС холодного спая программно или аппаратно вычитается из сигнала термопары.



Рисунок 3

Места подключения термопары к измерительной системе должны иметь одинаковую температуру, то есть находиться в изотермальной зоне. Кроме того, в схеме с компенсацией холодного спая в этой же зоне должен находиться и датчик температуры холодного спая. При конструировании измерительной системы эти требования должны учитываться.

При выборе термопары для производства замеров температуры в некотором диапазоне следует выбирать ту термопару, коэффициент линейности которой изменяется менее других в рамках этого диапазона. Для достижения высокой

точности измерений термопарного термометра во всем диапазоне рабочих температур необходима его калибровка.

Среди основных можно выделить следующие типы термопар:

ТХА (хромель-алюмелевая термопара) – предназначена для работы в окислительных и инертных

средах. Обладает более близкой к прямой характеристикой.

ТХК (хромель-копелевая термопара) – предназначена для работы в окислительных и инертных средах. Обладает наибольшей чувствительностью, высокой термоэлектрической стабильностью при температурах до 600°С. Недостаток: высокая чувствительность к деформациям.

ТПП (платинародий-платиновая термопара) – предназначена для длительной эксплуатации в

окислительных средах. Обладает хорошей устойчивостью к газовой коррозии (особенно на воздухе при высоких температурах); высокой надежностью при работе в вакууме, но менее стабильны в нейтральных средах. Недостаток: высокая чувствительность термоэлектродов к любым загрязнениям, появившимся при изготовлении, монтаже или эксплуатации термопар.

ТВР (вольфрам-рениевая термопара) – может использоваться как стандартные для установления

номинальных статических характеристик термопар методом сравнения. Обладает возможностью длительного применения при температурах до 2200°С в неокислительных средах; устойчивостью в аргоне, гелии, сухом водороде и азоте. Недостаток: плохая воспроизводимость термо-ЭДС, вынуждающая группировать термоэлектродные пары по группам с номинальными статическими характеристиками.

ТНН (нихросил-нисиловая термопара) – предназначена в качестве универсального средства измерения температур в диапазоне температур 0 - 1230°С. Обладает высокой стабильностью термо-ЭДС (по сравнению с ТХА, ТПП, ТПР), высокой радиационной стойкостью, высокой стойкостью к окислению электродов.

В зависимости от конструкции и назначения различают термопары погружаемые и поверхностные; с обыкновенной, взрывобезопасной, влагонепроницаемой или иной оболочкой (герметичной или негерметичной), а также без оболочки; обыкновенные, вибротряскоустойчивые и ударопрочные; стационарные и переносные и т.д.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
2. Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»
3. Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.
4. Подключить защитное заземление .
5. Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.
6. Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
7. Провести эксперимент.
8. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
9. Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок проведения эксперимента

Все исследования датчиков температуры проводятся в диапазоне: от температуры окружающей среды до 80°С˚.

Ознакомиться с электрической схемой соединения датчика с измерительным прибором для снятия статической характеристики. Статическая характеристика датчика - функциональная зависимость между изменениями входной X и выходной Y величинами.

Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика «ТЕРМОПАРА».



Рисунок 4

Представить схему для проверки преподавателю.

Включить питание модулей.

Включить нагревательный ТЭН.

Включить питание модулей. Произвести измерение напряжения на выходных клеммах термопары (0,2 – 2,0 мВ), изменяя температуру нагрева датчика от 25°С до 75°С.

По мере увеличения температуры записывать показания с дисплея прибора и показания величины показания напряжения с прибора через 1…2 °С.

Данные занести в таблицу и построить график зависимости Э.Д.С термопары от температуры.

Таблица.

	1	2	3	4	5	…	N
Время, сек							
Температура, °С							
Напряжение, мВ							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 «ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЯ»

Цель работы: изучение динамических характеристик терморезистивного преобразователя.

Теоретическая часть

Термосопротивления представляют собой измерительный преобразователь с чувствительным элементом (проводник или полупроводник), который под воздействием температуры изменяет активное сопротивление электрическому току. Изменение электросопротивления данного материала при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом сопротивления □ (1/□С), который определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{\mathrm{R}_t - R_0}{R_0 t} \qquad (1)$$

где *t* – температура материала, °С; R_0 и R_t – электросопротивление при 0 °С и при температуре *t*, Ом.

Проводниковые ТС

Материалы, которые используют для изготовления проводниковых ТС должны быть устойчивыми к нагреванию, что обуславливает однозначность зависимости сопротивления от температуры и стойкость проводника против коррозии и, следовательно, достаточную точность измерений; иметь большой α обеспечивающий высокую чувствительность прибора; значительное удельное сопротивление проводника позволяющее изготовить термометры малых размеров; линейность характеристики.

Наиболее полно указанным требованиям отвечают платина (интервал температур – 260 ÷ +750 °С) и медь (интервал – 60 ÷ +180 °С).

Электрическое сопротивление проволоки платиновых термометров сопротивления в интервале температур от 0 до +650 °С определяется по формуле:

$$R_t = R_0\left(1 + At + Bt^2\right) \qquad (2)$$

где R_t – сопротивление термометра при температуре *t* °С; R_0 – сопротивление термометра при температуре 0 °С; *A* и *B* – постоянные коэффициенты.

Для платины марки «Экстра»

R_{100}/R_0=1,391;

A=3,96847·10^{-3} °С$^{-1}$;

B=5,847·10^{-7} °С$^{-2}$.

Сопротивление платины в интервале температур от –200 до 0 °С изменяется по закону:

$$R_t = R_0\left[1 + At + Bt^2 + Ct^3\left(t - 100\right)\right] \qquad (3)$$

где C = – 4,22·10^{-12} °С$^{-1}$.

У платины, применяемой для изготовления технических термометров α=3,9·10^{-3} 1/°С.

Из уравнений 1 и 2 видно, что характеристики платиновых термометров нелинейны однако отклонение от линейной характеристики не превышает 5% в интервале от 0 до 500°С и 19% в интервале температур от –200 до 0°С.

Электрическое сопротивление проволоки медных термометров сопротивления в интервале температур от –50 до +180°С определяется по формуле:

$$R_t = R_0(1+\alpha t) \qquad (4)$$

где α – температурный коэффициент сопротивления меди (α=4,26·10^{-3} °С$^{-1}$).

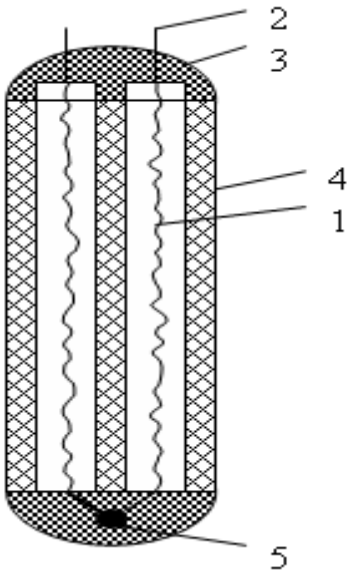


Рисунок 1 – Чувствительный элемент платинового ТС

К преимуществам меди следует отнести низкую стоимость, легкость получения ее в чистом виде, сравнительно высокий α=4,26·10^{-3} 1/°С и линейную зависимость сопротивления от температуры.

К недостаткам меди относятся малое удельное сопротивление и легкая окисляемость при температуре выше 100°С.

Кроме того для изготовления ТС используется никель и железо.

На рисунке показан чувствительный элемент платинового термометра. Он состоит из двух соединенных последовательно платиновых спиралей 1, расположенных в каналах керамического каркаса 4. К двум верхним концам этих спиралей припаяны платиновые или иридиево-родиевые (60% родия) выводы 2, к которым приварены выводные проводники изолированные керамическими бусами. Для крепления платиновых спиралей и выводов в керамическом каркасе используют глазурь (или термоцемент) 3 на основе окисей алюминия и кремния. Пространство между платиновыми спиралями и стенками каналов каркаса заполнено порошком окиси алюминия, который служит изолятором и улучшает тепловой контакт между спиралями и каркасом.

Для подгонки сопротивления при 0°С изменяют длину нижних концов платиновых спиралей с последующей пайкой 5.

Для защиты от воздействия химически агрессивных сред и механических повреждений чувствительные элементы помещают в кожух, выполненный из алюминия или нержавеющей стали. Все ТС выпускаются взаимозаменяемыми.

Термометры сопротивления ТСП выпускают с сопротивлением R_0=1 Ом (градуировка гр 1П), R_0=10 Ом (градуировка гр 10П) и R_0=50 Ом (градуировка гр 50П).

Термометры сопротивления ТСМ выпускают с сопротивлением R_0=10 Ом (градуировка гр 10М), R_0=50 Ом (градуировка гр 50М) и R_0=100 Ом (градуировка гр 100М).

Полупроводниковые ТС

Полупроводниковые термометры сопротивления, которые называются термисторами или терморезисторами, применяются для измерения температуры в интервале от –90 до +180 °С. Существенным их преимуществом является большой температурный коэффициент электрического сопротивления. Вследствие большого удельного электрического сопротивления полупроводников из них можно изготовить термометры малых размеров с большим начальным сопротивлением, что позволяет не учитывать сопротивление соединительных проводов и других элементов электрической измерительной схемы термометра.

Чувствительные элементы термисторов, изготовляемые из окислов меди, марганца, магния, никеля, кобальта и других металлов, имеют форму небольших цилиндров, дисков или шариков.

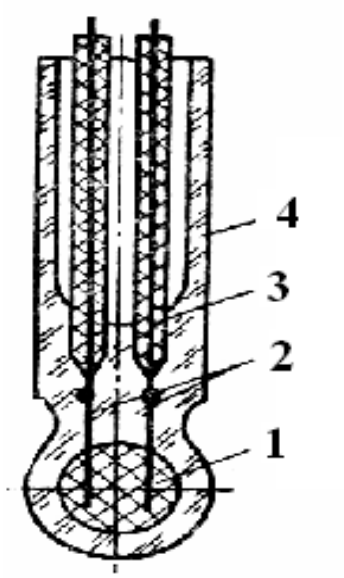


Рисунок 2 - Бусинковый полупроводниковый терморезистор

Сопротивление термисторов уменьшается с повышением температуры. Для большинства полупроводниковых сопротивлений зависимость электрического сопротивления от температуры имеет нелинейный характер и может быть в общем виде описана зависимостью:

$$R_{\mathrm{T}} = A \cdot e^{B/T} \qquad (4)$$

где R_{T} – электрическое сопротивление термистора при абсолютной температуре *T*, К; *A* и *B* – константы термистора.

На рисунке показан бусинковый терморезистор, состоящий из полупроводникового элемента 1, защищенного стеклянной оболочкой 4. В шарик

1 вмонтированы электроды 2 из платиновой проволоки, соединенные с никелевыми выводами 3.

Основным препятствием, ограничивающим широкое внедрение полупроводниковых терморезисторов в промышленность, является плохая воспроизводимость их параметров, что исключает их взаимозаменяемость, а также сравнительно невысокая максимальная рабочая температура (от –60 до 180°С).

В качестве устройств, измеряющих электрическое сопротивление термометров в функции температуры, применяют мосты и логометры. Мосты бывают уравновешенные и неуравновешенные, автоматические и неавтоматические.

Принципиальная схема уравновешенного моста показана на рис. Здесь R_1 и R_3 – постоянные сопротивления, R_2 – переменное сопротивление (реохорд), с помощью которого мост приводят в равновесное состояние, $R_\text{Т}$ – сопротивление термометра, НП – нуль-прибор.

При равновесии мостовой схемы ток I_0 в измерительной диагонали равен нулю, а падения напряжений на сопротивлениях R_1 и R_3 должны быть равны между собой, т.е.

$$I_1 R_1 = I_3 R_3 \qquad (5)$$

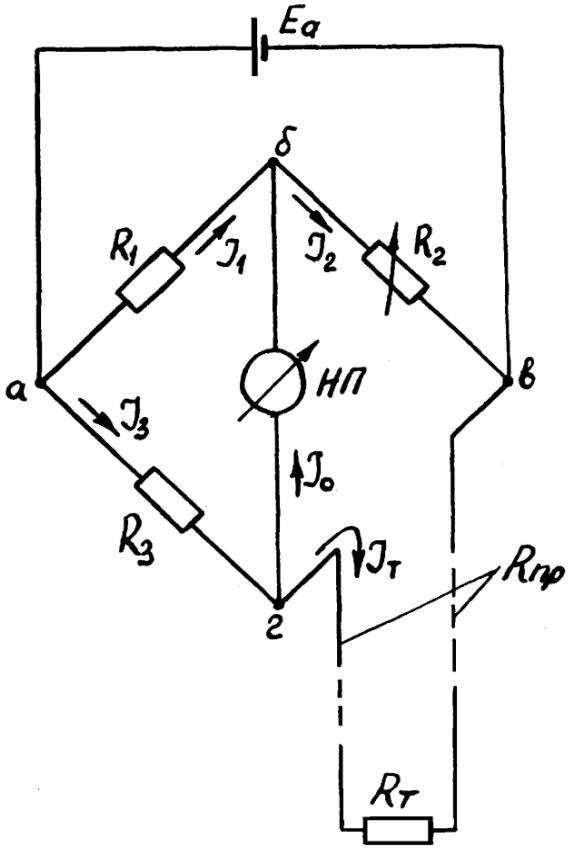


Рисунок 3 – Принципиальная схема уравновешенного моста

Кроме того, падения напряжений на плечах «*бв*» и «*вл*» также должны быть равными между собой, т.е.

$$I_2 R_2 = I_{\text{Т}}\left(R_{\text{Т}} + R_{\text{пр}}\right) \quad (6)$$

где $R_{\text{пр}}$ – сопротивление соединительных проводов.

Разделив (6) на (7) и принимая во внимание, что при равновесии моста $I_1 = I_2$; $I_3 = I_{\text{Т}}$, получим:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_{\text{Т}} + R_{\text{пр}}} \quad (7)$$

или

$$R_2 \cdot R_3 = R_1\left(R_{\text{Т}} + R_{\text{пр}}\right) \quad (8)$$

Следовательно, условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч.

Из равенства (9) сопротивление термометра $R_{\text{Т}}$ будет равно:

$$R_{\text{Т}} = \frac{R_3}{R_1} R_2 - R_{\text{пр}} \quad (9)$$

Каждому значению R_T при равновесном состоянии мостовой схемы соответствует определенное значение R_2. Шкалу реохорда R_2 градуируют в °С, что позволяет по положению движка определить температуру нагрева термометра.

Для исключения влияния на результаты измерений колебаний сопротивления соединительных проводов применяют трехпроводную схему включения термометра (рисунок).

В этом случае для симметричного моста (когда $R_1 = R_3$) при условии равенства сопротивлений соединительных проводов равновесие моста будет иметь место при $R_{\text{Т}} = R_2$, т.е. изменение сопротивления проводов не будет влиять на результаты измерений.

Уравновешенные мосты имеют высокий класс точности, допускают колебания напряжения источника в пределах ±20 %, позволяют автоматизировать процесс измерения.

В неуравновешенном измерительном мосту тремя плечами являются постоянные сопротивления, а термометр сопротивления включается в четвертое плечо. К одной из диагоналей подключается источник питания, а в другую пирометрический милливольтметр (ПМ), показания которого зависят от сопротивления термометра. Сопротивление $R_к$ служит для контроля напряжения питания схемы.

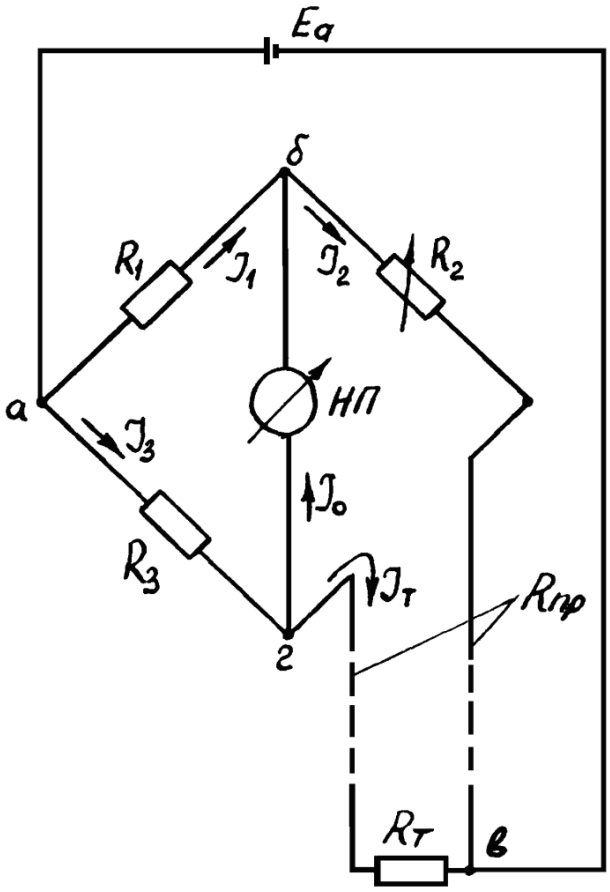


Рисунок 4 – Трехпроводная схема включения термометра сопротивления в уравновешенный мост

Перед началом измерений переключатель П ставят в положение 1. В этом случае четвертым плечом моста будет сопротивление $R_к$. Если питающее напряжение U_{ab} имеет номинальное значение, то стрелка милливольтметра устанавливается против контрольной отметки на шкале. Если этого нет, то, изменяя положение движка реостата R, выводят стрелку милливольтметра на контрольную отметку. При измерении переключатель ставят в положение 2. В этом случае четвертым плечом моста будет сумма сопротивлений $(R_т + R_{пр})$, ток через рамку милливольтметра будет функцией этой суммы сопротивлений. Отсчет результата измерения производят по заранее проградуированной шкале милливольтметра. Такие мосты применяют крайне редко, так как результаты измерений зависят от колебаний сопротивления соединительных проводов и питающего мост напряжения. Рекомендуется применять неуравновешенные мосты в тех случаях, когда сопротивление датчика во много раз превышает сопротивление соединительных проводов.

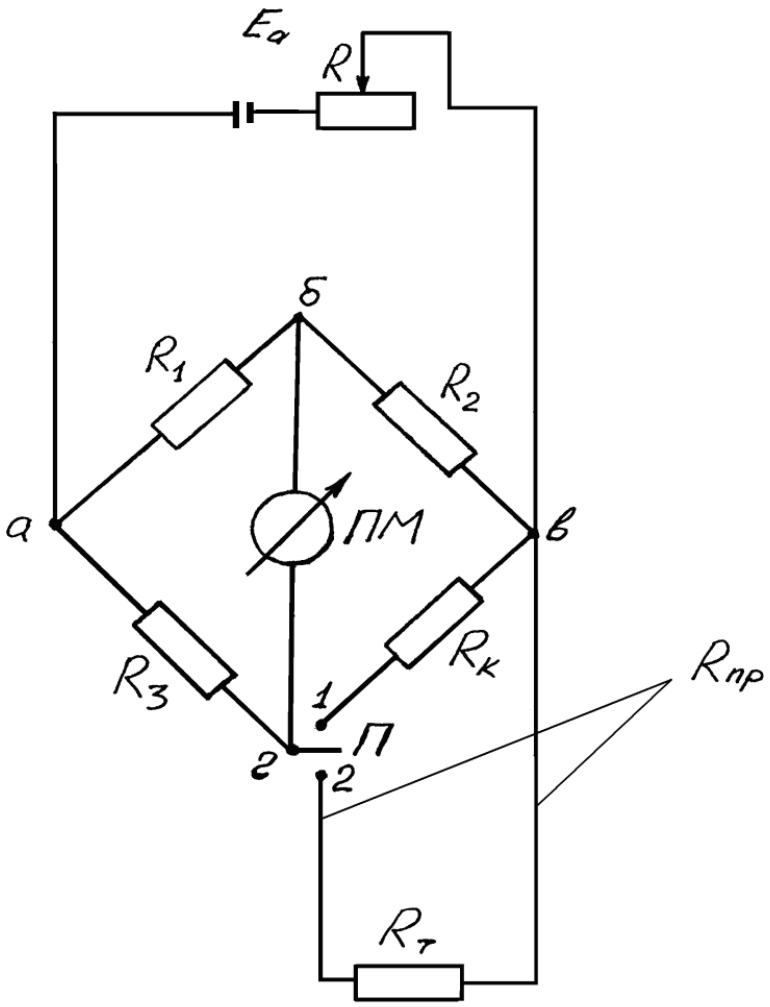


Рисунок 5 – Принципиальная схема неуравновешенного моста: E_a – источник питания; R – реостат для установки номинальной величины напряжения питания схемы; R_1, R_2, R_3 – постоянные сопротивления; П – переключатель; $R_к$ – контрольное сопротивление; $R_т$ – сопротивление термометра; $R_{пр}$ – сопротивление проводов;

Автоматические уравновешенные мосты широко используются для измерения и регистрации температуры в комплекте с ТС, а также других параметров, изменение которых может быть преобразовано в изменение активного сопротивления. Их характеризуют высокая точность и возможность использования в системах автоматического регулирования. Они выпускаются различных модификаций: одно- и многоточечные, с дисковой и ленточной диаграммой, с сигнальными устройствами и др.

На рисунке приведена принципиальная схема автоматического уравновешенного моста, работающего на переменном токе, который также как ручной равновесный мост, реализует нулевой метод измерения сопротивления.

Напряжение разбаланса на вершинах моста *a* и *b* подается на вход электронного усилителя ЭУ. В нем оно усиливается до величины, достаточной для приведения в действие реверсивного электродвигателя РД. Ротор двигателя вращается в ту или другую сторону в зависимости от знака напряжения разбаланса, через систему передач перемещает движок компенсирующего переменного резистора (реохорда) $R_р$, уравновешивая измерительную схему моста, а также перемещает показывающую стрелку. Если мост находится в равновесии, то ротор РД не вращается, т.к. напряжения на вход электронного усилителя не подается.

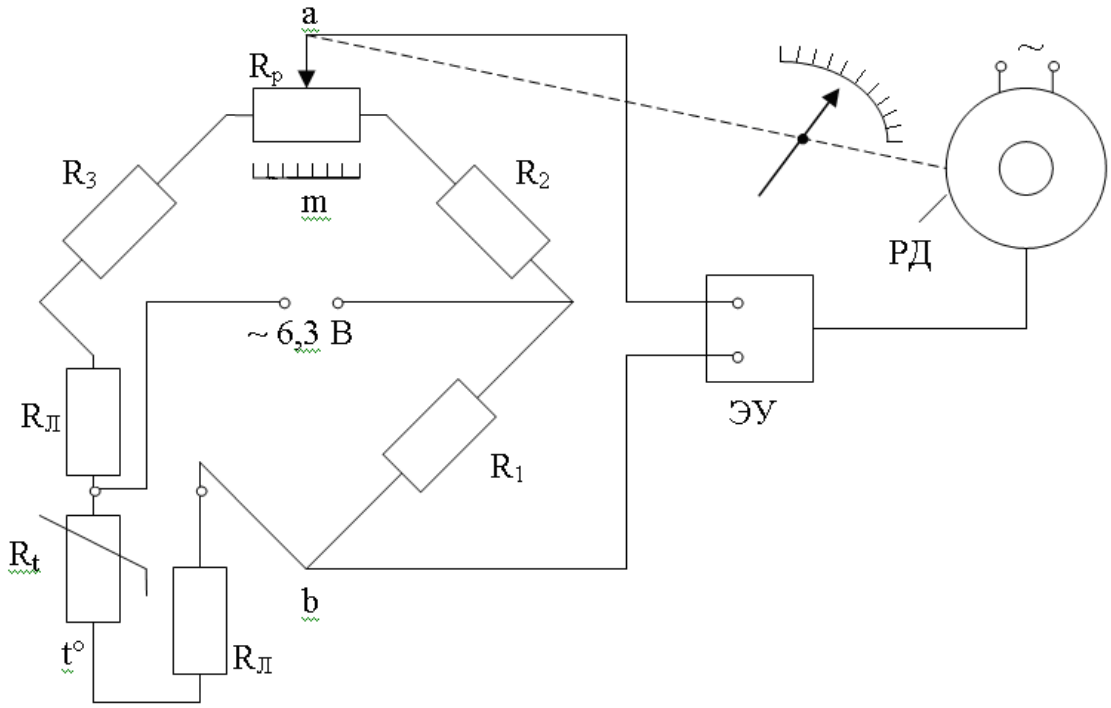


Рисунок 6 - Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

Кроме мостов, в качестве измерительных приборов для термометров сопротивления иногда применяют логометры, представляющие собой разновидность электроизмерительных приборов магнитоэлектрической системы (рисунок).

Постоянный магнит снабжен полюсными наконечниками *N* и *S* с цилиндрическими выточками. Центры выточек полюсных наконечников смещены относительно центра сердечника. Между полюсными наконечниками расположен цилиндрический сердечник из стали, вокруг которого вращается подвижная система из двух рамок RI и R2. К рамкам прикреплена стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы. Воздушный зазор между полюсными наконечниками и сердечником неравномерный, поэтому магнитная индукция меняется (наибольшее значение в середине полюсных наконечников, наименьшее - у края), являясь функцией угла поворота от среднего положения.

К рамкам подводится ток от общего источника питания (*G*). В рамку R_1 ток поступает через термометр сопротивления R_T., в рамку R_2 – через резистор *R* постоянного сопротивления. Направление сил тока I_1 и I_2 таково, что вращающие моменты рамок оказываются направленными навстречу один другому.

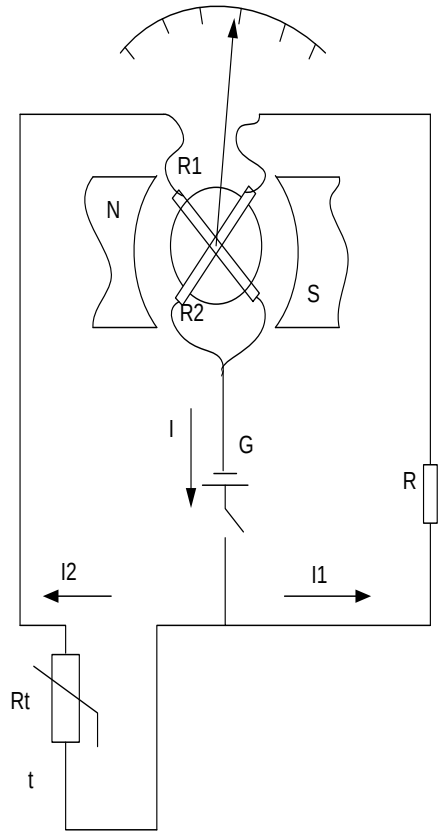


Рисунок 7 - Принципиальная схема логометра

Вращающие моменты рамок:

$$M_1 = C_1 \cdot B_1 \cdot \mathrm{I}\ , \tag{10}$$

$$M_2 = C_2 \cdot B_2 \cdot \mathrm{I}_2, \tag{11}$$

где C_1 и C_2 – постоянные, геометрических размеров и числа витков рамок; B_1 и B_2 – индукции в зоне расположения рамок.

Если сопротивление рамок одинаковое $R_1 = R_2$ и $R = R_t$, то $I_1 = I_2$, т.е. вращающие моменты рамок $M_1 = M_2$. При этом подвижная система находится в среднем положении. При изменении сопротивления термометра вследствие нагрева (или охлаждения) через одну из рамок потечет ток большей силы, равенство моментов нарушится, и подвижная система начнет поворачиваться в сторону действия большего момента. При вращении подвижной системы рамка, по которой течет ток большей силы, попадает в зазор с меньшей магнитной индукцией, вследствие чего действующий на нее момент уменьшается. При этом другая рамка входит в зазор с большей магнитной индукцией, и ее момент увеличивается. Вращение рамок продолжается до тех пор пока их вращающие моменты станут снова равны. В момент равновесия

$$C_1 \cdot B_1 \cdot \mathrm{I}_1 = C_2 \cdot B_2 \cdot \mathrm{I}_2 \tag{12}$$

или

$$\frac{\mathrm{I}_1}{\mathrm{I}_2} = \frac{C_2}{C1} \cdot \frac{B_2}{B_1} = C \cdot \frac{B_2}{B_1}. \tag{13}$$

Подставив в это уравнение значения I_1 и I_2, выраженные через напряжение источника питания U и сопротивление цепей, получим:

$$\frac{\frac{U}{R+R_t}}{\frac{U}{R_t+R_2}} = \frac{R_t+R_2}{R+R_1} = C\frac{B_2}{B_1}. \qquad (14)$$

Так как $B = f(\varphi)$, то и отношение $B_2/B_1 = f(\varphi)$; тогда

$$\frac{R_t+R_2}{R+R_1} = \mathrm{f}(\varphi) \qquad (15)$$

или

$$\varphi = f\left(\frac{R_t+R_2}{R+R_1}\right). \qquad (16)$$

В этом выражении R, R_1 и R_2 постоянные, поэтому угол поворота подвижной системы зависит только от сопротивления термометра: $\varphi = f(R_t)$.

Показания прибора не зависят от колебания напряжения источника питания только в определенных границах. Так, при колебаниях напряжения питания $\pm$ 20 % возникает угловая погрешность $\Delta\varphi \approx 0{,}5 - 1\%$.

К рамкам логометра ток подводится тремя тонкими спиральными волосками, служащими одновременно для возвращения стрелки прибора к началу шкалы при прекращении питания прибора током.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.

2 . Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»

3 . Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.

4 . Подключить защитное заземление .

5 . Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.

6 . Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.

7 . Провести эксперимент.

8 . Отключить модули от сети ~220В 50Гц.

9 . Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

Ознакомиться с электрической схемой соединения датчика с измерительным прибором для снятия статической характеристики. Статическая характеристика датчика - функциональная зависимость между изменениями входной X и выходной Y величинами.

Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика «ТЕРМОСОПРОТИВЛЕНИЕ».

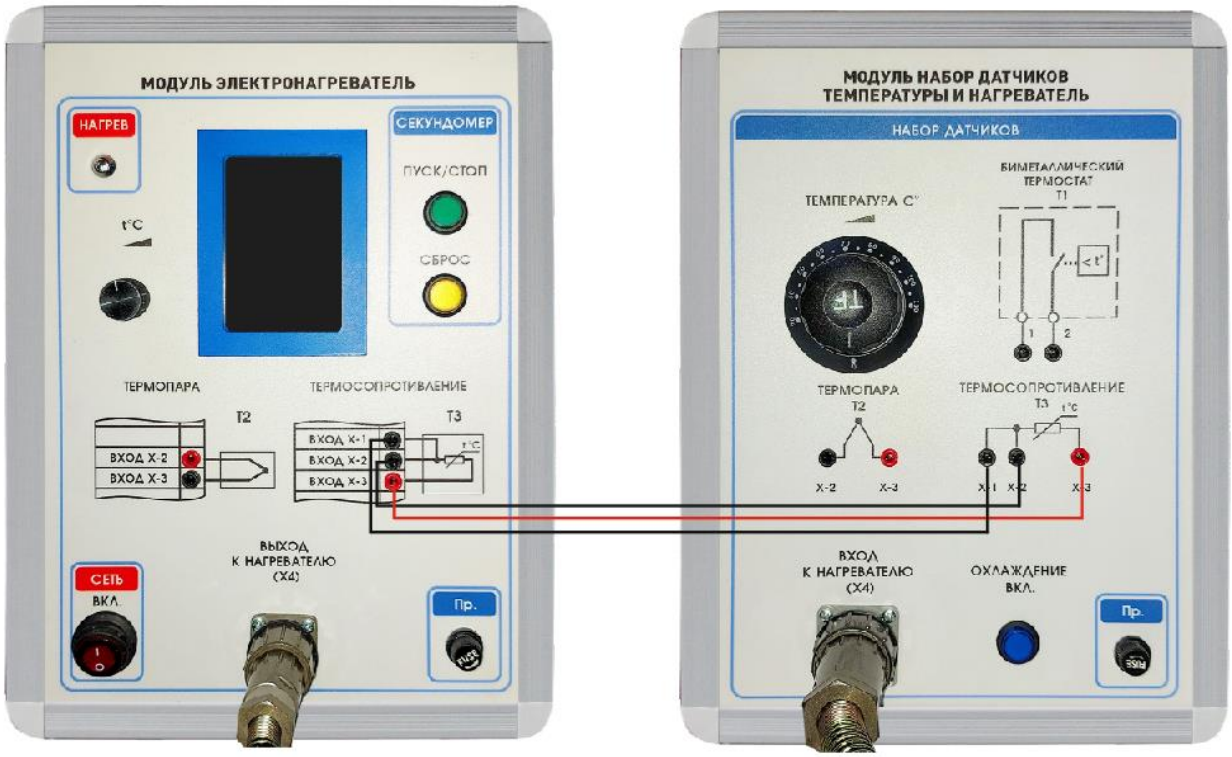


Рисунок 8

Представить схему для проверки преподавателю.

Включить питание модулей. Произвести измерение сопротивления на выходных клеммах датчика (2 – 10 Ом), изменяя температуру нагрева датчика от 25°С до 75°С

По мере увеличения температуры записывать показания с дисплея прибора и показания величины показания напряжения с прибора(мультиметра) через 1…2 °С.

Данные занести в таблицу и построить график зависимости сопротивления от температуры.

	1	2	3	4	5	…	N
Время, сек							
Температура, °С							
Сопротивление млОм							

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИЗУЧЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕРМОСТАТА»

Цель работы – изучение биметаллического регулируемого термостата.

Теоретическая часть:

Впервые биметаллические пластины были применены в XVIII веке английским часовщиком Джоном Харрисоном, который использовал их для регулирования точности хода морских хронометров. Современный биметаллический терморегулятор - это наиболее практичное и дешевое решение проблемы контроля рабочего диапазона температур.

Принцип работы биметаллического термостата.

При нагреве металлы расширяются. Каждый имеет свой коэффициент линейного расширения, из-за чего происходит искажение размеров и формы изделий из них. Это свойство определяет механизм работы биметаллических термостатов, который имеет такую последовательность:

Происходит нагрев пластины, один из слоев которой удлиняется быстрее.

В зависимости от видов металлов происходит постепенный или мгновенный изгиб пластины. Второй вариант изменения ее формы также называется механической бифуркацией.

Пластина приводит в действие исполнительный механизм термостата, который разрывает цепь.

Пластина остывает и возвращается в первоначальное состояние. Контакты устройства срабатывают автоматически или принудительно через кнопку, включая при этом цепь.

По своей сути регулируемый биметаллический термостат является тепловым реле, препятствующим перегреву оборудования. Такие устройства обычно рассчитаны на относительно небольшие температуры (до 180°С). Они также имеют нерегулируемое исполнение.

Преимущества использования биметаллических терморегуляторов.

Тепловые реле имеются в счетчиках, автоматических выключателях, электромоторах, бытовой технике и различном промышленном оборудовании. Биметаллический терморегулятор имеет несомненные достоинства: предельную простоту и надежность – устройство выдерживает до 100 тыс. циклов срабатывания; высокую точность срабатывания – ±1°С; низкую цену – биметаллическое реле в разы, а иногда и на порядок дешевле термостатов капиллярного типа; компактность, энергонезависимость и прочее.

Недостатком является инерционность – устройство может срабатывать с некоторым запозданием, но эта проблема решается путем настройки реле на более слабый нагрев.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.

2 . Убедиться, что все выключатели модулей стенда находятся в положении «ВЫКЛ»

3 . Выбрать модули стенда для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки стенда.

4 . Подключить защитное заземление.

5 . Подключить модули стенда к сети ~220В 50Гц.

6 . Соединить модули стенда согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.

7 . Провести эксперимент.

8 . Отключить модули от сети ~220В 50Гц.

9 . Составить отчет по лабораторной работе.

Порядок выполнения эксперимента:

1. Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика «биметаллический термостат».

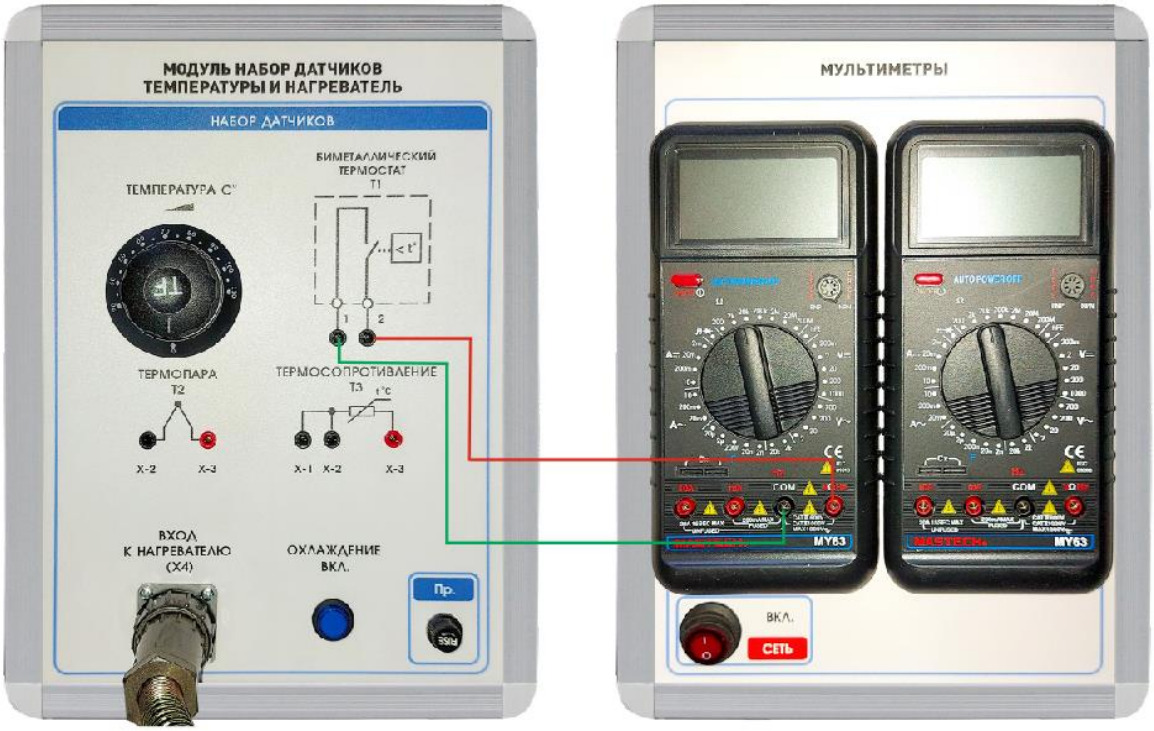


Рисунок 9

2. Представить схему для проверки преподавателю.

3. Включить питание модулей. На модуле «МУЛЬТИМЕТРЫ» установить режим



(прозвонки)

4. выставить температуру на биметаллическом термостате 30 С˚

5. Выставить уставку по температуре 75 С˚на блоке «модуль электронагреватель»

6. Засечь на секундомере за какое время нагреется электронагреватель и замкнуться концы биметаллического термостата.

7. Повторить пункты 4-6 для 40,50,60 ,70 С˚

8. Записать показания в таблицу

9. Построить график зависимости температуры срабатывания термостата от времени

Таблица

Температура уставки теромостата, °С	30С˚	40С˚	50С˚	60С˚	70С˚
Температура уставки нагревателя, °С	75С˚	75С˚	75С˚	75С˚	75С˚
Время, сек					

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ИЗУЧЕНИЕ ДАТЧИКОВ ЦВЕТА И СВЕТА»

1.1. Цель работы:

1. Изучение датчика цвета.
2. Изучение фотодиода и влияния силы света на его характеристики.
3. Изучение фоторезистора и влияния силы света на его характеристики.
4. Изучение фототранзистора и влияния силы света на его характеристики.

1.2. Теоретические сведения

1. Датчик цвета TCS3200 можно использовать для распознавания цветов окружающих предметов в роботизированных системах. Датчик состоит из четырех светочувствительных сенсоров с оптическими фильтрами – красным, зеленым, голубым и бесцветным. Это позволяет выделить из света, отражающегося от исследуемого материала, четыре цветовых компонента.

Также на датчике располагаются четыре белых светоизлучающих диода, которые нужны для подсветки исследуемой поверхности.



Рисунок 1.2.1

Основа модуля определения цвета RKP-TSC3200 это микросхема TCS3200 (TAOS TCS3200 RGB sensor chip) представляет собой матрицу из фотодиодов 8 x 8, всего 64 фотодиода в одном кристалле. Из них 16 фотодиодов имеют синий светофильтр, 16 фотодиодов имеют зеленый светофильтр, 16 фотодиодов имеют красный светофильтр и 16 фотодиодов без светофильтра.

Такая внутренняя компоновка микросхемы TCS3200 позволяет датчику измерять интенсивность цвета в четырех цветовых диапазонах: синем, зеленом, красном и белом.

Питание датчика цвета необходимо осуществлять от источника питания напряжением +5 В. Управлять работой датчика можно сигналами S0, S1, S2, S3 и S4.

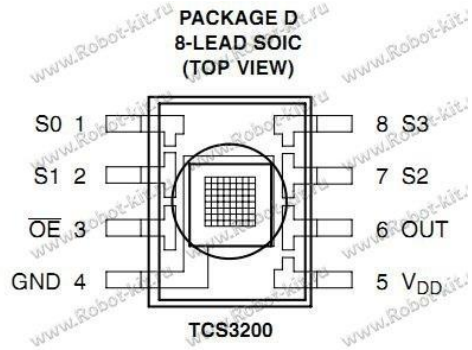


Рисунок 1.2.2

Датчик выдает информацию о цвете в виде импульсов, частота которых пропорциональна интенсивности света поступающего на соответствующий сенсор. Для удобства исследований цифровой выходной сигнал преобразован в аналоговый при помощи ЦАП.

2. Фотодиод - прибор, основанный на явлении фотовольтаического эффекта в полупроводниковом контактном переходе и предназначенный как для работы с приложением внешнего напряжения, так и без него.

В настоящее время при создании фотодиодов чаще других применяются p-n переходы, поэтому рассмотрим работу таких фотодиодов.

Фотодиод представляет собой пластинку полупроводникового материала, внутри которого имеются области примесной электронной (*n* – область) и дырочной (*p* – область) проводимостей. Границу между этими областями называют контактным *p-n* переходом (рисунок 1.2.3). Электронная и дырочная области снабжены невыпрямляющими контактами с присоединенными к ним выводами, с помощью которых осуществляется связь с внешней цепью. С целью предохранения чувствительного слоя фотодиода от воздействия внешней среды он покрывается лаком или монтируется в герметичном корпусе, изготовленном или из металла (со стеклянным входным окном) или из пластмасс.

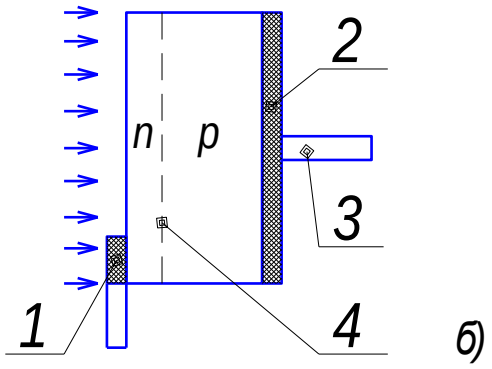


Рисунок 1.2.3 - Принципиальная схема фотодиода

Если внутри полупроводника граничат две области с разным типом проводимости, то возникает диффузия основных носителей тока: диффузионные токи электронов из *n* – области в *p* – область (ток I_{nn}) и дырок из *p* – области в *n* – область (ток I_{pp}). Приконтактные области объединяются основными носителями. Это приводит к появлению объемных зарядов вблизи границы, образованных неподвижными зарядами ионизированных атомов примеси (рисунок 1.2.4).

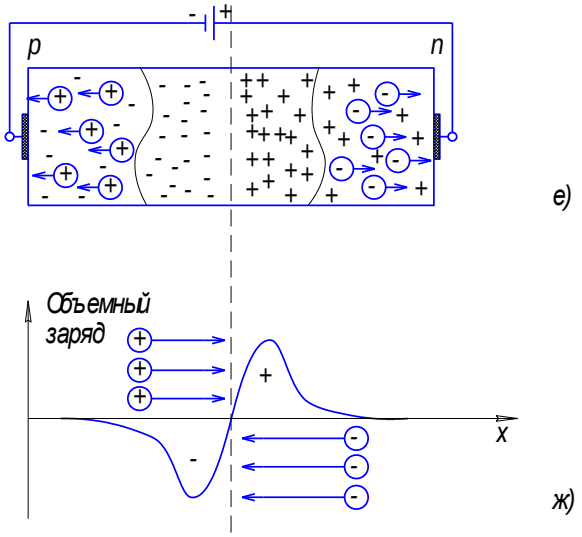


Рисунок 1.2.4 – Формирование p-n перехода

По мере нарастания объемных зарядов нарастает электрическое поле, противодействующее диффузии основных носителей (возникает потенциальный

барьер движению основных носителей и диффузионные токи основных носителей уменьшаются. Разность потенциалов этого поля называют контактной разностью потенциалов V_k, знак ее соответствует обеднению приконтактных областей основными носителями тока. Преодолеть потенциальный барьер могут только те из основных носителей, энергия которых больше энергии потенциального барьера ($E_k=eV_k$, e – заряд электрона).

Одновременно с диффузионным током основных носителей возникает встречный дрейфовый ток неосновных, т.к. для них контактное электрическое поле является ускоряющим. Дырки из n – области переходят в p – область (ток I_{pn}), а электроны из p – области – в n – область (ток I_{np}). Контактная разность потенциалов возрастает до тех пор, пока потоки основных и неосновных носителей через p-n переход не достигнут динамического равновесия:

$$I_{nn} = I_{np};\ \ I_{pp} = I_{pn} \tag{1.1.1}$$

При этом во внешней цепи ток отсутствует:

$$I_1 = I_{nn} + I_{pp} - I_{np} - I_{pn} = 0 \tag{1.1.2}$$

При приложении внешнего напряжения V_D потенциальный барьер изменяется на величину eV_D. Равновесие тока нарушается. При этом поток неосновных носителей через p-n переход изменяется незначительно, а ток основных носителей зависит от V_D: при прямом включении (плюс к p – области, минус к n – области) контактная разность потенциалов уменьшается и ток основных носителей очень быстро возрастает с увеличением V_D. При обратоном включении контактная разность потенциалов увеличивается и ток основных носителей практически прекращается. Вольт-амперная характеристика неосвещенного p-n перехода приведена на рисунок 1.2.5 (кривая $Ф$ = 0), где за положительные приняты: запирающее напряжение на диоде и обратный ток диода.

При облучении одной из областей излучением с энергией квантов $E_Ф$, превышающей ширину запрещенной зоны собственного полупроводникового материала этой области (ΔE) – $E_Ф > \Delta E$ – в объеме полупроводника генерируются пары неравновесных носителей тока – фотоэлектроны и фотодырки (внутренний фотоэффект в собственном полупроводнике). Когда дифференцирующие в объеме полупроводника фотоносители достигают области p-n перехода, в контактном электрическом поле происходит пространственное разделение пар: основные фотоносители остаются в объеме той области, где они возникли; неосновные свободно проходят через p-n переход, так как для них контактное поле является ускоряющим. Таким образом, неосновные фотоносители создают внутри p-n перехода дополнительный ток, который называют фототоком I_F.

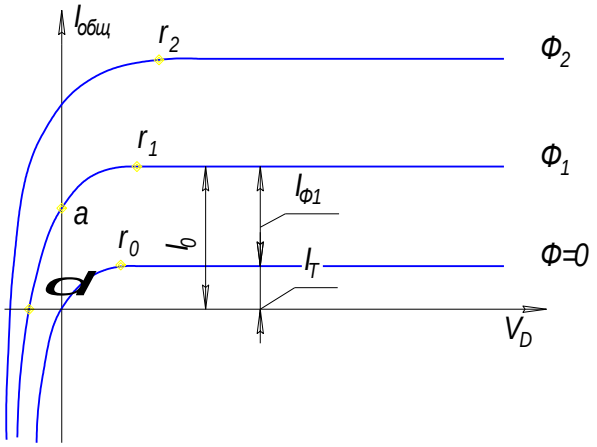
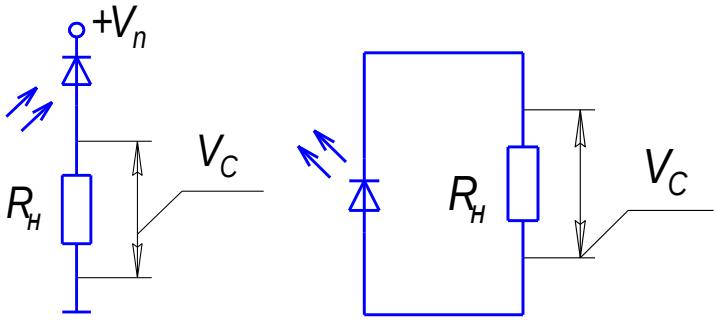


Рисунок 1.2.5 - Вольт-амперная характеристика *p-n* перехода

В зависимости от способа включения фотодиода и способа измерения фотосигналом цепи включения может служить или фототок или напряжение фотосигнала.

Фототок фотодиода преобразуется в напряжение фотосигнала посредством включения в электрическую цепь сопротивления нагрузки R_H

Применяют два способа (основных) включения фотодиода: фотодиодный режим (рисунок1.2.6(а)), вентильный режим (рисунок 1.2.6(б))



а б

Рисунок 1.2.6 - Фотодиодный (а) и вентильный (б) режимы работы фотодиода

Вентильный режим характерен отсутствием внешнего источника питания, т.е. используется способность *p-n* перехода фотодиода генерировать фотосигналы – фототок или фото ЭДС.В фотодиодном режиме внешнее напряжение V_D прикладывается в запирающем направлении.

3. Фоторезистор – это датчик, электрическое сопротивление которого меняется в зависимости от интенсивности падающего на него света. Чем интенсивней свет, тем больше создается свободных носителей зарядов и тем меньше становится сопротивление элемента.

Фоторезистор представляет собой тонкую пластинку или пленку полупроводника 1 с омическими контактами 2 на двух противоположных концах (рисунок 1.2.7), к которым подключается электрический источник питания. Полупроводник обычно наносится на стеклянную подложку 3.

Наиболее распространены фоторезисторы на основе CdS и CdSe, спектральные характеристики которых располагаются в видимой области спектра. В Инфракрасном диапазоне работают фоторезисторы из Ge, Si и т.д.

Падающее на поверхность фоторезистора излучение генерирует в нем свободные носители за счет собственного или примесного поглощения. Принцип

работы фоторезистора приведен на рисунке 1.2.8.

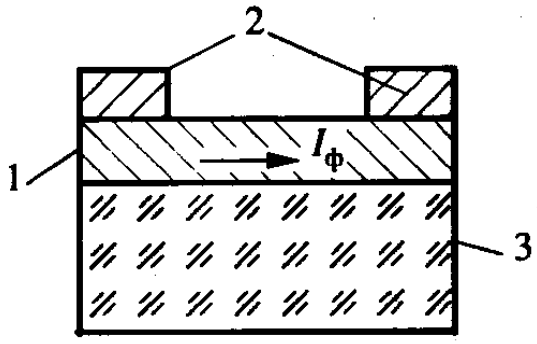
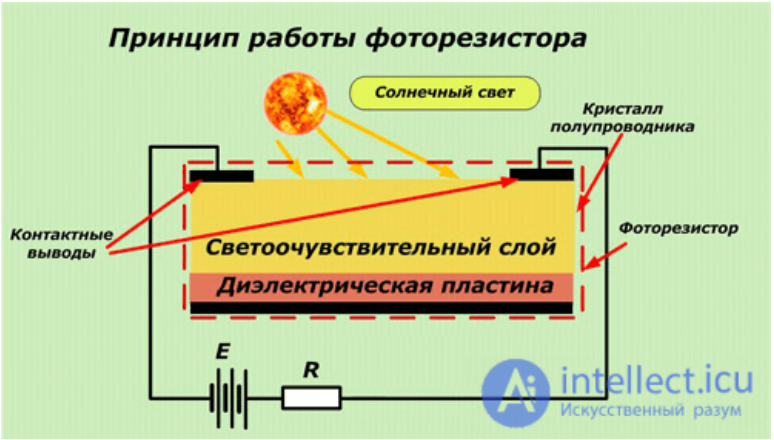


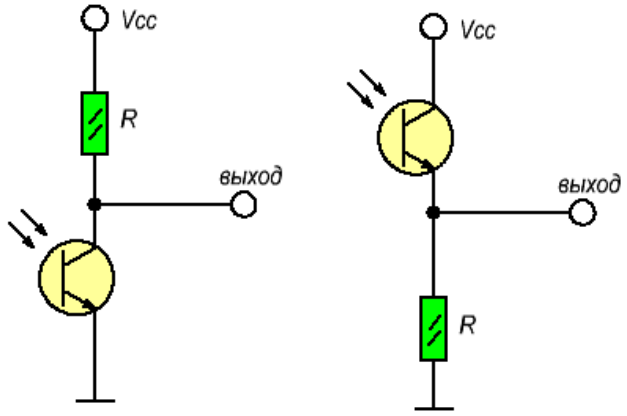
Рисунок 1.2.7 – Схема фоторезистора



1.2.8 – Принцип работы фоторезистора

4. Фототранзистор представляет собой твердотельное полупроводниковое устройство с внутренним усилением, которое используется для обеспечения аналоговых и цифровых сигналов. Фототранзисторы используются в детекторах дыма, лазерных радарах, системах дистанционного управления. Фототранзисторы более чувствительны по сравнению с фотодиодами, а также создают больший фототок.

Существует 2 основные схемы включения фототранзистора (рисунок 1.2.9).



1.2.9 – Схемы включения NPN транзистора. а – с общим эмиттером,

б – с общим коллектором

В случае включения по рисунку 1.2.9(а) сигнал переходит из высокого состояния в низкое в момент освещения фототранзистора, в случае 1.2.9(б) происходит обратное.

В обоих случая фототранзисторы могут использоваться в двух режимах работы: работа в активном режиме, работа в режиме переключения.

Работа в активном режиме подразумевает, что фототранзистор генерирует выходной сигнал пропорциональный степени его освещенности. То есть значение выходного сигнала имеет обратную зависимость от освещенности. Работа в режиме переключения подразумевает, что фототранзистор в ответ на его освещение будет либо «выключен», либо «включен». Активный режим используется тогда, когда необходимо различать несколько порогов напряжения. Режим переключения используется тогда, когда необходимо получить цифровой выходной сигнал. Переход от одного режима к другому осуществляется подбором резистора (в цепи коллектора в случае 1.2.9(а) или эмиттера в случае 1.2.9(б)). Обычно для режима переключения используется резистор номиналом более 5кОм, а для активного режима менее 5кОм.

Структура

1.3. Порядок проведения экспериментов:

В работе используются:

- модули: «Мультиметры», «Датчики цвета и света», «Регулируемый источник питания постоянного тока».

1. Изучение датчика цвета.

1.1 Ознакомиться с схемой соединения датчика с измерительным прибором (рисунок 1.3.1). В качестве измерительных приборов используются измерительные приборы модуля «Мультиметры».

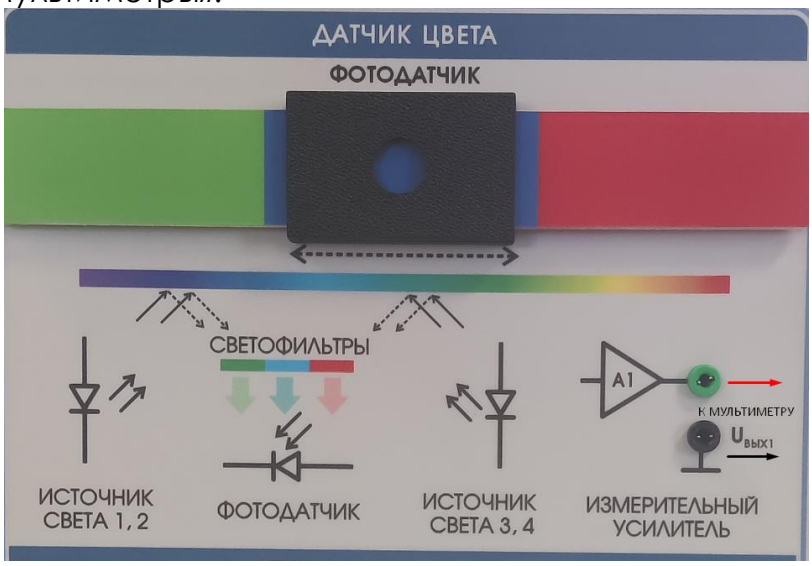


Рисунок 1.3.1 – Подключение мультиметра для исследования датчика цвета

1.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию датчика.

1.3 Включить питание модулей.

1.4 Произвести исследование датчика без фильтра, с красным светофильтром, с зеленым светофильтром и синим светофильтром. Для этого произвести выбор светофильтра нажатием кнопки «ВЫБОР СВЕТОФИЛЬТРА» до зажигания контрольного светодиода «ЦВЕТ» цветом, соответствующем выбранному светофильтру.

1.5 Поочередно изменяя цвета полос, измерить выходное напряжение каждого датчика с различными светофильтрами.

1.6 Данные занести в таблицу 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Фильтр\Цвет полосы	красный	синий	зеленый
Uвых (мВ)без фильтра			
Uвых (мВ)красный			
Uвых (мВ)синий			
Uвых (мВ)зеленый			

1.7 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы.

2. Изучение фотодиода и влияния силы света на его характеристики

2.1 Ознакомьтесь с схемой соединения фотодиода с измерительными приборами и источником питания (рисунок 1.3.2). Вольтметр необходимо установить в положение – измерение постоянного напряжения 20В. Амперметр необходимо установить в положение – измерение постоянного тока 2 мА.

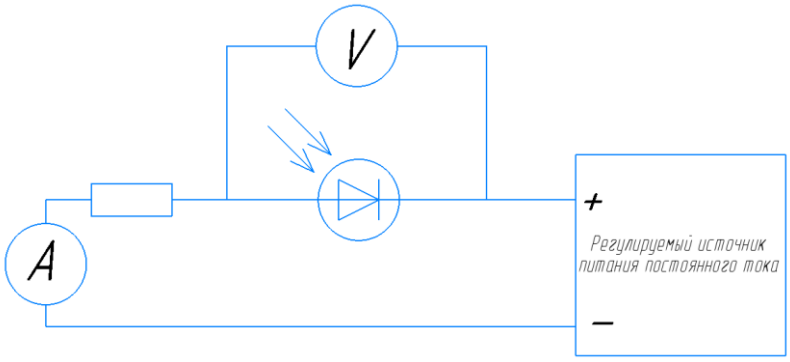


Рисунок 1.3.2 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фотодиода в фотодиодном режиме работы

2.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию характеристик фотодиода.

2.3 Включить питание модулей.

2.4 Установить напряжение питания 3В на модуле «Регулируемый источник питания постоянного тока».

2.5 Изменяя значение силы света (E(lx) при помощи ручки, зафиксировать значения напряжения и тока на мультиметрах и записать их в таблицу 1.3.2. В таблице указано значение освещенности для 11 рисок на поворотной ручке в порядке возрастания (0 соответствует 0 Lx, 1 соответствует 2150 Lx).

Таблица 1.3.2

Хар-ки\E(lx)	0	150	320	630	850	1100	1350	1610	1860	1990	2150
U_d											
I_d											

2.6 На основании полученных значений постройте зависимость фототока от освещенности.

2.7 Измените значение напряжения питания на 5В и повторите пункты 2.5 и 2.6.

2.8 Измените значение напряжения питания на 7В и повторите пункты 2.5 и 2.6.

2.9 Провести аналогичные опыты без источника питания (схема на рисунке 1.3.3).

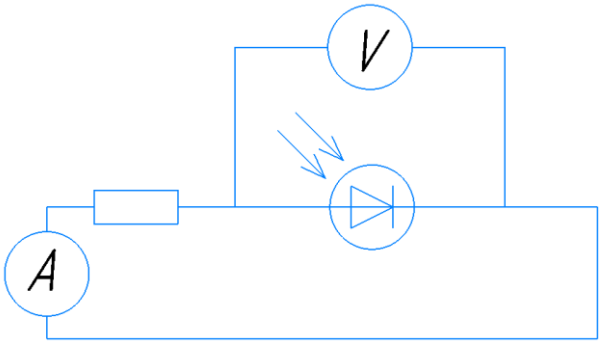


Рисунок 1.3.3 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фотодиода в вентильном режиме работы

2.10 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы.

3. Изучение фоторезистора и влияния силы света на его характеристики

3.1 Ознакомьтесь с схемой соединения фоторезистора с измерительными приборами и источником питания (рисунок 1.3.4). Вольтметр необходимо установить в положение – измерение постоянного напряжения 20В. Амперметр необходимо установить в положение – измерение постоянного тока 20 мА.

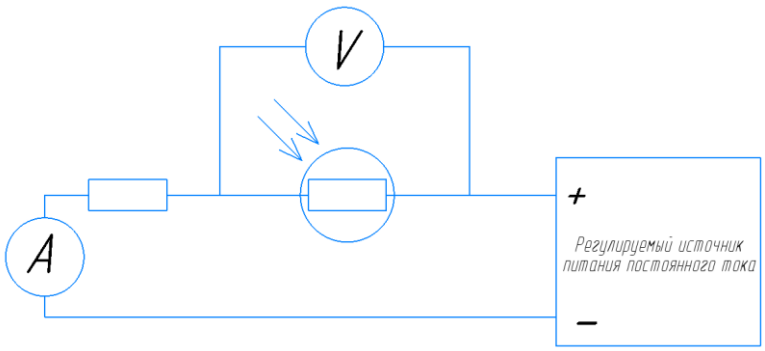


Рисунок 1.3.4 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фоторезистора

3.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию характеристик фоторезистора.

3.3 Включить питание модулей.

3.4 Установить напряжение питания 3В на модуле «Регулируемый источник питания постоянного тока».

3.5 Изменяя значение силы света (E(lx) при помощи ручки, зафиксировать значения напряжения и тока на мультиметрах и записать их в таблицу 1.3.3. В таблице указано значение освещенности для 11 рисок на поворотной ручке в порядке возрастания (0 соответствует 0 Lx, 1 соответствует 2150 Lx).

Таблица 1.3.3

Хар-ки\E(lx)	0	150	320	630	850	1100	1350	1610	1860	1990	2150
U_{fr}											
I_{fr}											

3.6 На основании полученных значений постройте зависимость фототока от освещенности.

3.7 Измените значение напряжения питания на 5В и повторите пункты 3.5 и 3.6.

3.8 Измените значение напряжения питания на 7В и повторите пункты 3.5 и 3.6.

3.9 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы.

4. Изучение фототранзистора и влияния силы света на его характеристики

4.1 Ознакомьтесь с схемой соединения фототранзистора с измерительными приборами и источником питания (рисунок 1.3.5). Вольтметр необходимо установить в положение – измерение постоянного напряжения 20В. Амперметр необходимо установить в положение – измерение постоянного тока 20 мА.

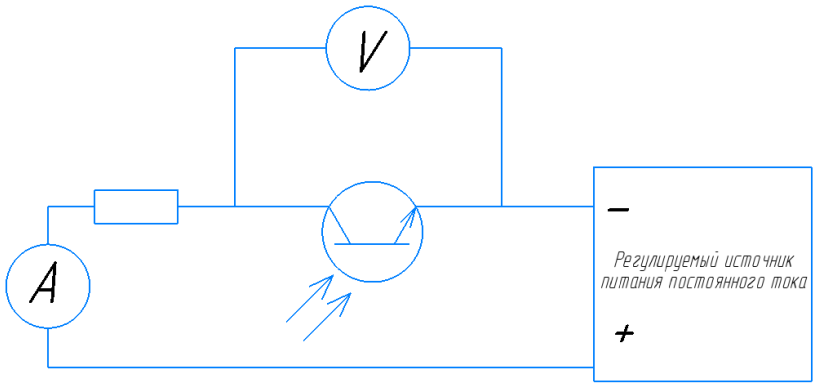


Рисунок 1.3.5 – Подключение мультиметра и источника питания для исследования характеристик фототранзистора в активном режиме

4.2 Собрать схему проведения эксперимента по исследованию характеристик фоторезистора.

4.3 Включить питание модулей.

4.4 Установить напряжение питания 3В на модуле «Регулируемый источник питания постоянного тока».

4.5 Изменяя значение силы света (E(lx) при помощи ручки, зафиксировать значения напряжения и тока на мультиметрах и записать их в таблицу 1.3.4. В таблице указано значение освещенности для 11 рисок на поворотной ручке в порядке возрастания (0 соответствует 0 Lx, 1 соответствует 2150 Lx).

Таблица 1.3.4

Хар-ки\E(lx)	0	150	320	630	850	1100	1350	1610	1860	1990	2150
U_{vt}											
I_{vt}											

4.6 На основании полученных значений постройте зависимость фототока от освещенности.

4.7 Измените значение напряжения питания на 5В и повторите пункты 4.5 и 4.6.

4.8 Измените значение напряжения питания на 7В и повторите пункты 4.5 и 4.6.

4.9 Сделать соответствующие выводы по данному разделу лабораторной работы, определить режим работы фототранзистора.

ЗАМЕТКИ

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе _____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.08 СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Технической механики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Волков Е.Б.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 9
Основы метрологии 11
1.1. Краткий исторический обзор 11
1.2. Термины и определения 14
1.3. Задачи метрологии 18
1.4. Международная система единиц 22
1.4.1. Общие положения 22
1.4.2. Основные единицы 23
1.4.3. Производные единицы 25
1.4.4. Внесистемные единицы 27
1.4.5. Кратные и дольные единицы 32
1.4.6. Единицы количества информации 33
1.4.7. Достоинства Международной системы единиц 33
2. Основы теории погрешностей 34
2.1. Общие положения 34
2.2. Нормальный закон распределения 38
2.3. Распределение Стьюдента 40
2.4. Распределение χ^2 41
2.5. Классификация погрешностей 43
2.6. Количественные характеристики погрешностей 46
3. Характеристики средств измерений 48
3.1. Общие положения 48
3.2. Статические характеристики 49
3.3. Динамические характеристики 50
3.4. Универсальные характеристики 53
3.5. Характеристики погрешностей 54
3.6. Классы точности 55
4. Статические погрешности средств измерений 60

4.1. Общие положения ... 60
4.2. Выявление промахов ... 62
4.3. Систематические погрешности ... 65
4.4. Случайные погрешности ... 67
4.5. Суммарные погрешности ... 69
4.6. Правила округления ... 72
4.7. Пример расчета ... 73
5. Доверительные интервалы и погрешности погрешностей ... 78
5.1. Общие положения ... 78
5.2. Погрешность арифметического среднего ... 78
5.3. Погрешность систематической погрешности ... 79
5.4. Погрешность среднего квадратического отклонения ... 81
5.5. Необходимое число измерений ... 82
5.6. Пример расчета ... 86
6. Динамические погрешности средств измерений ... 90
6.1. Общие положения ... 90
6.2. Передаточные функции ... 92
6.3. Частотные характеристики ... 95
6.4. Пример расчета ... 97
7. Погрешности результатов измерений ... 102
7.1. Погрешности прямых многократных измерений ... 102
7.1.1. Порядок оценки ... 102
7.1.2. Пример расчета ... 106
7.2. Погрешности прямых однократных измерений ... 109
7.2.1. Порядок оценки ... 109
7.2.2. Примеры расчета ... 112
7.3. Погрешности косвенных измерений ... 116
7.3.1. Порядок оценки погрешностей классическим методом ... 116
7.3.2. Порядок оценки погрешностей по МИ 2083–90 ... 120
7.3.3. Примеры расчета ... 124

7.4. Неопределенности измерений 129
8. Измерения физических величин 135
8.1. Общие положения 135
8.2. Датчики 137
8.3. Измерительные схемы 139
8.4. Средства измерения электрических величин 141
9. Построение и применение датчиков 143
9.1. Общие положения 143
9.2. Классификация датчиков 144
9.3. Параметрические датчики 147
9.3.1. Реостатные датчики 147
9.3.2. Датчики контактного сопротивления 149
9.3.3. Тензорезисторные датчики 151
9.3.4. Фоторезисторные датчики 155
9.3.5. Терморезисторные датчики 157
9.3.6. Индуктивные датчики 160
9.3.7. Емкостные датчики 167
9.4. Генераторные датчики 169
9.4.1. Термоэлектрические датчики 169
9.4.2. Пьезоэлектрические датчики 175
9.4.3. Индукционные датчики 178
9.4.4. Датчики Холла 180
9.4.5. Трансформаторные датчики 182
9.5. Тенденции развития датчикостроения 186
10. Динамика термочувствительных датчиков 188
10.1. Исходные данные 188
10.2. Скачкообразное изменение температуры 190
10.3. Линейное изменение температуры 195
11. Мостовые измерительные схемы 199
11.1. Общие положения 199

11.2. Основные соотношения при исследовании чувствительности 201
11.3. Основные соотношения при исследовании линейности 203
12. Неравновесные токовые мостовые измерительные схемы 204
12.1. Чувствительность токовых мостовых схем 204
12.1.1. Общие положения 204
12.1.2. Основные соотношения 206
12.1.3. Выводы и рекомендации 213
12.2. Линейность токовых мостовых схем 215
12.2.1. Общие положения 215
12.2.2. Основные соотношения 217
12.2.3. Выводы и рекомендации 226
13. Неравновесные потенциальные мостовые схемы 228
13.1. Чувствительность потенциальных мостовых схем 228
13.1.1. Общие положения 228
13.1.2. Основные соотношения 229
13.2. Линейность потенциальных мостовых схем 231
13.2.1. Общие положения 231
13.2.2. Основные соотношения 233
13.2.3. Выводы и рекомендации 242
14. Равновесные мостовые схемы 245
14.1. Общие положения 245
14.2. Датчик в первом плече 245
14.3. Датчик во втором плече 248
14.4. Датчик в третьем плече 250
14.5. Датчик в четвертом плече 251
14.6. Примеры расчета равновесных схем 253
15. Мостовые схемы переменного тока 257
15.1. Общие положения 257
15.2. Измерения параметров катушек индуктивности 262
15.3. Измерение параметров конденсаторов 267

15.4. Шестиплечие мостовые схемы 271
15.5. Трансформаторные мостовые схемы 272
15.6. Выводы и рекомендации 274
16. Примеры использования равновесных мостовых измерительных схем 276
16.1. Двух- и трехпроводные схемы включения датчиков 276
16.2. Автоматические мостовые схемы 277
17. Аналоговые электромеханические приборы 279
17.1. Общие положения 279
17.2. Магнитоэлектрические приборы 281
17.3. Электромагнитные приборы 284
17.4. Электродинамические приборы 288
17.5. Электростатические приборы 291
17.6. Индукционные приборы 294
17.7. Логометры 296
18. Приборы сравнения 299
18.1. Общие положения 299
18.2. Компенсаторы постоянного тока с ручным управлением 299
18.3. Автоматические компенсаторы постоянного тока 302
18.4. Полярно-координатные компенсаторы переменного тока 305
18.5. Прямоугольно-координатные компенсаторы переменного тока 306
19. Аналоговые электронные приборы 309
19.1. Общие положения 309
19.2. Вольтметры средних значений 310
19.3. Вольтметры амплитудных значений 314
19.4. Конденсаторные частотомеры 317
19.5. Омметры 320
20. Цифровые измерительные приборы 324
20.1. Общие положения 324
20.2. Электромеханические цифровые приборы 326
20.3. Электронные цифровые приборы 328

20.3.1. Времяимпульсные вольтметры ... 328
20.3.2. Уравновешивающие вольтметры ... 330
20.3.3. Электронно-счетные частотомеры ... 333
20.3.4. Измерители временных интервалов ... 335
20.3.5. Измерители разности фаз ... 338
20.4. Мультиметры ... 340
21. Измерительно-компьютерные системы ... 341
22. Измерение электрических токов ... 344
22.1. Общие положения ... 344
22.2. Измерение постоянного тока ... 346
22.3. Измерение переменного тока ... 351
23. Измерение электрических напряжений ... 354
23.1. Общие положения ... 354
23.2. Измерение постоянного напряжения ... 356
23.3. Измерение переменного напряжения ... 360
24. Измерение электрических сопротивлений ... 365
24.1. Общие положения ... 365
24.2. Измерение малых сопротивлений ... 370
24.3. Измерение средних сопротивлений ... 376
24.4. Измерение больших сопротивлений ... 384
25. Измерение температуры ... 389
25.1. Общие положения ... 389
25.2. Термометры ... 394
25.3. Пирометры ... 403
Заключение ... 411
Библиографический с писок ... 413
Приложение 1. Статистические таблицы ... 418
Приложение 2. Критерий согласия по ГОСТ 8.508 – 84 ... 423
Приложение 3. Характеристики датчиков ... 426
Приложение 4. Условные обозначения на шкалах и корпусах приборов ... 438

Приложение 5. Характеристики электроизмерительных приборов..... 441
Приложение 6. Условные графические обозначения в схемах 447
Приложение 7. Обозначение единиц измерения, их кратных и дольных значений 450
Приложение 8. Классификация электронных электроизмерительных приборов и система их обозначения..... 451
Приложение 9. Технические характеристики стандартных измерительных шунтов 454
Приложение 10. Технические характеристики устройства типа И58М 455
Приложение 11. Технические характеристики добавочного сопротивления типа Р-109..... 457
Приложение 12. Технические характеристики жидкостных термометров 458
Приложение 13. Технические характеристики манометрических термометров.. 460
Приложение 14. Визуальный оптический пирометр «Проминь» 461
Приложение 15. Телескоп пирометра суммарного излучения типа ПИРС-019 с усилителем 462

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие посвящено методам и средствам измерения. В работе приводятся основные понятия, встречающиеся в теории и практике метрологического обеспечения измерений. Рассмотрены методы и средства измерений физических величин, в том числе датчики, мостовые измерительные схемы, электроизмерительные приборы и приборы для измерения неэлектрических величин.

Особенно детально рассмотрены вопросы, связанные с погрешностями, так как в задачу каждого измерения входит не только определение искомой величины, но и оценка погрешности полученного результата.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют учебники и учебные пособия (см., например, [1–12]), которые бы в полной мере отвечали учебным планам специальностей: 230101 – ВМКСС; 230102 – АСУ; 280101 – БЖТ; 280103 – ЗЧС; 280104 – ПБ и рабочим программам по дисциплинам «Методы и средства измерений», «Метрология, стандартизация и сертификация» для студентов всех форм обучения перечисленных выше специальностей.

Монографии [13; 20–22] написаны для специалистов и по своему содержанию не могут служить учебными пособиями. В других случаях [1; 2; 7], стремясь к краткости и лаконичности, авторы опускают ряд существенных разделов курса. К тому же некоторые положения (например, по Международной системе единиц, по оценке погрешностей и др.) получили новую трактовку, что потребовало внести соответствующие изменения и дополнения.

При написании данного учебного пособия была сделана попытка охватить все вопросы, возникающие при изучении методов и средств измерений, а также основ метрологии, стандартизации и сертификации в соответствии с требованиями учебных планов и рабочих программ. Особенно большое внимание уделяется метрологии как науке об измерениях и их единстве. Значительная часть учебного пособия посвящена методам оценки погрешностей результатов и средств измерений.

Для сокращения объема учебного пособия некоторые второстепенные положения рассмотрены сравнительно кратко, без подробных доказательств и выкладок, а некоторые разделы изложены в виде инструкций и рекомендаций.

Работа снабжена приложениями, содержащими справочные данные, что может облегчить ее использование как практического руководства при оценке, например, погрешностей результатов и средств измерений без привлечения других книг и справочников. Последнее обстоятельство расширяет область использования учебника. И хотя учебник предназначен в основном для студентов, он с успехом может быть использован аспирантами, инженерами, преподавателями и научными работниками.

Библиографический список, приведенный в конце работы, включает в себя учебники, учебные пособия, монографии, справочники, нормативные документы и статьи, опубликованные в журналах и научных трудах. Ссылки на конкретные литературные источники приводятся по мере необходимости при рассмотрении соответствующих тем и задач метрологии и технических измерений. Новая литература, изданная в последние годы, приведена в конце библиографического списка. Здесь также представлен перечень нормативных документов, ссылки на которые сделаны в учебнике.

Автор благодарит рецензентов – закафедрой автоматизации производственных процессов УГЛТУ, кандидата технических наук, доцента С.П. Санникова и старшего научного сотрудника ИММ УрО РАН, кандидата технических наук, доцента С.И. Кумкова – за доброжелательное отношение к рукописи и за полезные замечания, сделанные ими при рецензировании.

Автор выражает признательность научному редактору, кандидату технических наук, доценту кафедры автоматики и управления в технических системах УГТУ–УПИ В.И. Паутову за большую работу по научному редактированию учебного пособия. Особую признательность автор выражает кандидату технических наук, доценту кафедры автоматики и информационных технологий УГТУ–УПИ Н.П. Бессонову за ценные советы и предложения, высказанные им при обсуждении рукописи.

ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1.1. Краткий исторический обзор

Термин «метрология» образован из двух греческих слов: «метрон» – мера и «логос» – учение. В дословном переводе «метрология» – это учение о мерах или, как принято определять в настоящее время это понятие, – наука об измерениях (более полное определение термина «метрология» приведено ниже в разделе «Термины и определения»).

Измерения выполнялись человечеством с незапамятных времен. Уже в древности проводились измерения времени, расстояния между поселениями, веса (массы) физических тел, площади земельных участков и т. д. Как правило, при этом использовались антропологические единицы измерений, т. е. единицы измерений, связанные с человеком и размерами его тела. Например, в России использовались следующие меры [10; 11; 23]:

1) *перст* – ширина указательного пальца (в метрической системе мер около 2 см);

2) *вершок* – ширина сложенных вместе двух пальцев, указательного и среднего (около 4,4 см);

3) *пядь малая* – расстояние между концами вытянутых большого и указательного пальцев руки (около 19 см);

4) *пядь великая* – от кончика мизинца до кончика большого пальца, растянутых по одной линии (от 22 до 23 см);

5) *косая сажень* – расстояние от носка левой ноги до конца пальцев правой руки, вытянутой по диагонали (от 216 до 248 см).

Антропологические единицы обладают очевидными недостатками (у разных людей разные «пяди», «вершки», «сажени» и т. д.). Для преодоления недостатка «чистых» антропологических единиц уже сравнительно давно стали использовать в качестве образцовых мер и эталонов деревянные сажени, медные фунты, мерные бутыли и т. д. Вещественные образцовые меры и эталоны не могли преодолеть всех недостатков измерений, основанных на антропологи-

ческих единицах. Требовался переход на принципиально новые единицы измерений, что и было сделано при создании метрической системы мер. Научное обоснование такого перехода обеспечила метрология.

Метрология как наука зародилась в конце XVIII века во времена Великой французской буржуазной революции 1789 г. Основоположники метрологии – Кулон, Лавуазье, Лагранж, Лаплас и другие известные ученые – предложили перейти от антропологических единиц к естественным единицам измерений (в дальнейшем получившим название естественнонаучных единиц). В основу естественных единиц измерений были положены такие единицы, как метр, килограмм и секунда, связанные с размерами Земли и с вращением ее вокруг своей оси. За единицу массы (единицу «веса» в первоначальной редакции) был принят килограмм, приравненный к массе («весу») воды определенного объема при заданной температуре. 7 мая 1795 г. Конвент принял закон о внедрении метрической системы мер во Франции. Фактически же это внедрение происходило длительное время и потребовало больших усилий.

Приведем первые определения основных единиц метрической системы мер:

1) *метр* – это одна сорокамиллионная часть земного меридиана, проходящего через город Париж.

2) *килограмм* – вес 1 дм^3 чистой воды при +4 ^{0}C.

3) *секунда* – это 1/86 400 часть солнечных суток.

Таким образом, от единиц, связанными с размерами тела человека, был сделан пере

Первые определения метрических мер измерения имели чисто академический (научный) вид (отсюда и название «естественно-научные единицы»), и их практическое использование было затруднено. Например, в определении килограмма есть нечеткое понятие «чистая вода». Это какая вода: из озера, из реки, из родника или как-то специально приготовленная? Кроме того, возникают трудности при воспроизведении объема 1 дм^3 и при поддержании температуры воды +4 ^{0}C, что требуется по приведенному определению килограмма. Для преодоления этих недостатков был сделан переход на материальное воспроизведе-

ние единиц измерений. Например, метр был воспроизведен в виде платиновой линейки, а затем в виде расстояния между штрихами, нанесенными на двутавровую балочку из сплава платины и иридия. Аналогично килограмм стал воспроизводиться в виде цилиндрической гири из сплава платины и иридия. Соответственно изменились определения единиц измерений, причем определение метра просуществовало до 1960 г., а определение килограмма (как массы международного прототипа килограмма) оказалось настолько удачным, что существует до сих пор. Более подробно единицы измерений рассмотрены ниже, в последующих разделах учебного пособия.

В России основоположником метрологии принято считать Дмитрия Ивановича Менделеева (1834–1907), хотя и до него проводились отдельные работы по метрологии и метрологическому обеспечению измерений. Д.И. Менделеев был разносторонним ученым. Он хорошо известен как химик и создатель периодической системы химических элементов. Кроме того, он занимался воздухоплаванием и даже летал на воздушном шаре. По заданию правительства разработал для русской армии бездымный порох. До этого в русской армии использовался дымный порох, малоэффективный и дающий много дыма (особенно при стрельбе из орудий большого калибра).

Кроме чисто научной деятельности, Д.И. Менделеев проводил большую организационную работу. В 1893 г. им была создана Главная палата мер и весов, являвшаяся, по существу, научно-исследовательским институтом метрологического профиля. В Англии аналогичная организация (Метрологическое отделение Национальной физической лаборатории) была создана в 1900 г., а в США – в 1901 г. (Национальное бюро стандартов).

Под руководством Д.И. Менделеева была проведена работа по сличению русской системы эталонов (аршин, сажень, фунт) с английскими и метрическими эталонами мер и весов. Была сделана попытка перейти на метрическую систему мер (метр, килограмм), но удалось добиться лишь ее факультативного применения.

Метрическая система мер как обязательная была официально признана лишь после Октябрьской революции 1917 года. 14 сентября 1918 г. был принят декрет Совнаркома «О введении Международной метрической системы мер и весов». Практически же это удалось сделать лишь через 9 лет – в 1927 г.

Для внедрения Международной метрической системы были созданы Палаты мер и весов во всех союзных республиках СССР и во многих крупных городах страны (в том числе и в Свердловске).

В дальнейшем Палаты мер и весов были преобразованы в Метрологические институты. Головным стал Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева, преобразованный в настоящее время в Федеральное государственное унитарное предприятие «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург).

Организационную работу по метрологии и стандартизации до 2005 года возглавлял Госстандарт России. В 2005 году создано Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование), которое заменило Госстандарт.

В области научной метрологии головной организацией по-прежнему остается Федеральное государственное унитарное предприятие (ФГУП) «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». В Екатеринбурге работу по научной метрологии проводит Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ).

Кроме того, в составе Минпромэнерго организован Департамент технического регулирования и метрологии, на который возложена разработка технических регламентов.

1.2. Термины и определения

Термины и определения, используемые в настоящем учебном пособии, соответствуют межгосударственным рекомендациям РМГ 29 – 99 [53], введенным с 01.01.2001 взамен ГОСТ 16263 – 70.

Приводимые ниже метрологические термины и их определения заимствованы также из словаря-справочника [26] и частично из периодических изданий в той части, в которой они не противоречат рекомендациям [117].

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Измерение – это совокупность операций по сравнению опытным путем измеряемой величины с некоторым ее значением, принятым за единицу измерения.

Единица измеряемой величины – это значение измеряемой величины, которому по определению присвоено числовое значение, равное 1.

Например, при измерении массы тела единицей измерения является «тело» с массой 1 килограмм (по определению килограмм равен массе международного прототипа килограмма); при измерении размеров комнаты шагами единицей измерения является 1 шаг.

Истинное значение величины – это значение величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую величину.

Действительное значение величины – это значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

В качестве действительного значения измеряемой величины принимаются номинальные значения эталонов, образцовых мер, стандартных образцов, образцовых средств измерений и т. п.

Результат измерения – это значение величины, полученное путем ее измерения.

Равноточные измерения – это ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерений и в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения – это ряд измерений какой-либо величины, выполненных разными по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Прежде чем обрабатывать ряд измерений, необходимо убедиться в том, что все измерения этого ряда являются равноточными.

Неравноточные измерения обрабатывают в целях получения результатов измерений только в том случае, когда невозможно получить ряд равноточных измерений.

Однократное измерение – это измерение, выполненное один раз.

Во многих случаях на практике выполняются именно однократные измерения. Например, измерение конкретного момента времени по часам проводится один раз, т. е. выполняется однократное измерение.

Для большей уверенности в получаемом результате одного измерения иногда недостаточно, поэтому выполняются два, три и более измерений одной и той же величины. В этом случае могут быть допущены выражения «двукратное измерение», «трехкратное измерение» и т. д.

Многократное измерение – это измерение одного и того же значения искомой величины, состоящее из ряда однократных измерений.

При многократных измерениях возникает вопрос, начиная с какого числа измерений их можно считать многократными. Строгого ответа на этот вопрос нет. Однако известно, что при числе измерений, равном четырем (и более), ряд измерений может быть обработан в соответствии с требованиями математической статистики. Это означает, что при четырех измерениях (и более) их можно считать многократными [26]. За результат многократных измерений одной и той же величины обычно принимают среднее арифметическое значение x, полученное по формуле (1.1) для равноточных измерений и по формуле (1.2) – для неравноточных измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \,, \tag{1.1}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^{n} P_i} \,, \tag{1.2}$$

где x_i – результат i-го измерения;

n – число измерений;

P_i – весовой коэффициент i-го измерения.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) – это значение величины, полученное по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \qquad (1.3)$$

где σ – СКО;

x_i – результат i-го измерения;

$\bar{x}$ – среднее арифметическое значение, полученное по формуле (1.1) или (1.2);

n – число измерений.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) среднего арифметического значения ($\sigma_{\bar{x}}$) – это значение величины, полученное по формуле

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \qquad (1.4)$$

Отметим, что среднее квадратическое отклонение σ по формуле (1.3) характеризует разброс результатов измерений около среднего арифметического значения $\bar{x}$ (чем больше σ, тем больше результаты отдельных измерений отклоняются от $\bar{x}$). Среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения $\sigma_{\bar{x}}$ по формуле (1.4) характеризует разброс средних арифметических значений $\bar{x}_j$ около генерального среднего значения $\bar{\bar{x}}$ (чем больше $\sigma_{\bar{x}}$, тем больше $\bar{x}_j$ отклоняется от $\bar{\bar{x}}$; здесь $\bar{x}_j$ – среднее арифметическое значение j-й серии многократных измерений одной и той же величины; $\bar{\bar{x}}$ – генеральное среднее арифметическое значение по результатам всех серий многократных измерений одной и той же величины).

Прямое измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных путем считывания с отчетных устройств используемых средств измерений.

Например, измерение массы на циферблатных весах, измерение температуры термометром, измерение длины с помощью линейных мер и т. д.

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямому измерению.

Например, нахождение плотности однородного тела по его массе.

Рабочее средство измерений – это средство измерений (СИ), предназначенное для измерений, не связанных с передачей размера единицы другим средствам измерений. К рабочим СИ относят средства измерений, применяемые в научных целях, при контроле параметров продукции и технологических процессов, в сельском хозяйстве, в торговле, спорте и других видах деятельности, где необходимо получить значение той или иной физической величины.

Метрологическое средство измерений – это средство измерений (СИ), предназначенное для метрологических целей: воспроизведения единицы и (или) ее хранения или передачи размера единицы рабочим СИ. К метрологическим СИ относят эталоны, образцовые средства измерений (ОСИ), поверочные установки, стандартные образцы, средства сравнения (компараторы) и др.

Поверка средства измерений – это экспериментальное определение метрологических характеристик средства измерений и установление его пригодности к применению.

1.3. Задачи метрологии

К задачам метрологии относятся:

1) разработка и обоснование единиц измерений (единиц величин);
2) воспроизведение единиц измерений (единиц величин);
3) разработка, обоснование и аттестация методик выполнения измерений (МВИ);
4) аттестация средств измерений (СИ) по нормируемым метрологическим характеристикам;
5) стандартизация;
6) сертификация.

Разработка, обоснование и воспроизведение единиц измерений, а также аттестация МВИ и СИ подробно рассмотрены ниже, и в данном разделе учебного пособия эти задачи не рассматриваются.

Стандартизация и сертификация, строго говоря, к метрологии как науке об измерениях прямого отношения не имеют. Это самостоятельные дисциплины.

Стандартизация – это работа по установлению и применению норм и правил с целью упорядочить и оптимизировать деятельность в конкретной области (например, в области машиностроения, науки, экономики, торговли, транспорта и т. д.).

Сертификация – это подтверждение качества продукции или производства и их соответствия действующим стандартам и другим нормативно-техническим документам (НТД).

Хотя стандартизация и сертификация являются самостоятельными дисциплинами, они тесно «увязаны» с метрологией и опираются на нее. Часто трудно сказать, где заканчивается стандартизация и сертификация и начинается метрология, – настолько эти дисциплины тесно переплетены. В связи с этим стандартизация и сертификация отнесены к задачам метрологии (хотя это и является, как уже было сказано, несколько условным).

Деятельность в области стандартизации определяется принятыми в установленном порядке нормативными документами.

Нормативные документы, принятые в Российской Федерации:

1) **Законы Российской Федерации** (РФ).

2) **Указы Президента РФ**.

3) **Постановления Правительства РФ**.

Законы РФ, указы Президента и постановления Правительства обязательны к исполнению на всей территории РФ и на всех предприятиях, во всех организациях и учреждениях независимо от форм собственности.

4) **Государственные стандарты (ГОСТы)** – нормативные документы, обязательные к исполнению на всей территории РФ и во всех отраслях народного хозяйства. ГОСТы, введенные еще в СССР, действуют на всей территории

РФ до их официальной отмены и до замены на Государственные стандарты России (на ГОСТ Р).

5) **Отраслевые стандарты (ОСТы)** – нормативные документы, обязательные к исполнению на всей территории РФ в тех отраслях, к которым они относятся.

6) **Стандарты предприятий (СТП)** – нормативные документы, обязательные к исполнению на том предприятии, на котором они приняты и утверждены в установленном порядке.

7) **Технические условия (ТУ)** – технические документы, которым должны соответствовать те изделия, на которые данные ТУ распространяются.

8) **Руководящие документы (РД)** и **методические указания метрологических институтов (МИ)** носят рекомендательный характер и регламентируют деятельность в тех областях, на которые распространяются.

Примеры обозначения и наименования основных нормативных документов, используемых в настоящее время, приведены в конце учебного пособия в библиографическом списке [44–54].

Нормативных документов разного уровня насчитывается более 250 тысяч (в том числе около 25 тысяч ГОСТов, около 40 тысяч ОСТов и около 160 тысяч СТП и ТУ). Более точное число нормативных документов назвать затруднительно, так как они находятся в постоянном «движении»: часть нормативных документов регулярно отменяется, часть – вводится вновь, часть – видоизменяется и т. д.

В настоящее время намечаются серьезные преобразования в области стандартизации. Начало преобразований положено Законом РФ «О техническом регулировании», принятым в самом конце 2002 г. Основным нормативным документом по этому Закону становится технический регламент (ТР). В качестве ТР могут выступать соответствующие Законы РФ, указы Президента и постановления Правительства. ТР могут действовать и как самостоятельные обязательные нормативные документы, в которых приводятся ссылки на Законы, Указы, постановления, ГОСТы и другие нормативные документы. При этом

намечается отменить ОСТы, а часть ГОСТов перевести из обязательных в рекомендательные. Преобразования планируется проводить постепенно на протяжении нескольких лет. В течение всего переходного периода действует прежняя система стандартизации.

Кроме перечисленных выше нормативных документов (НД), все большее распространение получают следующие, относительно новые, НД.

1) **Межгосударственный стандарт СНГ** (обозначается ГОСТ, как и стандарт СССР) – принимается странами СНГ и становится обязательным после утверждения.

2) **Гармонизованные стандарты** – становятся обязательными после утверждения в качестве национального стандарта, требования которого соответствуют международным или региональным стандартам (обозначаются: ГОСТ Р ИСО; ГОСТ Р МЭК и т. д., где ИСО, МЭК и пр. – обозначение соответствующего международного стандарта).

3) **Рекомендации межгосударственные (РМГ)** – нормативный документ стран СНГ. Утверждается как рекомендательный или обязательный на территории РФ.

4) **Правила (ПР) и рекомендации (Р)** – нормативные документы. После утверждения могут иметь обязательный или рекомендательный статус.

Подробнее затронутые вопросы освещены в учебных пособиях [17–19]. Примеры обозначения стандартов приведены в библиографическом списке (см., например, [44–54]).

Следует отметить большую значимость для народного хозяйства нормативных документов, без которых фактически невозможно современное производство. Известно, например, шутливое высказывание, что стандарты для промышленности – то же, что воздух для человека. Есть воздух – и человек его не замечает, нет воздуха – и человек задыхается. Аналогично и со стандартами. Есть стандарты – и их не замечают, нет стандартов – и производство замирает.

1.4. Международная система единиц

1.4.1. Общие положения

Унификация единиц измерений, получившая с созданием метрической системы мощный импульс, в дальнейшем сменилась появлением и распространением многочисленных и разнообразных систем единиц. В начале XX века насчитывалось едва ли не два десятка различных систем единиц. Назовем некоторые из этих систем: СГС (сантиметр – грамм – секунда), электромагнитная система СГСМ, электростатическая система СГСЭ, практическая система МКС (метр – килограмм – секунда), система МКСА (метр – килограмм – секунда – ампер) и т. д. Проблема унификации единиц снова стала актуальной.

Вопрос о создании единой Международной системы единиц впервые был поднят еще в 1913 г. на V Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ), но практические работы в этой области начались лишь в середине XX века.

В 1948 г. на IX ГКМВ было рассмотрено предложение о принятии Международной практической системы с основными единицами – метром, килограммом, секундой и одной из практических электрических единиц.

В 1954 г. на X ГКМВ было решено, что Международная система должна быть универсальна, т. е. охватывать все области измерений, и в качестве ее основных единиц следует принять метр, килограмм, секунду, ампер, градус Кельвина и свечу (канделу).

Наконец, в 1960 г. XI ГКМВ приняла решение:

1) присвоить системе, основанной на шести основных единицах, наименование «Международная система единиц»;

2) установить международное сокращенное наименование этой системы «SI» (от начальных букв Sisteme International);

3) ввести таблицу приставок для образования кратных и дольных единиц.

Международная система продолжала совершенствоваться и развиваться. Так, была добавлена седьмая основная единица – моль (единица измерения количества вещества). Кроме того, наименование «градус Кельвина» было заме-

нено наименованием «кельвин» и дало новое определение единице измерения времени (секунде).

В русской транскрипции Международная система единиц сокращенно называется СИ. В Советском Союзе (СССР) Международная система единиц введена как обязательная с 1 января 1982 г., и с этой же даты действовал ГОСТ 8.417–81.ГСИ. Единицы физических величин, замененный в настоящее время на ГОСТ 8.417–2002 [49], введенный в действие с 1 сентября 2003 г.

Единицы СИ должны применяться во всей вновь разрабатываемой технической документации и в публикациях, а также в учебных процессах всех учебных заведений, в учебниках и в учебных пособиях. Оговорено применение и некоторых единиц, не входящих в СИ.

Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикациях их результатов, если в них не рассматриваются и не используются результаты измерений конкретных физических величин, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам (например, шкалы твердости Роквелла и Виккерса, светочувствительности фотоматериалов и др.).

В настоящее время Международную систему составляют следующие единицы величин:

1) семь основных (табл. 1.1);

2) производные единицы (табл. 1.2–1.4);

3) двадцать абсолютных и десять относительных внесистемных единиц, допускаемых к применению наравне с единицами СИ (табл. 1.5; 1.6);

4) восемь внесистемных единиц, временно допускаемых к применению (табл. 1.7).

1.4.2. Основные единицы

Основные единицы Международной системы СИ приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Основные единицы СИ

Величина		**Единица**			
Наименование	**Размерность**	**Наименование**	**Обозначение**		**Определение**
			международное	русское	
1	2	3	4	5	6
Длина	*L*	метр	m	м	Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 s [XVII ГКМВ (1983 г.), Резолюция 1]
Масса	*M*	килограмм	kg	кг	Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма [I ГКМВ (1889 г.) и III ГКМВ (1901 г.)]
Время	*T*	секунда	s	с	Секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция I]
Электрический ток (сила электрического тока)	*I*	ампер	A	А	Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 m один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 m силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ N [МКМВ (1946 г.), Резолюция 2, одобренная IX ГКМВ (1948 г.)]
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К	Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды [XIII ГКМВ (1967 г.), Резолюция 4]

Продолжение таблицы 1.1

Количество вещества	*N*	моль	mol	моль	Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 kg. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицам или специфицированными группами частиц [XIV ГКМВ (1971 г.), Резолюция 3]
Сила света	*J*	кандела	cd	кд	Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Hz, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет1/683 W/sr [XVI ГКМВ(1979 г.), Резолюция 3]

Примечания

1. Кроме термодинамической температуры (обозначение T), допускается применять также температуру Цельсия (обозначение t), определяемую выражением $t = T - T_0$, где $T_0 = 273{,}15$ К. Термодинамическую температуру выражают в кельвинах, температуру Цельсия – в градусах Цельсия. По размеру градус Цельсия равен кельвину. Градус Цельсия – это специальное наименование, используемое в данном случае вместо наименования «кельвин».

2. Интервал или разность термодинамических температур выражают в кельвинах. Интервал или разность температур Цельсия допускается выражать как в кельвинах, так и в градусах Цельсия.

Обозначение Международной практической температуры в Международной температурной шкале 1990 г., если ее необходимо отличить от термодинамической температуры, образуют путем добавления к обозначению термодинамической температуры индекса «90» (например, T_{90} или t_{90}) [3].

1.4.3. Производные единицы

Примеры производных единиц СИ, образованных с использованием основных единиц СИ, приведены в табл. 1.2. Примеры производных единиц СИ, имеющих специальное название, приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.2

Примеры производных единиц СИ, наименования которых образованы из наименований основных единиц

№ п/п	Измеряемая величина	Единица		
		Наименование	Обозначение	
			международное	русское
1	Площадь	квадратный метр	m^2	$м^2$
2	Скорость	метр в секунду	m/s	м/с
3	Ускорение	метр на секунду в квадрате	m/s^2	$м/с^2$
4	Плотность	килограмм на кубический метр	kg/m^3	$кг/м^3$
5	Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	A/m^2	$А/м^2$
6	Напряженность магнитного поля	ампер на метр	A/m	А/м
7	Молярная концентрация компонента	моль на кубический метр	mol/m^3	$моль/м^3$
8	Яркость	кандела на квадратный метр	cd/m^2	$кд/м^2$

Таблица 1.3

Примеры производных единиц СИ, имеющих специальные наименования

№ п/п	Измеряемая величина	Единица			Выражение через основные единицы СИ
		Наименование	Обозначение		
			международное	русское	
1	Частота	герц	Hz	Гц	s^{-1}
2	Сила, вес	ньютон	N	Н	$m \cdot kg \cdot s^2$
3	Давление	паскаль	Pa	Па	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^2$
4	Количество электричества	кулон	C	Кл	$s \cdot A$
5	Электрическое напряжение	вольт	V	В	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
6	Электрическая емкость	фарад	F	Ф	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
7	Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$

Продолжение таблицы 1.3

8	Индуктивность	генри	H	Гн	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
9	Плоский угол	радиан	rad	рад	$m \cdot m^{-1}=1$
10	Телесный угол	стерадиан	sr	ср	$m^2 \cdot m^{-2}=1$

Таблица 1.4

Примеры производных единиц СИ, наименования которых образованы с использованием наименований, приведенных в табл. 1.3

№ п/п	Измеряемая величина	Единица			Выражение через основные единицы СИ
		Наименование	Обозначение		
			международное	русское	
1	Момент силы	ньютон-метр	N·m	Н·м	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
2	Динамическая вязкость	паскаль-секунда	Pa·s	Па·с	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
3	Плотность заряда (пространственная)	кулон на кубический метр	C/m^3	$Кл/м^3$	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
4	Электрическое смещение	кулон на квадратный метр	C/m^2	$Кл/м^2$	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
5	Напряженность электрического поля	вольт на метр	V/m	В/м	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
6	Диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	F/m	Ф/м	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^{-2}$
7	Магнитная проницаемость	генри на метр	H/m	Гн/м	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$

1.4.4. Внесистемные единицы

Внесистемные единицы, постоянно допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в табл. 1.5 и 1.6

Таблица 1.5

Абсолютные внесистемные единицы, постоянно допускаемые к применению наравне с единицами СИ

№ п/п	Наименование измеряемой величины	Единица				
		Наименование единицы	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Область применения
			международное	русское		
1	Масса	тонна	T	Т	$1 \cdot 10^3$ kg	Все области
		атомная единица массы	U	а.е.м.	$1{,}660502 \cdot 10^{-27}$ kg	Атомная физика
2	Время	минута	Min	мин	60 s	Все области
		час	*H*	ч	3600 s	
		сутки	*D*	сут	86400 s	
3	Плоский угол	градус	...°	...°	(π/180) rad	Все области
		минута	...'	...'	(π/10800) rad	
		секунда	..."	... "	(π/648000) rad	
		град (гон)	Доп	град	(π/200) rad	Геодезия
4	Объем, вместимость	литр	*L*	л	$1 \cdot 10^{-3}$ m^3	Все области
5	Длина	астрономическая единица	*U*a	а.е.	$1{,}49598 \cdot 10^{11}$ m	Астрономия
		световой год	*L*y	св.год	$9{,}4605 \cdot 10^{15}$ m	
		парсек	*P*c	пк	$3{,}0857 \cdot 10^{16}$ m	
6	Оптическая сила	диоптрия	-	дптр	1 m^{-1}	Оптика
7	Площадь	гектар	Ha	га	$1 \cdot 10^4$ m^2	Сельское хозяйство
8	Энергия	электрон-вольт	*eV*	эВ	$1{,}60218 \cdot 10^{-19}$ j	Физика
		киловатт-час	*kW·h*	кВт·ч	$3{,}6 \cdot 10^6$ j	Для счетчиков электрической энергии
9	Полная мощность	вольт-ампер	*V·A*	В·А		Электротехника

Продолжение таблицы 1.5.

10	Реактивная мощность	вар	*V*az	вар		Электротехника
11	Электрический заряд; количество электричества	ампер-час	*A·h*	А·ч	$3{,}6 \cdot 10^3$ С	Электротехника

Примечания

1. Наименования и обозначения единиц времени (минута, час, сутки), плоского угла (градус, минута, секунда), астрономической единицы, диоптрии и атомной единицы массы не допускается применять с приставками.

2. Допускается также применять другие единицы времени, получившие широкое распространение, например неделя, месяц, год, век, тысячелетие.

3. Обозначения единиц плоского угла пишут над строкой.

4. Единицу объема «литр» не рекомендуется применять при точных измерениях (например, вместо 1l следует применять $1 \cdot 10^{-3}$ m^3 = 1 $дм^3$). При возможности смещения обозначения «l» («эль») с цифрой «1» допускается использовать обозначение «L».

Таблица 1.6

Внесистемные относительные и логарифмические величины и их единицы, постоянно допускаемые к применению наравне с единицами СИ

№ п/п	Наименование измеряемой величины	Наименование единицы	Обозначение		Значение
			международное	русское	
1	Относительная величина; КПД; относительное удлинение; относительная плотность; деформация; относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости; магнитная восприимчивость и т. п.	единица	*1*	*1*	1
		процент	%	%	$1 \cdot 10^{-2}$
		промилле	‰	‰	$1 \cdot 10^{-3}$
		миллионная доля	ppm	млн$^{-1}$	$1 \cdot 10^{-6}$
2	Логарифмическая величина; уровень звукового давления; усиление; ослабление и т. п.	бел	B	Б	1 B = $\lg(P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$ 1 B = $2\lg(F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10}\,F_1$, где P_1, P_2 – мощность, энергия и т. п.; F_1, F_2 – напряжение, сила тока и т. п.
		децибел	dB	дБ	0,1 B
3	Логарифмическая величина; уровень громкости	фон	phon	фон	1 фон равен уровню громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 Hz равен 1dB (1phon = 1dB при f = 1000 Hz)
4	Логарифмическая величина; частотный интервал	октава	–	окт	1 октава равна $\log_2(f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 2$

Продолжение таблицы 1.6

		декада	–	дек	1 декада равна $\lg(f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 10$, где f_2, f_1 – частоты
5	Логарифмическая величина (натуральный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	непер	Np	Нп	1 Np = 0,8686…B 1 Np = 8,686… dB

Внесистемные единицы временно (до их отмены), допускаемые к применению наравне с единицами, СИ приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Внесистемные единицы, временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ

п/п	Измеряемая величина	Наименование единицы	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Применение
			международное	русское		
1	Длина	морская миля	n mile	миля	1852 m	В морской навигации
2	Масса	карат	–	кар	$2\cdot10^{-4}$kg	Для драгоценных камней и жемчуга
3	Линейная плотность	текс	tex	текс	$1\cdot10^{-6}$kg/m	В текстильной промышленности
4	Скорость	узел	kn	уз	0,514 m/s	В морской навигации
5	Частота вращения	оборот в секунду	r/s	об/с	1 s^{-1}	Электротехника
		оборот в минуту	r/min	об/мин	0,016 s^{-1}	
6	Давление	бар	bar	бар	$1\cdot10^5$ Pa	Физика
7	Ускорение	гал	Gal	Гал	0,01 m/s^2	Гравиметрия

1.4.5. Кратные и дольные единицы

Десятичные кратные и дольные единицы, а также их наименования и обозначения следует образовывать с помощью множителей и приставок, приведенных в табл. 1.8.

Присоединение к названию единицы двух и более приставок подряд не допускается. Например, вместо наименования единицы *микромикрофарад* следует писать – *пикофарад*.

Приставку или ее обозначение следует писать слитно с наименованием единицы, к которой она присоединяется, или соответственно с ее обозначением.

Таблица 1.8

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Наименование приставки	Обозначение		Множитель	Наименование приставки	Обозначение	
		международное	русское			международное	русское
10^{24}	иотта	Y	И	10^{-1}	деци	d	д
10^{21}	зетта	Z	З	10^{-2}	санти	c	с
10^{18}	экса	E	Э	10^{-3}	милли	m	м
10^{15}	пета	P	П	10^{-6}	микро	μ	мк
10^{12}	тера	T	Т	10^{-9}	нано	n	н
10^{9}	гига	G	Г	10^{-12}	пико	p	п
10^{6}	мега	M	М	10^{-15}	фемто	f	ф
10^{3}	кило	k	к	10^{-18}	атто	a	а
10^{2}	гекто	h	г	10^{-21}	зепто	z	з
10^{1}	дека	da	да	10^{-24}	иокто	y	и

Примечания

1. Примеры использования дольных и кратных приставок: $5 \cdot 10^{3}$ В = 5 кВ; $7 \cdot 10^{-3}$ А = 7 мА; $6 \cdot 10^{6}$ Ом = 6 МОм; $6 \cdot 10^{-3}$ Ом = 6 мОм.

2. Между последней цифрой числа и обозначением оставляют пробел. Например: 100 кВт; 80 %; 20 ˚С; (100,0 ± 0,1) кг; (1/50) s или (1/50) с.

3. В связи с тем, что наименование основной единицы массы – килограмм – содержит приставку «кило», для образования дольных и кратных единиц массы используют дольную единицу массы – грамм и приставки присоединяют к слову «грамм», например миллиграмм (mg или мг) вместо микрокилограмм (mkg или мкг).

1.4.6. Единицы количества информации

Стандарт 8.417–2002 [116] содержит справочные приложения, в которые вошли единицы величин, нашедшие широкое применение, но не в полной мере отвечающие требованиям международной системы единиц СИ. Одними из таких величин являются единицы количества информации (табл. 1.9), приведенные в справочном прил. А [116].

Таблица 1.9

Единицы количества информации

Наименование величины	**Единица**				**Примечание**
	Наименование	**Обозначение**		**Значение**	
		международное	**русское**		
Количество информации	бит	bit	Бит	1	Бит – единица информации в двоичной системе счисления (двоичная единица информации)
	байт	B (byte)	Б (байт)	1 Б = 8 бит	

Примечания

1. В соответствии с международным стандартом МЭК 60027-2 [121] единицы «бит» и «байт» применяются с приставками СИ (раздел 1.3.4 и табл. 1.8).

2. Исторически сложилось так, что с наименованием «байт» некорректно (вместо $1000 = 10^3$ принято $1024 = 2^{10}$) используют приставки СИ: 1 Кбайт = 1024 байт, 1 Мбайт = 1024 Кбайт, 1 Гбайт = 1024 Мбайт и т. д. При этом обозначение Кбайт начинают с прописной (большой) буквы «К» в отличие от строчной (малой) буквы «к» для обозначения множителя 10^3.

1.4.7. Достоинства Международной системы единиц

В заключение отметим ряд достоинств Международной системы единиц (СИ).

СИ – универсальна. Она охватывает почти все области физических явлений и почти все отрасли народного хозяйства.

Построение СИ отвечает современному уровню метрологии – оптимальный выбор основных единиц и, в частности, их числа и размеров, согласован-

ность (когерентность) производных единиц, образование кратных и дольных единиц посредством десятичных приставок и некоторые другие положения.

Международной системе присуща достаточная гибкость. Она допускает применение и некоторого числа внесистемных единиц. Это живая и развивающаяся система. Так, например, число основных единиц сравнительно недавно увеличено с шести до семи и может быть еще увеличено, если это будет необходимо для охвата какой-либо дополнительной области явлений. В будущем не исключено также смягчение некоторых действующих в СИ регламентирующих правил.

Международная система призвана стать повсеместно применяемой единственной системой единиц физических величин. Унификация единиц представляет давно назревшую необходимость. Уже сейчас СИ принята в большинстве стран мира и сделала ненужным многочисленные системы единиц, котировавшиеся еще несколько десятилетий назад.

Международная система единиц признана многими влиятельными международными организациями, включая Организацию Объединенных Наций (ООН). Среди признавших СИ – Международная организация по стандартам (ИСО), Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), Международная электротехническая комиссия (МЭК), Международный союз фундаментальной и прикладной физики и др. [23; 24–26].

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

2.1. Общие положения

На практике измерение той или иной величины проводят обычно один раз. Имеет ли ценность такое измерение и какова его погрешность? На первую часть вопроса ответ должен быть положительным, т. е. даже единичное измерение имеет определенную ценность. На вторую часть вопроса ответ будет неоднозначным. Имея паспорт прибора или результаты его исследования, невозможно сказать, какова погрешность единичного измерения. Можно лишь сказать, что она не более некоторой величины, определяемой классом точности

этого прибора. Например, классу 0,05 соответствует погрешность не более ±0,05 % от верхнего предела шкалы, классу 0,02 соответствует погрешность не более ±0,02 % от верхнего предела шкалы и т. д. Отметим, что все сказанное правомерно, если методические и другие погрешности малы и ими можно пренебречь. Такое положение, когда известна лишь верхняя возможная граница погрешности, обычно допустимо и вполне приемлемо при проведении практических измерений. Если же этого недостаточно, то каждый раз необходимо проводить специальное исследование.

Целью такого исследования, как правило, бывает определение погрешности результата измерения и разделение этой погрешности на систематическую и случайную составляющие.

Кроме того, в ходе измерений могут появляться промахи (из-за которых появляются грубые погрешности), вызванные неверными действиями оператора или неисправностью измерительных устройств. Выявление и исключение промахов также является составной частью исследования.

Систематические и случайные погрешности в малой степени всегда присутствуют в самых точных измерениях. Появления грубых погрешностей почти всегда можно избежать, и их не следует допускать в качественной работе.

Систематические погрешности присущи измерительной системе и вызываются, как правило, рядом причин. Погрешность, вызванная какой-либо одной причиной, имеет один знак. Погрешности же, вызванные несколькими причинами, могут компенсировать друг друга. Систематические погрешности могут быть обусловлены используемым прибором, ошибочными действиями оператора, методом измерений, воздействием окружающей среды и т. д.

Случайные погрешности, получаемые при одинаковых или почти одинаковых условиях, обусловливаются механическими сотрясениями, случайными колебаниями температуры, вибрациями, помехами и т. д. В силу вероятностного характера случайных погрешностей они могут быть оценены статистическими методами. Некоторые из наиболее общих методов будут рассмотрены ниже.

Рассмотренные типы погрешностей (систематические и случайные) можно проиллюстрировать следующим примером (рис. 2.1).

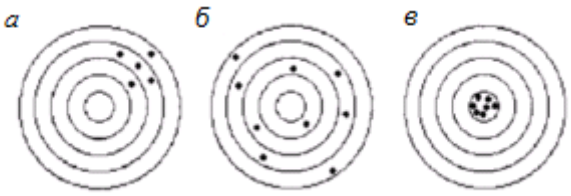


Рис. 2.1. Мишени, иллюстрирующие стрельбу с систематической погрешностью (*а*), со случайной погрешностью (*б*), с пренебрежимо малыми погрешностями (*в*)

Три человека делают по n выстрелов в мишень. Попадания первого стрелка оказались выше и правее «яблочка» (см. рис. 2.1, *а*). Отклонение среднего попадания от «яблочка» представляет собой систематическую погрешность. Эта погрешность могла быть вызвана неисправным прицелом, ветром, неправильным положением винтовки и т. д. Независимо от причины, такую погрешность можно избежать или сделать на нее поправку регулировкой прицела.

Второй стрелок разбросал свои выстрелы по всему полю мишени (см. рис. 2.1, *б*). В этом случае выстрелы свободны от систематической погрешности (среднее попадание в центре «яблочка»), но имеют большие случайные погрешности. Эти погрешности могли быть вызваны порывами ветра, плохими патронами, низкой квалификацией стрелка и т. д. Независимо от причины, избежать такие погрешности введением поправки невозможно. Эти погрешности можно лишь учесть и описать статистическими методами.

Третий стрелок сделал все выстрелы точно в центр мишени (см. рис. 2.1, *в*). Этот случай представляет собой точную стрельбу, в которой отсутствуют систематические погрешности, промахи и имеется незначительная случайная погрешность.

Поскольку случайные погрешности имеют вероятностный характер, то они могут быть описаны как случайные величины. В связи с этим, прежде чем перейти к изучению случайных погрешностей и методов их определения, напомним кратко основные характеристики случайных величин.

Случайной величиной будем называть такую величину, которая в результате опыта может принимать различные (случайные) числовые значения.

Различают случайные величины дискретные и непрерывные в зависимости от того, принимает случайная величина только определенные дискретные значения или может принимать любые значения в заданном интервале (или интервалах).

Случайные величины характеризуются законами распределения. При этом различают два вида законов: интегральный и дифференциальный.

Интегральный закон распределения или *интегральная функция распределения случайной величины* $F(x)$ характеризует вероятность события того, что конкретная реализация случайной величины X будет принимать значения, меньшие некоторой текущей величины x:

$$F(x) = P[X<x]. \tag{2.1}$$

Интегральный закон распределения – это неубывающая функция, которая при значении $x = -\infty$ равна нулю, а при $x = +\infty$ равна единице (т. е. $F(-\infty) = 0$, $F(+\infty) = 1$).

Интегральная функция распределения – самая универсальная характеристика случайной величины. Она существует для всех случайных величин, как дискретных, так и непрерывных, и полностью представляет случайную величину с вероятностной точки зрения.

Для непрерывной случайной величины с непрерывной и дифференцируемой функцией распределения можно найти *дифференциальный закон распределения* $f(x)$, выраженный как

$$f(x) = F'(x). \tag{2.2}$$

Эта функция называется также *плотностью распределения вероятности непрерывной случайной величины*. Функция $f(x)$ неотрицательна и подчиняется условию

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot dx = 1. \tag{2.3}$$

2.2. Нормальный закон распределения

Плотность вероятностей при нормальном законе распределения случайной величины *x* описывается соотношением

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x}_0)^2}{2\cdot\sigma_0^2}}, \qquad (2.4)$$

где σ_0 – среднее квадратическое отклонение (СКО);

$\bar{x}_0$ – математическое ожидание.

Отметим, что объем выборки ограничен и вместо σ_0 и $\bar{x}_0$ (σ_0 и $\bar{x}_0$ соответствуют числу измерений $n\to\infty$) на практике используются оценки СКО и среднего арифметического значения (соответственно σ и $\bar{x}$).

График функции *f*(*x*) приведен на рис. 2.2. При изменении $\bar{x}_0$ и постоянстве СКО вся кривая распределения плотности вероятностей перемещается вдоль оси абсцисс, не изменяя своей формы (рис. 2.2, *а*, кривые 1, 2, 3).

Параметр σ_0 характеризует форму кривой распределения плотности вероятностей и является количественным показателем степени рассеивания случайных величин около их математического ожидания. При уменьшении σ_0 и неизменности $\bar{x}_0$ кривая распределения вытягивается вдоль оси ординат, а при увеличении – становится более плоской и растягивается вдоль оси абсцисс (рис. 2.2, *б*, кривые 1, 2, 3).

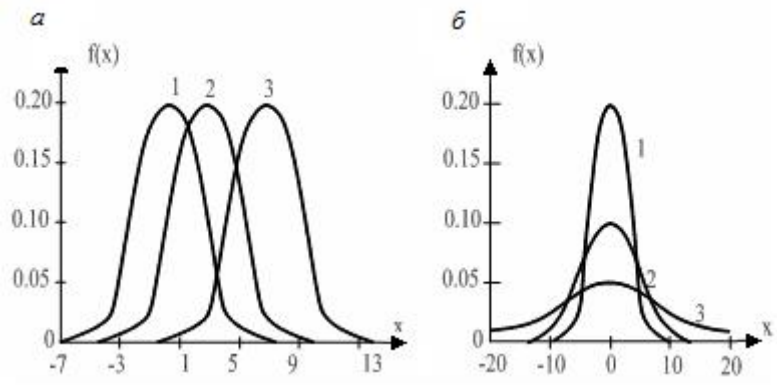


Рис. 2.2. Влияние параметров $\bar{x}_0$ (*а*) и σ_0(*б*) на вид функции *f*(*x*)

Интегральная функция распределения *F(x)* (для нормального закона) описывается соотношением

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_0 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-\bar{x}_0)^2}{2\sigma_0^2}} dx, \qquad (2.5)$$

где x, σ_0, $\bar{x}_0$ – определены выше.

Интеграл, стоящий в правой части уравнения, не может быть сведен к элементарным функциям в конечном виде, однако может быть выражен через *функцию Лапласа* Ф(Т), называемую также *интегралом вероятности*:

$$F(x) = \frac{1}{2}[1 + \Phi(\mathrm{T})], \qquad (2.6)$$

где

$$\Phi(\mathrm{T}) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{0}^{\mathrm{T}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \qquad (2.7)$$

$$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{X} - x_0}{\sigma_0}, \qquad (2.8)$$

$$t = \frac{x - x_0}{\sigma_0}. \qquad (2.9)$$

Интеграл вероятности Ф(Т) табулирован, и его численные значения приведены табл. П.1.1, а на рис. 2.3 приведен график функции Ф(Т).

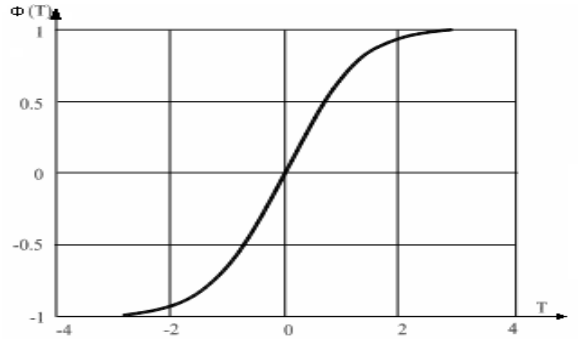


Рис. 2.3. Интегральная функция Ф(Т) для нормального закона распределения

Интеграл вероятности Ф(T) – монотонная функция, обладающая следующими свойствами:

$$\Phi(-T) = -\Phi(T), \qquad (2.10)$$

$$\Phi(+\infty) = 1, \qquad (2.11)$$

$$P(T) = \Phi(-T < t < +T). \qquad (2.12)$$

Соотношение (2.12) означает, что с вероятностью P(T) случайная величина t не выйдет за пределы интервала $\pm T$. В теории погрешностей интервал от $-T$ до $+T$ обычно называют доверительным интервалом, а соответствующую ему вероятность $P(T)$ – доверительной вероятностью. В дальнейшем доверительную вероятность будем обозначать P.

2.3. Распределение Стьюдента

Плотность вероятностей $\varphi(z)$ при распределении случайной величины z по закону Стьюдента описывается соотношением (2.13). Отметим, что закон распределения Стьюдента часто называют *t-распределением*, а величину $\varphi(z)$ – соответственно *плотностью вероятностей t-распределения*.

$$\varphi(z)=\frac{\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi(n-1)}\cdot\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}\cdot\left(1+\frac{z^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}}, \qquad (2.13)$$

где $\Gamma(n)$ – гамма-функция;

n – число случайных величин (аргумент).

$$\Gamma(n)=\int_0^{\infty}U^{n-1}e^{-U}dt\,. \qquad (2.14)$$

Приведенные в математических справочниках (см., например, [30]) таблицы значений гамма-функции обычно охватывают диапазон изменения аргумента n от 1 до 2, и там же дается порядок определения гамма-функции для других значений аргумента.

На рис. 2.4 приведены графики функции $\varphi(z)$ для различных значений n. Кривые симметричны относительно оси ординат и по форме напоминают кривую нормального распределения, к которой они стремятся в пределе при $n\to\infty$. Площадь между каждой кривой и осью абсцисс при изменении аргумента от $-\infty$ до $+\infty$ равняется 1, т. е. вероятность попадания случайной величины z в бесконечно большой интервал равна единице.

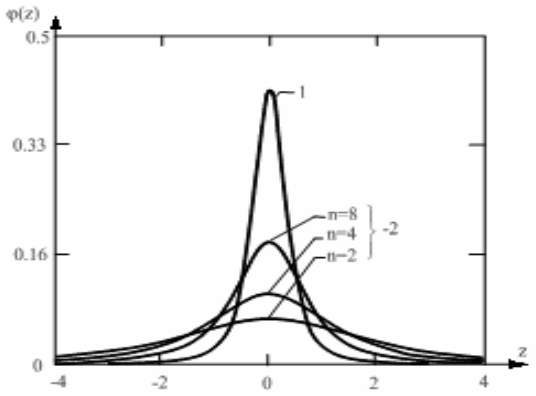


Рис. 2.4. Дифференциальная функция φ(z) для различных значений n:
1 – нормальный закон распределения; 2 – закон распределения Стьюдента;
n – число измерений

Для оценки вероятности попадания случайной величины *z* в границы заданного доверительного интервала ±*t* с доверительной вероятностью *P* необходимо проинтегрировать функцию φ(*z*) в заданных пределах:

$$P = \varphi(-t < z < +t) = \int_{-t}^{+t} \varphi(z)dz = 2 \cdot \int_{0}^{+t} \varphi(z)dz \quad . \tag{2.15}$$

Последняя форма записи интеграла с заменой пределов сделана из допущения, что функция φ(*z*) симметрична относительно начала координат.

Обычно на практике по заданной доверительной вероятности *P* и по заданному числу измерений *n* находят доверительный интервал ±*t*.

Численные значения *t*, носящие название *коэффициентов Стьюдента*, табулированы для конкретных значений *P* и *n* и приводятся в справочниках. Аналогичная таблица помещена в табл. П.1.2.

2.4. Распределение χ^2

Плотность вероятностей ψ(*v*) случайных величин *v*, подчиняющихся закону распределения χ^2, описывается соотношением

$$\psi(v) = \frac{v^{m-1}}{2^m \cdot \Gamma(m)} \cdot e^{-\frac{v}{2}}, \tag{2.16}$$

где $m = \frac{n-1}{2}$; *n* – число случайных величин (аргумент); *Γ* – гамма-функции.

При больших значениях n максимум кривых уменьшается, смещается в область повышенных значений v, а сами кривые приобретают симметричный характер.

Площадь, заключенная между каждой из рассматриваемых кривых и осью абсцисс, при изменении аргумента от нуля до бесконечности есть величина постоянная и равная единице, т. е. вероятность попадания случайной величины v в бесконечно большой интервал равна единице.

Для оценки попадания случайной величины v в некоторый заданный интервал от V_1 до V_2 с доверительной вероятностью P необходимо проинтегрировать функцию $\psi(v)$ с учетом заданных пределов:

$$P = \psi(V_1 < v < V_2) = \int_{V_2}^{\infty} \psi(v)dv \quad . \tag{2.17}$$

Значения приведенных интегралов табулированы в зависимости от V и n (см., например, справочник [30]). При практическом использовании распределения χ^2 (применительно к погрешностям) удобнее пользоваться коэффициентами γ_1 и γ_2:

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{n-1}{V_1}} \quad , \tag{2.18}$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{n-1}{V_2}} \quad . \tag{2.19}$$

Таблица коэффициентов γ_1 и γ_2 в зависимости от доверительной вероятности P и числа случайных величин (или числа измерений) n приведена в табл. П.1.3.

Методы практического использования рассмотренных законов распределения случайных величин (нормального, Стьюдента и χ^2) при оценке погрешностей и погрешности погрешностей приведены в последующих параграфах учебного пособия.

2.5. Классификация погрешностей

Один из возможных вариантов классификации погрешностей измерений представлен на рис. 2.5.

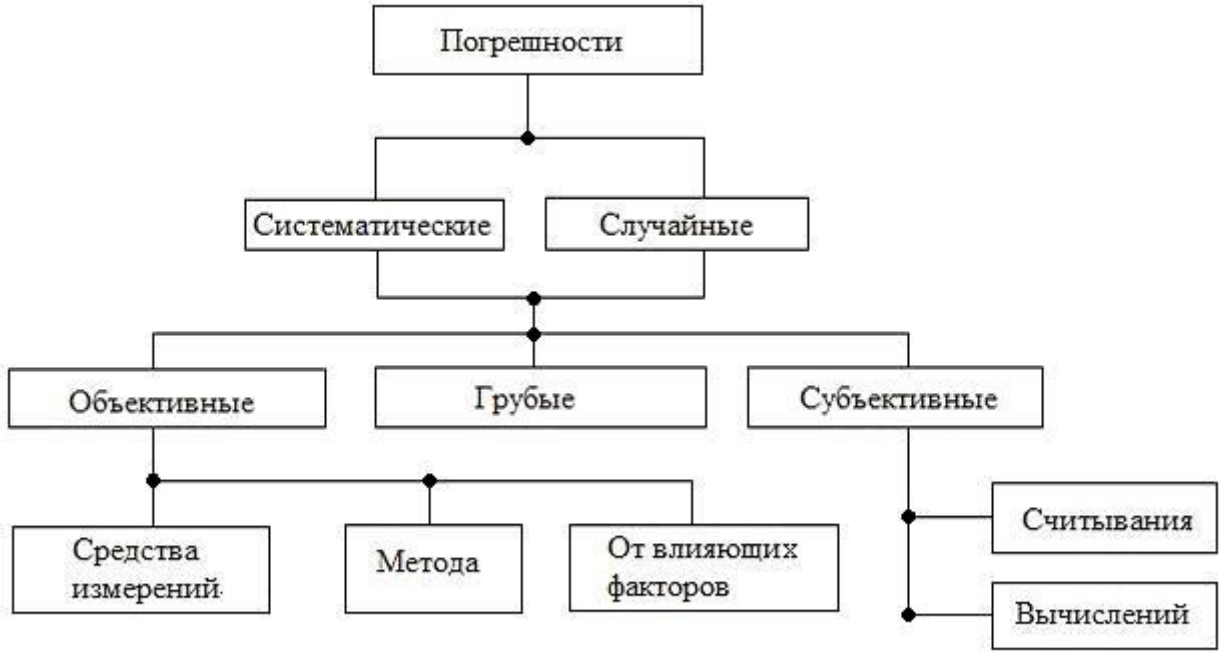


Рис. 2.5. Классификация погрешностей измерений

При описании погрешностей и их классификации использованы следующие термины.

Абсолютная погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Точность измерения – это качество измерения, отражающее близость его результатов к истинному значению измеряемой величины.

Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям всех видов, как систематических, так и случайных.

Количественно точность может быть выражена обратной величиной модуля относительной погрешности. Например, если погрешность измерения равна 10^{-3}, то точность равна 10^{3}. Следует отметить, что термин «точность измерений» не нашел широкого применения на практике, и для «точностной» характеристики результатов измерений рекомендуется использовать термин «погрешность измерений».

Систематическая составляющая погрешности измерения – это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная составляющая погрешности измерения – это составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Объективные погрешности измерений – это составляющие погрешности измерений, не зависящие от действий оператора.

Субъективные погрешности измерений – это составляющие погрешности измерений, зависящие от действий оператора.

Грубые погрешности – это погрешности, существенно превышающие по своему значению оправдываемые объективными условиями измерений систематические и случайные погрешности.

Вместо термина «грубая погрешность» иногда используется термин «промах». В настоящем учебном пособии термин «промах» используется в несколько ином смысле. В дальнейшем под промахом будем подразумевать результат измерения, содержащий грубую погрешность.

Промахи возникают, как правило, из-за неверных действий оператора, но могут также появляться из-за неисправности аппаратуры. Во всех случаях промахи не являются характеристикой измерений, и их необходимо отбросить.

Инструментальные погрешности измерений – составляющая погрешности измерений, обусловленная погрешностями применяемых средств измерений (образцовых и рабочих).

Образцовые средства измерений – это средства, предназначенные для калибровки, аттестации или поверки других средств измерений и не используемые для проведения «рабочих» измерений.

Отметим, что под *рабочими средствами измерений* подразумеваются те средства, которые используются непосредственно «в работе» для проведения измерений.

Отметим, что на практике учитываются, как правило, только погрешности «рабочих» средств измерений. Погрешности образцовых средств малы, и ими обычно пренебрегают. Погрешности образцовых средств измерений учитываются при проведении метрологических работ (калибровка, поверка, аттестация) или при повышенных требованиях к результатам измерений.

Погрешности измерений от воздействия влияющих факторов – это составляющие погрешности измерений, являющиеся следствием неучтенного влияния на результаты измерений внешних факторов, например температуры, атмосферного давления, влажности воздуха, напряженности магнитного поля, вибрации и т. п. При проведении электрических измерений такими влияющими факторами могут быть термоЭДС и контактные сопротивления в измерительных цепях, полярность измеряемого тока или напряжения и т. д.

Методические погрешности – это погрешности, обусловленные используемым методом измерений и не зависящие от погрешности самих измерительных устройств.

Погрешности считывания – это погрешности, возникающие при считывании показаний со средств измерений. Обычно эти погрешности малы или вообще отсутствуют (например, при использовании цифровых приборов).

Погрешности вычислений – это погрешности, возникающие при подсчетах конечных результатов по данным проведенных измерений. Эти погрешности могут появиться, например, при проведении косвенных измерений из-за неверных действий оператора.

Выявление последних двух погрешностей и их выделение из суммарной погрешности относится к области субъективных психологических факторов и в настоящем руководстве подробно не рассматривается. Следует, однако, отметить, что эти погрешности косвенно учитываются при определении погрешностей измерений и входят в состав как их систематических, так и случайных частей.

2.6. Количественные характеристики погрешностей

Наиболее употребительны нижеследующие количественные характеристики погрешностей.

1. *Абсолютная погрешность* Δ, представляющая собой разность между результатом измерения x и истинным значением измеряемой величины x_0:

$$\Delta = x - x_0. \tag{2.20}$$

Могут быть также рассмотрены абсолютные систематические погрешности Θ, абсолютные случайные погрешности ε, абсолютные методические погрешности Θ_M и т. д. Определение каждой из этих погрешностей будет представлено ниже. Абсолютные погрешности имеют ту же размерность, что и измеряемая величина.

2. *Относительная погрешность* δ, представляющая собой отношение абсолютной погрешности Δ к истинному значению измеряемой величины x_0:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100\% . \tag{2.21}$$

Соответственно рассматриваются относительные систематические, случайные, методические и т. д. погрешности. Обычно относительные погрешности выражаются в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

Использование в знаменателе формулы (2.21) значения x_0 соответствует рекомендациям РМГ 29–99 [53]. Так как истинное значение x_0 обычно неизвестно, то вместо него может быть использовано действительное значение измеряемой величины $x_д$. Государственный стандарт ГОСТ 8.401–80 [45] допускает использовать в знаменателе формулы (2.21) также значение результата измерения x (вместо x_0 или $x_д$). На практике значение x используется в тех случаях, когда неизвестно истинное значение измеряемой величины x_0 и заменяющее его действительное значение $x_д$.

3. *Приведенная погрешность* средств измерения γ, представляющая собой отношение абсолютной погрешности Δ к нормирующему значению x_N:

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100\% \quad . \tag{2.22}$$

Обычно $x_N = x_k$, где x_k – верхний предел шкалы (при этом нулевое значение прибора должно быть в начале шкалы).

Нормирующее значение x_N следует устанавливать равным большему из пределов измерений используемого прибора или равным большему из модулей пределов измерений, если нулевое значение находится внутри диапазона измерений.

Для электроизмерительных приборов нормирующее значение допускается устанавливать равным сумме модулей пределов измерений.

Для средств измерений физических величин, имеющих шкалу с условным нулем, нормирующее значение устанавливают равным модулю разности пределов измерений (более подробно см. ГОСТ 8.401–80 [45]).

Приведенные погрешности используются для характеристики точностных свойств только средств измерений (такое понятие, как приведенная погрешность результата измерения, не используется). Могут быть рассмотрены приведенные систематические и случайные составляющие погрешности средств измерений. Приведенные погрешности выражаются обычно в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

В заключение отметим, что при правильно организованных измерениях грубые погрешности должны отсутствовать. Погрешности коммутационные, от влияния факторов и методические должны быть малыми по сравнению с инструментальными погрешностями. В этом случае определяющими становятся инструментальные погрешности (или, как их еще называют, – погрешности средств измерений). Именно этим погрешностям посвящены три последующих главы учебного пособия.

Вместе с тем погрешность является важной, но не единственной характеристикой средств измерений (СИ). В силу этого ниже рассмотрены и другие характеристики СИ, нормируемые стандартами [44, 45 47].

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Общие положения

Различают метрологические и неметрологические характеристики средств измерений (СИ).

Метрологические характеристики – это характеристики свойств средств измерений, влияющие на результаты измерений и на их погрешности. Нормируются метрологические характеристики СИ Государственными стандартами ГОСТ 8.009–84 [44] и ГОСТ 8.508–84 [47], а также методическими указаниями РД 50–453–84 [53]. Для каждого типа средств измерений устанавливаются свои метрологические характеристики.

Метрологические характеристики, устанавливаемые нормативными документами, называются *нормируемыми метрологическими характеристиками*, а определяемые – *экспериментально-действительными метрологическими характеристиками*.

Неметрологические характеристики – это характеристики свойств средств измерений, не оказывающие прямого (непосредственного) влияния на результаты измерений и на их погрешности. К неметрологическим характеристикам СИ относятся, например, следующие: геометрические размеры и масса средства измерения, его цвет, наличие (или отсутствие) переносных ручек.

Ниже описываются нормируемые метрологические характеристики СИ. Для наглядности на рис. 3.1 приведена схема, позволяющая пояснить и оценить искомые характеристики.

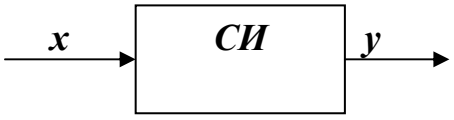


Рис. 3.1 Схема эксперимента:
СИ – средство измерения; x – измеряемая величина
(входная величина; входной сигнал); y – показание средства измерения
(выходная величина, выходной сигнал)

Различают статические и динамические свойства средств измерения. Статистические свойства средств измерения проявляются при измерении неизменных во времени величин или при измерении установившихся периодических

процессов. Динамические свойства средств измерения проявляются при измерении изменяющихся во времени величин или при измерении неустановившихся периодических процессов. Статистические и динамические свойства средств измерения описывают соответственно статистические и динамические характеристики.

3.2. Статические характеристики

Статическая характеристика преобразования (функция преобразования) – функциональная зависимость между входной «*x*» и выходной «*y*» величинами:

$$y = f(x). \tag{3.1}$$

Эта зависимость может выражать некоторый закон (или законы), которому подчиняется явление, положенное в основу работы средства измерения (СИ). Иногда выходная величина зависит не только от измеряемой величины x, но и от ряда других воздействующих на СИ факторов z_1, z_2, …z_n, являющихся помехами и искажающих результат измерения. В этом случае

$$y = f(x, z_1, z_2, \ldots z_n). \tag{3.2}$$

Очевидно, что воздействие на СИ посторонних факторов z_1, z_2, …z_n необходимо устранить или уменьшить. Это достигается путем экранирования и изоляции СИ от воздействия помех, их компенсации, стабилизации и т. д.

Статические характеристики преобразования могут быть аналоговые и дискретные, без гистерезиса и с гистерезисом (рис. 3.2).

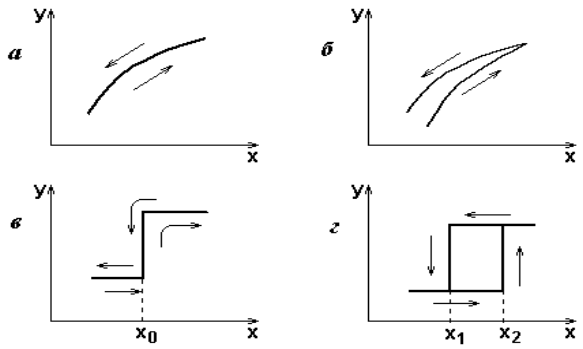


Рис. 3.2. Статические характеристики преобразования средств измерений:
а – аналоговая без гистерезиса; *б* – аналоговая с гистерезисом;
в – дискретная без гистерезиса; *г* – дискретная с гистерезисом;
x_0, x_1, x_2 – значения величины x, при которых величина y изменяется скачком

3.3. Динамические характеристики

Динамические характеристики определяют быстродействие средств измерения и могут быть представлены в различных видах: в виде переходных характеристик, передаточных функций, частотных характеристик и т. д.

Переходная характеристика – это зависимость выходной величины $y(t)$ при скачкообразном изменении измеряемой входной величины $x(t)$. Возможные типы переходных характеристик приведены на рис. 3.3.

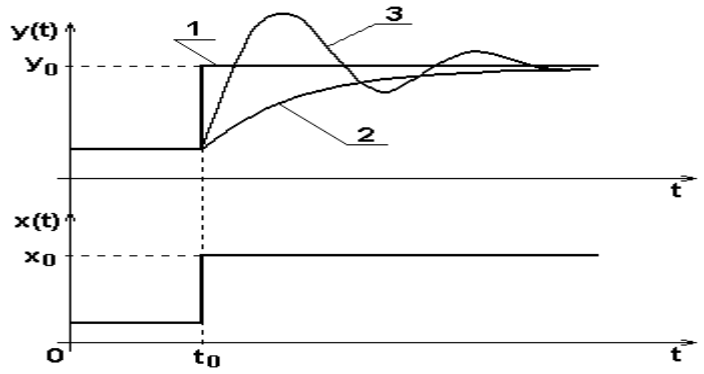


Рис. 3.3. Переходные характеристики средств измерения:
1 – идеальная (безынерционная) характеристика; 2 – апериодическая характеристика первого порядка; 3 – периодическая (колебательная) характеристика

Передаточная функция W(p) – это отношение изображений по Лапласу выходного и входного сигналов при нулевых начальных условиях.

$$W(p)=\frac{y(p)}{x(p)}, \tag{3.3}$$

где $y(p)$ – изображение по Лапласу выходного сигнала;

$x(p)$ – изображение по Лапласу входного сигнала;

p – комплексная переменная величина.

$$y(p)=\int_0^{\infty} y(t)\cdot e^{-pt}\cdot dt, \tag{3.4}$$

$$x(p)=\int_0^{\infty} x(t)\cdot e^{-pt}\cdot dt, \tag{3.5}$$

где $y(t)$, $x(t)$ – оригиналы выходных и входных сигналов СИ.

Амплитудно-фазовая характеристика W(jω) формально может быть получена из передаточной функции $W(p)$ путем замены величины *«p»* на мнимую

величину «$j\omega$», где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – циклическая частота рассматриваемых сигналов.

Алгебраическая форма записи амплитудно-фазовой характеристики:

$$W(j\omega) = G(\omega) + jQ(\omega), \tag{3.6}$$

где $G(\omega)$ – вещественная часть; $Q(\omega)$ – мнимая часть.

По вещественным и мнимым частям может быть построен график амплитудно-фазовой характеристики (рис. 3.4).

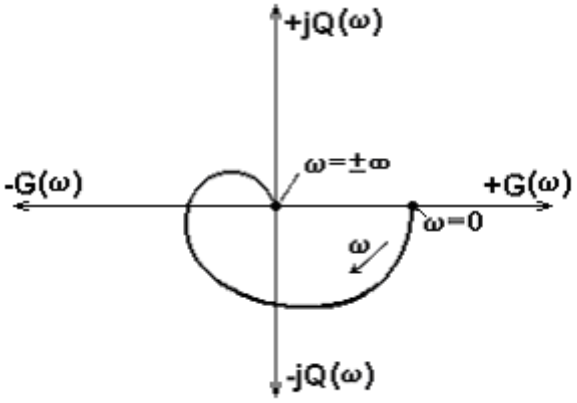


Рис. 3.4. Типичный вид амплитудно-фазовой характеристики
средства измерения

Для описания динамических свойств отдельных средств измерений амплитудно-фазовые характеристики применяются сравнительно редко. Гораздо чаще эти характеристики используются при анализе устойчивости автоматических систем (в состав которых, как правило, входят и средства измерения, например датчики).

Показательная форма записи амплитудно-фазовой характеристики имеет вид

$$W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \tag{3.7}$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика;

$\varphi(\omega)$ – фазово-частотная характеристика.

Параметры амплитудно-фазовой характеристики в алгебраической и показательной формах записи связаны между собой соотношениями

$$A(\omega)=\sqrt{[G(\omega)]^2+[Q(\omega)]^2}\,, \tag{3.8}$$

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\frac{Q(\omega)}{G(\omega)}\,. \tag{3.9}$$

В качестве примера ниже приведены динамические характеристики для апериодических динамических устройств первого порядка.

Передаточная функция для апериодических динамических устройств первого порядка имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1}, \tag{3.10}$$

где K – статический передаточный коэффициент; T – постоянная времени.

Отметим, что статический передаточный коэффициент определяется соотношением

$$K=\frac{\Delta y}{\Delta x}, \tag{3.11}$$

где Δy – приращение выходной величины; Δx – приращение входной величины.

Значение постоянной времени T может быть найдено в соответствии с рекомендациями, изложенными в литературе [27] и в настоящем учебном пособии (см. главу 6).

Кроме того, эта задача будет рассмотрена ниже при исследовании динамических свойств датчиков температуры.

Аналитические выражения, связывающие амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики с параметрами передаточной функции, имеют вид

$$A(\omega)=\frac{K}{\sqrt{\omega^2T^2+1}}\,, \tag{3.12}$$

$$\varphi(\omega)=\operatorname{arctg}\omega T. \tag{3.13}$$

Графики зависимостей (3.14) и (3.15) приведены на рис. 3.5.

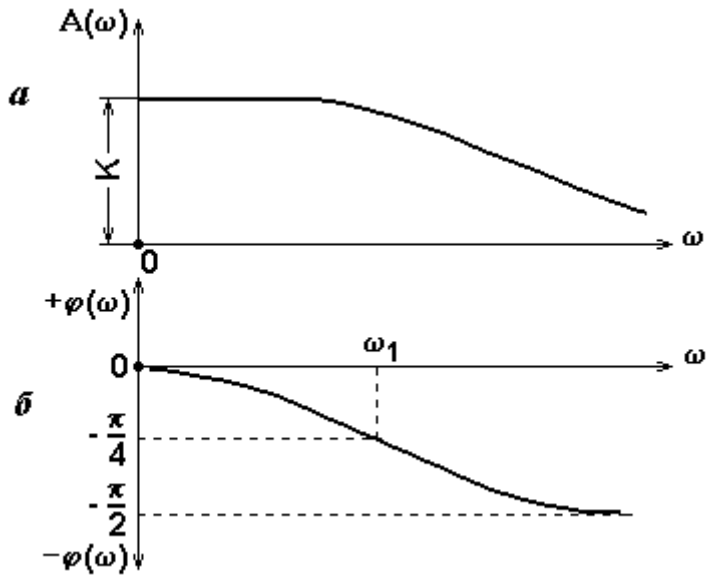


Рис. 3.5. Графики амплитудно-частотных (*а)* и фазово-частотных характеристик (*б)*

Приведенные характеристики (и их графики) свидетельствуют, что амплитуда сигнала на выходе средства измерения уменьшается с ростом частоты входного сигнала, а его фаза увеличивается (при $\omega\to\infty$ $\varphi(\omega)\to(-\pi/2)$ и $A(\omega)\to 0$).

3.4. Универсальные характеристики

К *универсальным* относятся характеристики средств измерений (СИ), которые правомерны как для статистических, так и для динамических режимов работы СИ.

Чувствительность СИ – отношение приращения выходной величины Δy к приращению входной величины Δx при $\Delta x\to 0$.

$$S = \lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}, \tag{3.14}$$

где S – чувствительность средств измерения.

Для ориентировочной оценки чувствительности может быть использовано соотношение

$$S \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}. \tag{3.15}$$

При нелинейной статической характеристике преобразования чувствительность зависит от x, а при линейной характеристике чувствительность постоянна и не зависит от измеряемой величины.

Чувствительность не следует смешивать с *порогом чувствительности*, под которым понимают наименьшее изменение входной величины, обнаруживаемое с помощью данного средства измерения. Порог чувствительности выражают в единицах входной величины.

Диапазон измерения – область значений измеряемой (входной) величины, для которой нормированы допускаемые наибольшие x_{max} и наименьшие x_{min} значения входных величин.

Кроме диапазона измерения «по входу», может быть указан диапазон измерения «по выходу» (от y_{max} до y_{min}).

Цена деления шкалы – разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений.

Цена деления многозначной меры – разность значений величин, соответствующих двум соседним заданным размерам, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью.

3.5. Характеристики погрешностей

Погрешность средства измерений – это разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины.

Для меры показанием является ее номинальное значение.

Поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то на практике используют ее действительное значение.

Приведенное определение понятия «погрешность средства измерений» соответствует определению по РМГ 29–99 [53].

Классификация погрешностей средств измерений (СИ) приведена на рис. 3.6.

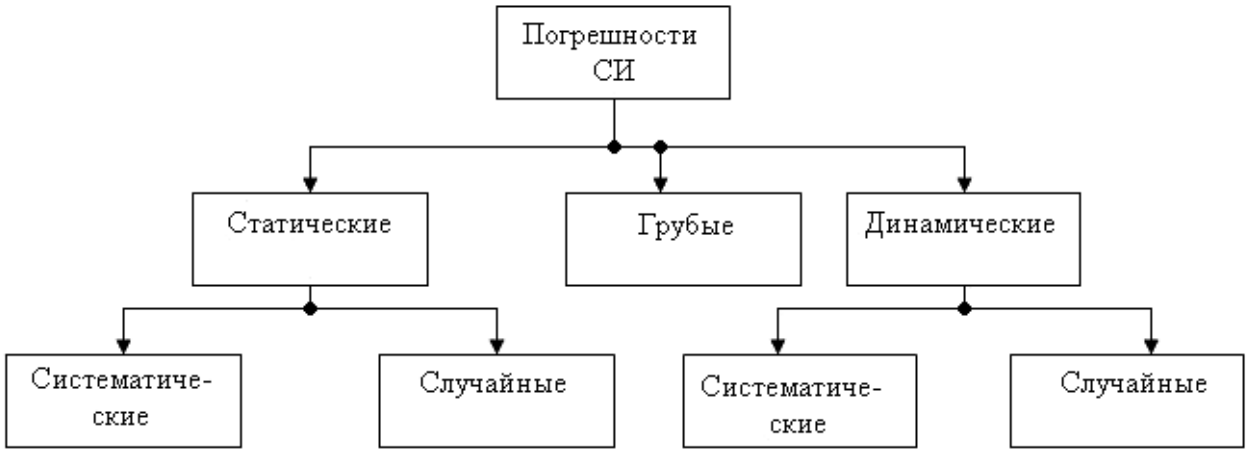


Рис. 3.6. Классификация погрешностей средств измерений

Статистические и динамические погрешности СИ могут быть определены следующим образом.

Статистические погрешности СИ – это погрешности средств измерений, возникающие при измерении неизменных во времени величин или установившихся периодических процессов. Статические погрешности детально рассмотрены в 4-й главе настоящего учебного пособия.

Динамические погрешности – это погрешности средств измерений, возникающие при измерении изменяющихся во времени величин или неустановившихся периодических процессов. Динамические погрешности детально рассмотрены в 6-й главе настоящего учебного пособия.

Погрешности грубые, систематические и случайные, а также количественные характеристики погрешностей (в том числе и погрешностей СИ) уже описаны во 2-й главе, в силу чего в данной главе учебного пособия не рассматриваются.

3.6. Классы точности

Класс точности средства измерений – это обобщенная характеристика средства измерений, выражаемая пределами его допускаемых основной и дополнительных погрешностей, а также другими характеристиками, влияющими на точность.

Класс точности дает возможность судить о том, в каких пределах находится погрешность средств измерений этого класса, но не является непосредственным показателем погрешности измерений, выполняемых с помощью этих средств.

Класс точности может выражаться в форме абсолютных Δ, приведенных γ или относительных δ погрешностей в зависимости от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средств измерений конкретного вида (см. ГОСТ 8.401–80 [45]):

$$\Delta = \pm a\,, \tag{3.16}$$

$$\Delta = \pm\left(a + b \cdot x\right), \tag{3.17}$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100 \quad \% \le \pm p\,, \tag{3.18}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \quad \% \le \pm p\,, \tag{3.19}$$

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100 \quad \% \le \pm \left[c + d\left(\left| \frac{x_k}{x} \right| - 1 \right) \right] \quad \% \lim_{x \to \infty}\,, \tag{3.20}$$

где x – значение измеряемой величины;

a, b – положительные числа, не зависящие от x;

$x_к$ – верхний предел шкалы;

x_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ (обычно $x_N = x_к$);

p, q, c, d – отвлеченные положительные числа, выбираемые из ряда $1 \cdot 10^n$; $1{,}5 \cdot 10^n$; ($1{,}6 \cdot 10^n$); $2 \cdot 10^n$; $2{,}5 \cdot 10^n$; ($3 \cdot 10^n$); $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$; (n = 1; 0; –1; –2; –3 и т. д.).

Значения, указанные в скобках, не используют для вновь разрабатываемых средств измерений.

В обоснованных случаях (см. ГОСТ 8.401–80 [45]) пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

Допускаемые основные и дополнительные погрешности приводятся в технических описаниях и формулярах средств измерений.

Кроме того, на циферблаты, шкалы, щитки и корпуса средств измерений наносятся условные обозначения классов точности.

Например, могут быть нанесены обозначения в виде 1,5; (1,5) или 0,02/0,01, что означает следующее:

1,5 – предел допускаемой приведенной основной погрешности определяется по формуле (3.18) и не превосходит ±1,5 % от верхнего предела измерения для рассматриваемого прибора (или диапазона измерения);

(1,5) – предел допускаемой относительной основной погрешности определяется по формуле (3.19) и не превосходит ±1,5 % от значения измеряемой величины;

0,02/0,01 – предел допускаемой относительной основной погрешности определяется по формуле (3.20) и не превосходит $\pm\left[0{,}02+0{,}01\left(\left|\frac{x_k}{x}\right|-1\right)\right]$ % от значения измеряемой величины.

Правила построения и примеры обозначения классов точности приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Примеры построения и обозначения классов точности

Форма выражения погрешности	**Пример обозначения класса точности**	**Пределы допускаемой основной погрешности**	**Значение основной погрешности**
Абсолютная Δ	±0,1 мм	$\Delta = \pm 0{,}1$ мм	±0,1 мм
Относительная δ	(1,5)	$\delta = \pm 0{,}5$ %	± 0,5 % от «x»
Относительная δ	0,2/0,1	$\delta = \pm[0{,}2 + 0{,}1(\frac{x_K}{x} - 1)]$ %	$\pm\delta$ % от «x»
Приведенная γ	1,0	$\gamma = \pm 1{,}0$ %	± 1,0 % от «x_K»
Приведенная γ	2,5 (в треугольнике)	$\gamma = \pm 2{,}5$ %	± 2,5 % от длины шкалы или ее части

В табл. 3.1 приняты следующие обозначения:

x – значение измеряемой величины или число делений, отсчитанных по шкале;

$x_К$ – верхний предел шкалы.

Тот или иной класс точности присваивается средству измерений по результатам оценки статистической погрешности, полученной в ходе специального метрологического исследования искомого средства измерения (СИ). Порядок оценки статистических погрешностей СИ рассмотрен ниже в главе 4 настоящего учебного пособия.

Отметим еще раз, что класс точности устанавливает пределы допускаемой основной погрешности средства измерения (СИ). Основная погрешность СИ – это погрешность средства измерения в нормальных условиях эксплуатации. Дополнительная погрешность СИ – это погрешность средства измерения в условиях эксплуатации отличных от нормальных (в пределах рабочих условий эксплуатации). Нормальные и рабочие условия эксплуатации оговариваются в технической документации на каждый конкретный тип средства измерения.

Например, для универсального вольтметра В7-34 предусмотрены следующие нормальные и рабочие условия эксплуатации (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Условия эксплуатации универсального вольтметра В7-34

Нормируемый параметр	**Условия эксплуатации**	
	Нормальные	**Рабочие**
Температура окружающего воздуха, ^{0}С(К)	От 18 до 22 (от 291 до 295)	От 5 до 40 (от 278 до 313)
Относительная влажность воздуха, %	65±15	До 95
Напряжение питающей сети, В	220,0±4,4	220±22
Частота питающей сети, Гц	50,0±0,5	50,0±0,5

Поверка средств измерений должна проводиться в нормальных условиях эксплуатации (см. табл. 3.2). Рабочие условия эксплуатации (см. табл. 3.2)

должны соблюдаться при практическом использовании средств измерений. Дополнительные погрешности, возникающие при отличии условий эксплуатации от нормальных, выражаются обычно в дольных или кратных частях от основной погрешности. Соотношения, используемые для оценки дополнительных погрешностей, приводятся в инструкциях по эксплуатации конкретных типов средств измерений. Например, для универсального вольтметра В7-34 погрешность измерения в рабочих условиях для диапазона от 5 до 40 ^{0}С вычисляется по формуле

$$\delta = \delta_0 \left[1 + 0{,}1 / \left(20 - t \right) \right], \qquad (3.21)$$

где δ – относительная дополнительная погрешность вольтметра в рабочих условиях, %;

δ_0 – относительная основная погрешность вольтметра, определяемая его классом точности, %;

t – температура окружающего воздуха, ^{0}С.

Формула (3.21) правомерна при всех режимах работы универсального вольтметра В7-34, за исключением измерения отношения двух постоянных напряжений.

4. СТАТИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Общие положения

Для определения погрешностей средств измерений необходимо провести специальные исследования. При этом может быть использована одна из схем, приведенных на рис. 4.1. В первом случае (рис. 4.1, *а*) для генерирования значений x_0 может быть использован любой (не образцовый) генератор. Например, при исследовании вольтметра – любой источник ЭДС, значения которых могли бы изменяться в необходимых пределах. Измерение значения x_0 производится с помощью образцового средства и исследуемого средства измерений одновременно. Во втором случае (рис. 4.1, *б*) само образцовое средство измерений выступает в роли генератора сигналов. Например, при исследовании вольтметра – это источник образцовых ЭДС (образцовый калибратор напряжений); при исследовании датчиков давления – образцовый грузопоршневой манометр и т. д.

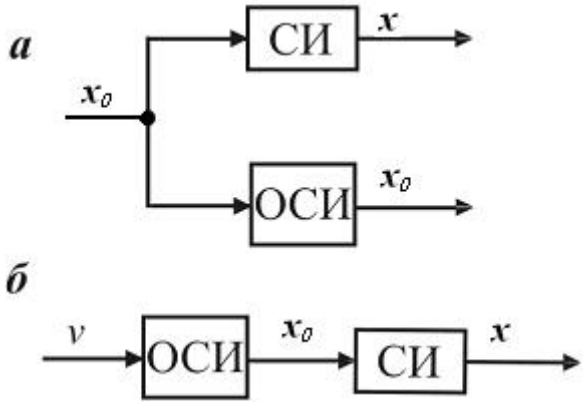


Рис. 4.1. Схемы исследования средств измерений:
СИ – исследуемое средство измерений; ОСИ – образцовое средство измерений; x_0 – "истинное" значение измеряемой величины; x – показания исследуемого средства измерений; v – управляющий сигнал, воздействующий на ОСИ

После выбора одной из схем, приведенных на рис. 4.1, проводится выбор исследуемых точек на шкале прибора. При этом можно воспользоваться следующими правилами:

1) чем выше класс прибора, тем большее число исследуемых точек необходимо выбрать;

2) для рабочих измерительных приборов число исследуемых точек обычно составляет 5–6, а их число и расположение должно соответствовать требованиям ГОСТ 8.508–84 [47].

В каждой из выбранных точек шкалы прибора проводится заданное число измерений. Если число измерений не задано, то оно выбирается произвольно, но не менее 10 [47]. Для повышения достоверности результатов число измерений целесообразно увеличить до 16–20, а в ответственных случаях – до 50 и более.

Отметим, что число измерений зависит от принятой доверительной вероятности P (растет с ростом P) и от допускаемой погрешности среднего квадратического отклонения $\Delta\sigma$ (растет при уменьшении $\Delta\sigma$).

Таблица значений $n = f(P, \Delta\delta)$ для нормального закона распределения приведена в государственном стандарте ГОСТ 8.508–84 [47].

При законе распределения результатов измерений, отличном от нормального, необходимое число измерений стандартом [47] не рассматривается.

Измерения рекомендуется проводить путем постепенного увеличения измеряемой величины до предельного значения для исследуемого устройства с последующим постепенным уменьшением ее до минимума. Увеличение и уменьшение измеряемой величины проводятся столько раз, сколько измерений необходимо провести, фиксируя каждый раз показания исследуемого измерительного устройства в выбранных точках шкалы.

По результатам эксперимента в каждой исследуемой точке оцениваются значения величин $\bar{x}$ и σ по следующим формулам:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i , \tag{4.1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} , \tag{4.2}$$

где $\overline{x}$ – среднее арифметическое значение;

σ – среднее квадратическое отклонение;

x_i – результат *i*-го изменения;

n – число измерений.

Полученные описанным методом экспериментальные данные и расчетные значения являются исходными, позволяющими путем соответствующей обработки получить необходимые сведения об исследуемом средстве измерений (т. е. его систематическую, случайную и суммарную погрешности).

4.2. Выявление промахов

Выявление промахов необходимо провести до определения погрешностей измерений. Эта операция особенно целесообразна в том случае, если среди ряда измерений встречаются отдельные значения, резко отличные от других.

Промахи возникают, как правило, из-за неверных действий оператора, но могут также явиться результатом неисправности используемых средств измерений. Во всех случаях промахи не являются характеристикой измерений, и для избежания значительных искажений результатов их необходимо отбросить.

Для объективного решения вопроса о том, является ли промахом какой-либо результат измерения, применяются специальные методы. Наибольшее распространение получили два из них: метод (критерий) 3σ и табличный метод (критерий Смирнова–Греббса).

В основу метода 3σ («три сигма») положено допущение, что результаты однократных измерений x могут отклоняться от их среднего арифметического значения $\bar{x}$ не более чем на 3σ. Если же какой-либо результат однократного измерения $x_П$ отклоняется от *x* более чем на 3σ, то $x_П$ – промах.

Метод 3σ универсален и может быть использован при любом законе распределения рассматриваемых величин. Если закон распределения рассматриваемых величин неизвестен, то метод 3σ формально применим, но при этом остается неизвестной доверительная вероятность, с которой выявляются промахи.

Рассмотрим для примера нормальное распределение. Известно, что при нормальном распределении случайных величин их рассеивание около арифмети-

ческого среднего с вероятностью 0,997 не превосходит величины ±3σ. Этот вывод следует непосредственно из рассмотрения нормального закона распределения случайных величин. Иначе говоря, принято считать, что результаты, вероятность получения которых меньше 0,003, могут появиться только при наличии в ряду измерений промахов. Для обнаружения промахов по методу 3σ необходимо выполнить следующие операции:

1) подсчитать среднее арифметическое значение ряда измерений $\bar{x}$ по формуле (4.1);

2) подсчитать среднее квадратическое отклонение σ по (4.2);

3) найти по абсолютной величине разность A между предполагаемым промахом $x_{\text{п}}$ и средним арифметическим значением ряда измерений.

$$A = |x_{\text{п}} - \bar{x}|; \tag{4.3}$$

4) провести сравнение полученной величины A с 3σ. Если выполняется условие

$$A < 3\sigma, \tag{4.4}$$

то величина $x_{\text{п}}$ не является промахом. Если условие (4.4) не выполняется, то $x_{\text{П}}$ – промах, и его следует отбросить.

Используя метод 3σ, следует помнить: существует очень малая, но отличная от нуля вероятность того, что отброшенный результат измерения является не промахом, а естественным статистическим отклонением.

Идея табличного метода была высказана еще в 1941 году Н.В. Смирновым, а затем развита в 1950 году Греббсом. Поэтому иногда в литературе табличный метод выявления промахов называют критерием Греббса (или критерием Смирнова–Греббса).

Табличный метод разработан из предположения, что результаты измерений равноточные и подчиняются нормальному закону распределения.

Для практического использования рассматриваемого метода (на основе положений теории вероятностей и математической статистики [3]) составлены специальные таблицы (см. табл. П.1.4).

В таблице помещены значения некоторых табличных коэффициентов $W_т$, подсчитанные в зависимости от доверительной вероятности P и числа измерений n. Коэффициенты $W_т$ представляют собой, по сути дела, отношение доверительных интервалов, соответствующих выбранной доверительной вероятности, к среднему квадратическому отклонению.

При практическом применении табличного метода необходимо выполнить следующие операции:

1) подсчитываются величины $\bar{x}$ и σ для данного ряда измерений;

2) находится величина W:

$$W = \left| \frac{x_П - \bar{x}}{\sigma} \right|, \qquad (4.5)$$

где $x_П$ – предполагаемый промах;

3) по специальным таблицам (см. табл. П.1.4) в зависимости от проведенного числа измерений и принятой доверительной вероятности находится величина табличного коэффициента $W_т$;

4) проводится сравнение величины W, полученной согласно (4.5) по экспериментальным данным, с табличной величиной $W_т$.

Если выполняется условие

$$W < W_т,$$

то величина $x_п$ не является промахом, и ее следует оставить в ряду измерений.

Если же окажется, что

$$W > W_т,$$

то величина $x_п$ с принятой доверительной вероятностью является промахом, и ее следует отбросить.

После выявления и исключения промахов подсчитываются новые значения величин $\bar{x}$ и σ, и уже эти новые значения участвуют в дальнейших расчетах.

4.3. Систематические погрешности

Систематические погрешности средств измерений – это, как уже отмечалось выше, составляющие погрешности, которые в данном ряду измерений остаются постоянными или закономерно изменяются.

Следует отметить, что систематические погрешности (как и случайные) в различных точках шкалы одного и того же прибора или измерительного устройства могут быть различны. Поэтому после проведения исследований можно с уверенностью говорить о величине погрешностей лишь в выбранных точках шкалы прибора. Что касается интервалов между точками, то здесь обычно исходят из предположения, что от точки к точке погрешности прибора изменяются плавно (без скачков).

Оценка систематической погрешности проводится в следующей последовательности:

1) в каждой из выбранных точек шкалы прибора определяется среднее арифметическое значение $\bar{x}$;

2) систематическая погрешность средства измерений Δ_C определяется в каждой из выбранных точек шкалы как разность между средним арифметическим и истинным значением измеряемой величины в этой точке:

$$\Delta_C = \bar{x} - x_0, \tag{4.6}$$

где x_0 – определено выше.

Систематическая погрешность Δ_C может быть как положительной (при $\bar{x} > x_0$), так и отрицательной (при $\bar{x} < x_0$).

Истинное значение измеряемой величины x_0, как правило, неизвестно, и вместо x_0 используется действительное значение измеряемой величины, за которое принимают показания образцовых средств измерений.

Систематическая погрешность, подсчитанная по формуле (4.6), является абсолютной и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Кроме абсолютных значений, подсчитываются относительная δ_C и приведенная γ_C систематические погрешности:

$$\delta_C = \frac{\Delta_C}{x_0} 100\ \%, \qquad (4.7)$$

$$\gamma_C = \frac{\Delta_C}{x_N} 100\ \%, \qquad (4.8)$$

где x_N – нормирующее значение (в большинстве случаев $x_N = x_K$);

x_K – верхний предел шкалы прибора.

Относительная и приведенная погрешности выражаются обычно в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

На рис. 4.2 изображена числовая ось, на которой отложено истинное значение измеряемой величины x_0 и нанесены результаты измерений этой величины исследуемым средством измерений. В результате первого измерения получено значение x_1, второго – x_2, третьего – x_3, и т. д. (на рис. 4.2 обозначены результаты только первых четырех измерений). На числовой оси отложены также величины $x_П$ и $\overline{x}$. На рисунке представлены, кроме того, среднее квадратическое отклонение (σ) систематическая погрешность (Δ_C), случайная погрешность ($\overset{0}{\Delta}$) и суммарная погрешность (Δ).

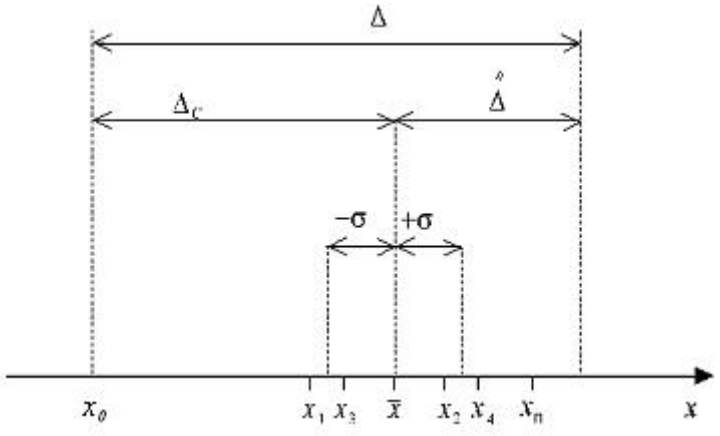


Рис. 4.2. Графическая интерпретация статических погрешностей средств измерений

Таким образом, из приведенного рисунка следует, что систематическая погрешность является некоторой постоянно присутствующей средней величиной, но отнюдь не исчерпывает всех погрешностей измерительного устройства. Действительно, разность между результатами отдельных измерений и истинным значением измеряемой величины может превосходить систематическую

погрешность (как, например, разности $x_2 - x_0$, $x_4 - x_0$ и т. д.), т. е. кроме систематической явно видна погрешность случайная.

4.4. Случайные погрешности

Случайные погрешности средств измерений (СИ) – это, как уже отмечалось, составляющие погрешности, которые в данном ряду измерений, выполненных исследуемым СИ, изменяются случайным образом.

Определение случайной погрешности (так же как и систематической) проводится в каждой из выбранных точек шкалы (или диапазона измерений) исследуемого СИ в следующей последовательности:

1) определяются средние арифметические значения $\bar{x}$;

2) определяются средние квадратические отклонения σ;

3) определяются случайные погрешности по формуле (4.9) без учета знака

$$\overset{0}{\Delta} = K \cdot \sigma, \qquad (4.9)$$

где K – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и закона распределения результатов измерений, рассматриваемых как случайные величины.

Стандарты (см., например, ГОСТ 8.009–84 [44] и ГОСТ 8.508–84 [47]) допускают использование в качестве характеристики случайной погрешности средств измерений значение среднего квадратического отклонения σ, оцениваемого по формуле (4.2).

Отметим, что значение СКО характеризует разброс результатов измерений около среднего арифметического значения (см. рис. 4.2).

Переходя к точностным характеристикам средств измерений, еще раз отметим, что следует рассматривать положительные значения СКО ($+\sigma$) и положительные значения случайной погрешности $\overset{0}{\Delta}$.

Коэффициент K, как уже отмечалось, зависит от принятой доверительной вероятности и закона распределения результатов измерений. Значение K для различных законов распределения приведены в методических указаниях по

применению ГОСТ 8.009–84 [44]. В настоящем учебном пособии при оценке случайных погрешностей используется предположение, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения.

Ниже приведены значения K в зависимости от доверительных вероятностей P при нормальном законе распределения:

$P = 0{,}68$; $K = 1{,}00$;

$P = 0{,}95$; $K = 1{,}96$;

$P = 0{,}99$; $K = 2{,}58$.

Подробная таблица значений K приведена в табл. П.1.5.

Отметим, что при нормальном законе распределения результатов измерений коэффициент K обычно называют «квантиль нормального распределения». Это обстоятельство отражено в заголовке табл. П.1.5.

Случайная погрешность, подсчитанная по формуле (4.9), является абсолютной и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Кроме абсолютных значений, могут также подсчитываться относительная и приведенная случайные погрешности:

$$\overset{\circ}{\delta} = \frac{\overset{\circ}{\Delta}}{x_0} 100\ \%, \tag{4.10}$$

$$\overset{\circ}{\gamma} = \frac{\overset{\circ}{\Delta}}{x_N} 100\ \%, \tag{4.11}$$

где x_0, x_n – определены выше.

Относительная и приведенная случайные погрешности выражаются, как правило, в процентах, но могут выражаться и в относительных величинах.

Проиллюстрируем изложенное с помощью рис. 4.2. Как уже указывалось выше, на рисунке изображена числовая ось с отложенными на ней результатами измерения x_1, x_2, x_3, ... известной величины x_0. Кроме того, на рисунке показаны величины $\overline{x}$, σ, Δ_C и Δ. Рассмотрим последнюю величину подробнее. Согласно выражению (4.9), случайная погрешность определяется как произведение K и σ.

Выражение

$$\overset{0}{\Delta} = K \cdot \sigma$$

обозначает, что случайная погрешность с вероятностью P не превзойдет величины $K \cdot \sigma$.

Например, при $K = 2$ и $P = 0{,}95$ случайная погрешность с вероятностью 0,95 будет не больше величины 2σ.

Таким образом, когда речь идет о случайной погрешности, кроме ее значений необходимо указывать доверительную вероятность результата.

При подсчете случайных погрешностей основная трудность возникает при определении коэффициента K, так как закон распределения результатов измерений, как правило, неизвестен.

Правомерность предположения о нормальности закона распределения результатов измерений может быть проверена по одному из критериев согласия, изложенных, например, в Государственных стандартах (ГОСТ 8.207–76 [46]; ГОСТ 8.508–84 [47]) или по критерию Романовского, приведенному в [30].

В прил. 2 описан критерий согласия по ГОСТ 8.508–84 [47].

4.5. Суммарные погрешности

Суммарная погрешность средства измерения Δ равняется арифметической сумме систематической и случайной погрешностей и характеризует наибольшую статическую погрешность средства измерения (СИ) в исследуемой точке шкалы (ГОСТ 8.009–84 [44]; ГОСТ 8.508–84 [47]).

$$\Delta = \pm\left(\left|\Delta_C\right| + \left|\overset{0}{\Delta}\right|\right). \qquad (4.12)$$

Отметим, что в разных точках шкалы измерительного устройства величины Δ (как и Δ_c, и $\overset{0}{\Delta}$) могут быть различны, поэтому для характеристики устройства в целом рассматривают наибольшую суммарную погрешность Δ_m. В этом случае говорят, что погрешность СИ не превосходит величины Δ_m.

Аналогично могут быть рассмотрены максимальная систематическая погрешность Δ_{cm} и максимальная случайная погрешность $\overset{\circ}{\Delta}_m$ как наибольшие погрешности из полученных в различных точках шкалы средства измерений.

Суммарная погрешность, подсчитанная по формуле (4.12), является абсолютной и имеет ту же размерность, что и измеряемая величина.

Кроме абсолютных значений, подсчитываются относительная δ и приведенная γ суммарные погрешности:

$$\sigma = \frac{\Delta}{x_0} 100\ \%, \tag{4.13}$$

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} 100\ \%, \tag{4.14}$$

где x_N – нормирующее значение.

Относительная и приведенная суммарные погрешности обычно выражаются в процентах, но могут выражаться и в виде относительных величин.

Для иллюстрации изложенного на рис. 4.2 наряду с другими величинами отложена величина суммарной погрешности.

Поскольку в состав суммарной погрешности входит случайная погрешность, то суммарная погрешность также является случайной величиной. Оценим доверительную вероятность *P,* с которой найдена абсолютная суммарная погрешность Δ, если доверительная вероятность оценки абсолютной случайной погрешности составляет *P* (аналогично могут быть рассмотрены доверительные вероятности относительных и приведенных погрешностей).

Напомним, что систематическая погрешность Δ_C – это погрешность, которая остается постоянной при повторных измерениях одной и той же величины. Другими словами, Δ_C, по определению, есть постоянная величина и в силу этого имеет доверительную вероятность, равную единице.

Воспользуемся теоремой умножения вероятностей, которая гласит: если сложное событие *C* состоит из ряда независимых исходов простых событий A_1, A_2, ..., A_n и его осуществление означает одновременное появление всех исхо-

дов, то вероятность такого сложного события равна произведению вероятностей исходов (см. [17, с. 46]), т. е.

$$P(C) = P(A_1 \cap A_2 \cap ... \cap A_n) = \prod_{j=1}^{n} P(A_j), \qquad (4.15)$$

где знак $\cap$ соответствует операции «и».

Независимость исходов при этом означает, что осуществление одного из них не влияет на вероятность осуществления остальных.

В нашем случае выражение (4.15) принимает вид

$$P(\Delta) = P(\Delta_c) \cdot P(\overset{o}{\Delta}) = P(\overset{0}{\Delta}), \qquad (4.16)$$

где $P(\Delta_c)$ – доверительная вероятность систематической погрешности ($P(\Delta_c) = 1$);

$P(\overset{o}{\Delta})$ – доверительная вероятность случайной погрешности;

$P(\Delta)$ – доверительная вероятность суммарной погрешности.

Таким образом, в рассмотренном случае доверительная вероятность суммарной погрешности численно равна доверительной вероятности случайной погрешности. Другими словами, с доверительной вероятностью P абсолютная суммарная погрешность исследованного средства измерения не превосходит величины Δ.

Соотношения (4.12), (4.13) и (4.14), приведенные выше, позволяют оценить значения абсолютной, относительной и приведенной суммарных погрешностей средств измерений.

Полученные значения абсолютной суммарной погрешности Δ (или относительной δ, или приведенной γ суммарных погрешностей) позволяют присвоить исследованному средству измерений тот или иной класс точности (см. п. 3.4 учебного пособия). Присвоенный класс точности должен соответствовать требованиям ГОСТ 8.401–80 [45].

Отметим, что для решения поставленной задачи по определению численного значения класса точности полученные значения Δ, или δ, или γ округляются до ближайшего большего значения стандартного ряда и являются классом точ-

ности данного средства измерений (СИ). Например, для СИ, имеющего $\delta =$ $= \pm 1{,}2$ %, класс точности (1,5); для СИ, имеющего $\gamma = \pm 3{,}2$ %, класс точности 4,0 и т. д.

Присвоенный класс точности заносится в техническую документацию на СИ. Кроме того, класс точности наносится на шкалы, щитки или корпуса средств измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 8.401–80 [45].

4.6. Правила округления

Результаты измерений и погрешности следует округлять по сложившимся правилам.

Основные положения этих правил округления:

1. Округление проводится только один раз при получении окончательных результатов. Все промежуточные результаты целесообразно представлять тем числом разрядов, которые удается получить.

2. Округление начинается с округления погрешности результата измерения.

3. Погрешность результата измерения округлятся до двух значащих цифр, если при движении слева направо первая значащая цифра округляемой погрешности меньше 3.

Погрешность результата измерения округляется до одной значащей цифры, если при движении слева направо первая значащая цифра округляемой погрешности больше 3 или равна 3.

4. Результат измерения округляется так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Если числовое значение результата измерения представляется десятичной дробью, оканчивающейся нулями, то нули отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

5. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры в числе не изменяют. Если эта цифра больше 5, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Лишние цифры в целых числах

заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, результат измерения U = 25,4587 мВ при погрешности результата Δ = ±0,0213 мВ. Округление начинается с погрешности. После округления погрешность Δ = ±0,021 мВ и результат измерения U = 25,459 мВ. Результат измерения с учетом погрешности запишется в виде U' = (25,459±0,021) мВ. Если погрешность (при том же результате измерения) Δ = ±6,25 мВ, то после округления Δ = ±6 мВ, U = 25 мВ и результат измерения с учетом погрешности U' = (25±6) мВ.

6. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры отсутствуют или нули, то последнюю сохраняемую цифру числа не изменяют.

Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры отличны от нуля, то последнюю сохраняемую цифру числа увеличивают на единицу.

7. Примеры округления:

а) результат измерения A = 625,47; погрешность ΔA = ±7,24. После округления: ΔA = ±7; A = 625 и результат измерения с учетом погрешности A' = (625±7);

б) результат измерения B = 1055,53; погрешность ΔB = ±5,29. После округления: ΔB = ±5; B = 1056 и результат измерения с учетом погрешности B' = (1056±5);

в) результат измерения C = 72,85; погрешность ΔC = ±0,35. После округления: ΔC = ±0,3; C = ±72,8 и результат измерения с учетом погрешности C = (72,8±0,3). Остающиеся цифры в числе не изменяют.

4.7. Пример расчета

В качестве примера рассмотрен расчет точностных характеристик вольтметра по результатам измерений с его помощью заданного напряжения. Расчет проведен в соответствии с рекомендациями, изложенными в пп. 4.1–4.6 учебного пособия.

Пример

При многократных измерениях напряжения $U_0 = 60{,}00$ В получены следующие показания исследуемого вольтметра: 60,12; 60,15; 60,16; 60,18; 60,20;

60,23; 60,25; 60,27; 60,28; 60,31 В. Предполагая, что результаты измерений подчиняются нормальному закону распределения, найти (с доверительной вероятностью P = 0,95) систематическую, случайную и суммарную погрешности вольтметра. Верхний предел измерения вольтметра $U_K = 200$ В.

Оценка искомых величин проводится в нижеследующей последовательности.

1. Рассчитывается среднее арифметическое значение рассматриваемого ряда измерений:

$$\overline{U} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} U_i = \frac{1}{10}(60{,}15 + ...60{,}31) = 60{,}215 \text{ В},$$

где $\overline{U}$ – среднее арифметическое значение;

n – число измерений (n = 10);

U_i – значение i-го измерения.

2. Определяется среднее квадратическое отклонение σ по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(U_i - \overline{U}\right)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(60{,}15-60{,}215)^2 + ... + (60{,}31-60{,}215)^2}{10-1}} = 0{,}0628 \text{ В},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение;

U_i, $\overline{U}$ и n – определены выше.

3. Выявляются возможные промахи методом 3σ и методом Смирнова–Греббса (табличным методом).

Метод 3σ

Для реализации этого метода подсчитывается значение 3σ = 3·0,0628 = 0,1884 В, которое сравнивается с разностью между $U_{\text{П}}$ и $\overline{U}$.

$$\left|U_{\text{П}} - \overline{U}\right| = \left|60{,}31 - 60{,}215\right| = 0{,}095 < 3\sigma,$$

где $U_{\text{П}}$ – предполагаемый промах ($U_{\text{П}} = 60{,}31\ B$);

$\overline{U} = 60{,}215B$ – определено выше.

Поскольку $\left|U_{\text{П}} - \overline{U}\right| < 3\sigma$, то $U_{\text{П}} = 60{,}31B$ – не промах, и это значение следует оставить в ряду измерений.

Табличный метод

Для реализации табличного метода оцениваются значения:

$$W = \frac{\left|U_{\text{П}} - \overline{U}\right|}{\sigma} = \frac{60,31 - 60,215}{0,0628} = 1,5127;$$

$$W_{\text{Т}} = f\left(p_i n\right) = 2,29 \text{ (для } p = 0,95 \text{ и } n = 10),$$

где W_T – табличное значение, зависящее от принятой доверительной вероятности p и числа измерений n (см. табл. П.1.4);

$U_{\text{П}}, \overline{U}$ и σ – определены выше.

Поскольку $W < W_T$, то $U_П = 60,31B$ _ не промах, и это значение следует оставить в ряду измерений.

4. Оценивается абсолютная систематическая погрешность вольтметра:

$$\Delta_C = \overline{U} - U_0 = 60,215 - 60,00 = 0,215 \text{ В},$$

где Δ_C – систематическая погрешность вольтметра в рассматриваемой точке шкалы или диапазона измерения;

U_0 – рассматриваемая точка шкалы (диапазона измерения), значение напряжения в которой принимается за истинное значение измеряемой величины (U_0 = 60,00 В);

$\overline{U}$ – определено выше.

5. Оценивается абсолютная случайная погрешность вольтметра:

$$\overset{0}{\Delta} = \kappa \cdot \sigma = 1,96 \cdot 0,0628 = 0,1231 \text{ В},$$

где $\overset{0}{\Delta}$ – случайная погрешность вольтметра в рассматриваемой точке шкалы (диапазоне измерения);

κ – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности p и от закона распределения результатов измерений (для p = 0,95 и нормального закона распределения результатов измерений κ = 1,96);

σ – определено выше.

6. Оценивается абсолютная суммарная погрешность вольтметра:

$$\Delta = \pm(|\Delta_C| + |\overset{0}{\Delta}|) = \pm(0{,}215 + 0{,}1231) = \pm 0{,}3381 \text{ В};$$

$$\Delta = \pm 0{,}3381 \text{ В},$$

где Δ – абсолютная суммарная погрешность вольтметра;

Δ_C, $\overset{0}{\Delta}$ – определены выше.

7. Оценивается относительная суммарная погрешность вольтметра:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{U_0} 100\ \% = \pm \frac{0{,}3381}{60{,}00} 100\ \% = \pm 0{,}5635\ \%;$$

$$\delta = \pm 0{,}5635\ \%,$$

где δ – относительная суммарная погрешность;

U_0 – определено выше (U_0= 60,00 В).

8. Оценивается приведенная суммарная погрешность вольтметра:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{U_k} 100\ \% = \pm \frac{0{,}3381}{200} 100\ \% = \pm 0{,}1690\ \%;$$

$$\gamma = \pm 0{,}1690\%,$$

где γ – приведенная суммарная погрешность;

U_k – верхний предел шкалы или диапазона измерения вольтметра (U_k = 200 В).

9. Провести округление полученных величин. После округления рассматриваемые величины принимают следующие значения:

$$\Delta = \pm 0{,}3\ \ B;$$

$$\delta = \pm 0{,}6\ \%;$$

$$\gamma = \pm 0{,}17\ \%;$$

$$\overline{U'} = (60{,}2 \pm 0{,}3)\ \text{В}, p = 0{,}95.$$

Следовательно, с доверительной вероятностью p = 0,95 суммарные погрешности (при измерении напряжения U_0= 60,00 В) составляют: абсолютная $\pm$ 0,3 В; относительная $\pm$ 0,6 %; приведенная $\pm$ 0,17 %. При этом результат измерения исследуемым вольтметром в выбранной точке шкалы (или диапазона

измерения) может быть записан как $(60{,}2 \pm 0{,}3)$ В. Отметим, что термин «шкала» применяется для отсчетного устройства стрелочных приборов, а термин «диапазон измерения» – для отсчетного устройства цифровых измерительных приборов. В приведенном примере не уточняется тип прибора (стрелочный прибор или цифровой) и, в силу этого, используются оба термина при характеристике рассматриваемых величин.

5. ДОВЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ И ПОГРЕШНОСТИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

5.1. Общие положения

В учебном пособии широко используются такие величины, как среднее арифметическое значение ($\bar{x}$), среднее квадратическое отклонение (σ), систематические (Δ_C), случайные ($\overset{0}{\Delta}$) и суммарные (Δ) погрешности средств измерений (СИ). Все перечисленные величины зависят от числа измерений «*n*» и принимают разные значения в зависимости от «*n*». За истинные значения $\bar{x}$, σ, Δ_C, $\overset{0}{\Delta}$ и Δ принимаются их значения при бесконечно большом числе измерений (при $n \to \infty$). На практике число измерений всегда ограничено, что приводит к появлению погрешностей при оценке рассматриваемых величин. Причем погрешность из-за конечного числа измерений тем больше, чем меньше проведенное число измерений.

Ниже рассматривается порядок оценки погрешностей при определении величин $\bar{x}$, Δ_C и σ. Аналогичные погрешности могут быть найдены для величины $\overset{0}{\Delta}$ и Δ, но фактически эти погрешности рассчитываются исключительно редко и в силу этого в данном учебном пособии не рассматриваются.

5.2. Погрешность арифметического среднего

При конечном числе измерений в значении арифметического среднего появляется погрешность, которая тем больше, чем меньше проведенное число измерений.

Погрешность среднего арифметического значения определяется по формуле

$$\Delta\bar{x} = \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \qquad (5.1)$$

где *t* – коэффициент Стьюдента, зависящий от принятой доверительной вероятности *P* и числа измерений *n* (значения *t* приведены в табл. П.1.2).

Область значений $\Delta\bar{x}$ может быть записана в виде

$$F\left(a_1\langle\bar{x}\langle a_2\right)=P\,, \tag{5.2}$$

т. е. с доверительной вероятностью P значение $\bar{x}$ больше значения a_1 и меньше значения a_2, где a_1 – нижняя и a_2 – верхняя доверительные границы.

Изложенное иллюстрируется на рис. 5.1, *а*, где изображена числовая ось, на которой отложены среднее арифметическое значение $\bar{x}$, верхняя a_2 и нижняя a_1 границы доверительного интервала $\bar{x}$ и погрешности среднего арифметического $+\Delta\bar{x}$ и $-\Delta\bar{x}$. Нижняя и верхняя границы доверительного интервала определяются соотношениями

$$a_1=\left(\bar{x}-\Delta\bar{x}\right), \tag{5.3}$$

$$a_2=\left(\bar{x}+\Delta\bar{x}\right). \tag{5.4}$$

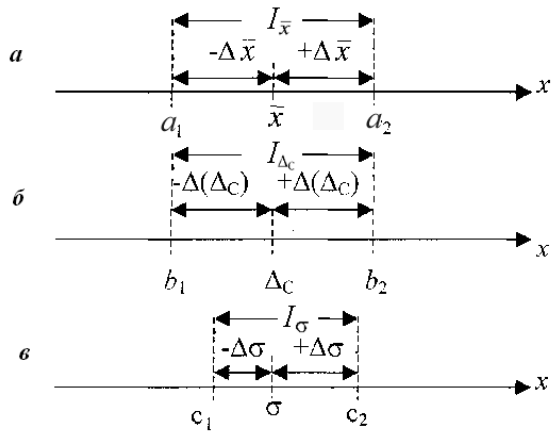


Рис. 5.1. Графическая интерпретация доверительных интервалов и погрешности погрешностей

5.3. Погрешность систематической погрешности

Систематическая погрешность Δ_C определяется как разность между средним арифметическим значением и истинным значением измеряемой величины

$$\Delta_C=\bar{x}-x_0\,. \tag{5.5}$$

Предположим теперь, что известна погрешность среднего арифметического значения, равная $\pm\Delta\bar{x}$.

Тогда с учетом этой погрешности можно записать

$$\bar{x}=\bar{x}\pm\Delta\bar{x}\,. \tag{5.6}$$

Подставляя значение $\bar{x}$ в уравнение (5.5) и обозначая полученную при этом величину через Δ'_C, получим

$$\Delta'_C = \bar{x} \pm \Delta\bar{x} - x_0 = \bar{x} - x_0 \pm \Delta\bar{x} = \Delta_C \pm \Delta\bar{x}. \qquad (5.7)$$

Введем обозначение $\Delta(\Delta_C) = \Delta\bar{x}$ и будем называть в дальнейшем эту величину погрешностью систематической погрешности.

Следовательно, погрешность систематической погрешности численно равна погрешности арифметического среднего, если действительное значение измеряемой величины известно точно и не содержит каких-либо погрешностей:

$$\Delta(\Delta_c) = \pm t \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \qquad (5.8)$$

Таким образом, при малом числе измерений нельзя указать точное значение систематической погрешности, а можно лишь сказать, что с принятой доверительной вероятностью систематическая погрешность будет находиться в определенных границах. Нижняя b_1 и верхняя b_2 границы доверительного интервала определяются соответственно выражениями

$$b_1 = \Delta_C - \Delta(\Delta_C), \qquad (5.9)$$

$$b_2 = \Delta_C + \Delta(\Delta_C). \qquad (5.10)$$

Изложенное здесь иллюстрируется на рис. 5.1, *б*, где изображена числовая ось с отложенными на ней величинами Δ_C, b_1, b_2, $-\Delta(\Delta_C)$, $+\Delta(\Delta_C)$ и I_{Δ_C}.

Величина доверительного интервала систематической погрешности (т. е. промежуток, заключенный между верхней и нижней границей) зависит от проведенного числа измерений и от принятой доверительной вероятности. При заданной доверительной вероятности с ростом числа измерений доверительный интервал уменьшается и при числе измерений $n \to \infty$ стягивается в точку. Другими словами, при бесконечно большом числе измерений погрешности среднего арифметического и систематической погрешности равны нулю. Подчеркнем еще раз это обстоятельство. Увеличение числа измерений уменьшает не систематическую погрешность, а ее неопределенность. С ростом числа измерений уменьшается не сама погрешность, а погрешность погрешности.

5.4. Погрешность среднего квадратического отклонения

При малом числе измерений величина среднего квадратического отклонения σ, подобно среднему арифметическому значению измеряемой величины и систематической погрешности, также будет иметь погрешность. Погрешность среднего квадратического отклонения $\Delta\sigma$ может быть найдена по приближенной формуле

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{2\cdot(n-1)}}. \qquad (5.11)$$

Выражение (5.11) справедливо для *n,* большего 25–30, но в случае грубых оценок это выражение можно использовать и для меньшего числа измерений.

Из (5.11) следует, что при $n = 30$ $\Delta\sigma = \pm 1/8\sigma$, т. е. при тридцати измерениях погрешность в определении среднего квадратического отклонения составит примерно 13 %. При $n = 50$ погрешность определения σ составит около 10 %, при $n = 100$ – примерно 7 %. Таким образом, погрешность в определении величины σ уменьшается медленнее, чем происходит рост числа измерений.

Для более строгой оценки погрешности среднего квадратического отклонения используется уже рассмотренное ранее распределение χ^2.

На основе распределения χ^2 для коэффициентов γ составлены специальные таблицы, в которых приводятся значения этих коэффициентов в зависимости от числа измерений и принятой доверительной вероятности. Поскольку распределение χ^2 асимметрично, то погрешности равного значения, но противоположного знака, не равновероятны, как в случае нормального распределения. Введем нижнюю и верхнюю границы погрешности:

$$\Delta_{1\sigma} = (\gamma_1 - 1)\sigma, \qquad (5.12)$$

$$\Delta_{2\sigma} = (\gamma_2 - 1)\sigma. \qquad (5.13)$$

Поскольку $\gamma_1 \langle 1$, а $\gamma_2 \rangle 1$, то величина $\Delta_1\sigma$, определяемая по (5.12), всегда отрицательна, а величина $\Delta_2\sigma$, определяемая по (5.13), всегда положительна. Отметим также, что $|\Delta_1\sigma| \langle |\Delta_2\sigma|$, т. е. положительная погрешность среднего квад-

ратического отклонения (СКО) всегда больше по абсолютной величине отрицательной погрешности СКО.

Подробная таблица значений коэффициентов γ_1 и γ_2 приводится в приложении (табл. П.1.3).

Вместо расчетных соотношений вида (5.12) и (5.13) можно использовать запись вида

$$F\left(c_1 < \sigma < c_2\right) = P,$$

т. е. с доверительной вероятностью P среднее квадратическое отклонение σ больше величины c_1 и меньше c_2.

На рис. 5.1, *в* изображена числовая ось и отложены величины σ, $\left|-\Delta\sigma\right| = \left|\Delta_1\sigma\right|, \left|+\Delta\sigma\right| = \Delta_2\sigma,$, c_1, c_2, где c_1 и c_2 – нижняя и верхняя границы доверительного интервала I_σ. Границы доверительного интервала I_σ определяются соотношениями

$$c_1 = \sigma - \left|\Delta_1\sigma\right| \tag{5.14}$$

$$c_2 = \sigma + \left|\Delta_2\sigma\right|. \tag{5.15}$$

Значение и асимметрия доверительного интервала зависят от проведенного числа измерений и принятой доверительной вероятности. При заданной доверительной вероятности с ростом числа измерений ширина доверительного интервала и его асимметрия уменьшаются, а при $n \to \infty$ доверительный интервал стягивается в точку.

Следует отметить, что при большом числе измерений приближенная формула (5.11) и более строгие соотношения (5.12) и (5.13) дают близкие результаты.

5.5. Необходимое число измерений

Для увеличения достоверности результата измерения могут быть использованы два пути: повышение точности измерений за счет улучшения измерительных приборов и методов измерений и увеличение числа измерений. Рас-

смотрим последний прием, считая, что все возможности совершенствования техники уже реализованы.

Сами погрешности (и систематические, и случайные) от числа измерений непосредственно не зависят. От числа измерений непосредственно зависят погрешности погрешностей и соответствующие доверительные интервалы, т. е. при увеличении числа измерений уменьшаются такие величины, как $\Delta\bar{x}$, $\Delta(\Delta_C)$ и $\Delta(\sigma)$.

Отметим, что уменьшать погрешность погрешностей целесообразно до тех пор, пока погрешность измерений не будет значительно превосходить соответствующую погрешность погрешности. Для этого необходимо, чтобы доверительный интервал, определенный с выбранной доверительной вероятностью, был бы существенно меньше величины погрешности измерений. Обычно в этих случаях сравнивают между собой погрешность среднего арифметического значения и систематическую погрешность Δ_C и добиваются, чтобы

$$\Delta\bar{x} << \Delta_C. \qquad (5.16)$$

На практике обычно считают, что условие (5.16) выполняется, если $\Delta\bar{x}$ составляет примерно одну десятую часть от Δ_C. Иногда удовлетворяются гораздо менее жесткими требованиями: $\Delta\bar{x} = 1/5\Delta_C$ или даже $\Delta\bar{x} = 1/3\Delta_C$.

В пункте 5.1 уже отмечалось, что погрешность арифметического среднего определяется с использованием распределения Стьюдента по соотношению (5.1). Выражение (5.1) позволяет решить и обратную задачу, т. е. по заданным величинам *t* и σ найти соответствующее им число измерений *n.* Правда, решение обратной задачи с помощью табл. П.1.2 приходится вести методом последовательного приближения, задаваясь различными значениями *n.* Необходимость последнего объясняется тем, что коэффициент Стьюдента *t,* значения которого приводятся в табл. П.1.2, зависит не только от доверительной вероятности, но и от проведенного числа измерений. Для облегчения решения поставленной задачи составлены специальные таблицы, в которых приводится необходимое число измерений для получения относительной погрешности $\Delta\bar{x}/\sigma$ в зависимости от требуемой доверительной вероятности *P* (см. табл. П.1.6).

Сущность пересчета от данных табл. П.1.2 к данным табл. П.1.6 заключается в следующем.

Выше было показано, что доверительная вероятность P попадания случайной величины z в интервал $\pm t$ зависит как от заданной величины t, так и от числа измерений n. На этой основе составлена табл. П.1.2. Коэффициенты Стьюдента представляют собой численные значения доверительного интервала $\pm t$ в зависимости от двух параметров P и n. Очевидно, с помощью такой таблицы можно определить любую из трех величин P, n и t по известным двум другим. В частности, таким образом можно найти n по заданным значениям P и t.

В практических условиях доверительный интервал задается не для величины t, а непосредственно для исследуемой случайной величины $\Delta\bar{x}$ (см. (5.1)).

На основании зависимости (5.1) можно записать

$$t = \sqrt{n} \cdot \frac{\Delta x}{\sigma}. \tag{5.17}$$

Откуда окончательно получаем

$$M = \frac{\Delta\bar{x}}{\sigma} = \frac{t}{\sqrt{n}}, \tag{5.18}$$

где M – обозначение приведенной величины доверительного интервала.

Таким образом, для решения поставленной задачи по определению необходимого числа измерений n по заданным значениям доверительного интервала $\pm\Delta\bar{x}$ и доверительной вероятности P необходимо коэффициенты Стьюдента t (см. табл. П.1.2) разделить на корень квадратный из соответствующего числа измерений n.

Полученная таким образом таблица приведена в прил. 1 (табл. П.1.6).

Приведем пример расчета необходимого числа измерений.

Пример 5.1. Систематическая погрешность вольтметра Δ_C = 0,8 В; σ = 1,0 В. Сколько измерений нужно проделать, чтобы с вероятностью 0,95 погрешность среднего арифметического была меньше половины систематической погрешности?

Находим $\Delta\bar{x}$ и отношение $\Delta\bar{x}$ к σ:

$$\Delta\bar{x} = \frac{1}{2}\cdot\Delta_C = \frac{1}{2}\cdot 0{,}8 = 0{,}4\ \text{В};$$

$$\frac{\Delta\bar{x}}{\sigma} = \frac{0{,}4}{1{,}0} = 0{,}4\,.$$

Из табл. П.1.2 находим в колонке $P = 0{,}95$ для $\Delta\bar{x}/\sigma = 0{,}4$, $n = 27$.

Иначе говоря, надо провести 27 измерений, чтобы погрешность среднего арифметического значения не превысила 0,4 В с вероятностью $P = 0{,}95$.

В данном случае получилось сравнительно небольшое число измерений, которое можно осуществить практически. Из табл. П.1.6 следует, что при высоких доверительных вероятностях и жестких требованиях к результатам измерений могут получаться очень большие числа измерений, исчисляемые десятками и даже сотнями тысяч. Очевидно, что реализовывать такие большие числа измерений невозможно, поэтому требования к результатам измерений должны быть согласованы с возможностями измерительных устройств и их не следует необоснованно завышать.

Выше подробно рассмотрен порядок расчетов, когда задана величина погрешности арифметического среднего. В случае, когда задана величина погрешности систематической погрешности, порядок расчетов остается тот же самый и поэтому здесь не рассматривается.

Погрешности среднего квадратического отклонения Δ_σ и тем более погрешность случайной погрешности $\Delta(\overset{0}{\Delta})$ в качестве исходных величин используются редко, и в силу этого в настоящем учебном пособии данный вопрос подробно не рассматривается. Отметим только, что при необходимости можно воспользоваться приближенным соотношением (5.11), решив его относительно числа измерений *n.* Можно также воспользоваться табл. П.1.3 γ-коэффициентов, но в этом случае задачу придется решать методом последовательного приближения.

В заключение параграфа опишем, какие и в какой последовательности следует выполнить операции, чтобы найти необходимое число измерений при заданной погрешности среднего арифметического значения $\bar{x}$.

Определение минимально необходимого числа измерений n для получения с выбранной доверительной вероятностью P заданной погрешности арифметического среднего приводится в нижеследующей последовательности.

В исследуемой точке шкалы прибора проводится 10–20 измерений и находятся величины $\bar{x}$ и σ. Измерения следует проводить таким образом, как описано в п. 4.1.

Находится отношение $\Delta\bar{x}/\sigma$, где $\Delta\bar{x}$ – заданная погрешность арифметического среднего.

По величине соотношения $\Delta\bar{x}/\sigma$ и заданной доверительной вероятности P находится минимально необходимое число измерений (см. табл. П.1.6).

Полученное согласно изложенному число измерений n_1 является первым приближением. Для получения второго приближения необходимо провести n_1 измерений и повторить все необходимые расчеты, порядок которых приведен выше. Если полученное число измерений n_1 меньше предварительно проведенного числа измерений или равно ему, то второго приближения делать не следует.

Из всего изложенного можно заключить, что увеличением числа измерений можно устранить влияние случайных воздействий на результат измерения только в том случае, если стандартное отклонение σ не более чем в несколько раз превосходит систематическую погрешность Δ_C. Реально это возможно, если $\sigma \le 5\Delta_C$. При больших значениях σ для получения удовлетворительных результатов уже требуются сотни и тысячи измерений, что практически невыполнимо. В этих случаях следует коренным способом менять методику измерений или используемые измерительные устройства, чтобы уменьшить величину среднего квадратического отклонения.

5.6. Пример расчета

Расчет погрешности погрешностей, доверительных интервалов и доверительных границ проведен с использованием условия задачи примера 4.1 (п. 4.7).

Для расчетов использованы следующие величины из примера 4.1:

$$\overline{U} = 60{,}215 \text{ В}; \ \sigma = 0{,}0628 \text{ В}; \ \Delta_C = 0{,}215 \text{ В}.$$

1. Погрешность среднего арифметического значения оценивается по формуле:

$$\Delta\overline{U} = \pm t\frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \pm\frac{2,26\cdot 0,0628}{\sqrt{10}} = \pm 0,0449 \text{ В};$$

где $\Delta\overline{U}$ – погрешность среднего арифметического значения;

t – коэффициент Стьюдента, зависящий от принятой доверительной вероятности P и числа измерений n (для $P = 0,95$ и $n = 10$ $t = 2,26$; см.табл. П.1.2);

σ, n – определены выше.

2. Доверительные границы среднего арифметического значения оценивается по формулам

$$a_1 = \overline{U} - \left|\Delta\overline{U}\right| = 60,215 - 0,0449 = 60,1701 \text{ В};$$

$$a_2 = \overline{U} + \left|\Delta\overline{U}\right| = 60,215 + 0,0449 = 60,2599 \text{ В};$$

где a_1 и a_2 – нижняя и верхняя доверительные границы среднего арифметического значения;

$\Delta\overline{U}$ и $\overline{U}$ – определены выше.

3. Доверительный интервал среднего арифметического значения оцениваются по формуле

$$I_{\overline{U}} = a_2 - a_1 = 60,2599–60,1701 = 0,0898 \text{ В}.$$

4. Погрешность систематической погрешности численно равна погрешности арифметического среднего значения, т. е.

$$\Delta(\Delta_C) = \pm 0,0449 \text{ В},$$

где $\Delta(\Delta_C)$ – погрешность систематической погрешности.

5. Доверительные границы систематической погрешности оцениваются по формулам

$$b_1 = \Delta_C - \left|\Delta(\Delta_C)\right| = 0,2150–0,0449 = 0,1701 \text{ В};$$

$$b_2 = \Delta_C - \left|\Delta(\Delta_C)\right| = 0,2150+0,0449 = 0,2599 \text{ В};$$

где b_1 и b_2 – нижняя и верхняя доверительные границы систематической погрешности;

Δ_C и $\Delta(\Delta_C)$ – определены выше.

6. Доверительный интервал систематической погрешности определяется по формуле

$$I_{\Delta_C} = b_2 - b_1 = 0{,}2599 - 0{,}1701 = 0{,}0898 \text{ В};$$

где I_{Δ_C} – доверительный интервал систематической погрешности;

b_1 и b_2 – определены выше.

7. Приближенное значение погрешности среднего квадратического отклонения (СКО) оценивается по формуле

$$\Delta\sigma = \pm\frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}} = \pm\frac{0{,}0628}{\sqrt{2(10-1)}} = \pm 0{,}0148 \text{ В};$$

где Δσ – приближенное значение погрешности СКО;

σ и n – определены выше.

8. Уточненные значения погрешностей среднего квадратического отклонения (СКО) оцениваются по формулам

$$\Delta_1\sigma = (\gamma_1 - 1)\sigma = (0{,}69 - 1)\cdot 0{,}0628 = -0{,}0195 \text{ В};$$

$$\Delta_2\sigma = (\gamma_2 - 1)\sigma = (1{,}83 - 1)\cdot 0{,}0628 = 0{,}0521 \text{ В};$$

где $\Delta_1\sigma$ и $\Delta_2\sigma$ – уточненные погрешности (СКО);

γ_1 и γ_2 – коэффициенты, зависящие от принятой доверительно вероятности P и числа измерений n (для $P = 0{,}95$ и $n = 10$ $\gamma_1 = 0{,}69$ и $\gamma_2 = 1{,}83$, см. табл. П.1.3);

σ – определено выше.

9. Уточненные доверительные границы среднего квадратического отклонения (СКО) оцениваются по формулам

$$C_1 = \sigma - |\Delta_1\sigma| = 0{,}0628 - 0{,}0195 = 0{,}0433 \text{ В};$$

$$C_2 = \sigma + |\Delta_2\sigma| = 0{,}0628 + 0{,}0521 = 0{,}1149 \text{ В},$$

где C_1 и C_2 – уточненные нижняя и верхняя доверительные границы СКО;

σ, $\Delta_1\sigma$, $\Delta_2\sigma$ – определены выше.

10. Уточненный доверительный интервал среднего квадратического отклонения (СКО) оценивается по формуле

$$I_\sigma = C_2 - C_1 = 0,1149 - 0,0433 = 0,0716 \text{ В};$$

где I_σ – уточненное значение доверительного интервала СКО;

C_1 и C_2 – определены выше.

После округления найденных величин получены следующие их значения:

$$\Delta\overline{U} = \pm 0,04 \text{ В};\ a_1 = 60,10 \text{ В};\ a_2 = 60,26 \text{ В};\ I_{\overline{U}} = 0,09 \text{ В}.$$

$$\Delta(\Delta_C) = \pm 0,04 \text{ В};\ b_1 = 0,17 \text{ В};\ b_2 = 0,26 \text{ В};\ I_{\Delta_C} = 0,09 \text{ В}.$$

$$\Delta\sigma = \pm 0,01 \text{ В}.$$

$$\Delta_1\sigma = -0,02 \text{ В};\ \Delta_2\sigma = +0,05 \text{ В};$$

$$C_1 = 0,04 \text{ В};\ C_2 = 0,11 \text{ В};\ I_\delta = 0,07 \text{ В}.$$

В заключение напомним еще раз основные положения.

При малом числе измерений появляются погрешности погрешностей, которые уменьшаются с ростом числа измерений. Приведенный пример позволяет количественно оценить погрешности погрешностей при $n = 10$ (где n – число измерений).

Подсчет погрешностей среднего квадратического отклонения (СКО) по приближенной формуле всегда дает симметричные и несколько меньшие значения, чем значения, полученные по уточненным формулам с использованием коэффициентов γ_1 и γ_2 (см. приведенный пример).

Погрешности СКО, найденные по уточненным формулам, всегда асимметричны, причем отрицательная погрешность по абсолютной величине всегда меньше положительной погрешности. Уточненная отрицательная погрешность по абсолютной величине близка погрешности, получаемой по приближенной формуле (см. результаты расчетов, приведенные в рассмотренном примере).

6. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Общие положения

Динамическая погрешность измерений – это погрешность, возникающая при измерении переменных во времени величин или неустановившихся периодических процессов и обусловленная инерционными свойствами средств измерений [1, 2, 26].

Динамическая погрешность средства измерения $d(t)$ может быть определена как разность между сигналом на выходе средства измерения $x(t)$ и истинным значением измеряемой величины $x_0'(t)$, приведенной к выходу.

$$d(t) = x(t) - x_0'(t), \tag{6.1}$$

где значения величин $d(t)$, $x(t)$ соответствуют моменту времени t.

Выражение (6.1) свидетельствует, что динамическая погрешность является функцией времени и зависит от характера входного сигнала.

Истинным значением измеряемой величины является ее значение на входе измерительного устройства $x_0(t)$. Для сравнения входных и выходных величин между собой необходимо сделать их приведение «к входу» или «к выходу» средства измерения. Воспользовавшись приведением «к выходу», запишем значение динамической погрешности $d(t)$ в виде

$$d(t) = x(t) - Kx_0(t), \tag{6.2}$$

где $x(t)$ – выходной сигнал;

$x_0(t)$ – входной сигнал;

K – статический передаточный коэффициент.

Статический передаточный коэффициент находится в статических условиях работы измерительного устройства как отношение приращения выходной величины Δx к приращению входной величины Δx_0:

$$K = \Delta x / \Delta x_0. \tag{6.3}$$

При классификации погрешностей средств измерений отмечалось, что динамическая погрешность может быть представлена в виде суммы двух со-

ставляющих – систематической и случайной. Однако из-за большой сложности разделения динамических погрешностей на систематические и случайные составляющие такого разделения обычно не проводят, а ограничиваются рассмотрением суммарной динамической погрешности, определяемой выражением (6.2).

Вместе с тем следует отметить, что динамическая погрешность в виде (6.2) сравнительно редко используется на практике. Это объясняется тем, что $d(t)$ характеризует реакцию измерительного устройства на вполне определенный входной сигнал $x_0(t)$. Величина погрешности в этом случае зависит как от динамических свойств измерительного устройства, так и от вида входного сигнала, причем каждому входному сигналу соответствует своя динамическая погрешность. В силу этого для описания динамических свойств самих измерительных приборов (или устройств), а не системы прибор-сигнал предпочитают использовать другие характеристики. Наиболее полно динамические свойства измерительного устройства описываются передаточной функцией $W(p)$, которая, как известно, определяется соотношением

$$W(p) = \frac{x(p)}{x_0(p)}, \tag{6.4}$$

где p – комплексная переменная величина(параметр);

$x_0(p)$, $x(p)$ – входной и выходной сигналы, преобразованные по Лапласу, при нулевых начальных условиях.

Другими важными характеристиками измерительных устройств являются амплитудно- и фазово-частотные характеристики.

Амплитудно-частотной характеристикой измерительного устройства называется зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты выходного сигнала (при постоянстве амплитуды входного сигнала).

Фазово-частотной характеристикой измерительного устройства называется зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты изменения входного сигнала.

Методы определения передаточных функций и частотных характеристик подробно рассматриваются в курсе теории автоматического управления и детально освещены в соответствующей литературе. Более подробно с методами определения передаточных функций и частотных характеристик можно ознакомиться по работе [27]. В данном учебном пособии эти вопросы рассмотрены очень кратко.

6.2. Передаточные функции

Существует несколько методов экспериментального определения параметров передаточной функции $W(p)$, правомерных для линейных средств измерений, не имеющих чистого запаздывания. Наибольшее распространение получил метод, основанный на использовании переходных характеристик $L(t)$ исследуемых устройств и характеристик типовых динамических звеньев.

Переходной характеристикой $L(t)$ динамической системы называется ее реакция на входной сигнал, имеющий вид ступенчатой функции, при нулевых начальных условиях. На рис. 6.1 приводится характерный вид входных и выходных сигналов при исследовании измерительных устройств.

Рекомендуется следующая последовательность операций для определения передаточной функции измерительного устройства.

На вход исследуемого измерительного устройства подается сигнал в виде единичной функции, т. е. на входе устройства изменяются скачком напряжение, ток и т. д. Скачок входной величины может быть как положительным, так и отрицательным. Для определенности все последующие рассуждения проводятся применительно к положительному скачку входного сигнала.

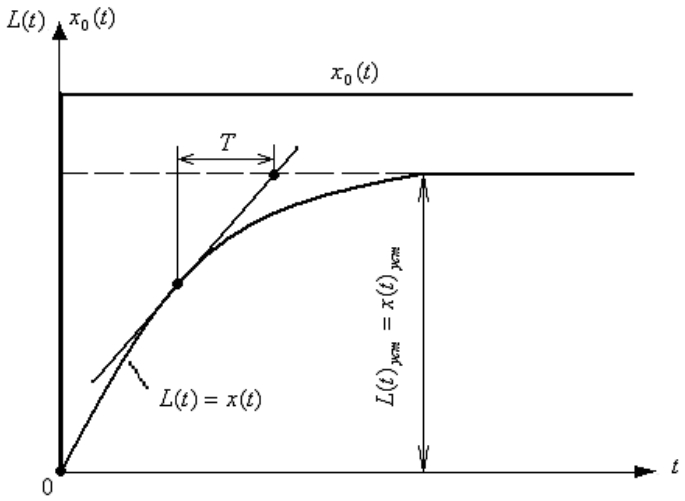


Рис. 6.1. Характерный вид входных и выходных сигналов
при исследовании измерительных устройств первого порядка

В зависимости от свойств исследуемого устройства переходная характеристика может иметь апериодический или колебательный характер, а работа устройства может быть описана дифференциальным уравнением первого, второго, третьего и т. д. порядков. При этом измерительные устройства соответственно называются устройствами первого, второго, третьего и т. д. порядков.

По переходным характеристикам, полученным экспериментально в соответствии с изложенным, отыскивается передаточная функция измерительного устройства. Вид передаточной функции определяется главным образом порядком устройства.

Для измерительных устройств первого порядка передаточная функция имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1}. \tag{6.5}$$

Для измерительных устройств второго порядка передаточная функция имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{T_2^2 p^2+T_1 p+1} \tag{6.6}$$

или

$$W(p)=\frac{K}{(T_3 p+1)(T_4 p+1)}. \tag{6.7}$$

Для измерительных устройств третьего порядка передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} \qquad (6.8)$$

или

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T^2 p^2 + 2T\lambda p + 1)} . \qquad (6.9)$$

Для измерительных устройств четвертого порядка:

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)} . \qquad (6.10)$$

Неизвестные параметры T, T_1, T_2, T_3 и T_4 передаточных функций измерительных устройств первого и второго порядков рекомендуется определять графически [27].

Неизвестные параметры T, T_1, T_2, T_3, T_4, λ передаточных функций измерительных устройств третьего и четвертого порядков рекомендуется определять графоаналитическим методом Цыпкина–Максимова. Измерительные устройства старших порядков – третьего, четвертого и т. д. – встречаются на практике сравнительно редко, и поэтому определение их параметров в данном пособии не рассматривается.

Оценка параметров передаточных функций устройств высоких порядков может быть проведена по работе [27].

В настоящем учебном пособии рассматривается оценка параметров передаточной функции устройства первого порядка (см. соотношение (6.5)).

Неизвестный параметр T (постоянная времени) для измерительных устройств первого порядка определяется по графику переходной характеристики как величина проекции касательной в данной точке на линию установившегося значения $L(t) = L(t)_{уст}$(см. рис. 6.1), причем в идеальном случае T одинакова во всех точках кривой $L(t)$. Поскольку проводить точно касательные к экспериментально полученной кривой $L(t)$ затруднительно, то рекомендуется провести

касательные к трем- етырем точкам кривой, найти для каждой точки T и взять среднее арифметическое значение.

Отметим, что длительность переходного процесса для устройств первого порядка (т. е. время затухания переходной характеристики) с погрешностью около 5 % равна $3T$ и с погрешностью около 1 % равна $5T$.

Неизвестный статический передаточный коэффициент K оценивается по соотношению (6.3), привиденному выше.

6.3. Частотные характеристики

Частотные характеристики измерительных устройств (амплитудные и фазовые) могут быть получены экспериментально или расчетным путем по передаточным функциям. При экспериментальном определении частотных характеристик на вход измерительных устройств подаются переменные (синусоидальные) сигналы, частота которых изменяется от нуля до максимально возможного для данного устройства значения. При этом проводятся замеры амплитудных значений сигналов на входе и выходе устройства и фазовые сдвиги между входными и выходными сигналами.

Под термином *«входной сигнал»* подразумевается сигнал той или иной природы, поступающий на вход устройства (для вольтметра это напряжение, для амперметра – электрический ток и т. д.).

Под термином *«выходной сигнал»* подразумеваются показания устройства, считываемые с его выхода (для стрелочных приборов это отсчет по шкале, для осциллографа – изображение на экране и т. д.).

Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики (и вообще динамические характеристики) имеет смысл рассматривать для датчиков (преобразователей неэлектрических величин в электрические), осциллографов и некоторых других приборов, используемых для измерения параметров неустановившихся (переходных) процессов. Для стрелочных приборов, компенсаторов с ручным управлением и подобных им приборов, предназначенных для измерений в установившемся режиме, эти характеристики, как правило, не рассматриваются. В паспортах приборов, предназначенных для измерения параметров ус-

тановившихся процессов в цепях переменного тока, обычно указывается частотный диапазон, в котором они работают без значительных погрешностей.

Следует отметить, что если амплитудно- и фазово-частотные характеристики и передаточная функция позволяют судить о динамических свойствах измерительного устройства и его возможности при измерениях в неустановившихся (переходных) режимах, то частотный диапазон характеризует возможности измерительного устройства при измерениях периодических процессов в установившихся режимах.

Ниже приводятся аналитические выражения, связывающие амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики с параметрами передаточных функций T_1, T_2, T_3, T_4, T.

Для измерительных устройств первого порядка

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\omega^2 T^2 + 1}}. \tag{6.11}$$

Для апериодических устройств второго порядка

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\omega^2 T_3^2 + 1} \cdot \sqrt{\omega^2 T_4^2 + 1}}. \tag{6.12}$$

Для колебательных устройств второго порядка

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{\left(1 - \omega^2 T_2^2\right)^2 + \omega^2 T_1^2}}, \tag{6.13}$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{\omega T_1}{1 - \omega^2 T_2^2} \tag{6.14}$$

Типичный вид амплитудно- и фазово-частотных характеристик рассмотренных динамических звеньев приведен на рис. 6.2.

Таким образом, динамические свойства измерительных устройств можно охарактеризовать:

1) динамической погрешностью;
2) передаточной функцией измерительного устройства;
3) амплитудно- и фазово-частотными характеристиками.

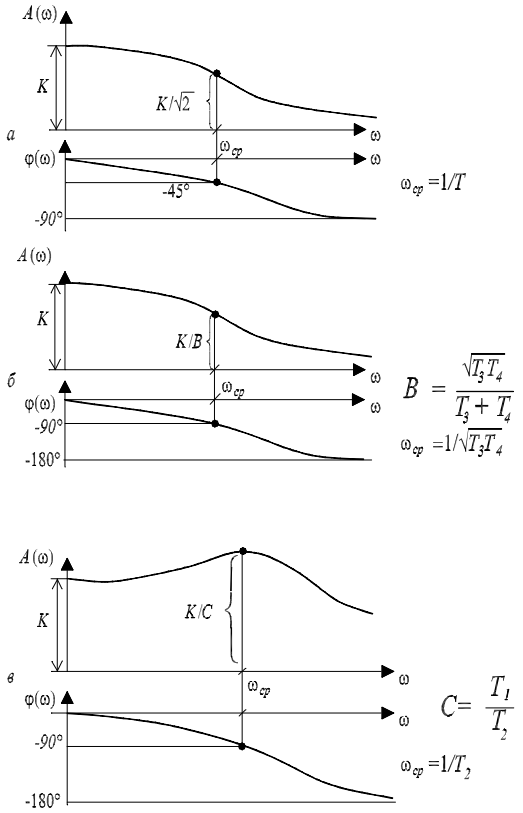


Рис. 6.2. Характерный вид амплитудно-частотных А(ω) и фазово-частотных φ(ω) характеристик типовых динамических звеньев: *а* – апериодическое звено первого порядка; *б* – апериодическое звено второго порядка; *в* – колебательное звено второго порядка

Более подробно с динамическими характеристиками различных устройств можно ознакомиться по работе [27].

Динамические характеристики средств измерений нормирует ГОСТ 8.009–84 [44].

6.4. Пример расчета

Сформулируем постановку задачи. Задана переходная характеристика линейного измерительного устройства (рис. 6.3).

Требуется определить: передаточную функцию устройства; амплитудно- и фазово-частотные характеристики; динамическую погрешность устройства при изменении входного сигнала по закону

$$x_{вх}(t) = 1{,}1 + 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t}.$$

Определение параметров передаточной функции

По виду переходной характеристики (см. рис. 6.3) можно заключить, что исследуемое измерительное устройство является устройством первого порядка и его передаточная функция имеет вид

$$W(p)=\frac{K}{Tp+1}.$$

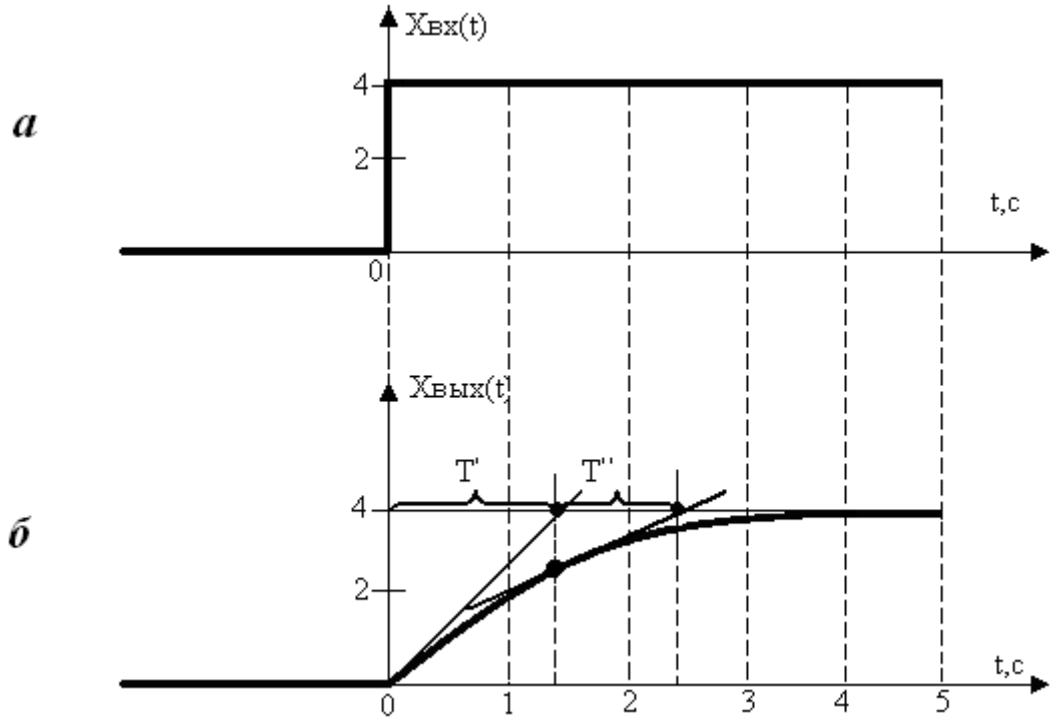


Рис. 6.3. Сигнал на входе и на выходе исследуемого измерительного устройства: *X*вх(t) – входной сигнал; *X*вых(t) – выходной сигнал

На основании методики, изложенной в пособии, неизвестные параметры передаточной функции запишутся в виде

$$K=\frac{\Delta x_{вых}}{\Delta x_{вх}}=\frac{4-0}{4-0}=1; \qquad K=1,$$

$$T=\frac{T'+T''}{2}=\frac{1{,}4+1{,}2}{2}=1{,}3; \qquad T=1{,}3 \text{ с}.$$

Таким образом,

$$W(p)=\frac{1}{1{,}3p+1}.$$

Определение амплитудно- и фазово-частотных характеристик

Искомые характеристики исследуемого измерительного устройства запишутся следующим образом:

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1,3^2\omega^2 + 1}},$$

$\varphi(\omega) = -\text{arctg}\, T = -\text{arctg}\, 1,3\, \omega$.

Численные значения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ при изменении угловой частоты от $\omega = 0$ до $\omega = 6$ приведены ниже, а графики зависимостей $A = f(\omega)$ и $\varphi = f(\omega)$ представлены в табл. 6.1 и на рис. 6.4.

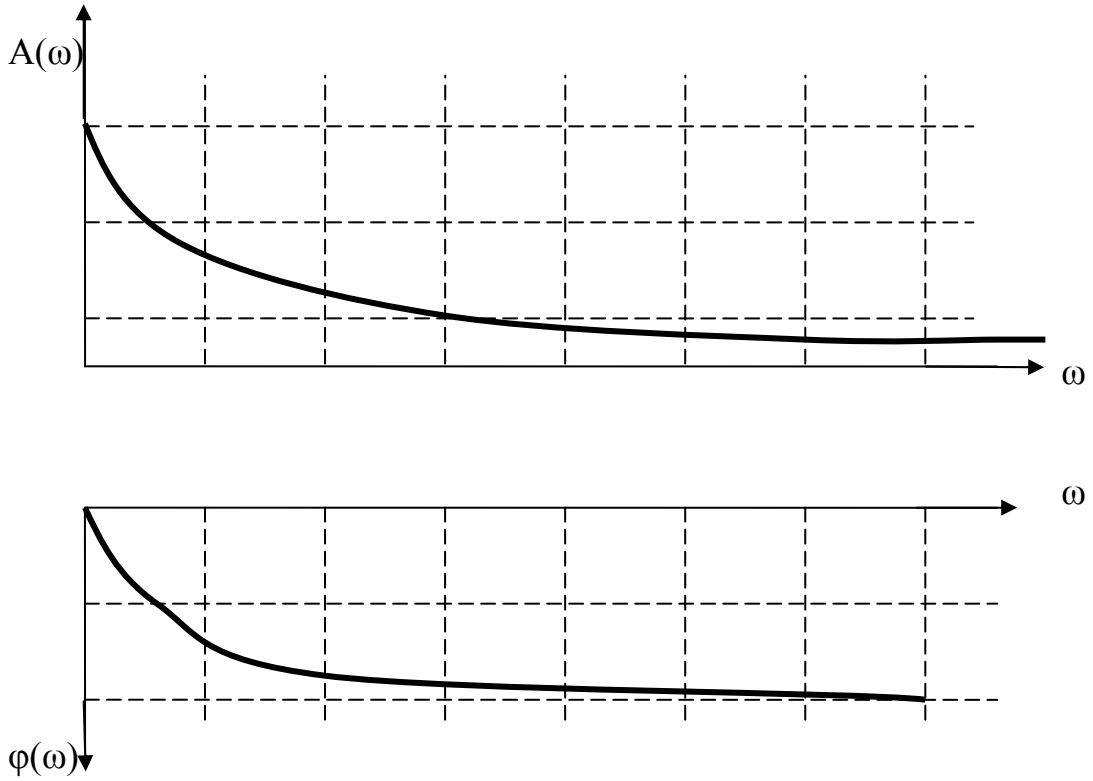


Рис 6.4. Амплитудно- и фазово-частотные характеристики

Таблица 6.1

Зависимость амплитуды и фазы от угловой частоты

Ω	0,00	0,30	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
A(ω)	1,00	0,93	0,84	0,61	0,36	0,25	0,19	0,15	0,13
φ(ω)	0,00	25°40’	38°40’	58°00’	72°40’	78°20’	81°10’	83°50’	84°05’

Определение погрешности

Динамическая погрешность для входного сигнала $x_{вх}(t) = 1{,}1 + 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t}$ запишется в виде

$$d(t) = \frac{x_{вых}(t)}{K} - x_{вх}(t) = \frac{x_{вых}(t)}{1} - 1{,}1 - 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t}.$$

Воспользуемся рекомендациями, изложенными в пособии, и на их основании определим закон изменения выходного сигнала. Для этого найдем изображение по Лапласу входного сигнала, затем изображение по Лапласу выходного сигнала $x_{\text{вых}}(t)$.

Изображение входного сигнала:

$$x_{вх}(t) = 1{,}1 + 2{,}0 \cdot e^{0{,}5t} = \frac{1{,}1}{p} + \frac{2{,}0}{p - 0{,}5};$$

$$x_{вх}(p) = \frac{1{,}1}{p} + \frac{2{,}0}{p - 0{,}5}.$$

Изображение выходного сигнала

$$x_{вых}(p) = W(p) \cdot x_{вх}(p),$$

где $x_{вых}(p)$ – изображение по Лапласу выходного сигнала;

$W(p)$ – передаточная функция измерительного устройства, используемого для измерения входного сигнала.

Отметим, что передаточная функция уже найдена выше и определяется соотношением

$$W(p) = \frac{1}{1{,}3 + 1}.$$

Изображение выходного сигнала с учетом $W(p)$ и $x_{вх}(p)$ имеет вид

$$x_{вых}(p) = \frac{1{,}1}{p(1{,}3p + 1)} + \frac{2{,}0}{(p - 0{,}5)(1{,}3p + 1)}.$$

После деления числителя и знаменателя на 1,3 и приведения значения $x_{вых}(p)$ к табличному виду получим

$$x_{вых}(p) = 1{,}1 \cdot \frac{0{,}8}{p(p+0{,}8)} + 1{,}5 \cdot \frac{1}{(p+0{,}8)(p-0{,}5)}.$$

По таблицам преобразования Лапласа (см. табл. П.1.7) оригинал выходного сигнала по его изображению запишется в виде

$$x_{вых}(t) = 1{,}1 - 2{,}3 \cdot e^{-0{,}8t} + 1{,}2e^{0{,}5t}.$$

Динамическая погрешность рассматриваемого средства измерения с учетом найденного выходного сигнала запишется в виде

$$d(t) = -2{,}3 \cdot e^{-0{,}8t} - 0{,}8e^{0{,}5t}.$$

График, иллюстрирующий изменение динамической погрешности во времени, представлен на рис. 6.5.

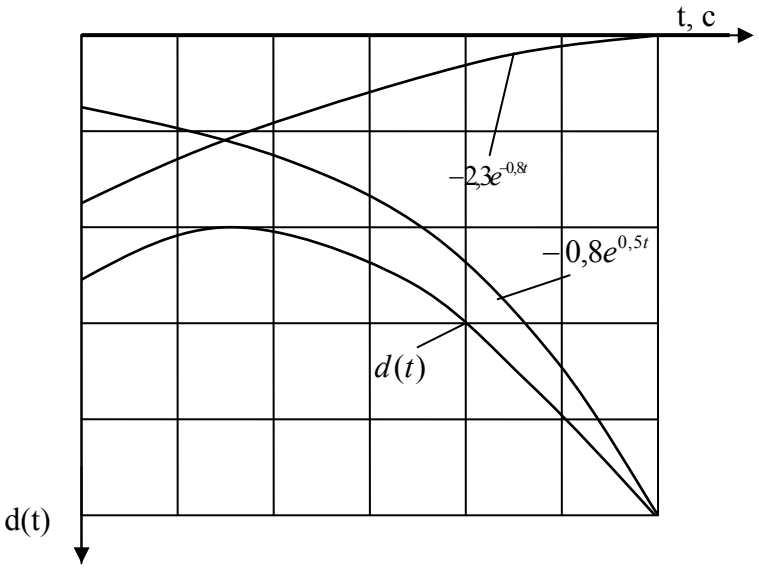


Рис. 6.5. Динамическая погрешность $d(t)$ апериодического средства измерения первого порядка при экспоненциальном изменении входного сигнала

Таким образом, на основании проведенных расчетов можно заключить, что исследованное измерительное устройство пригодно для измерений постоянных во времени или медленно изменяющихся сигналов. При измерении переменных во времени сигналов, изменяющихся с частотами более 0,1 Гц, появляются значительные динамические погрешности, а при измерении экспоненциально возрастающих сигналов появляются увеличивающиеся с течением времени динамические погрешности, как показано на рис. 6.5.

7. ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Погрешности прямых многократных измерений

7.1.1. Порядок оценки

Порядок оценки погрешностей прямых многократных измерений регламентирует стандарт ГОСТ 8.207–76 [46].

Стандарт [46] регламентирует оценку погрешностей прямых измерений с многократными независимыми наблюдениями, подчиняющимися нормальному закону распределения, и устанавливает основные положения методов обработки результатов наблюдений. Отметим, что в стандарте [46] принята терминология, отличная от терминологии, используемой в настоящее время. Так, например, использованы термины «наблюдение» (под наблюдением подразумевается однократное измерение) и «результат измерения», за которое принимается среднее арифметическое значение рассматриваемых многократных измерений.

При обработке результатов наблюдений необходимо выполнить нижеследующие операции.

1. Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдений.

2. Вычислить среднее арифметическое значение результатов наблюдений , принимаемое за результат измерения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ ,$$

где x_i – i-й результат наблюдения;

n – число результатов наблюдений.

3. Вычислить среднее квадратическое отклонение σ результата наблюдений:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \ .$$

4. Выявить и отбросить результаты наблюдений, содержащие промахи (если они есть).

5. Вычислить среднее квадратическое отклонение результата измерения:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}.$$

6. Проверить гипотезу о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону распределения. Проверка гипотезы может быть проведена по критерию, приведенному в ГОСТ 8.207–76 [46], или по критерию, приведенному в прил. 2 к данному учебному пособию. При $n < 10$ проверка гипотезы не проводится. При этом применение ГОСТа 8.207–76 возможно, если заранее известно, что результаты наблюдений подчиняются нормальному закону распределения.

7. Вычислить случайную составляющую погрешности результата измерения ε (без учета знака) по формуле

$$\varepsilon = t \cdot \sigma\left(\bar{x}\right),$$

где t – коэффициент Стьюдента.

Значения коэффициента Стьюдента в зависимости от принятой доверительной вероятности P и числа результатов наблюдений n приведены в приложении к учебному пособию (см. табл. П.1. 2).

Доверительную вероятность $P = 0{,}95$ принимают при проведении технических измерений, $P = 0{,}99$ – при проведении метрологических измерений и измерений, результаты которых имеют значение для здоровья людей.

8. Вычислить неисключенную систематическую погрешность Θ (систематическую составляющую погрешности) результата измерения. В качестве Θ принимают пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей средств измерений, а также методические погрешности и погрешности, вызванные другими источниками.

При 5–10 суммированиях отдельных неисключенных систематических погрешностей каждое слагаемое рассматривается как случайная величина. При

отсутствии данных о виде распределения этих величин (что обычно имеет место на практике) их распределения принимают за равномерное. При равномерном распределении неисключенных систематических погрешностей их значение (без учета знака) можно вычислить по формуле

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_j^2} ,$$

где Θ_j – j-я неисключенная систематическая погрешность (НСП);

m – число суммируемых НСП;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом слагаемых m.

При доверительной вероятности $P = 0{,}95$ коэффициент k принимают равным 1,1 (независимо от числа слагаемых для $m \geq 2$). При $m = 1$ $k = 1$.

При доверительной вероятности $P = 0{,}99$ коэффициент k зависит от числа суммируемых НСП. При $m \leq 4$ коэффициент k определяется по графику зависимости

$$k = f(m, l),$$

где $l = \Theta_1/\Theta_2$;

Θ_1 – составляющая погрешности, наиболее отличная от других;

Θ_2 – составляющая погрешности, наиболее близкая к Θ_1.

График зависимости (7.6) приведен на рис. 7.1

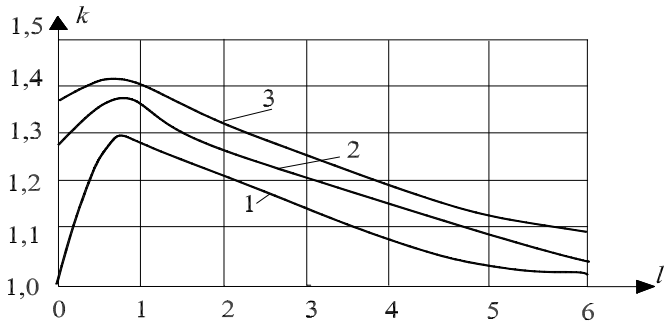


Рис. 7.1. График зависимости $k = f(L, m)$: 1 – $m = 2$; 2 – $m = 3$; 3 – $m = 4$

Для приближенных оценок погрешностей могут быть приняты следующие значения коэффициента k: при $m = 2$ $k = 1{,}2$; при $m = 3$ $k = 1{,}3$; при $m = 4$ $k = 1{,}4$; при $m \geq 5$ $k = 1{,}45$. Отметим, что при $m = 1$ $k = 1$.

9. Вычислить погрешность результата измерения Δ. Значение Δ вычисляется в том случае, если выполняется условие

$$0{,}8 \le \Theta/\sigma(\bar{x}) \le 8{,}0. \qquad (7.7)$$

Если условие (7.7) не выполняется, то при $\Theta/\sigma(\bar{x}) < 0{,}8$ принимается $\Delta = \varepsilon$, а при $\Theta/\sigma(\bar{x}) > 8{,}0$ принимается $\Delta = \Theta$.

Погрешность, возникающая из-за пренебрежения одной из составляющих погрешности результата измерения (при выполнении указанных неравенств), не превышает 15 %.

Если условие (7.7) выполняется, то погрешность результата измерения вычисляется по формуле

$$\Delta = K_\Sigma \sigma_\Sigma,$$

где K_Σ – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешности;

σ_Σ – суммарное среднее квадратическое отклонение результата измерения.

Коэффициент K_Σ вычисляют по эмпирической формуле

$$K_\Sigma = \frac{\varepsilon + \Theta}{\sigma(\bar{x}) + \sigma(\Theta)},$$

где $\sigma(\Theta) = \Theta / k\sqrt{3}$.

Суммарное среднее квадратическое отклонение вычисляют по формуле

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma^2(\bar{x}) + \sigma^2(\Theta)}.$$

Результаты прямых многократных измерений представляют в форме

$$(\bar{x} \pm \Delta); P,$$

где $\bar{x}$ – результат измерения;

$\pm\Delta$ – погрешность результата измерения;

P – принятая доверительная вероятность.

Числовое значение результата измерения должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ.

При отсутствии данных о виде функций распределений составляющих погрешности результата и необходимости дальнейшей обработки результатов или анализа погрешностей, результаты измерений представляют в форме

$$\bar{x},\ \sigma(\bar{x}),\ n,\ \Theta,\ P,$$

где величины $\sigma(\bar{x})$, n, Θ, P – определены выше.

7.1.2. Пример расчета

Условие задачи

С помощью универсального цифрового вольтметра с известными метрологическими характеристиками проведены многократные измерения напряжения лабораторной сети. Результаты измерений:

$$U_1=218{,}62\ \text{В};\ U_2=219{,}83\ \text{В};\ U_3=218{,}97\ \text{В};\ U_4=220{,}05\ \text{В};$$

$$U_5=218{,}37\ \text{В};\ U_6=219{,}74\ \text{В}.$$

Предел измерения вольтметра $U_K=1000$ В. Класс точности вольтметра 0,5/0,1. Нормальные условия эксплуатации вольтметра: $\tau_0=(20\pm 2)\ ^0\text{C}$; $H_0=0$ А/м, где τ – температура и H_0 – напряжение внешнего магнитного поля в нормальных условиях эксплуатации.

Измерения проведены при температуре $\tau=+24\ ^0C$ и напряженности внешнего магнитного поля $H=20$ А/м.

Найти абсолютную погрешность результата измерения, округлить и записать результат измерения, если наблюдения подчиняются нормальному закону распределения и принята доверительная вероятность $P = 0{,}95$.

В соответствии с технической документацией дополнительные абсолютные систематические погрешности используемого вольтметра определяются соотношениями $\theta_\tau=\dfrac{\tau-\tau_0}{10}\cdot\theta_{\text{ОС}}$; $\theta_{\text{Н}}=\dfrac{H-H_0}{50}\cdot\theta_{\text{ОС}}$,

где θ_τ – дополнительная абсолютная температурная погрешность;

$\theta_{\text{Н}}$ – дополнительная абсолютная погрешность от воздействия магнитного поля;

$\theta_{\text{ОС}}$ – основная абсолютная погрешность вольтметра, определяемая его классом точности.

Решение задачи

1. Среднее арифметическое значение $\overline{U}$, принимаемое за результат измерения, запишется в виде

$$\overline{U} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} U_i = 219{,}2633\ A$$

2. Среднее квадратическое отклонение σ имеет значение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{6}\left(U_i - \overline{U}\right)}{6-1}} = 0{,}7022 \text{ В}.$$

3. Выявление промахов проводится по методике, изложенной в п. 4.2. Пример выявления промахов уже приведен (см. п. 4.7) и в данном разделе учебного пособия не рассматривается. Отметим только, что в приведенном ряду измерений промахи отсутствуют.

4. Основная относительная систематическая погрешность результата измерения $\delta_{ос}$, обусловленная классом точности использованного вольтметра:

$$\delta_{ос} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{U_k}{U} - 1\right)\right]\%$$

где $U_k = 1000$ В (верхний предел диапазона измерения);

$\overline{U} = 219{,}2633$ В (результат измерения);

$$\delta_{ос} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{1000}{219{,}2633} - 1\right)\right] = 0{,}8561\% .$$

5. Основная абсолютная систематическая погрешность результата измерения $\Theta_{ос}$, обусловленная классом точности используемого вольтметра:

$$\Theta_{ос} = \frac{U}{100}\cdot\delta_{ос} = \frac{219{,}2633}{100}\cdot 0{,}8561 = 1{,}8771 \text{ В}$$

6. Дополнительная абсолютная систематическая погрешность результата измерения Θ_{τ}, обусловленная воздействием температуры окружающей среды:

$$\Theta_{\tau} = \frac{\tau - \tau_0}{10}\cdot\Theta_{ос} = \frac{24-22}{10}\cdot 1{,}8771 = 0{,}3754 \text{ В}$$

7. Дополнительная абсолютная систематическая погрешность результата измерения, обусловленная воздействием на вольтметр переменного магнитного поля:

$$\Theta_{\text{Н}} = \frac{H}{50} \cdot \Theta_{\text{ос}} = \frac{20}{50} \cdot 1,8771 = 0,7508 \text{ В}.$$

8. Суммарная абсолютная неисключенная систематическая погрешность результата измерения Θ, обусловленная используемым вольтметром:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_j^2},$$

где $k = 1,1$ для доверительной вероятности $P = 0,95$;

Θ_j – j-я составляющая абсолютной неисключенной систематической погрешности;

$$\Theta = k \sqrt{\Theta_{ос}^2 + \Theta_{\tau}^2 + \Theta_H^2} = 1,1 \sqrt{1,8771^2 + 0,3754^2 + 0,7508^2} = 2,261 \text{ В}$$

9. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения

$$\sigma_{\bar{U}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,7022}{\sqrt{6}} = 0,2867 \text{ В}$$

10. Случайная абсолютная погрешность результата измерения

$$\varepsilon = t \cdot \sigma_{\bar{U}},$$

где t – коэффициент Стьюдента ($t = 2,57$ при $n = 6$ и $P = 0,95$).

$$\varepsilon = 2,57 \cdot 0,2867 = 0,7368 \text{ В}.$$

11. Суммарная абсолютная погрешность результата измерения

$$\Delta = k_{\Sigma} \cdot \sigma_{\Sigma}.$$

Приведенная формула для оценки суммарной погрешности Δ правомерна, если выполняется условие

$$0,8 \le \frac{\theta}{\sigma_{\text{U}}} \le 8.$$

В нашем случае $\frac{\theta}{\sigma_U} = 7,89$, т. е. приведенная формула правомерна и ее можно использовать для расчетов.

$$k_\Sigma = \frac{\Theta + \varepsilon}{\sigma_\Theta + \sigma_{\bar{U}}} = \frac{2,2619 + 0,7368}{1,1872 + 0,2867} = 2,0345,$$

где $\sigma_\Theta = \frac{\Theta}{k \cdot \sqrt{3}} = \frac{2,2619}{1,1 \cdot \sqrt{3}} = 1,1872$ В

$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_\Theta^2 + \sigma_{\bar{U}}^2} = 1,2213$ В,

$\Delta = \pm 2,4847$ В.

После округления получаем $\Delta = \pm 2,5$ В.

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде $U' = (219,3 \pm 2,5)$В с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

7.2. Погрешности прямых однократных измерений

7.2.1. Порядок оценки

Порядок оценки погрешностей результатов прямых однократных измерений до 2005 г. регламентировали методические указания МИ 1552–86. С 01.01.2005 г. действуют рекомендации Р 50.2.038–2004 [54], которые устанавливают методы оценки погрешностей при условии, что составляющие погрешности результата измерения известны, случайные составляющие погрешности подчиняются нормальному закону распределения, а неисключенные систематические погрешности распределены равномерно.

Неисключенными систематическими составляющими погрешности результата однократного измерения Θ являются погрешности средств измерений, метода, вызванные другими источниками.

Неисключенные систематические погрешности (НСП) вычисляются по формуле (7.5). Порядок оценки НСП для однократных прямых измерений полностью совпадает с порядком оценки НСП для многократных прямых измерений.

При однократных измерениях невозможно оценить случайную составляющую погрешности результата измерения непосредственно по экспериментальным данным, поэтому требуются априорные предварительные сведения по случайным погрешностям. В противном случае может быть оценена только НСП по формуле (7.5).

Дополнительные предварительные сведения по случайным погрешностям результатов измерений могут представляться в виде средних квадратических отклонений σ_j отдельных составляющих (инструментальных, метода, оператора и т. д.) или в виде случайных погрешностей ε_j отдельных составляющих, соответствующих одной и той же доверительной вероятности P.

Если известны σ_j, то среднее квадратическое отклонение (СКО) результата однократного измерения σ вычисляется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \sigma_j^2} \quad .$$

Если известны ε_j, то случайная погрешность результата однократного измерения ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j^2(P)} \quad .$$

При известном значении σ, полученном по формуле (7.11), случайная погрешность результата однократного измерения ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \text{≢}\sigma \quad ,$$

где – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности P и закона распределения.

При нормальном законе распределения результатов измерений коэффициент ≢ = 2 для $P = 0{,}95$ и ≢ = 2,6 для $P = 0{,}99$ [54].

Суммарная погрешность результата измерения Δ определяется в зависимости от наличия (или отсутствия) априорных сведений о случайных погрешностях и от соотношения систематических и случайных составляющих погрешностей.

Если сведения о случайных погрешностях отсутствуют, то суммарная погрешность результата измерения Δ приравнивается к неисключенной систематической погрешности Θ, найденной с доверительной вероятностью *P*.

При наличии сведений о случайных погрешностях суммарная погрешность результата однократного измерения определяется с учетом следующих положений:

1) если $\frac{\Theta}{\sigma} < 0,8$, то неисключенной систематической погрешностью пренебрегают и принимают Δ = ε, где ε – случайная погрешность с доверительной вероятностью *P*;

2) если $\frac{\Theta}{\sigma} > 0,8$, то случайной погрешностью пренебрегают и принимают Δ = Θ;

3) если $0,8 \le \frac{\Theta}{\sigma} \le 8$, то погрешность результата измерения вычисляют по формуле

$$\Delta = \pm K[\,|\Theta| + |\varepsilon|\,],$$

где К – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности *P*.

Для доверительной вероятности *P* = 0,95 коэффициент *K* = 0,76; для доверительной вероятности *P* = 0,99 коэффициент *K* = 0,83.

Погрешности, возникающие из-за пренебрежения одной из составляющих погрешности результата измерения при выполнении указанных неравенств, не превышают 15 %.

При симметричной доверительной погрешности результат однократного измерения представляется в форме *A*; ±Δ; *P* или *A*±Δ; *P*.

Числовые значения результата измерения должны оканчиваться цифрами того же разряда, что и значение погрешности Δ.

7.2.2. Примеры расчета

В качестве примеров рассмотрены три задачи (задача 7.1, задача 7.2 и задача 7.3), отличающиеся друг от друга исходными данными.

Задача 7.1

Условие задачи

С помощью универсального цифрового вольтметра измерено напряжение сети. Результат измерения U = 218,62 В получен на пределе измерения $U_к$ = 1000 В. Класс точности вольтметра 0,5/0,1; нормальные условия эксплуатации: $\tau_0 = (20 \pm 2)\ ^\circ C$; H_0 =0 А/м .

Измерения проведены при τ = +24 ºС и $H = 20$ А/м, где τ – температура окружающей среды; H – напряженность внешнего магнитного поля.

Найти абсолютную погрешность результата измерения и записать результат с учетом найденной погрешности.

Решение задачи

Дополнительные погрешности использованного вольтметра определяются соотношениями

$$\Theta_\tau = \frac{\tau - \tau_0}{10} \cdot \Theta_{ос},$$

$$\Theta_H = \frac{H}{50} \cdot \Theta_{ос},$$

где Θ_τ – абсолютная дополнительная систематическая погрешность, возникающая при температуре окружающей среды, равной τ;

$\Theta_{ос}$ – абсолютная основная систематическая погрешность вольтметра, определяемая его классом точности;

Θ_H – абсолютная дополнительная систематическая погрешность, возникающая от воздействия на вольтметр магнитного поля H.

1. Относительная основная систематическая погрешность вольтметра, обусловленная его классом точности:

$$\delta_{oc} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{U_k}{U} - 1 \right) \right] \ \%,$$

$$\delta_{oc} = \left[0{,}5 + 0{,}1\left(\frac{1000}{218{,}62} - 1 \right) \right] \ \% \ = 0{,}8574 \ \%.$$

2. Абсолютная основная систематическая погрешность вольтметра, обусловленная его классом точности:

$$\Theta_{oc} = \frac{U}{100 \ \%} \cdot \delta_{oc} \ \%,$$

$$\Theta_{\text{ос}} = \frac{218{,}62}{100\%} \cdot 0{,}8574\% = 1{,}8743 \ \text{В}$$

3. Абсолютная дополнительная погрешность, обусловленная воздействием температуры:

$$\Theta_{\tau} = \frac{24 - 22}{10} \cdot 1{,}8743 = 0{,}3749 \ \text{В}$$

4. Абсолютная дополнительная погрешность, обусловленная воздействием магнитного поля:

$$\Theta_{\text{Н}} = \frac{20}{50} \cdot 1{,}8743 = 0{,}7497 \ \text{В}$$

5. Суммарная абсолютная систематическая погрешность вольтметра Θ определяется соотношением

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \Theta_j^2} \ ,$$

где $k = 1{,}1$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$;

Θ_j – j-я составляющая погрешности.

$$\Theta = 1{,}1 \cdot \sqrt{\Theta_{oc}^2 + \Theta_{\tau}^2 + \Theta_{H}^2} \ ,$$

$$\sqrt{\ \Theta = 1{,}1 \ \ 1{,}8743^2 + 0{,}3749^2} + 0{,}7497^2 \ = 2{,}1026 \ \ \text{В}.$$

6. При однократных измерениях и отсутствии сведений о случайных погрешностях за погрешность результата измерения Δ принимают суммарную

систематическую погрешность использованного средства измерения Θ. После округления получаем

$$\Delta = \Theta = \pm 2{,}1 \ B.$$

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде

$$U' = (218{,}6 \pm 2{,}1) \ B, \ P = 0{,}95.$$

Задача 7.2

Исходное условие задачи 7.2 полностью совпадает с условием задачи 7.1. Дополнительно вводятся сведения о случайной погрешности. Предполагается, что с доверительной вероятностью $P = 0{,}95$ случайная погрешность $\varepsilon = 3{,}4248$ В.

Решение задачи

Абсолютная суммарная погрешность результата измерения Δ в этом случае оценивается соотношением

$$\Delta = \pm K\left(|\Theta| + |\varepsilon|\right),$$

где $K \approx 0{,}76$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$;

Θ – суммарная систематическая погрешность (см. задачу 7.1).

ε – случайная погрешность

$$\Delta = \pm 0{,}76(2{,}1026 + 3{,}4248) = \pm 4{,}2008 \ \text{В}.$$

После округления получаем $\Delta = \pm 4$ В.

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде $U' = (219 \pm 4)\,\text{В}, \ P = 0{,}95$.

Задача 7.3

Исходное условие задачи 7.3 в основном совпадает с условием задачи 7.1. Дополнительно вводятся сведения о среднем квадратическом отклонении (СКО) средства измерения $\sigma_1 = 0{,}3782$ В и СКО оператора $\sigma_2 = 0{,}4202$ В.

Значения σ_1 и σ_2 найдены для $n_1 = 10$ и $n_2 = 20$, где n_1 и n_2 – числа измерений при экспериментальной оценке рассматриваемых величин (n_1 при оценке σ_1 и n_2 при оценке σ_2).

Решение задачи

Абсолютная неисключенная систематическая погрешность Θ, найденная в задаче 7.1, остается в силе и для данной задачи ($\Theta = 2{,}1026$ В).

При отсутствии корреляционной связи между величинами σ_1 и σ_2, суммарное среднее квадратическое отклонение σ:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{0{,}3782^2 + 0{,}4202^2} = 0{,}5653 \text{ В}$$

$\sigma = 0{,}5653$ В.

Абсолютная случайная погрешность результата измерений ε запишется в виде

$$\varepsilon = \overline{z} \cdot \sigma \ ,$$

где $\overline{z}$ – коэффициент ($\overline{z}$=2,0 для $P = 0{,}95$).

$$\varepsilon = 2{,}0 \cdot 0{,}5653 = 1{,}130 \text{ В},$$

$$\varepsilon = 1{,}130 \text{ В}.$$

Абсолютная суммарная погрешность результата измерений Δ:

$$\Delta = \pm K(|\Theta| + |\varepsilon|) \ ,$$

где $K = 0{,}76$ для $P = 0{,}95$;

Θ – неисключенная систематическая погрешность;

ε – случайная погрешность.

Выражение для оценки «Δ» правомерно, если справедливо соотношение

$$0{,}8 \le \frac{\Theta}{\sigma} \le 8 \ .$$

Отношение $\dfrac{\Theta}{\sigma}$ имеет значение

$$\frac{\Theta}{\sigma} = \frac{2{,}1026}{0{,}5653} = 3{,}7194$$

т. е. приведенное выражение для оценки «Δ» правомерно.

$$\Delta = \pm 0{,}76(2{,}1026 + 1{,}130) = \pm 2{,}4572 \text{ В},$$

$$\Delta = \pm 2{,}4572 \text{ В}.$$

После округления $\Delta = \pm 2{,}5$ В.

С учетом погрешности результат измерения запишется в виде

$$U' = (218{,}6 \pm 2{,}5) \text{ В},$$

$$\text{P} = 0{,}95.$$

7.3. Погрешности косвенных измерений

Косвенное измерение – это измерение, при котором искомое значение величины находится по известной зависимости между этой величиной и величинами , подвергаемыми прямым измерениям. Напомним, что *прямое измерение* – это измерение, при котором искомая величина определяется непосредственно из эксперимента по показаниям средства измерений.

7.3.1. Порядок оценки погрешностей классическим методом

Ниже излагается порядок оценки погрешностей косвенных измерений классическим методом для одного и для нескольких аргументов, по которым определяется результат косвенного измерения.

Рассмотрим зависимость

$$y = f(x),$$

где y – результат косвенного измерения (функция);

x – результат прямого измерения (аргумент).

Предполагается, что погрешность измерения аргумента x известна и составляет величину $\pm\Delta_x$.

Погрешность измерения функции y обозначим через $\pm\Delta_y$ и найдем ее значение по известным значениям величин y, x и $\pm\Delta_x$.

С учетом погрешностей $\pm\Delta_x$ и $\pm\Delta_y$ выражение (7.15) принимает вид

$$y \pm \Delta y = f(x \pm \Delta_x).$$

Разложим правую часть равенства (7.16) в ряд Тейлора и, пренебрегая членами разложения, содержащими Δ_x в степени выше первой, получим

$$y \pm \Delta_y = f(x) + \Delta_x \frac{df(x)}{dx}.$$

Учитывая соотношение (7.15), получим для величин Δ_y выражение

$$\Delta_y = \pm\Delta_x \frac{df(x)}{dx},$$

где Δ_y – абсолютная погрешность результата косвенного измерения величины y;
Δ_x – абсолютная погрешность результата прямого измерения величины x.

Отметим, что выражение (7.18) является линейным приближением и в силу этого дает оценочные, приближенные значения погрешностей косвенных измерений. Допустимость использования соотношения (7.18) нормируется методическими указаниями МИ 2083–90 [48].

Относительная погрешность косвенного измерения δ_y определяется выражением

$$\delta_y = \pm\frac{\Delta_y}{y} = \pm\frac{\Delta_x}{y} \cdot \frac{df(x)}{dx},$$

или

$$\delta_y = \pm\frac{\Delta_y}{y} \cdot 100\% = \pm\frac{\Delta_x}{y} \cdot \frac{df(x)}{dx} \cdot 100\%,$$

т. е. относительная погрешность может выражаться относительными величинами (см. (7.19)) или величинами в процентах (см. (7.20)).

Рассмотрим результат косвенных измерений для случая с несколькими аргументами, т. е.

$$y = f(x, z, ..., t),$$

где x, z, ..., t – результаты прямых измерений (аргументы);
y – результат косвенного измерения (функция).

Значение суммарной абсолютной погрешности косвенного измерения Δ_y в этом случае находится по формуле

$$\Delta_y = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \Delta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \Delta_z^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 \Delta_t^2}\ .$$

Значение суммарной относительной погрешности косвенного измерения δ_y для рассматриваемого случая находится по формуле

$$\delta_y = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \left(\frac{\Delta_x}{y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \left(\frac{\Delta_z}{y}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 \left(\frac{\Delta_t}{y}\right)^2}\ .$$

В (7.22) и (7.23) значения Δ_x, Δ_z, … , Δ_t – суммарные абсолютные погрешности результатов прямых измерений величин x, z, ... ,t. Соотношения (7.22) и (7.23) правомерны при условии, что рассматриваемые погрешности независимы (отсутствует связь между ними) и являются случайными величинами.

Соотношение (7.22) рекомендуется использовать для оценки погрешностей результатов косвенных измерений при определении искомой величины путем алгебраического суммирования аргументов (например, для функций вида $y = x+z+t$).

Ниже приведен пример оценки искомой величины и погрешности ее косвенного измерения по соотношению (7.22).

Соотношение (7.23) рекомендуется использовать для оценки погрешностей результатов косвенных измерений при определении искомой величины путем умножения, деления или возведения в степень аргументов, подвергаемых прямым измерениям (например, для функций вида $y = \frac{x \cdot z^2}{t}$).

Ниже приведен пример оценки искомой величины и погрешности ее косвенного измерения по соотношению (7.23).

Формулы для вычисления суммарных абсолютных и относительных погрешностей результатов косвенных измерений приведены в табл. 7.1.

В таблице приняты те же обозначения, что уже использовались выше, т. е. Δ_x, Δ_z – абсолютные суммарные погрешности результатов прямых измерений величин x и z; δ_x, δ_z – относительные суммарные погрешности результатов

прямых измерений величин x и z; Δ_y и δ_y – абсолютные и относительные суммарные погрешности результата косвенного измерения величины y.

Таблица 7.1

Погрешности косвенных измерений

Функция (y)	**Погрешности**	
	абсолютная (Δ_y)	**относительная (δ_y)**
$x + z$	$\pm\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}$	$\pm\dfrac{\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}}{x+z}$
$x - z$	$\pm\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}$	$\pm\dfrac{\left[\Delta_x^2 + \Delta_z^2\right]^{1/2}}{x-z}$
$x \cdot z$	$\pm\left[x^2\Delta_z^2 + z^2\Delta_x^2\right]^{1/2}$	$\pm\left[\delta_x^2 + \delta_z^2\right]^{1/2}$
x/z	$\pm\dfrac{\left[x^2\Delta_z^2 + z^2\Delta_x^2\right]^{1/2}}{z^2}$	$\pm\left[\delta_x^2 + \delta_z^2\right]^{1/2}$
x^n	$\pm nx^{n-1}\Delta_x$	$\pm n\delta_x$
$\sqrt[n]{x}$	$\pm\dfrac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}\Delta_x$	$\pm\dfrac{1}{n}\delta_x$
$\sin x$	$\pm\Delta_x\cos x$	$\pm\Delta_x \operatorname{ctg} x$
$\operatorname{tg} x$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(\cos x)^2}$	$\pm\dfrac{2\cdot\Delta_x}{(\sin 2x)^2}$
$\cos x$	$\pm\Delta_x \sin x$	$\pm\Delta_x \operatorname{tg} x$
$\operatorname{ctg} x$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(\sin x)^2}$	$\pm\dfrac{2\cdot\Delta_x}{\sin 2x}$
$\operatorname{arctg} x$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(1+x^2)}$	$\pm\dfrac{\Delta_x}{(1+x^2)\operatorname{arctgx}}$

Изложенный порядок оценки значений погрешностей результатов косвенных измерений может быть использован при известных значениях суммарных погрешностей результатов прямых измерений, по которым вычисляются результаты косвенных измерений. В случае же, когда известны составляющие (систематические и случайные) погрешностей результатов прямых измерений,

необходимо воспользоваться рекомендациями, изложенными ниже в п. 7.3.2 учебного пособия.

7.3.2. Порядок оценки погрешностей по МИ 2083–90

Сформулируем основные положения, используемые при оценке погрешностей косвенных измерений по МИ 2083–90 [48].

Искомое значение величины A находится на основании результатов прямых измерений аргументов b, c, ..., s, связанных с искомой величиной уравнением

$$A = F(b, c, ..., s). \qquad (7.24)$$

Для оценивания косвенно измеряемой величины и погрешностей результата измерения принято одно из допущений:

1) зависимость (7.24) линейная и отсутствует корреляция между погрешностями измерений аргументов;

2) зависимость (7.24) нелинейная, отсутствует корреляция между погрешностями измерений аргументов и допустим метод линеаризации рассматриваемой зависимости.

Случай для коррелированных погрешностей измерений аргументов и при недопустимости использования метода линеаризации зависимости (7.24) в данном учебном пособии не рассматривается. При необходимости этот материал может быть изучен самостоятельно (см. [21, 48]).

Предположим, что проведено n прямых измерений аргументов b, c, ..., s. Первому измерению соответствует значение, равное A_1, второму измерению – A_2 и т. д. Среднее арифметическое значение $\overline{A}$ и среднее квадратическое отклонение σ результатов косвенных измерений вычисляются по формулам

$$\overline{A} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_i ,$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(A_i - \overline{A}\right)^2}{n-1}} ,$$

где n – число измерений;

A_i – i-е значение результата косвенного измерения.

Дальнейшая обработка данных проводится в нижеследующей последовательности.

1. По значениям $\bar{x}$ и σ выявляются и отбрасываются промахи. При этом предполагается, что результаты косвенных измерений A_i подчиняются нормальному закону распределения, т. е. для выявления промахов могут быть использованы как метод 3σ, так и табличный метод (оба метода описаны в п. 4.2 учебного пособия).

2. Вычисляется СКО среднего арифметического значения по формуле

$$\sigma_{\bar{A}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

3. Оценивается абсолютная случайная составляющая погрешности результата косвенного измерения искомой величины по формуле

$$\varepsilon = t \cdot \sigma_{\bar{A}},$$

где ε – случайная составляющая погрешности;

t – коэффициент Стьюдента.

4. Оценивается абсолютная неисключенная систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения искомой величины по формуле

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\Theta_b^2\left[\frac{\partial F}{\partial b}\right]^2 + \Theta_c^2\left[\frac{\partial F}{\partial c}\right]^2 + \ldots + \Theta_s^2\left[\frac{\partial F}{\partial s}\right]^2},$$

где Θ – абсолютная неисключенная систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения;

k – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и числа слагаемых (подробно см. в п. 7.1 учебного пособия);

Θ_b, Θ_c, ..., Θ_s – абсолютные неисключенные систематические составляющие погрешностей результатов прямых измерений аргументов *b*, *c*, ..., *s*;

$\frac{\partial F}{\partial b}, \frac{\partial F}{\partial c}, \frac{\partial F}{\partial s}$ – частные производные от функции (7.24) по *b*, *c*, ..., *s*.

Отметим, что при задании зависимости (7.24) в виде алгебраической суммы аргументов *b*, *c*, ..., *s* удобнее оценивать абсолютную составляющую погрешности Θ по формуле (7.29).

Если же зависимость (7.24) представляет собой произведение и (или) отношение аргументов *b*, *c*,..., *s*, то удобнее оценивать относительную неисключенную систематическую составляющую результата косвенного измерения величины *A* по формуле

$$\upsilon = k \cdot \sqrt{\left[\frac{\theta_b}{A}\right]^2 \left[\frac{\partial F}{\partial b}\right]^2 + \left[\frac{\theta_c}{A}\right]^2 \left[\frac{\partial F}{\partial c}\right]^2 + \ldots + \left[\frac{\theta_s}{A}\right]^2 \left[\frac{\partial F}{\partial s}\right]^2},$$

где υ – относительная неисключенная систематическая составляющая погрешности (υ может выражаться в процентах или в виде относительной величины).

Величины Θ и υ связаны между собой соотношениями

$$\Theta = \frac{\overline{A}}{100\,\%} \cdot \upsilon\,\%,$$

$$\Theta = \overline{A} \cdot \upsilon\,.$$

Соотношение (7.31) используется при выражении υ в процентах, а соотношение (7.32) – при выражении υ в виде относительной величины.

5. Оценивается абсолютная погрешность результата косвенного измерения искомой величины $\overline{A}$ по формуле

$$\Delta = \pm K(|\Theta| + |\varepsilon|),$$

где Δ – абсолютная погрешность результата косвенного измерения;

K – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и от отношения $\Theta / \sigma_{\overline{A}}$ (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Значения коэффициента К = $f\left(p, \theta / \delta_{\overline{A}}\right)$

$\theta / \sigma_{\overline{A}}$	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
$K_{0,95}$	0,76	0,74	0,71	0,73	0,76	0,78	0,79	0,80	0,81
$K_{0,99}$	0,84	0,82	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,84	0,85

Для приближенных расчетов можно принять $K = 0{,}80$ при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ и $K = 0{,}85$ при доверительной вероятности $P = 0{,}99$.

Относительные погрешности результата косвенного измерения определяются по формулам

$$\delta' = \frac{\Delta}{\overline{A}} \cdot 100\ \%,$$

$$\delta = \frac{\Delta}{\overline{A}}.$$

Соотношение (7.34) используется при выражении относительной погрешности в процентах, а соотношение (7.35) – при выражении δ в относительных величинах.

6. Результат косвенного измерения и его погрешность представляют в виде

$$\left(\overline{A} \pm \Delta\right), P,$$

где $\overline{A}$ – результат косвенного измерения;

$\pm\,\Delta$ – значение абсолютной погрешности;

P – принятая доверительная вероятность.

Допускается также представление результатов косвенных измерений в виде

$$\overline{A}\,;\, \sigma_{\overline{A}}\,;\, n;\, \Theta(P),$$

где $\sigma_{\overline{A}}$ – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического значения (СКО результата косвенного измерения);

n – число измерений;

$\Theta(P)$ – абсолютная неисключенная систематическая составляющая погрешности результата косвенного измерения, полученная с доверительной вероятностью P.

При необходимости кроме абсолютных погрешностей могут быть приведены относительные погрешности в соответствии с соотношением (7.34) или (7.35).

7.3.3. Примеры расчета

В качестве примеров рассмотрены три задачи (задача 7.4, задача 7.5 и задача 7.6) по оценке погрешностей косвенных измерений. Первые две задачи решены классическим методом, а третья – в соответствии с рекомендациями методических указаний МИ 2083–90 [48].

Рассмотрим пример оценки погрешности косвенного измерения по формуле (7.18).

Задача 7.4

Условие задачи

Найти площадь квадрата S и абсолютную суммарную погрешность ее косвенного измерения $\Delta(s)$, если результат прямого измерения стороны квадрата равен «a» и абсолютная суммарная погрешность этого измерения составляет «$\Delta(a)$».

Решение задачи

Площадь квадрата $S = a^2$.

Абсолютная суммарная погрешность косвенного измерения площади квадрата оценивается соотношением

$$\Delta(S) = \Delta(a) \cdot \frac{dS(a)}{da} = \Delta(a) \cdot \frac{d(a^2)}{da} = \Delta(a) \cdot 2a\,;$$

$$\Delta(S) = \Delta(a) \cdot 2a\,.$$

Относительная суммарная погрешность косвенного измерения площади квадрата соответственно:

$$\delta(S) = \frac{\Delta(S)}{S} = \frac{2a \cdot \Delta(a)}{a^2} = 2 \cdot \delta(a)\,,$$

где $\delta(a) = \frac{\Delta(a)}{a}$ – относительная суммарная погрешность прямого измерения стороны квадрата.

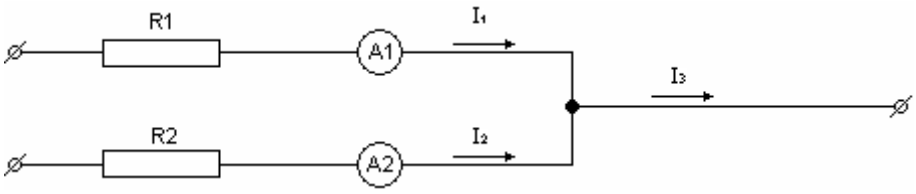
$$\delta(S) = 2 \cdot \delta(a).$$

Отметим, что суммарные относительные погрешности $\delta(S)$ и $\delta(a)$ могут выражаться в относительных величинах, как в примере, или в процентах (см. соотношение (7.20)).

Задача 7.5

Условие задачи

Найти значение тока I_3 и абсолютную суммарную погрешность его косвенного измерения по приведенной схеме.



Значения токов I_1 и I_2 , полученные путем прямого измерения с помощью амперметров $A1$ и $A2$, заданы. Заданы также абсолютные суммарные погрешности измерения этих токов Δ_1 и Δ_2 (соответственно).

Решение задачи

Значение тока I_3 (по первому закону Кирхгофа):

$$I_3 = I_1 + I_2.$$

Абсолютная суммарная погрешность Δ_3 косвенного измерения тока I_3 запишется в виде

$$\Delta_3 = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial I_1}\right)^2 \cdot \Delta_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial I_2}\right)^2 \cdot \Delta_2^2} \ .$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_1} = \frac{\partial (I_1 + I_2)}{\partial I_1}. = \frac{\partial I_1}{\partial I_1} + \frac{\partial I_1}{\partial I_2} = 1 + 0 = 1.$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_2} = \frac{\partial (I_1 + I_2)}{\partial I_2}. = \frac{\partial I_1}{\partial I_2} + \frac{\partial I_2}{\partial I_2} = 0 + 1 = 1.$$

$$\Delta_3 = \pm\sqrt{1^2 \cdot \Delta_1^2 + 1^2 \cdot \Delta_2^2} \ = \pm\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}.$$

$$\Delta_3 = \pm\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}.$$

Относительные суммарные погрешности косвенного измерения тока I_3 соответственно:

$$\delta_3 = \frac{\Delta_3}{I_3}; \ \delta_3' = \frac{\Delta_3}{I_3} \cdot 100\% ,$$

т. е. относительная суммарная погрешность, как уже отмечалось, может выражаться в относительных величинах или в процентах.

Задача 7.6

Условие задачи

Методом вольтметра и амперметра в нормальных условиях эксплуатации проведено измерение электрического сопротивления *R*. Класс точности вольтметра 0,5; предел его измерения U_k = 30 В. Класс точности миллиампермет-ра (1,0). Значения прямых измерений напряжения *U* и тока *I*, а также текущие значения косвенного измерения искомого сопротивления *R* приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты измерений

Параметры	**Номер измерения**			
	1	**2**	**3**	**4**
U, В	18,0	20,5	19,8	21,2
I, мА	530	610	590	630
R, Ом	33,9623	33,6066	33,5593	33,6508

Найти результат и погрешность косвенного измерения сопротивления R и записать результат косвенного измерения с учетом найденной погрешности.

Решение задачи

1. Текущие значения косвенного измерения электрического сопротивления определяются по закону Ома соотношением

$$R = \frac{U}{I},$$

где $U; I$ – значения напряжения и тока, приведенные в табл. 7.3;

R – искомая величина.

2. Среднее арифметическое значение сопротивления $\overline{R}$, принимаемое за результат косвенного измерения искомой величины, запишется в виде

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R = 33,6948 \text{ Ом}$$

где n – число измерений ($n = 4$);

R_i – результат i-го измерения (см. табл. 7.3).

3. Среднее квадратическое отклонение σ имеет следующее значение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_i - \overline{R})^2}{n-1}} = 1{,}1822 \text{ Ом}$$

где R_i, $\overline{R}$, n – определены выше.

4. Выявление промахов детально рассмотрено в параграфе 4.2 и в силу этого при решении данной задачи не проводится. Отметим только, что в приведенном ряду косвенных измерений сопротивления R промахи отсутствуют.

5. Среднее квадратическое отклонение результата измерения $\sigma_{\overline{R}}$ имеет следующее значение:

$$\sigma_{\overline{R}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0{,}1822}{\sqrt{4}} = 0{,}0911 \text{ Ом}$$

6. Случайная абсолютная погрешность результата измерения ε:

$$\varepsilon = t \cdot \sigma_{\overline{R}} = 3{,}18 \cdot 0{,}0911 = 0{,}2898 \text{ Ом}$$

где t – коэффициент Стьюдента ($t = 3{,}18$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$ и числа измерений $n = 4$).

7. Относительная инструментальная погрешность измерения напряжения U (см. табл. 7.3) оценивается соотношением

$$\delta_V = \frac{U_k}{U_{\min}} \cdot \gamma\%,$$

где δ_V – относительная инструментальная погрешность измерения напряжения;

U_k – верхний предел шкалы вольтметра;

$U_{\min}$ – минимальное показание вольтметра;

γ – приведенная погрешность вольтметра, определяемая его классом точности ($\gamma = \pm 0{,}5\%$).

$$\delta_V = \frac{30}{18{,}0} \cdot 0{,}5\% = 0{,}8333\,\%.$$

8. Относительная неисключенная систематическая погрешность (НСП) результата измерений запишется в виде

$$\upsilon = k\sqrt{\delta_V^2 + \delta_A^2}\ ,$$

где υ – относительная НСП результата измерения;

k – коэффициент ($k = 1{,}1$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$ и $m = 2$, где P – доверительная вероятность, m – число слагаемых под корнем);

δ_A – относительная инструментальная погрешность измерения тока, определяемая классом точности миллиамперметра ($\delta_A = 1{,}0\%$),

$$\upsilon = 1{,}1 \cdot \sqrt{0{,}8333^2 + 1{,}0^2} = 1{,}3017\ \%\ .$$

9. Абсолютная неисключенная систематическая погрешность результата измерения Θ запишется в виде

$$\Theta = \frac{\overline{R}}{100\%} \cdot \upsilon\% = \frac{33{,}6948}{100} \cdot 1{,}3017 = 0{,}4386\ \text{Ом}$$

10. Абсолютная суммарная погрешность результата измерений Δ оценивается соотношением

$$\Delta = \pm K\left(\left|\Theta\right| + \left|\varepsilon\right|\right),$$

где K – коэффициент ($K \approx 0{,}80$ для доверительной вероятности $P = 0{,}95$);

$$\Delta = \pm 0{,}80(\left|0{,}4386\right| + \left|0{,}2898\right|) = \pm 0{,}5827\ \text{Ом}$$

После округления получаем $\Delta' = \pm 0{,}6\ \text{В}$.

11. Относительная суммарная погрешность результата измерения δ оценивается соотношением

$$\delta = \pm\frac{\Delta}{\overline{R}} \cdot 100\% = \pm\frac{0{,}5827}{33{,}6978} \cdot 100 = \pm 1{,}7293\%\ .$$

После округления: $\delta' = \pm 1{,}7\ \%$.

12. С учетом погрешности результат измерения запишется в виде

$$U' = (33{,}7 \pm 0{,}6)\ \text{Ом}.$$

7.4. Неопределенности измерений

По инициативе ряда международных метрологических организаций предложена новая концепция для показателя точности результатов измерений. В основе этой концепции лежит отказ от принятого сейчас понятия «погрешность» и переход на новый показатель точности «неопределенность». Стимулировало такой подход, видимо, несоответствие принятого определения понятия «погрешность» и установившегося порядка практической оценки погрешностей результатов измерений. Терминологические межгосударственные рекомендации РМГ 29–99 [53] дают следующее определение понятия погрешности результата измерения: «*Погрешность результата измерения* – это отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины».

Далее в рекомендациях [53] отмечается, что истинное значение величины неизвестно и его применяют только в теоретических исследованиях. На практике используют действительное значение измеряемой величины, за которое принимают номинальное значение эталона или образцового средства измерения (СИ).

Следует отметить, что на практике при измерении искомой величины действительное значение этой величины неизвестно. Более того, возникает законный вопрос: зачем проводить измерение, если действительное значение измеряемой величины уже известно. Ответ очевиден: проводить измерение в этом случае не имеет смысла. Другими словами, реализовать практическую оценку погрешности результата измерения непосредственно из определения [53] невозможно. Практическая оценка погрешностей прямых многократных измерений проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 8.207–76 [46], оценка погрешностей прямых однократных измерений – в соответствии с рекомендациями Р50.2.038–2004 [54] и оценка погрешностей косвенных измерений – в соответствии с рекомендациями МИ 2083–90 [48]. В нормативных документах [46; 48; 54] для оценки погрешностей истинное (действительное) значение измеряемой величины не используется. Оценка погрешностей по [46; 48; 54] никак не увязывается с определением термина «погрешность». Складывается впечатле-

ние, что определение погрешности существует само по себе, а найденные по [46; 48; 54] величины, непосредственно не связанные с погрешностью по [53] и также называемые погрешностями, существуют сами по себе. Напрашивается вывод о необходимости изменить определение понятия «погрешность результата измерения» или изменить порядок оценки погрешности, увязав его с истинным (действительным) значением измеряемой величины.

Авторы замены погрешности на неопределенность пошли по первому пути. Они отказались от показателя точности – «погрешность результата измерения» и предложили новый показатель точности – «неопределенность результата измерений». Рекомендации [53] дают следующее определение понятию неопределенность: «*Неопределенность измерений* – это параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине». Как видно, в этом определении нет понятий «истинного (действительного) значения измеряемой величины». Приведенные выше рассуждения свидетельствуют, что этого понятия в данном случае и не должно быть. Повторим еще раз, что существующие методы оценки погрешностей результатов измерений непосредственно не используют понятие «истинное (действительное) значение измеряемой величины». Не требуют знания этой величины и методы оценки неопределенностей измерений. Последнее послужило поводом утверждать, что авторы «неопределенностей» отвергают понятие истинного (действительного) значения измеряемой величины. Да, отвергают, но только в данном, конкретном случае при оценивании неопределенностей результатов измерений. И с этим можно согласиться. Все меняется коренным образом, если речь идет о погрешностях средств измерений. По определению [53]: «*Погрешность средства измерений* – это разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины». В данном случае «истинное (действительное) значение» вполне уместно. Более того, экспериментальная оценка погрешностей средств измерений невозможна без использования эталонов или образцовых средств. Напомним, что номинальное значение эталона или образ-

цового средства измерения принимают за действительное значение измеряемой величины. Не противоречит сказанному и принятый порядок оценки погрешностей средств измерений в соответствии с требованиями нормативных документов (ГОСТ 8.009–84 [44] и ГОСТ 8.508–84 [47]). Таким образом, заменять понятие «погрешность средства измерения» на понятие «неопределенность средства измерения», со всеми вытекающими отсюда последствиями, не следует.

Порядок оценки неопределенностей изложен в руководстве по выражению неопределенностей результатов измерений [41] и нормативно закреплен в рекомендациях РМГ 43–2001 [42].

В соответствии с [41, 42] неопределенность подразделяют на две составляющие: неопределенность типа А и неопределенность типа В. Неопределенность типа А оценивается статистическими методами и описывает случайные отклонения при повторных измерениях. Неопределенность типа В оценивается в основном другими способами, отличными от статистических, и близка по своей сути к неисключенным систематическим погрешностям.

Говоря о «близости» неопределенностей и погрешностей результатов измерений следует помнить, что термины «неопределенность» и «погрешность» – не синонимы и представляют собой различные понятия; их не следует путать друг с другом или заменять одно понятие другим.

Рассмотрим порядок оценки неопределенностей при проведении прямых многократных измерений. Предполагаем, что получен ряд значений x_1, x_2, x_n при измерении физической величины с помощью прибора, метрологические характеристики которого известны. Считаем также, что известна методическая погрешность измерения, известен закон распределения результатов измерений и задана доверительная вероятность, с которой должны быть найдены рассматриваемые величины.

Неопределенности типа А

Для оценки неопределенностей типа А проводятся следующие расчеты:

1) вычисляется среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{7.37}$$

где $\bar{x}$ – среднее арифметическое, принимаемое за результат измерения;

x_i – результат *i*-го измерения;

n – число измерений;

2) вычисляется стандартная неопределенность результатов однократных измерений:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \tag{7.38}$$

где u – стандартная неопределенность;

3) вычисляется стандартная неопределенность типа А:

$$u_A = \frac{u}{\sqrt{n}}, \tag{7.39}$$

где u_A – стандартная неопределенность результата измерений типа А.

Полученное значение u_A характеризует случайную составляющую неопределенности результата измерений. Расчет случайной неопределенности руководством [41] и рекомендациями [42] не предусматривается.

Неопределенности типа В

В качестве исходных данных для вычисления неопределенностей типа В используют:

1) сведения о виде распределения вероятностей;

2) неопределенности констант и справочных данных;

3) сведения изготовителя о средстве измерения;

4) данные поверки и калибровки средства измерения;

5) данные о методе измерения;

6) опытные данные о поведении и свойствах соответствующих приборов и материалов и т. п.

Точностные характеристики исходных данных обычно представляют в виде неисключенных систематических погрешностей. При этом предполагается, что рассматриваемые величины подчиняются равномерному закону распределения.

Для оценки неопределенности типа В проводятся следующие расчеты:

1) вычисляются составляющие неопределенности типа В по формуле

$$u_{B_j} = \frac{\theta_j}{\sqrt{3}} \tag{7.40}$$

где u_{B_j} – j-я составляющая стандартной неопределенности типа В;

θ_j – j-я составляющая неисключенной систематической погрешности результата измерения;

2) вычисляется стандартная неопределенность типа В:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{B_j}^2}, \tag{7.41}$$

где u_B – стандартная неопределенность типа В;

m – число слагаемых;

3) вычисляется суммарная стандартная неопределенность

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \tag{7.42}$$

где u_C – суммарная стандартная неопределенность;

u_A и u_B – определены выше;

4) вычисляется расширенная неопределенность

$$U_P = k_p \cdot u_c, \tag{7.43}$$

где U_P – расширенная неопределенность результата измерений для доверительной вероятности P;

k_p – коэффициент, зависящий от принятой доверительной вероятности и закона распределения результатов измерений;

u_C – определено выше.

Во многих практических случаях при вычислении неопределенностей результатов измерений делают предположение о нормальности закона распределения возможных значений измеряемой величины и полагают:

$k_p = 2$ для $P = 0{,}95$ и $k_p = 3$ для $P = 0{,}99$.

При предположении о равномерности закона распределения полагают:

$k_p = 1{,}65$ для $P = 0{,}95$ и $k_p = 1{,}71$ для $P = 0{,}99$.

Окончательно результат измерения T может быть представлен в виде $(\bar{x} - U_p) \le T \le (\bar{x} + U_p)$ или $(\bar{x} \pm U_p)$ с доверительной вероятностью P.

При описании результатов измерений руководство [41] рекомендует приводить достаточное количество информации для возможности проанализировать или повторить весь процесс получения результата измерений и вычисления неопределенностей результата измерений, а именно:

1) алгоритм получения результата измерений;

2) алгоритм вычисления всех поправок и неопределенностей;

3) неопределенности всех используемых данных и способы их получения;

4) алгоритмы вычисления суммарной и расширенной неопределенностей (включая значение коэффициента k_p).

Отношение отечественных метрологов к предложениям, изложенным в руководстве [41], значительно изменилось за последнее время. Первые отклики на замену погрешностей неопределенностями были резко отрицательными [43]. Главные критические замечания касались предполагаемого отказа от понятия истинного (действительного) значения измеряемой величины, замены понятия «погрешность» на понятие «неопределенность», необходимости переработки многочисленных нормативных документов и применения новой терминологии и методики оценивания неопределенности результатов измерений. Особенно большая критика досталась «неопределенности типа В», призванной заменить неисключенную систематическую погрешность.

В последнее время отношение к руководству [41] несколько изменилось [40]. Многие метрологи склоняются к мнению, что понятие «неопределенность результата измерения» надо постепенно вводить в практику, но пока не вместо понятия «погрешность результата измерения», а наряду с ним. По нашему мнению, понятие «неопределенность» может успешно применяться в качестве показателя точности результата измерений. При этом, правда, потребуется значительная доработка руководства [41], РМГ 43–2001 [42] и разработка новых нормативных документов. Особенно большие изменения, видимо, должны быть сделаны в части применения понятия «неопределенность типа В». Что же касается средств измерений, то здесь пока должна быть сохранена традиционная терминология: «погрешность» и «истинное (действительное) значение измеряемой величины». Распространять понятие «неопределенность» в существующем виде на точностные характеристики средств измерений не представляется возможным.

Таким образом, целесообразно, видимо, использовать в практической работе два показателя точности: неопределенность результатов измерений и погрешность средств измерений[67; 68].

8. ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

8.1. Общие положения

Измерения физических величин осуществляются, как правило, путем преобразования измеряемых величин в целях приведения их к виду, удобному для считывания, обработки и представления получаемой измерительной информации. Измеряемые величины при этом часто преобразуются в величины другой физической природы [1–9].

Например, при измерении температуры ртутным термометром измеряемая температура преобразуется в длину столбика ртути. Больше температура – и больше длина столбика ртути, меньше температура – и столбик ртути меньше. Таким образом, о значении температуры судят по длине столбика ртути. Здесь измеряемая величина одной физической природы («температура») для

определения ее искомого значения преобразуется в физическую величину другой природы («длину» столбика ртути). Можно привести и другие примеры. Так, измерение давления газа с помощью трубчатого манометра осуществляется за счет деформации (скручивания или раскручивания) трубчатой пружины под воздействием измеряемого давления газа. Скручивание (или раскручивание) трубчатой пружины передается указательной стрелке, перемещающейся вдоль оцифрованной шкалы манометра, с которой и производится отсчет показаний. Таким образом, для измерения давления газа проводится целый ряд последовательных преобразований, что и позволяет в итоге оценить значение искомой величины. Измерение расхода жидкости можно провести, например, оценивая перепад давления на специальном сужающем устройстве, т. е. в этом случае расход жидкости преобразуется в перепад давления, измерение которого и дает значение искомой величины.

При проведении технических измерений неэлектрических величин (температуры, давления, расхода и т. д.) эти величины, довольно часто, преобразуют в электрические величины, которые и подвергаются дальнейшим преобразованиям и измерениям (рис. 8.1).

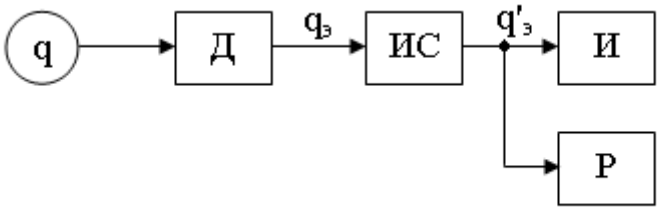


Рис. 8.1. Структура устройства при электрических измерениях неэлектрических величин: q – измеряемая неэлектрическая величина; $q_э$,$q'_э$ – электрические величины; Д – датчик; ИС – измерительная схема; И – измеритель (средство измерения электрической величины); Р – регистратор (регистратор электрической величины)

Датчик Д преобразует измеряемую неэлектрическую величину q в электрическую $q_э$. Эта величина в общем случае может быть преобразована в измерительной цепи (ИС) в другую электрическую величину $q'_э = f(q_э)$. При этом величина $q_э$ может быть усилена или ослаблена, преобразована из аналоговой величины в дискретную или из дискретной в аналоговую и т. д. Полученная величина $q'_э$ подвергается измерению или регистрации с помощью электрических

средств, а также может быть передана по линии связи на значительное расстояние для дальнейшей обработки и использования. Обработка величин $q'_э$ может проводиться с использованием универсальных ЭВМ или специализированных вычислительных устройств.

Измерения неэлектрических величин электрическими методами имеют ряд отличительных достоинств, к которым можно отнести:

1) возможность измерять малые значения искомых величин;

2) использовать электронные усилители, что дает возможность измерять такие сигналы, которые невозможно измерить другими методами;

3) возможность дистанционно измерять параметры искомых величин;

4) возможность дистанционно управлять как производственными, так и другими процессами;

5) возможность использовать высокоточную и малоинерционную электроизмерительную аппаратуру;

6) возможность комплектовать различные измерительные установки однотипными электрическими блоками;

7) возможность широко использовать современную вычислительную технику в измерительных системах.

В последующих параграфах учебного пособия подробно рассмотрены элементы, составляющие измерительное устройство, структура которого приведена на рис. 8.1. Так, отдельные параграфы пособия посвящены датчикам, измерительным схемам, электроизмерительным приборам и методам измерения конкретных физических величин, наиболее часто встречающихся в практике технических измерений.

8.2. Датчики

Основное назначение датчиков, применяемых при измерениях физических величин, заключается в восприятии и преобразовании исследуемых величин в вид, удобный для дальнейшего использования.

Следует отметить, что в настоящее время не существует единого и общепринятого определения термина «датчик».

Одни авторы рассматривают датчик как простейший элемент, осуществляющий преобразование неэлектрической величины в электрическую. Другие авторы, например в [1–3, 32], вообще избегают использовать термин «датчик» и заменяют его термином «первичный измерительный преобразователь». В [32] отмечается, правда, что кроме термина «первичный измерительный преобразователь» используется близкий к нему термин – «датчик». При этом под *датчиком* подразумевается один или несколько измерительных преобразователей, служащих для преобразования измеряемой неэлектрической величины в электрическую и объединенных в единую конструкцию. Аналогичную позицию занимают авторы учебника [1], в котором отмечается, что первичные измерительные преобразователи, размещаемые непосредственно на объекте исследования и удаленные от места обработки, отображения и регистрации измерительной информации, называют иногда датчиками. При изложении материала в [1] термин «датчик» не используется. Вместо него фигурируют термины «измерительный преобразователь» и «преобразователь». В учебном пособии [3] автор применяет термин «измерительный преобразователь», но не отказывается и от термина «датчик», под которым понимает конструктивную совокупность ряда измерительных преобразователей, размещаемых непосредственно у объекта измерения. Есть авторы, которые считают, что датчик должен выполнять ряд преобразований одних величин в другие, усиливать и распределять сигналы и производить некоторые вычислительные операции.

Международный электротехнический словарь дает следующее определение термина «датчик»: «*Датчик* – это измерительный орган, включающий наряду с чувствительным элементом усилитель или преобразователь сигнала, видоизменяющий форму выходного сигнала в соответствии с заданной».

На основании изложенного можно сформулировать основные положения, которые необходимо учесть при определении термина «датчик».

Датчик как функциональный элемент измерительной системы должен воспринимать и преобразовывать измеряемую величину, и его можно рассматривать как устройство, состоящее из воспринимающего (чувствительного) эле-

мента и промежуточных преобразователей. Вопрос заключается в том, какие преобразователи относить к датчикам, а какие – к другим функциональным элементам устройства. Исходя из этого, можно дать следующее определение: датчиком называется конструктивно единый измерительный преобразователь измеряемой неэлектрической величины в электрическую. Такое определение правомерно применительно к задаче электрических измерений неэлектрических величин.

Термин «датчик» обычно применяют в сочетании с физической величиной, для преобразования которой он предназначен: датчик температуры, датчик давления, датчик ускорения и т. д. Датчики могут выполняться как в виде простейших по устройству и схеме функциональных элементов (термопары, проволочные тензодатчики и т. п.), так и в виде более сложных устройств, состоящих из ряда самостоятельных элементов (например, датчик давления, состоящий из упругого элемента, рычажной системы и переменного электрического сопротивления; в этом случае измеряемое давление воздействует на упругий элемент, который через рычажную систему перемещает движок переменного сопротивления, и, таким образом, давление преобразуется в электрическое сопротивление). Необходимость разработки и применения сложных датчиков обусловлена главным образом тем, что они позволяют получить большие, чем простейшие датчики, чувствительность, точность и линейность преобразования.

8.3. Измерительные схемы

Измерительные схемы служат для включения датчиков, что необходимо для их нормальной работы. В простейшем случае роль измерительных схем могут выполнять соединительные провода (например, при подключении термопары к измерительному прибору, когда не используются какие-либо согласующие или усилительные устройства). В более сложных случаях измерительные схемы могут быть достаточно сложными устройствами и содержать в своем составе, например, усилители, генераторы, компенсаторы и т. д. Часто в качестве таких устройств используются равновесные и неравновесные мостовые измерительные схемы, которые могут быть как постоянного, так и переменного тока.

Наибольшее распространение получили следующие схемы включения датчиков: токовые, потенциальные и частотные.

Пример токовой схемы включения датчиков приведен на рис. 8.2, а на рис. 8.3 приведен график статической характеристики для этой схемы.

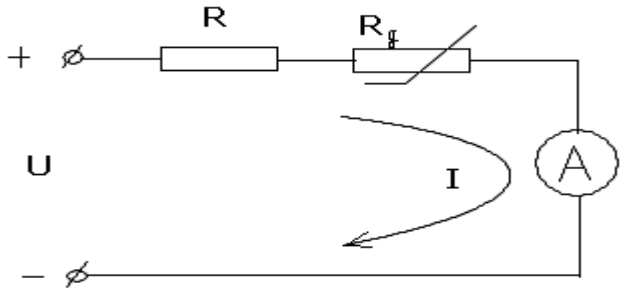


Рис. 8.2. Пример токовой схемы включения датчиков

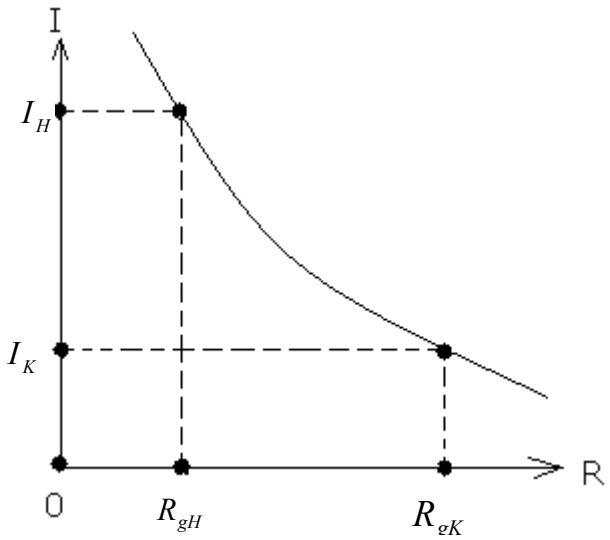


Рис. 8.3. График зависимости $I = f(R_g)$

На рис. 8.2 и рис. 8.3 приняты следующие обозначения: R_g – сопротивление датчика; R – балластное сопротивление; U – напряжение питания; I – измеряемый ток; A – амперметр (измеритель тока); R_{gH} – начальное сопротивление датчика; R_{gK} – конечное сопротивление датчика; $I_н$ и I_K – начальное и конечное значения тока

Мостовые измерительные схемы имеют исключительно большое значение при измерении физических величин (как электрических, так и неэлектрических), в силу чего эти схемы подробно описаны ниже и им посвящены отдельные главы учебного пособия.

8.4. Средства измерения электрических величин

Измерение физических величин с использованием датчиков и измерительных схем требует подключения к выходу измерительных схем электрических средств измерений (СИ) для регистрации и отображения выходных сигналов. С этой целью используются регистрирующие или показывающие СИ электрических величин. Регистраторы электрических сигналов описаны в литературе [1–7; 9; 18; 55].

В данном учебном пособии основное внимание уделено электроизмерительным приборам (аналоговым и цифровым, а также приборам прямого измерения и компенсационным).

На рис. 8.4 приведен один из возможных вариантов классификации электроизмерительных приборов.

Электронно-лучевые приборы находят применение в измерительной практике, хотя и в меньшей степени, чем в прежние годы. Вместе с тем электронно-лучевые приборы входят в учебные программы многих дисциплин (в том числе в школьную программу по физике), что позволило отказаться от рассмотрения этих приборов в данном учебном пособии.

Электромеханические и электронные приборы (аналоговые и цифровые), нашедшие наибольшее распространение, детально рассматриваются ниже в последующих разделах учебного пособия.

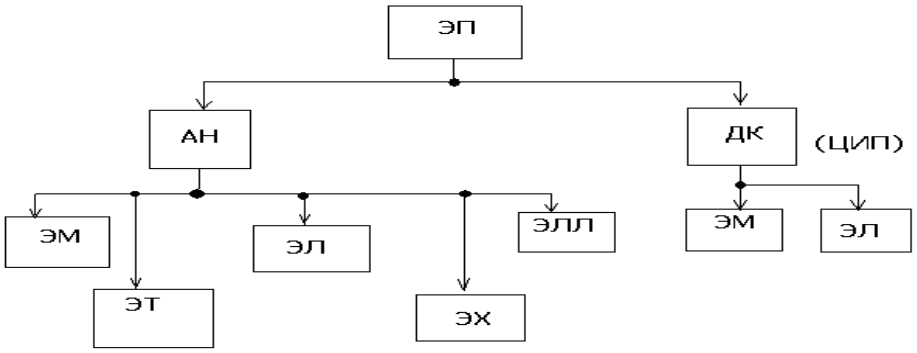


Рис. 8.4. Классификация электроизмерительных приборов:
ЭП – электроизмерительные приборы; АН – аналоговые приборы; ДК – дискретные приборы (цифровые измерительные приборы); ЭМ – электромеханические приборы (аналоговые и цифровые); ЭЛ – электронные приборы (аналоговые и цифровые); ЭЛЛ – электронно-лучевые приборы (электронные осциллографы); ЭТ – электротепловые приборы; ЭХ – электрохимические приборы

Электрохимические приборы используют химическое действие электрического тока.

Электротепловые приборы используют тепловое действие электрического тока.

Электрохимические и электротепловые приборы используются сравнительно редко при решении специфических измерительных задач и в силу этого в данном учебном пособии не рассматриваются.

9. ПОСТРОЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ДАТЧИКОВ

9.1. Общие положения

Датчики могут быть систематизированы по виду входных (измеряемых) величин, что может быть полезным при выборе датчиков для измерения заданной величины.

По виду входных (измеряемых) величин датчики обычно разделяют на следующие группы:

1) датчики перемещений;
2) датчики усилий;
3) датчики момента вращения;
4) датчики размеров;
5) датчики уровня;
6) датчики скорости;
7) датчики ускорения;
8) датчики параметров вибраций;
9) датчики давления и расхода;
10) датчики температуры;
11) датчики влажности;
12) датчики для анализа состава вещества.

В пределах каждой группы возможно и дальнейшее разделение датчиков. Например, можно различать датчики линейного и углового перемещения, датчики высоких и низких температур и т. д.

Систематизация датчиков по виду их выходного сигнала позволяет определить, какие измерительные устройства наиболее пригодны для работы с данными датчиками или, наоборот, какие типы датчиков следует использовать для заданных измерительных устройств.

По виду выходного сигнала датчики, применяемые для электрических измерений неэлектрических величин, можно разделить на группы в зависимости от преобразования ими измеряемой величины в электрическое сопротивле-

ние, в индуктивность, в емкость, в значение постоянного тока или напряжения, в фазу переменного тока или напряжения, в частоту переменного тока или напряжения.

Кроме того, выходная величина датчика может представлять собой импульсно-модулированный электрический ток или напряжение. Причем возможно применение амплитудно-импульсной, частотно-импульсной, время-импульсной и других видов модуляции. Такие датчики особенно целесообразно использовать в импульсных и цифровых измерительных устройствах.

Большие возможности открываются при использовании датчиков в измерительно-вычислительных комплексах (ИВК) совместно с компьютерами. Такое использование позволяет решить целый круг задач, связанных со сбором, переработкой, передачей, хранением, поиском и выдачей информации, «источником» которой являются датчики. Попутно решаются такие проблемы, как компенсация внешних воздействий на датчики, повышение точности и надежности проводимых измерений, ускорение и упрощение экспериментальных работ и т. п. Более подробно о сопряжении датчиков с компьютерами, о возникающих при этом трудностях и о круге решаемых задач можно узнать из литературы, приведенной в конце учебного пособия (см., например, [33, 34]).

9.2. Классификация датчиков

Большое разнообразие и многочисленность видов датчиков затрудняют задачу изучения, оптимального выбора и использования их при электрических измерениях неэлектрических величин. Для облегчения этой задачи необходимы, очевидно, систематизация и классификация датчиков. Чаще всего классификация датчиков проводится по принципу их действия. Кроме того, датчики иногда целесообразно классифицировать по виду входных или выходных величин, как уже было рассмотрено выше (см. п. 9.1).

В зависимости от принципа действия датчики можно разделить на две большие группы: датчики параметрические и датчики генераторные.

Датчики параметрической группы характеризуются тем, что измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в параметр электрической цепи: со-

противление, индуктивность, взаимную индуктивность, емкость. Для обеспечения нормальной работоспособности таких датчиков необходимы вспомогательные источники электрической энергии.

К параметрическим можно отнести следующие типы датчиков:

1) *реостатные датчики*, основанные на использовании зависимости сопротивления реостата от положения его движка, который перемещается под воздействием измеряемой величины;

2) *датчики контактного сопротивления*, в которых используется зависимость контактного сопротивления между поверхностями твердых тел (например, угольных шайб) от давления тел друг на друга;

3) *тензометрические (тензорезисторные) датчики*, основанные на измерении сопротивления проводников при их растяжении или сжатии;

4) *терморезисторные датчики*, основанные на измерении их сопротивлений в зависимости от температуры;

5) *фоторезисторные датчики*, основанные на изменении их сопротивлений в зависимости от освещенности;

6) *электролитические датчики*, основанные на изменении сопротивления раствора электролита от концентрации раствора;

7) *ионизационные датчики*, основанные на зависимости сопротивления газового разрядного промежутка от степени ионизации газа;

8) *электронные (механотронные) датчики*, основанные на зависимости анодного тока электронных ламп от расстояния между их электродами;

9) *индуктивные датчики*, основанные на зависимости их индуктивности от величины немагнитных зазоров, от длины и площади сечения сердечников, а также от взаимного расположения частей магнитопроводов и обмоток датчиков;

10) *магнитоупругие датчики*, основанные на зависимости их индуктивности от механического напряжения ферромагнитного материала, образующего сердечники этих датчиков;

11) *емкостные датчики*, основанные на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его обкладок, а также от диэлектрической проницаемости его диэлектрика.

Генераторные датчики характеризуются тем, что в них осуществляется преобразование различных видов энергии в электрическую (генерирование электрической энергии под воздействием измеряемой неэлектрической величины).

К генераторным можно отнести следующие типы датчиков:

1) *термоэлектрические датчики (термопары)*, основанные на зависимости термоЭДС термопар от разности температур их рабочих и свободных концов;

2) *индукционные датчики*, основанные на явлении электромагнитной индукции;

3) *пьезоэлектрические датчики*, основанные на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, состоящего в поляризации некоторых материалов (кварца, турмалина, пьезокерамики и др.) при их деформации;

4) *фотоэлектрические датчики*, основанные на зависимости ЭДС фотоэлементов от их освещенности;

5) *гальванические датчики*, основанные на зависимости ЭДС гальванического элемента от состава и концентрации растворов электролитов;

6) *электрокинетические датчики*, основанные на явлении электрокинетического потенциала, возникающего при вынужденном протекании полярной жидкости через пористую стенку.

Приведенный перечень типов датчиков не охватывает, конечно, всех типов и всех возможных модификаций датчиков одного типа. Приведены лишь наиболее распространенные типы датчиков, которые и будут рассмотрены более подробно в последующих разделах учебного пособия.

9.3. Параметрические датчики

9.3.1. Реостатные датчики

Реостатным параметрическим датчиком называют переменное сопротивление, движок которого перемещается в соответствии со значением измеряемой неэлектрической величины. Таким образом, входной величиной реостатных датчиков является перемещение движка, которое может быть линейным или угловым. Выходной величиной реостатных датчиков является активное сопротивление, которое может изменяться линейно или по некоторому закону (в зависимости от перемещения движка).

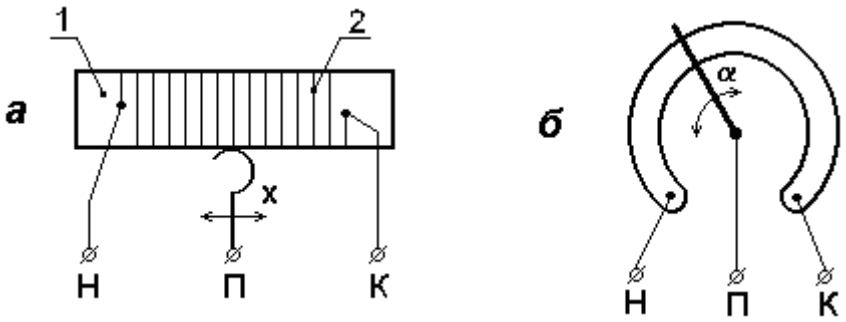


Рис. 9.1. Реостатные преобразователи для линейных *(а)* и угловых *(б)* перемещений:
1 – каркас; 2 – обмотка; Н, К – начало и конец обмотки; П – вывод от подвижного контакта (движка); *x* – линейное перемещение движка; α – угловое перемещение движка датчика

Основными элементами реостатного датчика являются: каркас с обмоткой в виде проволоки (или с нанесенным на каркас полупроводником, пленкой металла или пленкой специального сплава) и подвижные токосъемные щетки (движки), которые скользят непосредственно по поверхности резистивного слоя или по ряду соединенных с ним контактов. Датчики могут быть однооборотные и многооборотные. Например, в [37] описан десятиоборотный датчик с намоткой в виде проволочной проводящей спирали на пластмассовом цилиндре со щетками из благородных металлов. Срок службы такого датчика – 20 млн. оборотов при скорости до 500 об/мин.

Статические характеристики преобразования реостатных датчиков приведены на рис. 9.2.

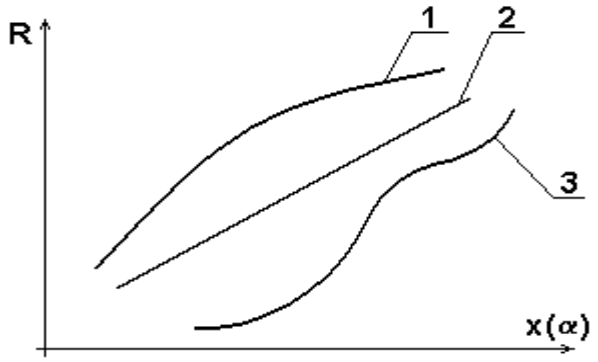


Рис. 9.2. Статические характеристики преобразования реостатных датчиков:
1 – нелинейная; 2 – линейная; 3 – функциональная

На рис. 9.2 в качестве входных величин отложены по оси абсцисс величины x и α (линейное и угловое перемещение движка датчика), а по оси ординат (в качестве выходной величины) отложено значение активного сопротивления R.

Статические характеристики преобразования реостатных датчиков в самом общем виде могут быть записаны следующим образом:

$$R = f(x), \tag{9.1}$$

$$R = f(\alpha), \tag{9.2}$$

где величины R, x, α определены выше.

Проволочные датчики (по сравнению с непроволочными) обладают рядом преимуществ: большей стабильностью во времени, большей надежностью, линейностью и т. д. Вместе с тем конечное число витков обмотки таких датчиков приводит к тому, что их статические характеристики, строго говоря, становятся ступенчатыми и возникает погрешность разрешающей способности (ступеньки на рис. 9.2 не показаны). Относительную погрешность разрешения δ обычно задают в виде

$$\delta = (1/w)\cdot 100\ \%, \tag{9.3}$$

где w – число витков.

Для удовлетворительной работы реостатного датчика число витков должно быть не менее 100–200.

Конструкция реостатных датчиков: каркас из текстолита или пластмассы; реже применяются каркасы из алюминия, покрытого изоляционным лаком или оксидной пленкой; провода изготавливаются из константана, манганина, фехраля, из сплавов платины с иридием, платины с палладием и др.

К достоинствам реостатных датчиков относятся их простота, дешевизна и высокий уровень выходного сигнала без усиления. С другой стороны, они обладают сравнительно низкой точностью, имеют скользящий контакт и иногда требуют значительных усилий для перемещения движка датчика.

Применяют реостатные датчики для измерения перемещений и других неэлектрических величин (например, усилий, давлений, уровней и т. п.), которые предварительно могут быть преобразованы в перемещения. Справочные данные по реостатным датчикам приведены в [37, 38].

9.3.2. Датчики контактного сопротивления

Действие датчиков контактного сопротивления (рис. 9.3) основано на зависимости переходного сопротивления контактов R_K от усилия их сжатия.

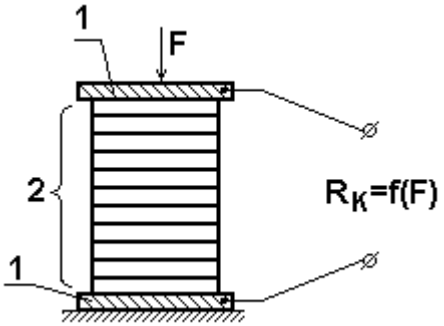


Рис. 9.3. Датчик контактного сопротивления:
1 – металлические пластины; 2 – столбик из шайб (например, угольных)

Зависимость значения контактного сопротивления R_K от усилия сжатия определяется соотношением

$$R_K = \frac{K}{F_0 + F}, \tag{9.4}$$

где K – постоянный коэффициент;

F_0 – усилие сжатия в исходном положении;

F – текущее значение усилия сжатия.

Начальное сжатие контактов осуществляется за счет конструктивных особенностей датчиков, позволяющих осуществить эту операцию.

График статической характеристики преобразования (СХП) в соответствии с соотношением (9.4), являющимся аналитической записью СХП, приведен на рис. 9.4.

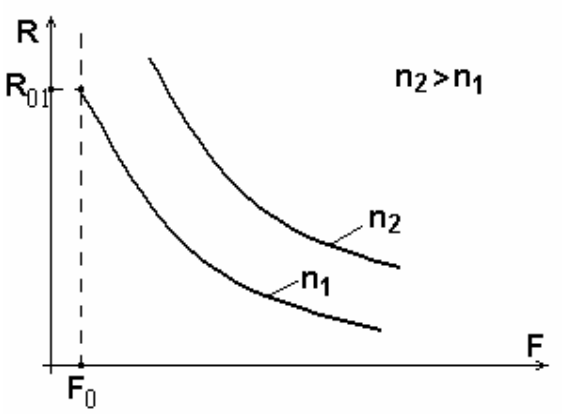


Рис. 9.4. График статической характеристики преобразования датчика контактного сопротивления: n_1, n_2 – число угольных шайб; R_{01} – исходное (начальное) сопротивление датчика при $F = F_0$ и $n = n_1$

Обычно датчики выполняются из угольных шайб или дисков. Материалом служат электродный уголь, графит или керамика с графитовым заполнением. Толщина шайб 0,5–3,5 мм. Размеры шайб выбираются из расчета максимально допускаемого давления до 65 кГс/см^2 и максимально допускаемого тока до 300–400 мА.

Кроме «угольных», известны датчики контактного сопротивления на основе электропроводящей бумаги, уложенной рядами в виде столбика, на основе электропроводящей резины или металлических пластин, на которые путем напыления нанесен высокоомный резистивный слой.

К недостаткам датчиков контактного сопротивления следует отнести большой гистерезис, значительную нелинейность и зависимость их сопротивления от температуры окружающей среды. Суммарная погрешность рассматриваемых датчиков может достигать ±10 %.

К достоинствам этих датчиков относятся их конструктивная простота, высокая надежность и достаточная для целей измерения и автоматизации мощность.

Кроме преобразования неэлектрических величин (усилий, напряжений, малых перемещений и т. д.) в электрические, датчики контактного сопротивления применяются в качестве выходных органов регуляторов напряжения, стабилизаторов, угольных микрофонов и т. п.

Более подробно с датчиками контактного сопротивления можно познакомиться по многим литературным источникам (см., например, [32, 37]).

9.3.3. Тензорезисторные датчики

Принцип действия тензорезисторных датчиков основан на изменении сопротивления материала проводника при его деформации. Отметим, что рассматриваемые датчики могут называться по-разному. Например, могут быть использованы термины: тензометрические датчики, тензочувствительные датчики, омические тензодатчики и просто «тензодатчики». В дальнейшем будем использовать последний из названных терминов («тензодатчик»).

Принцип работы тензодатчиков поясняет рис. 9.5.

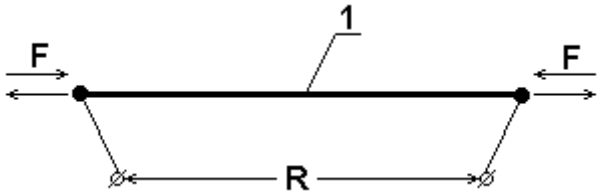


Рис. 9.5. Тензодатчик:
1 – проводник; R – сопротивление проводника;
«F–F» – усилие растяжение (или сжатия) проводника

Сопротивление проводника при неизменной температуре, как известно, рассчитывается по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}. \qquad (9.5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника;

l – длина проводника;

S – площадь поперечного сечения проводника.

При малом растяжении или сжатии проводника его удельное сопротивление остается примерно постоянным. Принимая, что ρ≈const, рассмотрим влияние на R остальных членов выражения (9.5).

При растяжении длина проводника l растет, площадь поперечного сечения S уменьшается и в соответствии с выражением (9.5) сопротивление проводника R возрастает.

При сжатии проводника эффект будет обратным: длина l уменьшается, площадь поперечного сечения S растет и сопротивление R снижается.

В случае значительных деформаций проводников удельное электрическое сопротивление материала этих проводников изменяется (возрастает и при растяжении, и при сжатии), что необходимо учитывать.

Изменение сопротивления проводников характеризуется коэффициентом тензочувствительности:

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \tag{9.6}$$

где K – коэффициент тензочувствительности;

ΔR и Δl – изменения сопротивления и длины проводника.

Чувствительные элементы тензодатчиков выполняют из металлической проволоки и фольги, а также из полупроводников круглого и плоского сечения. Конструкции различных типов тензодатчиков представлены на рис. 9.6.

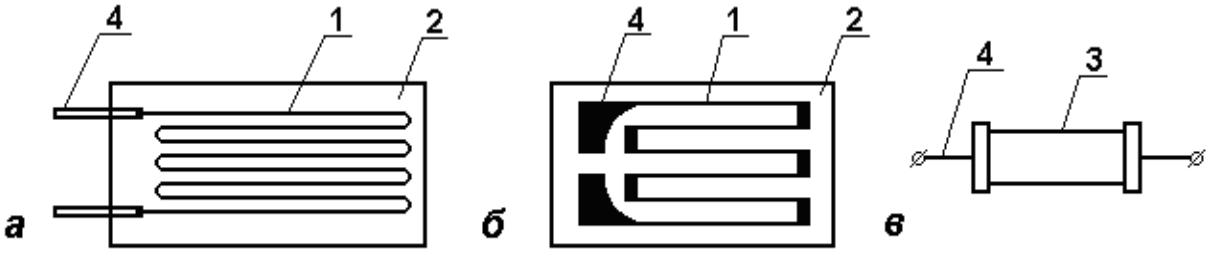


Рис. 9.6. Конструкция тензодатчиков проволочных (*а)*, фольговых (*б)* и полупроводниковых (*в)*:
1 – металлические проводники; 2 – подложка из бумаги или лаковая пленка;
3 – полупроводник; 4 – выводы

Показанные на рис. 9.6 датчики относятся к «наклеиваемым», т. е. вместе с подложкой их наклеивают на исследуемую деталь специальным клеем. Такие датчики просты в работе, но наличие клея ухудшает их характеристики (появляется гистерезис, «ползучесть» и потеря чувствительности со временем). Существуют бесклеивые датчики, проводники которых крепятся к взаимоперемещающимся деталям без клея с помощью механических устройств.

Для проволочных тензодатчиков, приведенных на рис. 9.6, *а* и для фольговых тензодатчиков, приведенных на рис. 9.6, *б* относительные изменения сопротивления не превышают 1 %, что может оказаться сравнимым с температурными изменениями сопротивления этих датчиков. Отсюда требования к материалу тензодатчиков – иметь малый температурный коэффициент и большой коэффициент тензочувствительности. Кроме того, материалы тензодатчиков должны иметь большое удельное сопротивление (для уменьшения габарита датчика при заданном его сопротивлении) и большую механическую прочность. Основные характеристики материалов для тензодатчиков приведены в табл. 9.1. Следует отметить, что приведенные характеристики в значительной степени зависят от состава, технологии изготовления и последующей обработки материала.

Таблица 9.1

Характеристики материалов, используемых для тензодатчиков

Материал	**Коэффициент тензочувствительности К**	**Удельное сопротивление ρ при 20 °С, мкОм·м**	**Температурный коэффициент сопротивления (ТКС), 10^{-3}/°С**
Константан	1,9÷2,2	0,47÷0,51	–0,04÷+0,02
Манганин	0,47÷0,50	0,4÷2,0	–0,03÷+0,04
Нихром	2,1÷2,3	1,0÷1,2	0,15÷0,17
Изоэластик	2,8÷3,6	–	0,47
Платина	4,1÷6,1	0,09÷1,11	2,57÷3,98
Железохромо-алюминиевый сплав	2,8÷2,9	1,35÷1,55	0,02

Данные табл. 9.1 свидетельствуют, что наибольшей тензочувствительностью (среди приведенных материалов) обладает платина. Несмотря на это, платиновые тензодатчики используются сравнительно редко из-за большого температурного коэффициента сопротивления (ТКС). Наибольшее распространение для изготовления тензодатчиков получил константан, имеющий приемлемую тензочувствительность (К≈2) и малый ТКС. Полупроводниковые тензорезисторы имеют чувствительность много большую, чем металлические, но усту-

пают последним по стабильности характеристик и по температурному диапазону. Применение современной интегральной микроэлектронной технологии позволяет значительно улучшить все характеристики как металлических (фольговых), так и полупроводниковых тензодатчиков (повышаются стабильность и идентичность, уменьшаются размеры и т. п.).

Номинальные сопротивления тензодатчиков составляют от 50 до 800 Ом. Фольговые и проволочные тензодатчики обычно имеют длину от 5 до 20 мм и ширину от 3 до 10 мм. Полупроводниковые тензодатчики представляют собой пластинку монокристалла кремния или германия (чаще кремния) длиной 5–10 мм и шириной 0,2-0,8 мм. Известны «малобазовые» тензодатчики (металлические и полупроводниковые), имеющие длину от 1 до 3 мм.

Основное назначение тензодатчиков – измерять деформацию деталей машин и механизмов, а также элементов зданий и сооружений (мостов, виадуков и т. д.). Кроме того, они могут использоваться в качестве чувствительного элемента датчиков давления, силы, параметров вибрации. Например, при измерении давления жидкости или газа тензорезисторы наносят на мембрану датчика давления и располагают их так, что при работе два из них подвергаются деформации растяжения, а два других – деформации сжатия.

Использование специальных схем включения (обычно мостовых) и специальных компенсирующих устройств обеспечивают высокие метрологические характеристики измерений. Совмещение в одной конструкции всех функциональных узлов датчика позволяет сократить число проводов в линиях связи, сформировать высокочувствительный выход и повысить помехозащищенность измерительного канала.

Справочные данные по тензодатчикам приведены во многих литературных источниках (см., например, [32, 37, 38]).

9.3.4. Фоторезисторные датчики

Фоторезисторные датчики (устаревшее название «фотосопротивления») представляют собой полупроводниковую пластину, которая при освещении уменьшает свое сопротивление в результате внутреннего фотоэффекта. Схема фоторезистора и его характеристика $R = f(\Phi)$ приведены на рис. 9.7.

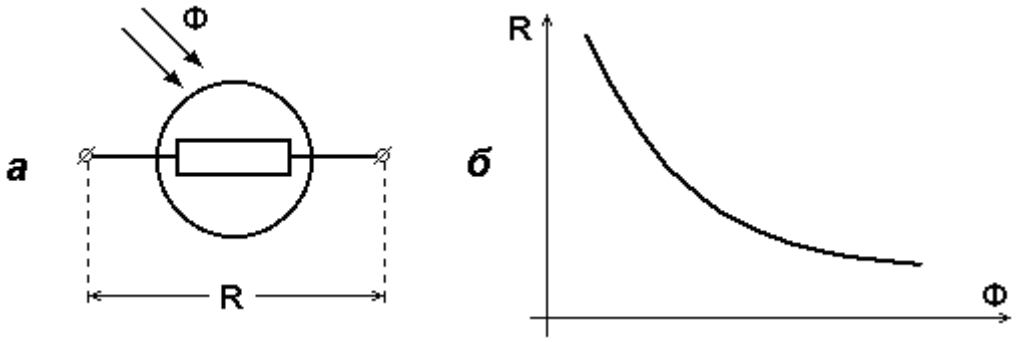


Рис. 9.7. Схема фоторезистора (*а)* и его статическая характеристика преобразования (*б)*: R – сопротивление фоторезистора; Ф – световой поток

В качестве фоточувствительного материала обычно используются: сернистый кадмий (тип ФС-К), сернистый свинец (тип ФС-А), селенид кадмия (тип ФС-Д), монокристаллы сернистого кадмия (тип ФС-КМ). Спектральные характеристики фоторезисторов определяются свойствами используемых полупроводниковых материалов. Полупроводниковые фоторезисторы перекрывают спектр от инфракрасных до ультрафиолетовых излучений. Характеристики полупроводниковых фоторезисторных датчиков нелинейны и температурозависимы, поэтому выбор подходящего типа фоторезистора и схемы его включения во многом зависит от конкретной области его применения.

При небольших освещенностях сопротивление фоторезистора подчиняется закону Ома:

$$R = \frac{U}{I_\Phi}, \tag{9.7}$$

где U – напряжение, приложенное к фоторезистору;

I_Φ – фототок.

При больших освещенностях фоторезистора пропорциональность между U и I_Φ нарушается.

Чувствительность фоторезисторов определяется кратностью изменения их сопротивлений $R_{\text{Т}}$ и $R_{\text{СВ}}$:

$$K = \frac{R_T}{R_{CB}}, \tag{9.8}$$

где $R_{\text{Т}}$ – темновое сопротивление (сопротивление неосвещенного фоторезистора); $R_{\text{СВ}}$ – сопротивление освещенного фоторезистора (обычно принимается освещенность E = 200 лк).

Инерционность фоторезисторов характеризуется постоянной времени T, которая может принимать значения от десятков микросекунд до десятков миллисекунд. Основные характеристики фоторезисторных датчиков приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Основные характеристики фоторезисторных датчиков

Тип фоторезистора	**Размер фоточувствительной площадки, мм^2**	**Рабочее напряжение, В**	**Темновое сопротивление, МОм**	**Фототок, мкА**	$\frac{R_T}{R_{CB}}$	**Постоянная времени, мс**	**Спектральная чувствительность**	
							λ_{max}	$\lambda_{кр}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ФСК-1	28,8	400	3,3	1500	100	80	0,64	0,9
ФСК-5	1,0	100	5,1	500	60	80	0,64	0,9
ФСД-0	28,8	300	2,0	1500	150	3,0	0,72	1,2
ФСА-1	30,0	15–60	0,05	–	1,2	0,04	2,1	2,7
ФСК-П1	12,0	100	100	80-2000	1500	0,04	0,64	0,9
ФСА-6	125	15–30	0,2	–	1,2	0,04	2,1	2,7
СФЗ-1	7,5	15	0,5	1500	3000	0,04	0,72	1,2

Примечания

1. Значение фототока (колонка «5») и отношение темнового сопротивления $R_{\text{Т}}$ к световому сопротивлению $R_{\text{СВ}}$ (колонка «6») указаны при освещенности 200 лк.
2. Значение λ_{max} (колонка «8») соответствует длине волны излучения, при которой спектральная чувствительность достигает максимума.
3. Значение $\lambda_{кр}$ (колонка «9») – длина волны излучения, соответствующая красной границе спектральной чувствительности.

Более подробно с фоторезисторными датчиками можно познакомиться по литературным источникам, приведенным в библиографическом списке (справочные данные см., например, в [32, 37]).

9.3.5. Терморезисторные датчики

Принцип действия терморезисторных датчиков (устаревшее название – «датчики термосопротивления») основан на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении их температуры. В качестве терморезисторов может использоваться металлический или полупроводниковый резистор.

Датчики температуры с терморезисторами иногда называют термометрами сопротивления.

Наибольшее распространение получили металлические терморезисторы, что объясняется стабильностью их статических характеристик преобразования и возможностью строить на их основе измерители температур со сравнительно малыми погрешностями.

Для изготовления полупроводниковых терморезисторов (термисторов) применяются смеси окислов металлов (Mn_2O_3, Cu_2O_3, Fe_2O_3, NiO и др.), которые прессуются и спекаются при высокой температуре. Термисторы обладают высокой чувствительностью, но широкого распространения не получили из-за нестабильности их статических характеристик преобразования.

Зависимость сопротивления проводника от его температуры выражается формулой

$$R = R_0 \cdot e^{\alpha(\theta-\theta_0)} \tag{9.9}$$

где R – сопротивление проводника при температуре θ;

R_0 – сопротивление проводника при температуре θ_0;

α – температурный коэффициент сопротивления.

График зависимости $R = f(\theta)$ приведен на рис. 9.8.

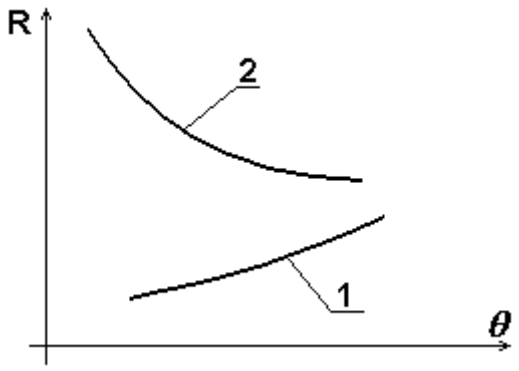


Рис. 9.8. Статические характеристики преобразования терморезисторных датчиков:
1 – металлические терморезисторы; 2 – полупроводниковые терморезисторы

Металлические терморезисторы нормируются государственным стандартом ГОСТ 6651-84 [51]. Отметим, что ГОСТ 6651-84 вводит термин «термопреобразователи сопротивления» (далее – ТС).

В соответствии со стандартом для изготовления металлических ТС могут использоваться медные (ТСМ), платиновые (ТСП) и никелевые (ТСН) терморезисторы. Использование других металлов не рекомендуется. Основные характеристики ТС, нормируемые стандартом [51], приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Основные характеристики термопреобразователей сопротивления

Тип	**Диапазон измеряемых температур, °С**	**Условные обозначения номинальных статических характеристик преобразования (НСХП)**	**Класс допуска**
ТСМ	–200÷+200	10М; 50М; 100М	В; С
ТСП	–260÷+1100	1П; 10П; 50П; 100П; 500П	А; В; С
ТСН	–70÷+180	–	С

Примечания
1. Цифры в условных обозначениях НСХП обозначают значение сопротивления ТС при 0 ^{0}С (R_0).
2. Буквы в условных обозначениях НСХП обозначают: «М» – медные ТС; «П» – платиновые ТС; «Н» – никелевые ТС.

Значения классов допуска (А; В; С) приведены в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Допускаемое отклонение от номинального значения сопротивления R_0 при 0°С для нормируемых классов допуска (± %)

Тип	Класс допуска		
	A	B	C
ТСП	0,05	0,1	0,2
ТСМ	–	0,1	0,2
ТСН	–	–	0,24

Рассмотрим более детально зависимость $R = f(\theta)$ для металлических ТС (см. выражение (9.9)).

Разлагая правую часть (9.9) в степенной ряд и ограничиваясь первыми двумя членами ряда, получаем

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0]], \qquad (9.10)$$

где $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-3}$ $(°C)^{-1}$ – для ТСП и ТСМ.

Выражение (9.10) правомерно для медных ТС при температуре от 0 до +200 °С и в первом приближении для платиновых ТС при тех же температурах.

Для отрицательных температур и для температур больших +200 °С разложение выражения (9.9) в степенной ряд должно содержать уже три члена.

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha(\theta - \theta_0) + \beta(\theta - \theta_0^2]], \qquad (9.11)$$

где $\beta \approx -5,8 \cdot 10^{-7} (^0C)^{-2}$ – для ТСП;

$\beta \approx -5,0 \cdot 10^{-7} (^0C)^{-2}$ – для ТСМ.

Таким образом, в небольшом температурном диапазоне зависимость $R = f(\theta)$ близка к линейной. Для больших температурных диапазонов (особенно при отрицательных температурах) эта зависимость становится нелинейной. Большей линейностью отличаются характеристики медных ТС и меньшей – платиновых ТС.

Температура терморезистора, а следовательно, и величина его сопротивления при установившемся тепловом равновесии определяются многими факторами: температурой окружающей среды; электрическим током через датчик;

геометрическими размерами датчика, его конфигурацией, наличием (или отсутствием) защитной арматуры; физическими свойствами окружающей среды; скоростью перемещения газовой или жидкой среды, в которую погружен датчик и т. д.

Зависимость сопротивления датчика от перечисленных выше факторов позволяет использовать терморезисторы для измерения различных неэлектрических величин (температуры, скорости перемещения жидкости или газа и т.д.).

К недостаткам рассматриваемых датчиков следует отнести сравнительно большую инерционность, нелинейность зависимости $R = f(\theta)$, большой разброс параметров у термисторов и т. д.

Более подробно с терморезисторными датчиками можно познакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке (справочные данные, например, см. в [3, 32, 37, 38]).

9.3.6. Индуктивные датчики

Принцип действия индуктивных датчиков основан на изменении их индуктивности под воздействием входной величины (перемещения, усилия).

Различают датчики короткоходовые и длинноходовые, нормального исполнения и дифференциальные, а также магнитоупругие датчики, в основу которых положено свойство ферромагнитных материалов изменять магнитную проницаемость при упругих деформациях.

Короткоходовые датчики. Схемы, поясняющие их работу, приведены на рис. 9.9.

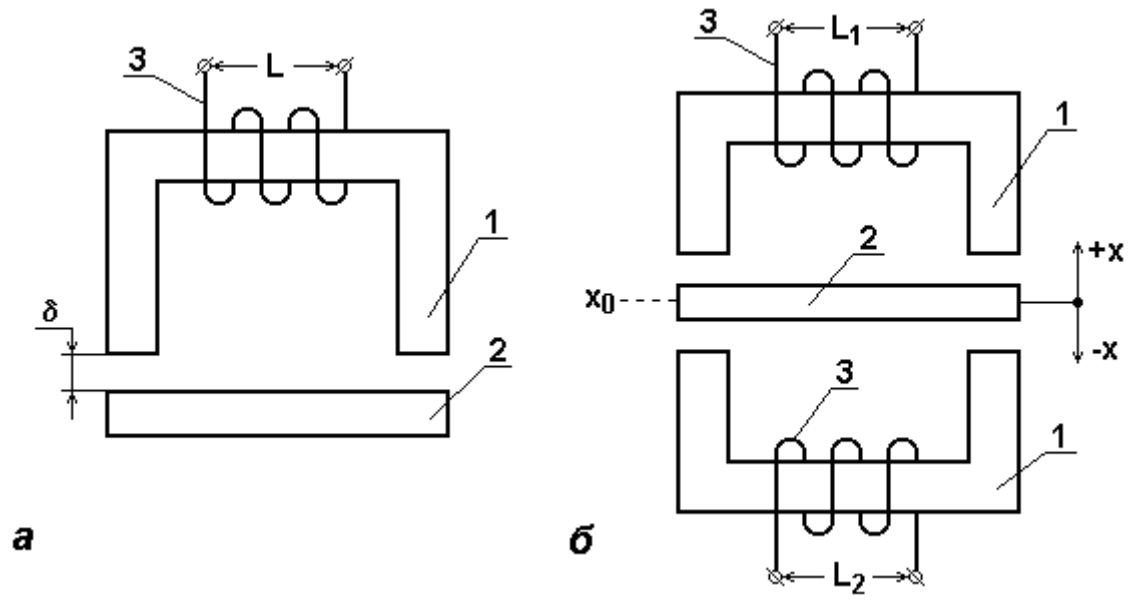


Рис. 9.9. Схемы короткоходовых датчиков нормального (*а)* и дифференциального исполнения (*б)*: 1 – магнитопроводы из магнитомягкого материала; 2 – сердечники из магнитомягкого материала; 3 – обмотки датчиков; L, L_1, L_2 – индуктивности датчиков;δ – воздушный зазор; x_0 – начальное положение сердечника

Индуктивность датчика L с воздушным зазором δ (рис. 9.9, *а*) определяется следующим выражением:

$$L = \frac{w^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{2\delta + l/\mu}, \qquad (9.12)$$

где w – число витков;

μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

S – площадь поперечного сечения магнитопровода;

l – длина магнитопровода;

δ – воздушный зазор;

μ – относительная магнитная проницаемость.

Из соотношения (9.12) следует, что индуктивность датчика зависит от воздушного зазора (обратно пропорциональна значению зазора), а также от значения величин w, S, l и μ. Конструкция датчиков, приведенных на рис. 9.9, *а* и на рис. 9.9, *б*, позволяет реализовать только зависимость $L = f(\delta)$ или $L = f(x)$. При другой конструкции может быть использована зависимость индуктивности датчика от геометрических размеров магнитопровода, магнитной проницаемости материала магнитопровода или числа витков катушки.

Графики статических характеристик преобразования рассматриваемых индуктивных датчиков приведены на рис. 9.10.

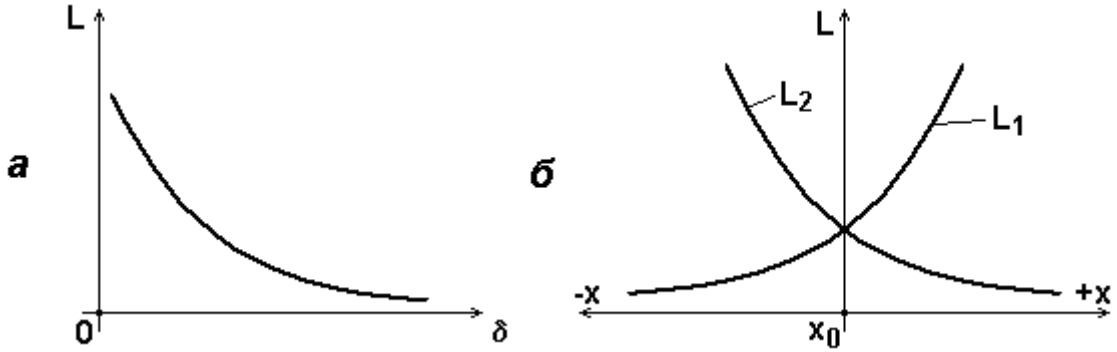


Рис. 9.10. Графики зависимостей $L = f(\delta)$, $L_1 = f_1(x)$ и $L_2 = f_2(x)$ для короткоходовых индуктивных датчиков: *а* – одинарные датчики; *б* – дифференциальные датчики

Короткоходовые индуктивные датчики применяются для измерения малых перемещений (от 0,01 до 5 мм) и других неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в перемещение (усилие, давление, вращающий момент и т. п.).

К недостаткам индуктивных датчиков следует отнести нелинейность статических характеристик преобразования, зависимость индуктивного сопротивления датчика от частоты источника питания и от температуры окружающей среды, большое обратное воздействие датчика на объект исследования.

Достоинства индуктивных датчиков: простота, надежность, отсутствие подвижных контактов, относительно большая величина отдаваемой электрической мощности, возможность работы на переменном токе промышленной частоты.

Длинноходовые датчики. Схемы, поясняющие их работу, приведены на рис. 9.11, где рассмотрены датчики нормального исполнения (рис. 9.11, *а*) и датчики дифференциальные (рис. 9.11, *б*).

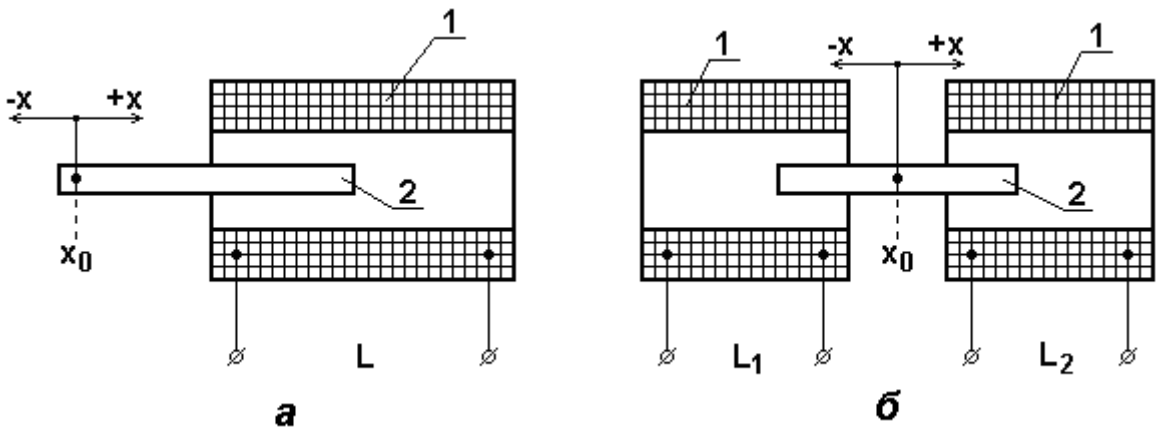


Рис. 9.11. Схемы длинноходовых датчиков нормального (*а)* и дифференциального (*б)* исполнения: 1 – катушки (с числом витков *w*); 2 – сердечник (плунжер)

Сердечники рассматриваемых датчиков часто называют плунжерами. Отсюда и название этих датчиков, встречающееся в литературе, – «плунжерные датчики». Сердечники (плунжеры) могут быть ферромагнитные (из магнитомягкого материала) и диамагнитные (например, из меди).

Известно, что введение ферромагнитного сердечника увеличивает индуктивность катушки, а введение диамагнитного – уменьшает. Это обстоятельство приводит к существенному различию характеристик длинноходовых датчиков с ферромагнитными и диамагнитными сердечниками.

Индуктивность катушки с сердечником (чем по существу являются длинноходовые датчики) определяется выражением

$$L = \mu_0 \cdot \mu \cdot w^2 \cdot S / l \,, \qquad (9.13)$$

где μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника (для ферромагнитных материалов $\mu >> 1$; для диамагнитных материалов $\mu < 1$);

w – число витков;

S, l – площадь и длина катушки.

Из (9.13) следует, что индуктивность длинноходовых датчиков прямо пропорциональна магнитной проницаемости материала сердечников (плунжеров), площади их поперечного сечения, квадрату числа витков и обратно пропорциональна длине катушки датчика.

Графики статических характеристик преобразования рассматриваемых датчиков приведены на рис. 9.12.

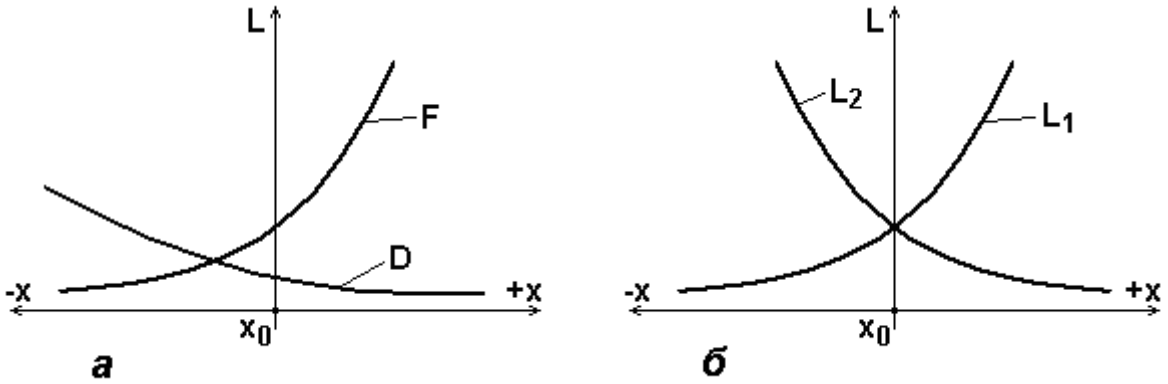


Рис. 9.12. Графики зависимостей $L = f(x)$ для длинноходовых датчиков: *а* – нормальные датчики; *б* – дифференциальные датчики; *F* – ферромагнитные сердечники; *D* – диамагнитные сердечники; L_1, L_2 – индуктивности дифференциальных датчиковпри использовании ферромагнитных сердечников

Применяются длинноходовые индуктивные датчики для измерения больших перемещений. Для датчиков с ферромагнитными сердечниками (плунжерами) перемещения могут составлять до 10-15 см, а для датчиков с диамагнитными сердечниками (плунжерами) – до 20-30 см и даже более.

Датчики с ферромагнитными сердечниками имеют нелинейные статические характеристики преобразования и высокую чувствительность. Чувствительность датчиков с диамагнитными сердечниками много ниже, но зато и их статические характеристики преобразования ближе к линейным.

Остальные достоинства и недостатки длинноходовых датчиков совпадают с достоинствами и недостатками короткоходовых датчиков (см. выше).

Магнитоупругие датчики – это датчики, индуктивность которых изменяется при упругих деформациях ферромагнитных сердечников. Схема, поясняющая работу таких датчиков, приведена на рис. 9.13, *а*.

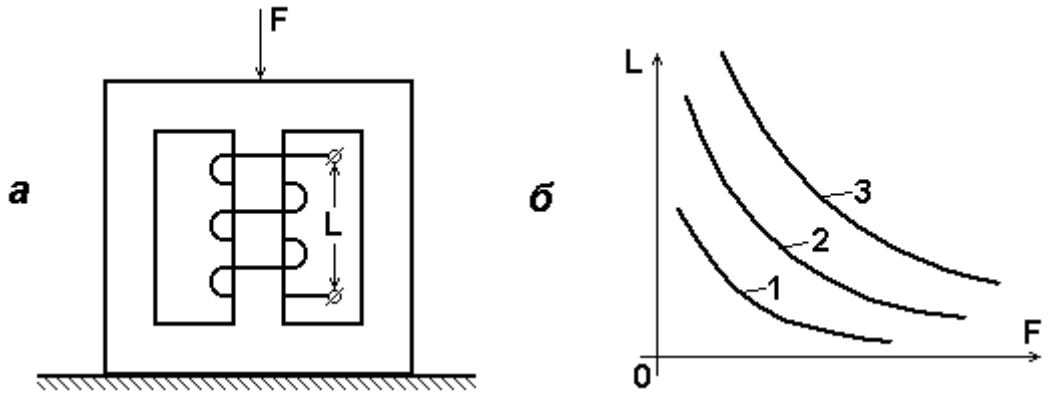


Рис. 9.13. Схема (*а)* и статические характеристики преобразования (*б)* магнитоупругих датчиков: *F* – усилие; *L* – индуктивность (1 – для м = м$_1$, 2 – для м = м$_2$, 3 – для м = м$_3$)

На рис. 9.13, *б* приведены статические характеристики преобразования магнитоупругих датчиков. Характеристики приведены для датчиков из различных ферромагнитных магнитомягких материалов, отличающихся друг от друга магнитной проницаемостью ($\mu_1<\mu_2<\mu_3$).

Магнитоупругие датчики представляют собой катушки индуктивности с замкнутыми магнитопроводами, деформирующимися под влиянием входных величин (усилия или перемещения).

В исходном состоянии (при $F = 0$ или $F = F_{min}$) индуктивность такого датчика максимальна. При $F \neq 0$ или $F>F_{min}$ магнитопровод датчика деформируется, его магнитная проницаемость снижается и, как результат, уменьшается индуктивность. Значение индуктивности датчика L (при F = const) определяется соотношением

$$L = \frac{w^2 \cdot S}{l} \cdot \mu_0 \cdot \mu, \qquad (9.14)$$

где w – число витков;

S, l – площадь поперечного сечения и длина магнитопровода;

μ_0 – магнитная постоянная (в системе СИ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Магнитоупругие свойства материала датчика характеризуются относительной магнитоупругой чувствительностью K:

$$K = \frac{\Delta\mu / \mu}{\Delta l / l}, \qquad (9.15)$$

где $\Delta\mu$; Δl – изменения магнитной проницаемости и длины магнитопровода датчика.

Материалом для сердечников может быть пермаллой, никель, электротехническая сталь, феррит и др. Относительная магнитоупругая чувствительность для некоторых материалов приведена в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Магнитоупругие свойства материалов

Материал	**Состав**	**Относительная магнитоупругая чувствительность**
Пермаллой	68 % Ni 32 % Fe	250
	78,5 % Ni 21,5 % Fe	200
Никель	100 % Ni	100

Как правило, магнитоупругие датчики питаются от сети с частотой 50 Гц, но известны датчики с питанием от сети с повышенной частотой (от сотен герц до 20 кГц).

Магнитоупругие датчики применяются для измерения больших усилий (нажатия прокатных валков, массы автомобилей и железнодорожных вагонов и т. д.), а также для измерения деформаций в деталях конструкций (с помощью наклеиваемых датчиков).

К достоинствам магнитоупругих датчиков относятся их высокая надежность, сравнительная простота конструкции и большая мощность выходных сигналов.

Недостатком магнитоупругих датчиков является их малая точность, что объясняется наличием гистерезиса, изменением со временем характеристик, влиянием температуры окружающей среды и т. п.

Более подробно с индуктивными датчиками (короткоходовыми, длинноходовыми и магнитоупругими) можно познакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке в конце учебного пособия. Справочные данные по индуктивным датчикам см., например, в [3, 32, 37, 38].

9.3.7. Емкостные датчики

Действие емкостных датчиков основано на преобразовании входной (измеряемой) величины в электрическую емкость.

Для плоского конденсатора, образующего датчик с двумя электродами, можно записать:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \frac{S}{\delta}, \qquad (9.16)$$

где C – емкость конденсатора;

ε_0 – электрическая постоянная (в системе СИ ε_0 = 8,85 пФ/м);

ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора;

S – площадь электродов (обкладок) конденсатора;

δ – расстояние между обкладками.

На рис. 9.14 приведены примеры основных типов емкостных датчиков.

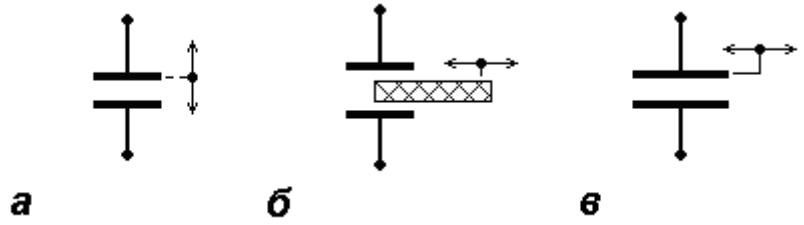


Рис. 9.14. Примеры основных типов емкостных датчиков

Изменение емкости возможно получить, изменяя:

1) расстояние между электродами (обкладками) конденсатора (рис. 9.14, *а*); в этом случае реализуется зависимость $C = f(\delta)$, где C – емкость конденсатора, δ – расстояние между электродами (обкладками) конденсатора;

2) диэлектрическую проницаемость диэлектрика или части его (рис. 9.14, *б*); в этом случае реализуется зависимость $C = f(\varepsilon)$, где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, расположенного между электродами (обкладками) конденсатора;

3) площадь электродов (обкладок), образующих емкостной датчик (рис. 9.14, *в*); в этом случае реализуется зависимость $C = f(S)$, где S – площадь электродов (обкладок) конденсатора.

Графики статических характеристик преобразования емкостных датчиков приведены на рис. 9.15.

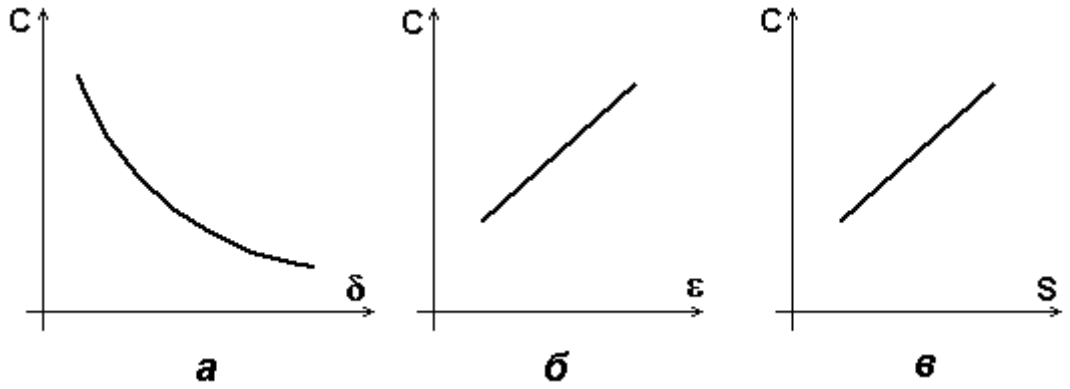


Рис. 9.15. Графики статических характеристик преобразования емкостных датчиков типов *а, б* и *в*

На практике наибольшее распространение получили емкостные датчики, построенные на принципе изменения расстояния между электродами, хотя такие датчики и имеют нелинейную статическую характеристику преобразования. Диэлектриком в этом случае может быть воздух, либо диэлектрическая жидкость, либо эластичный твердый диэлектрик (например, специальная резина).

Случай (*б*) представляет собой частный вариант случая (*а*) для измерения, например, диэлектрической проницаемости изоляционной ленты (или ее толщины), когда последняя проходит между обкладками конденсатора. Роль диэлектрика может выполнять жидкость при измерении, например, ее уровня.

Случай (*в*) представляет лишь одну из возможных конструкций датчиков, работающих на принципе изменения площади. Эта разновидность емкостных датчиков включает устройства такого типа, как поршень, движущийся в трубе, пластины с угловым перемещением относительно друг друга («переменные конденсаторы») и т. д.

Основными достоинствами емкостных датчиков являются: большая чувствительность, сравнительно малые размеры и вес и небольшое обратное действие на объект исследования (в отличие, например, от индуктивных датчиков, имеющих значительное обратное воздействие на объект исследования).

К числу недостатков емкостных датчиков следует отнести сильное влияние на результаты измерений паразитных емкостей и посторонних электрических полей, что требует очень тщательной экранировки этих датчиков; необходимость применения источников питания высокой частоты (от нескольких килогерц до десятков мегагерц). При низких частотах реактивное сопротивление датчика $x_c = 1/\omega C$ весьма велико, так как собственная емкость датчика мала и составляет десятки (в лучшем случае – сотни) пикофарад, а также имеются существенные погрешности от воздействия температуры окружающей среды (температура влияет на геометрические размеры датчика и на диэлектрическую проницаемость жидких и твердых диэлектриков).

Наибольшее применение емкостные датчики получили при измерении малых перемещений, параметров вибраций, размеров изделий (например, толщины ленты из диэлектрика), углов наклона, уровней жидкостей, влажности и т. п.

Более подробно с емкостными датчиками можно познакомиться по литературным источникам, приведенным в библиографическом списке в конце учебного пособия. Справочные данные по этим датчикам см., например, в [37].

9.4. Генераторные датчики

9.4.1. Термоэлектрические датчики

Термоэлектрические датчики состоят из двух разнородных проводников А и В, соединенных между собой в двух точках, как схематически показано на рис. 9.16, *а*.

На практике термоэлектрические датчики принято называть термопарами (ТП).

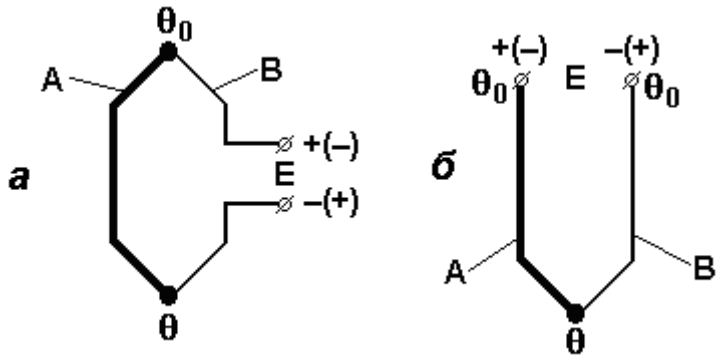


Рис. 9.16. Принципиальные схемы термоэлектрических датчиков (термопар):
A; B – проводники из разнородных материалов; θ; θ_0 – температуры спаев; E – термоЭДС

Рассмотрим схему ТП, приведенную на рис. 9.16, *а,* на которой представлена термопара из двух разнородных проводников А и В с двумя спаями. Один из спаев (рабочий, или «горячий») помещается (в соответствующей арматуре) в место измерения температуры, а другой (свободный, или «холодный») находится во внешней цепи. В нашем случае «горячий» спай ТП имеет температуру θ, а «холодный» спай ТП – θ_0.

ТермоЭДС, генерируемая термопарой, может быть записана в виде

$$E \cong K(\theta - \theta_0) \qquad (9.17)$$

где E – термоЭДС;

K – коэффициент, зависящий от материала электродов А и В.

Соотношение (9.17) соответствует линейной статической характеристике преобразования и правомерно лишь в первом приближении. Реальные характеристики ТП нелинейны и задаются, как правило, в виде таблицы. Другим приближением (9.17) является рассмотрение термоЭДС для «холостого хода». Т. е. подразумевается, что к точкам схемы (±) на рис. 9.16, *а* нет подключения какого-либо прибора. В действительности же такое подключение всегда есть, и в этом случае необходимо учитывать влияние на результирующую термоЭДС соединительных проводов. Для сведения этого влияния к минимуму используются специальные удлинительные провода, получившие название *компенсационных*. Кроме того, применяются схемные решения для компенсации температуры холодных спаев. Таким образом, при использовании ТП необходимо про-

вести подбор удлинительных проводов, выполнить компенсацию температуры холодных спаев и линеаризацию статических характеристик преобразования.

Описанный термоэлектрический эффект открыт в 1823 г. немецким физиком Зеебеком. Отсюда в литературе (особенно иностранной) прямой термоэлектрический эффект часто называют эффектом Зеебека.

В 1834 г. французский физик Пельтье открыл обратный термоэлектрический эффект, называемый также эффектом Пельтье. Суть эффекта Пельтье заключается в следующем. При протекании электрического тока через спай разнородных проводников спай нагревается при одном направлении тока и охлаждается при другом направлении тока. Нагрев или охлаждение спая прямо пропорциональны току и невелики, но все же понижения температуры спая, например, достаточно для построения микрохолодильников, которые могут использоваться при охлаждении транзисторов, интегральных микросхем и т.п. устройств. В измерительных целях обратный термоэлектрический эффект практически не используется, но учитывать его необходимо (он приводит к дополнительным погрешностям). Для сведения погрешностей от этого эффекта к минимуму надо уменьшить измерительный ток через термопару и ее спай. Это достигается использованием измерительных приборов с большим входным сопротивлением или приборов компенсационного типа.

В качестве электродов ТП могут использоваться чистые металлы, сплавы и полупроводники. Чувствительность ТП из чистых металлов составляет единицы микровольт на градус Цельсия, из сплавов – десятки микровольт на градус Цельсия, из полупроводников – сотни и даже тысячи микровольт на градус Цельсия.

Типы термоэлектрических преобразователей (ТП), условные обозначения номинальных статических характеристик (НСХ) преобразования ТП, материалы термоэлектродов и диапазоны измеряемых температур должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.585 – 2001 [50] (табл. 9.6).

Стандарт [50] нормирует номинальные статические характеристики (НСХ) преобразования термопар при температуре холодного спая $\theta_0 = 0I$ °С,

пределы допускаемых отклонений термоЭДС ТП от номинального значения и аппроксимирующие полиномы НСХ преобразования. НСХ преобразования ТП приведены в виде таблиц (интервал температуры рабочего (горячего) спая 1 °С). Значения термоЭДС даны с точностью до 0,001 мВ. В качестве примера ниже приведены НСХ преобразования ТП для стандартных термопар (табл. 9.7).

В соответствии с ГОСТ Р 8.585–2002 [50] могут быть использованы (кроме приведенных в табл. 9.6) следующие термопары:

ТПП (*R*) – платинородий / платиновые с диапазоном измерения от 0 до 1600 ^{0}С;

ТХК$_Н$(*E*) – хромель / константановые с диапазоном измерения от –200 до 900 ^{0}С;

ТМК$_Н$(*T*) – медь / константановые с диапазоном измерения от –200 до 400 ^{0}С;

ТНН(*N*) – нихросил / нисиловые с диапазоном измерения от –250 до 1300 ^{0}С;

ТЖК$_Н$(*J*) – железо / константановые с диапазоном измерения от 0 до 900 ^{0}С.

Таблица 9.6

Характеристики термоэлектрических преобразователей (ТП) по ГОСТ Р 8.585 – 2002 [50]

Обозначение ТП		**Материал термоэлектродов**		**Диапазон измеряемых температур, °С**
		положительного	**отрицательного**	
русское	**международное**			
1	2	3	4	5
ТВР	А–1 А–2 А–3	Сплав вольфрам-рений ВР–5 (95 % W+5 % Re)	Сплав вольфрам-рений ВР–20 (80 % W + 20 % Re)	0...2500 0...1800 0...1800
ТПР	В	Сплав платинородий ПР–30 (70 % Pt+30 % Rh)	Сплав платинородий ПР–6 (94 % Pt+6 % Rh)	600 – 1800
ТПП	S	Сплав платинородий ПР–10 (90 % Pt+10 % Rh)	Платина (Pt)	0 – 1600
ТХА	К	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5 %Ni+9,5 % Cr)	Сплав алюмель НМц АК2-2-1 (94,5 % Ni+5,5 % Al, Si, Mn, Co)	минус 250 – плюс 1300
ТХК	L	Сплав хромель ТНХ 9,5 (90,5 % Ni +9,5 % Cr)	Сплав копель МНМЦ 43-0,5 (56 % Cu+44 % Ni)	минус 200 – плюс 800
ТМК	М	Медь М1 (Cu)	Сплав копель МНМЦ 43-0,5 (56 % Cu + +44 % Ni)	минус 200 – плюс 100

Примечание. Химический состав материалов термоэлектродов ориентировочный.

Таблица 9.7

Номинальные статические характеристики преобразования стандартных ТП по ГОСТ Р 8.585-2002 [50]

(температура свободных концов 0 °С). ТермоЭДС всех ТП при 0 °С E_0 = 0,000 мВ

Термоэлектрические преобразователи			**ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С**						
Наименование	**Обозначение**		**–200**	**+100**	**800**	**1300**	**1600**	**1800**	**2500**
	русское	**международное**							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вольфрам-рений / вольфрамрениевые	ТВР	A1	–	1,337	12,934	20,589	24,593	26,998	33,640
Платинородий / платинородиевые	ТПР	B	–	–	3,154	7,848	11,263	13,591	–
Платинородий / платиновые	ТПП	S	–	0,646	7,345	13,159	16,777	–	–
Хромель / алюмелевые	ТХА	K	–5,891	4,096	33,275	52,410	–	–	–
Хромель / копелевые	ТХК	L	–9,488	6,862	66,466	–	–	–	–
Медь / копелевые	ТМК	M	–6,154	4,722	–	–	–	–	–

Конструктивно термопары выполняются в виде трубчатого чехла, содержащего в себе термоэлектроды и клеммовую головку. Материалом для чехлов служат химически стойкие тугоплавкие металлы и металлические соединения. Наиболее часто используются стали 1Х18Н9Т (до 800I °С) и Х27 (до 1300I °С), фарфор, кварц, окись алюминия (до 1600I °С) и др.

Термоэлектрические преобразователи (ТП) выпускаются серийно на многих приборостроительных предприятиях. В частности, Челябинским АПО «Теплоприбор» разработаны и освоены ТП для измерения температур в различных средах [84].

Например, платина-платинародиевые и платинародий-платинородиевые термопары ТПП-0192, ТПР-0192, ТПР-0292 предназначены для измерения температуры в окислительных средах и нейтральных газовых средах. Тепловая инерция – не более 90 с, материал защитной арматуры – корунд.

Бескорпусные термопары ТПП-0392 и ТПР-0392, а также хромель-алюмелевые ТХА-0292 и хромель-копелевые ТХК-0292 предназначены для измерения температуры воздуха, инертных газов и газов без серосодержащих веществ. Тепловая инерция – не более 5 с.

Более подробно с термоэлектрическими датчиками можно познакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке в конце учебного пособия (см., например, [32, 37, 50]).

9.4.2. Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики (пьезодатчики) используют свойство некоторых естественных кристаллических веществ и искусственных текстур электролизоваться под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и деформироваться в электрическом поле (обратный пьезоэффект). Пьезоэффект обладает «знакочувствительностью», т. е. заряды меняют знак при замене сжатия растяжением и меняется знак деформации при изменении направления электрического поля.

Пьезоэффектом обладают многие кристаллические вещества (кварц, турмалин, сегнетовая соль и др.), а также искусственно создаваемые и специально

поляризуемые пьезокерамики (титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и т. п.).

Описанные эффекты поясняют рис. 9.17, *а* и рис. 9.17, *б*.

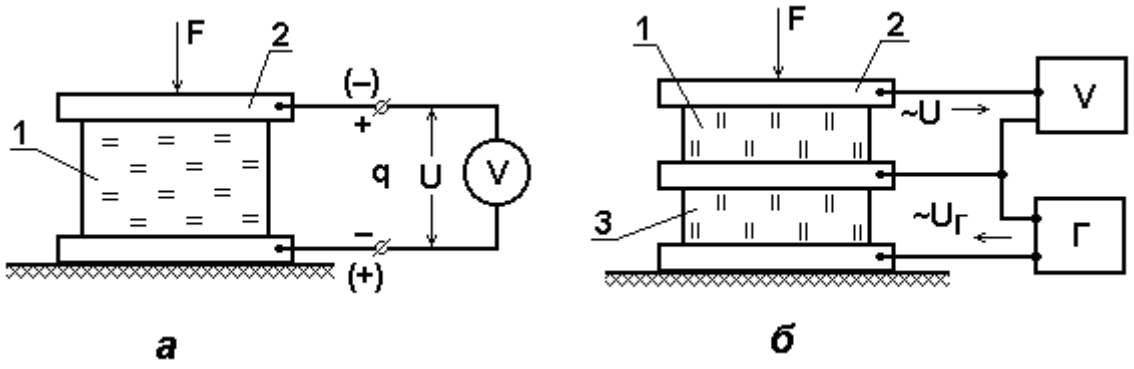


Рис. 9.17. Схемы пьезоэлектрических датчиков с одним (*а*) и двумя (*б*) пьезоэлементами: 1 – измерительные пьезоэлементы; 2 – контактные пластины; 3 – модуляционный пьезоэлемент; V – вольтметры; Г – генератор; F – сила; U – измеряемое напряжение; $U_Г$ – напряжение на выходе генератора; q – электрический заряд

Напряжение на входе вольтметра (см. рис. 9.17, *а*) запишется в виде

$$U = \frac{q}{C_0 + C_1 + C_2}, \tag{9.18}$$

где C_0 – емкость пьезодатчика;

C_1 – емкость соединительных проводов;

C_2 – входная емкость вольтметра.

Значение заряда q, возникающего на пьезоэлементе при его деформации силой F, определяется соотношением

$$q = \delta \cdot F \tag{9.19}$$

где δ – пьезомодуль.

Пьезомодуль δ зависит от материала пьезоэлемента. Например, для кварца $\delta \approx 10^{-12}$ Кл/Н; для пьезокерамики $\delta \approx 10^{-10}$ Кл/Н (табл. 9.8).

Возникающие при разовой деформации заряды стекают через входное сопротивление вольтметра и изоляцию проводников, что приводит лишь к кратковременным отклонениям вольтметра от нулевых показаний. Следовательно, пьезоэлектрические датчики по схеме рис. 9.17, *а* могут быть использованы для измерения только переменных величин (изменяющихся давлений, вибраций, ускорений и т.д.) и не пригодны для измерения статических величин.

Использование обратного пьезоэффекта позволяет строить модуляционные пьезодатчики, пригодные для измерения статических величин. Схема модуляционного пьезодатчика приведена на рис. 9.17, *б*.

Под воздействием переменного напряжения $U_Г$, подаваемого на модуляционный пьезоэлемент, последний начинает деформироваться («вибрировать») с частотой поданного напряжения. Возникшая вибрация передается на измерительный пьезоэлемент и приводит к его деформации. Причем значения деформации и, следовательно, напряжения U зависят и от «вибраций», и от значения силы F, воздействующей на систему из двух пьезоэлементов. В целом получается модуляционный пьезодатчик, пригодный для измерения статических величин.

Возможно включение одного пьезоэлемента – резонатора, в котором используются одновременно прямой и обратный пьезоэффекты. При включении такого пьезоэлемента в резонансный контур генератора частота генерируемых электрических колебаний будет определяться геометрическими размерами пьезоэлемента. При изменении геометрических размеров под воздействием, например, механических сил собственная резонансная частота пьезоэлемента изменится и соответственно изменится частота генерируемых колебаний. Этот принцип используется при измерении с помощью пьезодатчиков статических и динамических усилий, давлений и других величин, с предварительным преобразованием этих величин в частоту электрических сигналов.

Характеристики пьезодатчиков и значения коэффициентов, связывающих электрические и механические параметры, зависят от материала используемого пьезоэлемента, от его размеров и от типа среза. Для характеристики типа среза применяется условное буквенно-цифровое обозначение. От типа среза зависит характер воздействия на пьезоэлемент (продольное, поперечное, кручение, изгиб), на которое он реагирует в наибольшей степени. Характеристики некоторых материалов приведены в табл. 9.8. Пьезомодуль δ, приведенный в табл. 9.8, соответствует деформации пьезоэлемента по толщине (для турмалина – по объему) и срезу материала, обеспечивающему максимальное значение пьезомодуля

(при другом срезе и другом виде деформации рассматриваемый пьезомодуль имеет меньшее значение).

Таблица 9.8

Характеристики некоторых пьезоматериалов

Материал	ε	δ, 10^{-12} Кл/Н	$R_М$, 10^3 Ом·м	$F_Д$, 10^6 Н/м^2	Допускаемая температура, °С
Кварц	4,5	2,3	>1000	98	550
Турмалин	6,6	2,4	>100	–	–
Керамика А	1700	190	>100	80	70
Керамика В	1200	140	>100	80	70
TCL 1	1400	150	>30	–	70

Примечания: ε – относительная диэлектрическая проницаемость (при отсутствии деформации); $R_М$ – удельное объемное сопротивление; $F_Д$ – допустимое напряжение.
Более подробно с пьезоэлектрическими датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [1, 3, 32, 37]).

9.4.3. Индукционные датчики

Действие датчиков этой группы основано на использовании законов электромагнитной индукции.

По принципу действия индукционные датчики можно подразделить на две группы. В датчиках первой группы магнитное сопротивление на пути магнитного потока остается неизменным, а ЭДС наводится в катушке за счет ее перемещения (рис. 9.18, *а*) или за счет перемещения постоянного магнита (рис. 9.18, *б*). В датчиках второй группы как катушка, так и постоянный магнит неподвижны, а индуцированная ЭДС наводится за счет изменения полного магнитного сопротивления магнитной цепи (рис. 9.18, *в*).

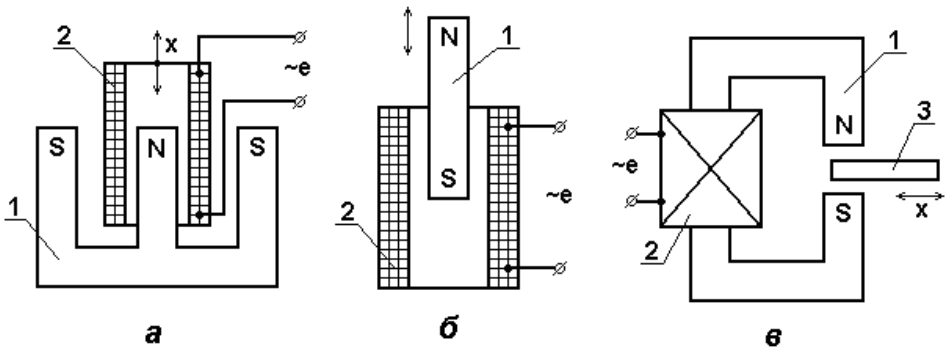


Рис. 9.18. Схемы индукционных датчиков: 1 – постоянный магнит;
2 – катушка с числом витков *w*; 3 – сердечник из магнитомягкого материала

Наводимая в катушке индукционного датчика ЭДС запишется в виде

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt}, \tag{9.20}$$

где e – значение ЭДС;

Ψ – потокосцепление;

t – время;

w – число витков катушки датчика;

Ф – магнитный поток.

Для первой группы датчиков наводимая ЭДС пропорциональна скорости движения катушки (или постоянного магнита) и определяется по формуле

$$e_1 = -Blw \cdot v_1, \tag{9.21}$$

где B – магнитная индукция;

l – средняя длина одного витка катушки;

w – число витков;

v_1 – скорость движения катушки (или постоянного магнита).

Для датчиков второй группы изменение магнитного сопротивления магнитопровода осуществляется изменением воздушного зазора или с помощью подвижных ферромагнитных сердечников различной формы (как показано, например, на рис. 9.18, *в*).

При линейном изменении магнитного потока Ф в зависимости от значения воздушного зазора (или от положения подвижного сердечника) наводимая в катушке ЭДС определяется соотношением

$$e_2 = -k_2 \cdot v_2, \tag{9.22}$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности;

v_2 – скорость изменения воздушного зазора или подвижного сердечника.

В общем случае значение ЭДС (см. выражение (9.20)) в зависимости от величины воздушного зазора (или положения подвижного сердечника) может быть нелинейным (или функциональным). Значение ЭДС в этом случае запишется в виде

$$e_3 = -k_3 \cdot f(x), \tag{9.23}$$

где k_3 – коэффициент пропорциональности;

x – величина воздушного зазора (или координата подвижного сердечника).

Непосредственно индукционные датчики могут применяться при измерении скорости линейного или углового перемещения, а также параметров, которые можно преобразовать в скорость (переменные усилия, переменные давления и т. п.). Совместно с интегрирующими и дифференцирующими элементами индукционные датчики можно использовать для измерения линейных или угловых перемещений и ускорений.

Индукционные датчики могут иметь частотный выход. В качестве частотного датчика индукционный датчик может иметь исполнение, например, в виде тахогенератора переменного тока. Частота напряжения, генерируемого таким генератором, определяется по формуле

$$f = \frac{p \cdot n}{60}, \tag{9.24}$$

где p – число пар полюсов тахогенератора;

n – число оборотов в минуту.

Таким образом, индукционный частотный датчик преобразует угловую скорость вала в частоту переменного тока.

Более подробно с индукционными датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [1, 3, 32, 38]).

9.4.4. Датчики Холла

Датчики этого типа используют эффект Холла, заключающийся в возникновении ЭДС на боковых гранях помещенной в магнитное поле проводящей пластинки, если по ней протекает ток (рис. 9.19).

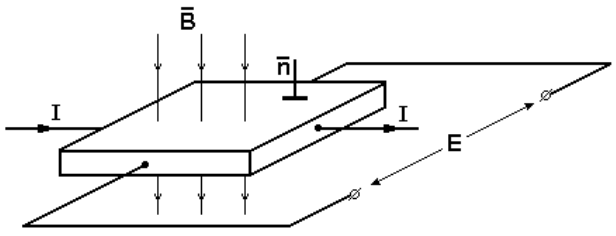


Рис. 9.19. Схема датчика Холла: I – значение тока; $\bar{B}$ – вектор магнитной индукции; E – ЭДС Холла; $\bar{n}$ – нормаль к плоскости датчика

Величина ЭДС Холла определяется выражением

$$E = \frac{1}{h} \cdot R_x \cdot I \cdot B \cdot \cos(\overline{B}\,\overline{n}), \qquad (9.25)$$

где h – толщина пластины;

R_x – постоянная Холла;

$(\widehat{\overline{B}\quad\overline{n}})$ – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости датчика.

Особенно значителен эффект Холла для германия (Ge), кремния (Si) и для некоторых других материалов. Постоянные Холла для полупроводниковых материалов имеют значения $(10^{-2}–10^{-4})$ м^3/(А·с), в то время как для чистых металлов – $(10^{-9}–10^{-12})$ м^3/(А·с). Например, для меди $R_x = 6 \cdot 10^{-11}$ м^3/(А·с).

Чувствительные элементы датчиков Холла имеют вид тонких пластинок (h = 0,01÷0,02 мм), которые вырезают из монокристаллов и шлифовкой доводят до необходимой толщины. Хорошими метрологическими характеристиками отличаются пленочные преобразователи Холла из тонких поликристаллических пленок на стеклянных подложках.

ЭДС Холла, как видно из выражения (9.25), пропорциональна произведению двух входных величин – тока и магнитной индукции. Соответственно датчики Холла можно использовать для измерения тока (I) или магнитной индукции (B). При этом другая («неизмеряемая величина») должна быть известна. При постоянных во времени I и B ЭДС Холла также постоянна. Если же одна из входных величин (B или I) переменная, то ЭДС Холла будет также переменной величиной с той же частотой, что и входная величина.

Данные по некоторым стандартным датчикам Холла приведены в табл. 9.9.

Таблица 9.9

Характеристики датчиков Холла

Тип	Номинальный ток, мА	Чувствительность по магнитной индукции, В/Тл	Входное сопротивление, Ом	Диапазон рабочих температур, °С	Размеры, мм	Материал
Х–111	10	0,20–0,45	30–180	-40…+80	1,5×0,8×0,2	Германий
Х–211	100	0,06–0,15	0,5–5	-60…+90	1,5×0,8×0,2	Арсенид индия
ДХГ–2	13–15	0,45	220–320	-60…+70	6×3×0,15	Германий
ДХК–14	6–9	0,6	500–1000	-150…+200	6×3×0,2	Кремний

Достоинством приборов на основе эффекта Холла является возможность измерения как постоянных, так и переменных токов, как постоянных, так и переменных магнитных индукций. Датчики Холла имеют малые размеры, что обеспечивает им хорошее пространственное разрешение. Недостатком является сравнительно большая зависимость ЭДС Холла от температуры. Основная погрешность обычно составляет от долей до единиц процентов, диапазон измерений – от тысячных долей до единиц тесла.

Более подробно с датчиками Холла можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [32, 37]).

9.4.5. Трансформаторные датчики

Трансформаторные датчики представляют собой трансформаторы, у которых под влиянием входного сигнала изменяются взаимные индуктивности обмоток, что приводит к изменению вторичного выходного напряжения.

Различают два вида трансформаторных датчиков: с подвижным сердечником и с подвижной обмоткой.

Датчики первого вида, в свою очередь, подразделяются на датчики с замкнутой и разомкнутой магнитными системами. По аналогии с индуктивными датчиками рассматриваемые датчики могут быть нормальными и диффе-

ренциальными, короткоходовыми и длинноходовыми. Примеры трансформаторных датчиков различного исполнения приведены на рис. 9.20.

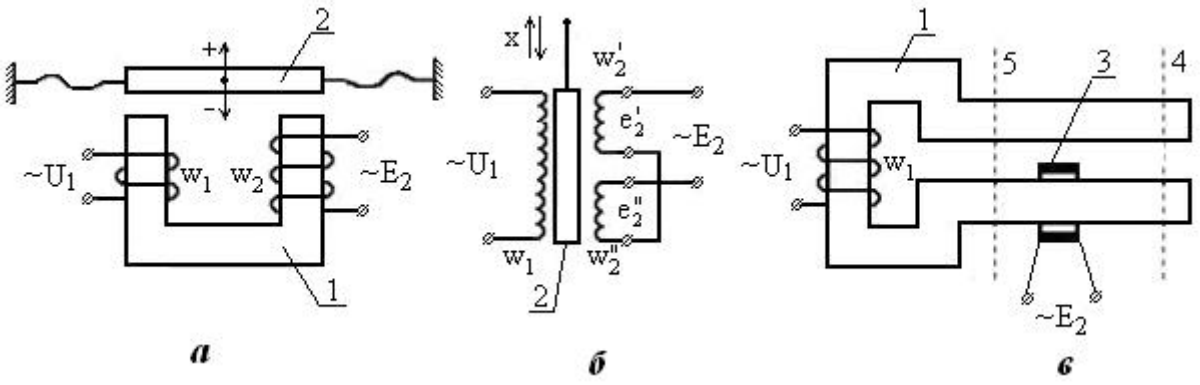


Рис. 9.20. Схемы трансформаторных датчиков: 1 – магнитопроводы из магнитомягкого материала; 2 – сердечники из магнитомягкого материала; 3 – подвижная катушка с числом витков w_2 (перемещается от положения 4 до положения 5)

На рис. 9.20, *а* изображен одинарный короткоходовый трансформаторный датчик нормального исполнения с замкнутым магнитопроводом. На первичную обмотку w_1 этого датчика подается от источника питания переменное напряжение U_1. Наводимая во вторичной обмотке ЭДС E_2 запишется в виде

$$E_2 = \omega \cdot \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{F}{Z_м} = f(x) \quad , \tag{9.26}$$

где ω – угловая частота;

w_1 – число витков первичной обмотки;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

F – магнитодвижущая сила;

$Z_М$ – магнитное сопротивление;

x – координата сердечника.

Таким образом, выходная ЭДС E_2 рассматриваемого датчика зависит от положения его сердечника, т. е. датчик преобразует перемещение сердечника в ЭДС E_2 (чем ближе сердечник к магнитопроводу, тем E_2 больше; чем дальше сердечник от магнитопровода, тем E_2 меньше). График зависимости $E_2 = f(x)$ приведен на рис. 9.21, *а*.

На рис. 9.20, *б* изображен дифференциальный длинноходовый датчик с разомкнутым магнитопроводом.

На первичную обмотку w_1 этого датчика подается переменное напряжение U_1. Во вторичной обмотке w'_2 наводится ЭДС e'_2, а во вторичной обмотке w''_2 наводится ЭДС e''_2. Благодаря встречному включению вторичных обмоток выходная ЭДС E_2 запишется в виде

$$E_2 = e'_2 - e''_2 = f(x), \tag{9.27}$$

где x – координата сердечника датчика.

Очевидно, что при некотором среднем положении сердечника $e'_2 = e''_2$ и $E_2 = 0$. При перемещении сердечника «вверх» (в сторону «+x») ЭДС e'_2 становится больше ЭДС e''_2 и $E_2 \neq 0$. При перемещении сердечника «вниз» (в сторону «–x») ЭДС e''_2 становится больше ЭДС e'_2 и $E_2 \neq 0$. График зависимости $E_2 = f(x)$ приведен на рис. 9.21, *б*.

На рис. 9.20, *в* изображен трансформаторный датчик с подвижной катушкой, которая может перемещаться от положения 4 до положения 5 вдоль магнитопровода. Наводимая в подвижной катушке ЭДС E_2 зависит от взаимной индуктивности между обмоткой этой катушки (являющейся вторичной) и обмоткой первичной катушки, на которую подается питающее переменное напряжение U_1. Датчик (рис. 9.20, *в*) предназначен для измерения больших линейных перемещений и, кроме катушек, содержит магнитопровод с рабочей частью в виде двух параллельных полос. При перемещении обмотки 3 от положения 4 до положения 5 индуцированная в обмотке 3 ЭДС возрастает. Зависимость ЭДС E_2 от координаты подвижной катушки «x» близка к линейной, если магнитное сопротивление участка магнитопровода 4–5 мало по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора. График зависимости $E_2 = f(x)$ для рассматриваемого датчика приведен на рис. 9.21, *в*.

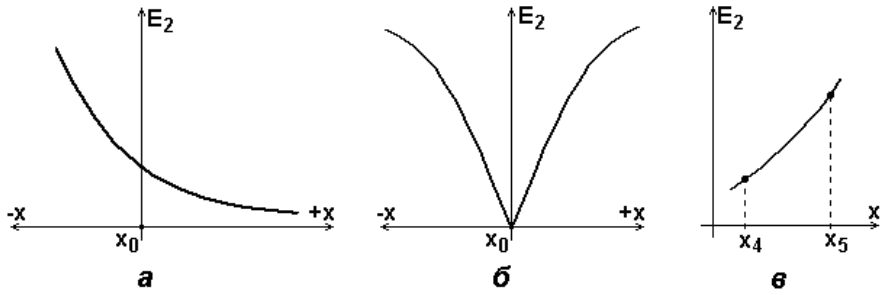


Рис. 9.21. Графики статических характеристик преобразования трансформаторных датчиков: *а* – для датчика нормального исполнения (рис. 9.20, *а*); *б* – для датчика дифференциального исполнения (рис. 9.20, *б*); *в* – для датчика с подвижной катушкой (рис. 9.20, *в*)

Трансформаторные датчики применяют для измерения линейных и угловых перемещений, а также для измерения физических величин, которые могут быть преобразованы в линейное или угловое перемещение (например, для измерения давления, расхода, силы и т. п.).

Трансформаторные датчики имеют много общего с датчиками индуктивными (область применения, достоинства, недостатки, конструкция и т. д.), но имеют и ряд преимуществ перед индуктивными датчиками. Их преимущества перед последними: отсутствие необходимости в использовании измерительных схем и отсутствие гальванической связи между цепями выхода и питания. К недостаткам трансформаторных датчиков следует отнести наличие температурных погрешностей, а также погрешностей от воздействия внешних электромагнитных полей и ферромагнитных тел. Существует даже ряд исполнений трансформаторных датчиков, реагирующих на приближение ферромагнитных тел и снабженных схемой с релейным выходом (реле близости).

Более детально с трансформаторными датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [1, 3, 32, 37]).

В настоящем учебном пособии рассмотрены наиболее распространенные типы датчиков, но далеко не все из известных датчиков и их разновидностей. Не рассмотрены в учебном пособии: ионизационные датчики, электромашинные, механотронные, струнные, электролитические, оптоэлектронные, магниторезистивные, электрохимические и некоторые другие. Часть из этих датчиков (например, ионизационные) рассматриваются в других учебных курсах, часть

из них (например, оптоэлектронные) являются разновидностью рассмотренных датчиков, часть носит узко специальный характер, а часть – сравнительно редко используется на практике. При необходимости со всеми перечисленными датчиками можно познакомиться по библиографическому списку, приведенному в конце учебного пособия (см., например, [3, 37, 38]).

9.5. Тенденции развития датчикостроения

Тенденции в развитии построения датчиков подчинены основным требованиям, которые предъявляются к современным средствам измерений: высокая точность и надежность, взаимозаменяемость отдельных узлов и элементов, самонастройка, устойчивость к внешним воздействиям, малые габариты и т. п.

Для реализации перечисленных требований постоянно совершенствуется технология изготовления датчиков и используются новые принципы их построения. Все шире в датчикостроении применяется интегральная микросхемная технология, все чаще датчики изготавливаются с использованием «*p*-*n*»-переходов, монокристаллов, тонких пленок. Применение, например, полупроводниковых материалов позволяет в ряде случаев значительно увеличить чувствительность и быстродействие датчиков, а также уменьшить их габариты и вес. Усовершенствование технологии и получение новых полупроводников на основе, например, кремния и арсенида галлия позволит в дальнейшем улучшить и другие характеристики датчиков (стабильность, повторяемость характеристик, устойчивость, взаимозаменяемость и т. п.).

Большие возможности имеет использование принципиально новых (по своим свойствам) материалов. К таким материалам, кроме уже упомянутых, можно отнести классические сверхпроводники и высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). Отметим, что классическая сверхпроводимость открыта голландским физиком Камерлинг-Оннесом в 1911 г. и проявляется при температурах, близких к температуре абсолютного нуля (например, при температуре жидкого гелия). В силу этого практическое использование данных материалов затруднено. Более перспективны ВТСП. Высокотемпературная сверхпроводимость, открытая в 1986 г., проявляется при температурах близких к температуре

жидкого азота. Например, материал $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ переходит в сверхпроводящее состояние при температуре около 90 К (–183 ^{0}C). Графики зависимостей $R = f(T)$ для этого материала приведены на рис. 9.22.

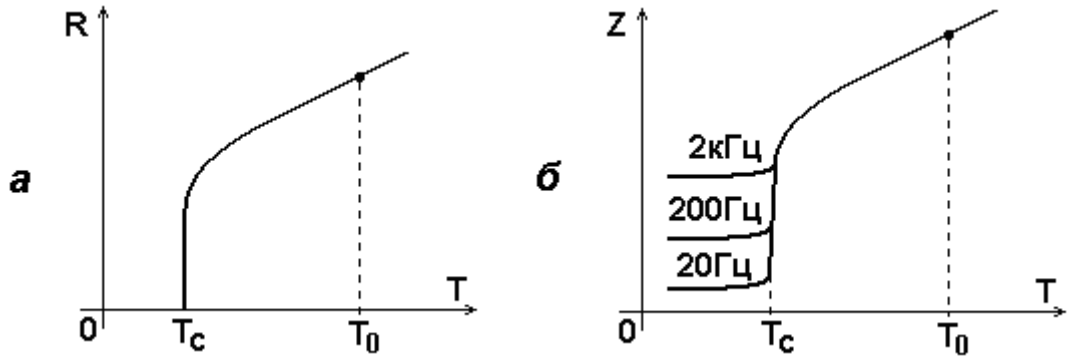


Рис. 9.22. Графики зависимостей $R = f(T)$ и $Z = f(T)$ для материала $YBa_2Cu_3O_{7-x}$: *а* – измерения на постоянном токе; *б* – измерения на переменном токе

На рис. 9.22 приняты следующие обозначения: R – электрическое сопротивление; T – абсолютная температура в кельвинах (К); T_0 – исходная (комнатная) температура (T_0 = 373 К); T_C – критическая температура, при которой исследуемый материал переходит в сверхпроводящее состояние.

Отметим, что характер рассматриваемых зависимостей существенно изменяется при переходе от постоянного тока (рис. 9.22, *а*) к переменному (рис. 9.22, *б*). Если на постоянном токе при температуре T_C рассматриваемый материал переходит в сверхпроводящее состояние, то на переменном токе этого не происходит. На переменном токе следует рассматривать полное сопротивление $Z = R+jX$, где R – активная составляющая, а X – реактивная составляющая полного сопротивления. На переменном токе тоже есть «сверхпроводящий переход» при температуре материала T_C, но сверхпроводимость не наступает. За счет реактивной составляющей при T_C (и более низких температур) всегда имеется «остаточное сопротивление». Причем значение остаточного сопротивления растет с ростом частоты переменного тока, протекающего по исследуемому материалу (см. рис. 9.22, *б*). Описанные ВТСП благодаря их уникальным свойствам вполне могут послужить основой для построения датчиков нового поколения с новыми, присущими только им, характеристиками.

10. ДИНАМИКА ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

10.1. Исходные данные

В данной главе учебного пособия рассмотрена динамика термочувствительных датчиков при измерении с их помощью температуры окружающей среды. Представлено два случая: при изменении измеряемой температуры скачком и при ее изменении по линейному закону. Схема размещения датчика и принятые обозначения приведены на рис. 10.1.

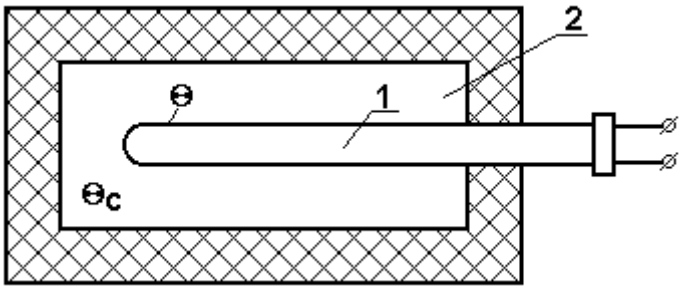


Рис. 10.1. Схема размещения датчика: 1 – датчик; 2 – среда (жидкость, газ), температура которой измеряется; θ – температура датчика; θ_C – температура среды

Датчики температуры (например, терморезисторы или термопары) обычно имеют защитные чехлы, предохраняющие их от различных механических и химических воздействий. Наличие защитных чехлов значительно повышает инерционность датчиков, что приводит к росту «отставания» его температуры от температуры окружающей среды. Это обстоятельство еще раз подчеркивает большое значение анализа динамических свойств датчиков температуры.

Для облегчения анализа примем ряд допущений. Будем полагать, что присутствие датчика не изменяет температуру окружающей среды и что рассматривается некоторая усредненная тепловая инерция датчика без разделения ее на тепловую инерцию чувствительного элемента, защитного чехла (одного или нескольких) и наполнителя, находящегося между защитным чехлом и чувствительным элементом, т. е. будем полагать, что рассматривается некоторый идеальный датчик, для которого правомерны допущения:

1) датчик монолитный и однородный;
2) термочувствительный элемент занимает весь объем датчика.

Конструкция стандартных датчиков с защитной арматурой не соответствует принятым допущениям (нет монолитности, однородности, и термочувствительный элемент занимает часть объема датчика).

Принятым допущениям соответствуют датчики, схемы которых приведены на рис. 10.2.



Рис. 10.2 Схемы идеальных термочувствительных датчиков:
а – терморезистор; *б* – термопара; θ – температура датчика; θ_C – температура среды

Для вывода дифференциального уравнения, описывающего изменение температуры датчика, предполагаем, что датчик с температурой θ помещается в среду с температурой θ_C. При этом на нагрев датчика будет расходоваться тепло dQ_1, связанное с параметрами датчика и его температурой соотношением

$$dQ = m \cdot c \cdot d\theta, \qquad (10.1)$$

где m – масса датчика;

c – удельная теплоемкость материала датчика.

Тепло dQ_2, передаваемое датчиком среде, определяется соотношением

$$dQ_2 = S \cdot \beta \cdot (\theta_c - \theta) dt \qquad (10.2)$$

где S – площадь поверхности датчика;

β – коэффициент теплопередачи;

t – время.

Условие теплового равновесия $dQ_1 = dQ_2$ запишется в виде

$$m \cdot c \cdot d\theta = S \cdot \beta \cdot (\theta_c - \theta) dt \qquad (10.3)$$

Выражение (10.3) может быть приведено к виду

$$T \cdot \dot{\theta} + \theta = \theta_c, \qquad (10.4)$$

где $T = \dfrac{m \cdot c}{S \cdot \beta}$ – постоянная времени;

$\dot{\theta} = \dfrac{d\theta}{dt}$ – первая производная от θ по времени.

Отметим, что T имеет размерность времени, а соотношение (10.4) является дифференциальным уравнением, описывающим поведение датчика температуры в динамическом режиме.

Выражение (10.4) правомерно для «идеальных» датчиков (см. рис. 10.2) и для принятых допущений. При наличии, например, защитного чехла появляется время чистого запаздывания, а при использовании многослойной изоляции кроме чистого запаздывания усложняется и зависимость $\theta = f(t)$ (в дальнейшем $\theta(t)$); соответствующее дифференциальное уравнение имеет более сложный вид, чем соотношение (10.4). Более детально данный вопрос освещен в литературе [3, 27, 32].

10.2. Скачкообразное изменение температуры

Начальные условия

При скачкообразном изменении температуры среды, окружающей датчик (от 0 до θ_0, рис. 10.3), исследуемое дифференциальное уравнение (10.4) принимает вид

$$T \cdot \dot{\theta}(t) + \theta(t) = \theta_0 \qquad (10.5)$$

где θ_0 – постоянная величина.

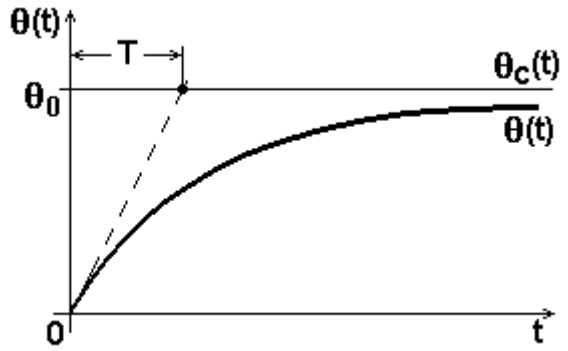


Рис. 10.3. Графики зависимостей θ_c (t) и θ (t) при скачкообразном изменении температуры окружающей датчик среды: $\theta_C(t)$ – температура окружающей среды; $\theta(t)$ – температура датчика

Начальные условия в рассматриваемом случае запишутся

для $t = 0$ $\theta(t) = 0$, $\theta_c = \theta_0$

Классический метод анализа

При классическом методе анализа дифференциального уравнения (10.5) решение имеет вид

$$\theta(t) = \theta_n(t)+\theta_y(t) \tag{10.6}$$

где $\theta_n(t)$ – характеризует переходный режим (общее решение);

$\theta_y(t)$ – характеризует установившийся режим (частное решение).

Общее решение исследуемого дифференциального уравнения (10.5) находится из однородного уравнения (10.7), на основе которого составляется характеристическое уравнение (10.8), имеющее корень λ (10.9).

$$T\cdot\lambda+1 = 0 \tag{10.8}$$

$$\lambda = -\frac{1}{T} \tag{10.9}$$

В данном случае характеристическое уравнение имеет один вещественный корень, и соответственно $\theta_n(t)$ имеет вид

$$\theta_n(t) = B\cdot e^{\lambda t} = B\cdot e^{-t/T} \tag{10.10}$$

где B – постоянная интегрирования.

Значение $\theta_y(t)$ определяется видом правой части исходного уравнения (10.5). При постоянной правой части (что имеет место в рассматриваемом случае) $\theta_y(t)$ – тоже постоянная величина:

$$\theta_y(t) = C \tag{10.11}$$

Таким образом, $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ запишутся в виде

$$\theta(t) = B\cdot e^{-t/T} + C \tag{10.12}$$

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{1}{T}\cdot B\cdot e^{-t/T} + 0 \tag{10.13}$$

Подставляя значения $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ в (10.7), получим

$$T\left(-\frac{1}{T}\cdot B\cdot e^{-t/T}\right) + B\cdot e^{-t/T} + C = \theta_0$$

или

$$-B\cdot e^{-t/T} + B\cdot e^{-t/T} + C = \theta_0$$

После приведения подобных (в последнем соотношении) определяется значение $C = \theta_0$.

Подставляя значение $C = \theta_0$ в (10.12), получим

$$\theta(t) = B \cdot e^{-t/T} + \theta_0 .$$

Для нахождения постоянной интегрирования «В» воспользуемся начальными условиями (при $t = 0$ $\theta(t) = 0$).

$$0 = B \cdot e^{0} + \theta_0 .$$

Учитывая, что $e^0 = 1$, находим, что постоянная интегрирования $B = -\theta_0$.

Итак, окончательно решение дифференциального уравнения (10.5) запишется в виде

$$\theta(t) = -\theta_0 \cdot e^{-t/T} + \theta_0 = \theta_0 (1 - e^{-t/T}) . \qquad (10.14)$$

Таким образом, при скачкообразном изменении температуры окружающей среды температура датчика изменяется по экспоненциальному закону. График зависимости $\theta = f(t)$ в соответствии с выражением (10.14) приведен на рис. 10.3.

Отметим, что с погрешностью ±5 % переходный процесс заканчивается за время, равное трем постоянным времени датчика T, т. е. через $t = 3T$ можно считать, что с указанной погрешностью температура датчика становится равной температуре окружающей среды.

За время $t = 5T$ переходный процесс заканчивается с погрешностью ±1 %.

Другими словами, за время $3T$ проходит 95 % переходного процесса, а за время $5T$ проходит 99 % переходного процесса.

Таким образом, постоянная времени T характеризует тепловую инерционность датчика. При больших T датчик медленно реагирует на изменения температуры окружающей среды, а при малых T датчик быстро «отрабатывает» изменения температуры.

В паспортных данных датчиков обычно приводятся значения не постоянной времени T, а значения близкой к ней величины, называемой «показатель тепловой инерции (ПТИ)». *ПТИ* по определению – это время, необходимое для

того, чтобы при внесении датчика в среду с постоянной температурой разность температур среды и любой точки внесенного в нее датчика стала равной 0,37 того значения, которое она имела бы в момент наступления регулярного теплового режима [51].

Различают датчики малоинерционные (ПТИ<10 секунд), датчики средней инерционности (ПТИ от 10 до 60 секунд) и датчики большой инерционности (ПТИ>60 секунд).

Метод определения показателя тепловой инерции изложен в литературе (см., например, [27]) и в настоящем учебном пособии не рассматривается. Значения показателя тепловой инерции для различных типов датчиков приведены, например, в справочнике [37].

Операторный метод анализа

При операторном методе решения дифференциального уравнения (10.5) необходимо его представить в виде операторного изображения, используя для этого преобразование Лапласа (подробней см. в литературе [29–32]):

$$T\cdot[p\cdot\theta(p)-\theta(0)]+\theta(p)=\theta_0/p \qquad (10.15)$$

где $\theta(p)$ – изображение по Лапласу оригинала $\theta(t)$;

$\theta(0)$ – значение $\theta(t)$ при $t = 0$.

Начальные условия для рассматриваемого уравнения сформулированы выше (отметим, что при $t = 0$ $\theta(0) = 0$; $\theta_c(0) = \theta_0$.

Решая уравнение (10.15) относительно $\theta(p)$ с учетом начальных условий, получим

$$\theta(p)=\frac{\theta_0}{p(Tp+1)} \qquad (10.16)$$

Для перехода от изображения $\theta(p)$ к оригиналу $\theta(t)$ воспользуемся данными табл. 10.1.

Таблица 10.1

Значения оригиналов и их изображений по Лапласу

№ п/п	Оригинал	Изображение
1	2	3
1	A	$\frac{A}{p}$
2	t	$1/p^2$
3	$f(t)$	$F(p)$
4	$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{p+\alpha}$
6	$t \cdot e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{(p+\alpha)^2}$
7	$\frac{t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} + \frac{e^{-\alpha t}}{\alpha^2}$	$\frac{1}{p^2(p+\alpha)}$
5	$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{\alpha}{p(p+\alpha)}$

Для приведения выражения (10.16) к табличному виду разделим числитель и знаменатель этого выражения на величину T. При этом равенство (10.16) принимает вид

$$\theta(p) = \theta_0 \frac{1/T}{p(p+1/T)} \qquad (10.17)$$

Выражение (10.17) соответствует табличному значению изображения, приведенного в таблице под номером «5» (при $a = 1/T$).

Тогда в соответствии с таблицей оригинал изображения (10.17) запишется в виде

$$\theta(t) = \theta_0(1 - e^{-t/T}). \qquad (10.18)$$

Выражение (10.18) полностью совпадает с выражением (10.14), которое получено классическим методом. Соответственно полностью правомерны выводы по результатам решения дифференциального уравнения (10.5), сделанные выше.

10.3. Линейное изменение температуры

Начальные условия

При линейном изменении температуры окружающей среды, окружающей датчик (рис. 10.4), исследуемое дифференциальное уравнение (10.4) принимает следуюший вид:

$$T \cdot \dot{\theta}(t) + \theta(t) = \theta_0 + b \cdot t \qquad (10.19)$$

где b – коэффициент, характеризующий скорость линейного изменения температуры окружающей среды.

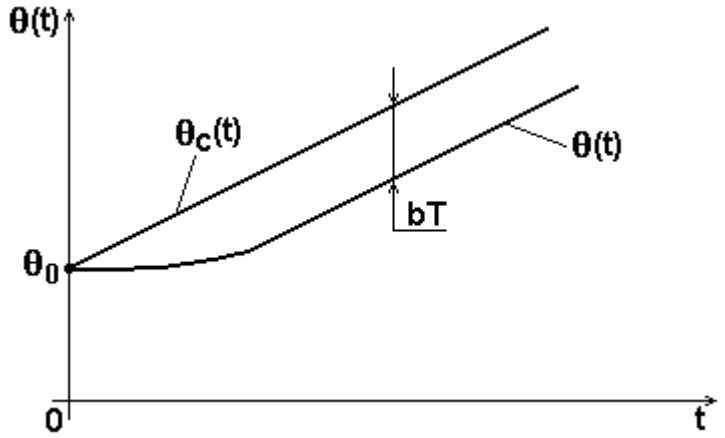


Рис. 10.4. Графики зависимостей $\theta_c(t)$ и $\theta(t)$ при линейном изменении температуры окружающей среды: $\theta_c(t)$ – температура окружающей среды; $\theta(t)$ – температура датчика

Начальные условия в рассматриваемом случае запишутся

для $t = 0$ $\theta(t) = 0$, $\theta_c = \theta_0$

Классический метод анализа

При классическом методе анализа дифференциального уравнения (10.19) остаются в силе положения, изложенные выше.

Величины $\theta_n(t)$ и $\theta_y(t)$ при этом принимают вид

$$\theta_n(t) = B \cdot e^{-t/T}, \qquad (10/20)$$

$$\theta_y(t) = C + D \cdot t, \qquad (10.21)$$

где B – постоянная интегрирования;

C и D – постоянные коэффициенты.

Соответственно $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ и запишутся в виде

$$\theta(t) = B \cdot e^{-t/T} + C + D \cdot t\,, \tag{10.22}$$

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{1}{T} B \cdot e^{-t/T} + D\,. \tag{10.23}$$

Подставляя значения $\theta(t)$ и $\dot{\theta}(t)$ в исходное дифференциальное уравнение (10.19), получим

$$T\left[-\frac{1}{T} \cdot B \cdot e^{-\frac{t}{T}} + D\right] + B \cdot e^{-\frac{t}{T}} + C + D \cdot t = \theta_0 + b \cdot t\,. \tag{10.24}$$

Раскрыв скобки и выполнив приведение подобных, приводим выражение (10.24) к виду

$$T \cdot D + C + D \cdot t = \theta_0 + b \cdot t\,. \tag{10.25}$$

Уравнение (10.25) правомерно, если равны коэффициенты при переменной величине t, имеющей равные степени.

Отсюда получим:

для t^0 $$T \cdot D + C = \theta_0, \tag{10.26}$$

для t^1 $$D = b\,. \tag{10.27}$$

Совместное решение уравнений (10.26) и (10.27) дает значение коэффициента C:

$$C = \theta_0 - b \cdot T \tag{10.28}$$

Подставляя значения коэффициентов D и C в уравнение (10.28), получим

$$\theta(t) = B \cdot e^{-t/T} + \theta_0 - b \cdot T + b \cdot t\,. \tag{10.29}$$

Для определения постоянной интегрирования B воспользуемся начальными условиями (при $t = 0$ $\theta(0) = \theta_0$):

$$\theta_0 = B \cdot e^0 + \theta_0 - b \cdot T + b \cdot 0\,, \tag{10.30}$$

откуда получаем

$$B = b \cdot T\,. \tag{10.31}$$

В окончательном виде температура датчика запишется в виде

$$\theta(t) = \theta_0 + b \cdot t - b \cdot T(1 - e^{-t/T}). \qquad (10.32)$$

График зависимости $\theta = f(t)$ для рассматриваемого случая приведен на рис. 10.4.

Приведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1) при линейном изменении температуры окружающей среды температура датчика не равна этой температуре даже после окончания переходного процесса (при $t \to \infty$);

2) температура датчика меньше температуры окружающей среды на величину $b \cdot T$, где b – коэффициент, характеризующий скорость изменения температуры среды, а T – постоянная времени датчика, характеризующая его тепловую инерцию;

3) динамическая погрешность при измерении линейно изменяющейся температуры окружающей среды датчиком с постоянной времени T растет с ростом величин «b» и «T» и уменьшается при уменьшении величин «b» и «T».

Операторный метод анализа

В операторной форме уравнение (10.19) принимает вид

$$T\left[p \cdot \theta(p) - \theta(0)\right] + \theta(p) = \theta_0 / p + b / p^2, \qquad (10.33)$$

где $\theta(p)$ – изображение по Лапласу оригинала $\theta(t)$;

$\theta(0)$ – значение $\theta(t)$ при $t = 0$.

Начальные условия в рассматриваемом случае сформулированы выше (отметим, что при $t = 0$ $\theta(t) = \theta_0$; т. е. $\theta(0) = \theta_0$).

Решая уравнение (10.33) относительно $\theta(p)$ с учетом начальных условий, получим

$$\theta(p) = \frac{b + p \cdot \theta_0 + p^2 \cdot \theta_0 \cdot T}{p^2(Tp + 1)} \qquad (10.34)$$

или

$$\theta(p) = \frac{b}{p^2(Tp + 1)} + \frac{\theta_0}{Tp + 1} + \frac{\theta_0 \cdot T}{Tp + 1} \qquad (10.35)$$

Для приведения выражения (10.35) к табличному виду (см. табл. 10.1) разделим числитель и знаменатель этого выражения на величину T.

После деления на величину T и проведения необходимых преобразований выражение (10.35) примет вид

$$\theta(p) = \frac{b}{T} \cdot \frac{1}{p^2(p+1/T)} + \theta_0 \cdot \frac{1/T}{p(p+1/T)} + \theta_0 \cdot \frac{1}{p+1/T} \qquad (10.36)$$

Первый член выражения (10.36) соответствует изображению, приведенному в табл. 10.1 под номером 7, второй – под номером 5 и третий – под номером 4 (при $a = 1/T$).

Оригинал изображения (10.36) имеет вид

$$\theta(t) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{1/T} - \frac{1}{1/T^2} + \frac{e^{-t/T}}{1/T^2} \right) + \theta_0(1 - e^{-t/T}) + \theta_0 \cdot e^{-t/T} \qquad (10.37)$$

Раскрыв скобки и выполнив приведение подобных, окончательно получим

$$\theta(t) = \theta_0 + b \cdot t - bT(1 - e^{-t/T}) \qquad (10.38)$$

Выражение (10.38) целиком совпадает с выражением (10.32), полученным при анализе исследуемого дифференциального уравнения классическим методом. Соответственно полностью правомерны выводы, сделанные выше и для рассматриваемого случая при анализе дифференциального уравнения (10.19) операторным методом.

11. МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

11.1. Общие положения

В данной главе рассмотрены основные соотношения и терминология, используемые при анализе четырехплечих мостовых измерительных схем постоянного тока (рис. 11.1).

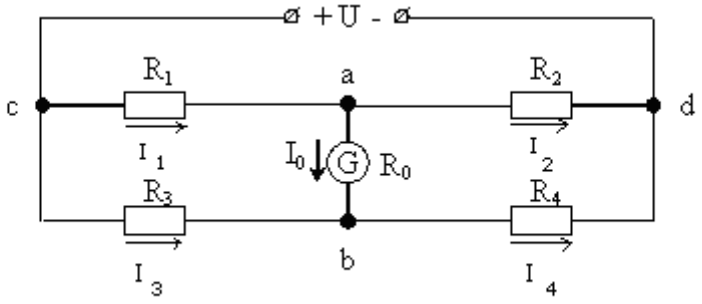


Рис. 11.1. Принципиальная электрическая схема четырехплечего измерительного моста: *U* – напряжение источника питания; *G* – измерительный прибор (например, микроамперметр магнитоэлектрической системы); *a–b* – измерительная диагональ; *c–d* – питающая диагональ; *c–a* – первое, *a–d* – второе, *c–b* – третье, *b–d* – четвертое плечи мостовой схемы; R_0 – внутренне сопротивление прибора в измерительной диагонали; I_0 – ток в измерительной диагонали

В рассматриваемом случае сопротивления плеч мостовой измерительной схемы равны R_1, R_2, R_3, R_4.

Ток в измерительной диагонали I_0 связан с остальными параметрами мостовой схемы соотношением

$$I_0 = U \cdot \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_0 (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_4)}. \qquad (11.1)$$

Соотношение (11.1) может быть получено путем анализа мостовой измерительной схемы, приведенной на рис. 11.1, одним из методов электротехники (например, с использованием первого и второго законов Кирхгофа). Выражение (11.1) обычно именуют основным соотношением для таковой мостовой измерительной схемы.

При равновесии мостовой схемы ток в измерительной диагонали I_0 тождественно равен нулю. Отметим также, что если в момент считывания показа-

ний ток $I_0 = 0$, то мостовая схема называется равновесной, а если в момент считывания показаний ток $I_0 \neq 0$, то мостовая схема называется неравновесной.

Если значение R_0 (см. рис. 11.1) во много раз превосходит каждое из сопротивлений плеч моста, то мостовая схема называется потенциальной. Для потенциальных мостовых измерительных схем обычно принимают $R_0 \to \infty$, что позволяет считать ток $I_0 = 0$ и в качестве выходной величины рассматривать напряжение на измерительной диагонали U_0.

В этом случае падение напряжения на измерительной диагонали $U_0 = U_{ab}$ запишется в виде

$$U_0 = U_{ab} = U_a - U_b, \tag{11.2}$$

где U_a – потенциал точки a;

U_b – потенциал точки b.

$$U_a = I_1 \cdot R_1 = R_1 \cdot \frac{U}{R_1 + R_2}, \tag{11.3}$$

$$U_b = I_3 \cdot R_3 = R_3 \cdot \frac{U}{R_3 + R_4}, \tag{11.4}$$

где U , R_1, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

Подставляя значения U_a и U_b в (11.2), получим

$$U_0 = U \frac{R_1(R_3 + R_4) - R_3 \cdot (R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \tag{11.5}$$

После раскрытия скобок и приведения подобных выражение (11.5) принимает вид

$$U_0 = U \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \tag{11.6}$$

Выражение (11.6) обычно именуют основным соотношением для потенциальной мостовой схемы.

При равновесии потенциальной мостовой схемы напряжение в измерительной диагонали U_0 тождественно равно нулю. Отметим также, что если в момент считывания показаний напряжение $U_0 = 0$, то любая мостовая схема на-

зывается равновесной, а если в момент считывания показаний напряжение $U_0 \neq 0$, то мостовая схема называется неравновесной.

Выражения (11.1) и (11.6) свидетельствуют, что как для токовой, так и для потенциальной мостовых измерительных схем равновесие наступает при выполнении условия

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{11.7}$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше.

Подробный анализ равновесных и неравновесных мостовых измерительных схем с выходом по току («токовые схемы») и с выходом по напряжению («потенциальные схемы») приводится ниже, в последующих главах учебного пособия.

Мостовые схемы с токовым выходом («токовые схемы») используются в том случае, когда внутреннее сопротивление измерительного прибора R_0 примерно равно каждому из сопротивлений плеч моста R_1, R_2, R_3, R_4 или отличается от них не более чем в 15–20 раз.

11.2. Основные соотношения при исследовании чувствительности

Для мостовых измерительных схем могут быть определены их чувствительности по мощности $S(P_0)$, по напряжению $S(U_0)$ и по току $S(I_0)$.

$$S(P_0) = \lim_{\Delta R \to 0} \frac{\Delta P_0}{\Delta R}, \tag{11.8}$$

$$S(U_0) = \lim_{\Delta R \to 0} \frac{\Delta U_0}{\Delta R}, \tag{11.9}$$

$$S(I_0) = \lim_{\Delta R \to 0} \frac{\Delta I_0}{\Delta R}, \tag{11.10}$$

где P_0, U_0, I_0 – соответственно мощность, напряжение и ток в измерительной диагонали;

ΔP_0, ΔU_0, ΔI_0 – изменения мощности, напряжения и тока в измерительной диагонали;

ΔR – изменение сопротивления датчика (вызвавшее изменение мощности, напряжения или тока в измерительной диагонали мостовой схемы).

При размещении датчика в 1–м плече мостовой схемы $\Delta R = \Delta R_1$, при размещении во 2–м плече $\Delta R = \Delta R_2$ и т. д. При размещении нескольких датчиков в одном, двух или нескольких плечах мостовой схемы ΔR имеет некоторое эквивалентное значение, зависящее от числа датчиков и от их размещения. Порядок определения эквивалентных значений ΔR рассмотрен ниже, в последующих главах учебного пособия.

Чувствительность по мощности, напряжению и току может быть оценена по приближенным формулам:

$$S(P_0) \approx \frac{\Delta P_0}{\Delta R}, \tag{11.11}$$

$$S(U_0) \approx \frac{\Delta U_0}{\Delta R}, \tag{11.12}$$

$$S(I_0) \approx \frac{\Delta I_0}{\Delta R}. \tag{11.13}$$

Чувствительность по мощности рассматривается в том случае, когда в измерительной диагонали включен прибор, внутреннее сопротивление которого соизмеримо с сопротивлениями плеч мостовой схемы. Например, при использовании приборов магнитоэлектрической системы, что обычно имеет место на практике, справедливо соотношение

$$\alpha = k \cdot \sqrt{\frac{P_0}{R_0}} \tag{11.14}$$

где α – показание прибора; k – постоянный коэффициент; P_0 – мощность, потребляемая прибором; R_0 – внутреннее сопротивление прибора.

Таким образом, при R_0 = const показания выходного прибора пропорциональны корню квадратному из мощности, потребляемой прибором.

Чувствительность по напряжению рассматривается в том случае, когда в измерительную диагональ включен прибор, внутреннее сопротивление которого значительно больше сопротивлений плеч мостовой схемы ($R_0 \to \infty$). На практике этот случай имеет место, когда в качестве измерителей используются, например, электронные вольтметры.

11.3. Основные соотношения при исследовании линейности

В данном параграфе учебного пособия приводятся основные соотношения при исследовании линейности четырехплечих мостовых измерительных схем (см. рис. 11.1) постоянного тока с выходом по току и по напряжению.

О линейности (или нелинейности) токовых мостовых измерительных схем можно судить по характеру зависимости (11.15), получаемой из (11.1) при изменении сопротивления датчика (или датчиков).

$$I_0 = f(\Delta R), \qquad (11.15)$$

где I_0 – ток в измерительной диагонали;

ΔR – изменение сопротивления датчика.

Линейность (или нелинейность) потенциальных мостовых измерительных схем характеризуется видом зависимости (11.16), получаемой из (11.16) при $\Delta R \neq 0$.

$$U_0 = f(\Delta R), \qquad (11.16)$$

где U_0 – напряжение на измерительной диагонали.

При анализе соотношений (11.15) и (11.14) обычно рассматривают несколько вариантов мостовых схем:

1) с одним датчиком ($\Delta R \neq 0$ в одном плече схемы);
2) с двумя датчиками ($\Delta R \neq 0$ в двух плечах схемы);
3) с тремя датчиками ($\Delta R \neq 0$ в трех плечах схемы);
4) с четырьмя датчиками ($\Delta R \neq 0$ в четырех плечах схемы).

Для анализа линейности неравновесных мостовых измерительных схем удобно принять следующие обозначения:

1) текущее сопротивление датчика в первом плече схемы $R_{g1} = R_1 + \Delta R_1$,
2) во втором плече $R_{g2} = R_2 + \Delta R_2$,
3) в третьем плече $R_{g3} = R_3 + \Delta R_3$,
4) в четвертом плече $R_{g4} = R_4 + \Delta R_4$,
5) где R_1, R_2, R_3, R_4 – начальные (исходные) сопротивления датчиков;
6) ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4 –изменение сопротивления соответствующих датчиков.

12. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ТОКОВЫЕ МОСТОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

12.1. Чувствительность токовых мостовых схем

12.1.1. Общие положения

Исследование чувствительности неравновесных токовых мостовых измерительных схем проводится при допущении, что используется один датчик, включенный в первое плечо мостовой схемы (рис. 12.1).

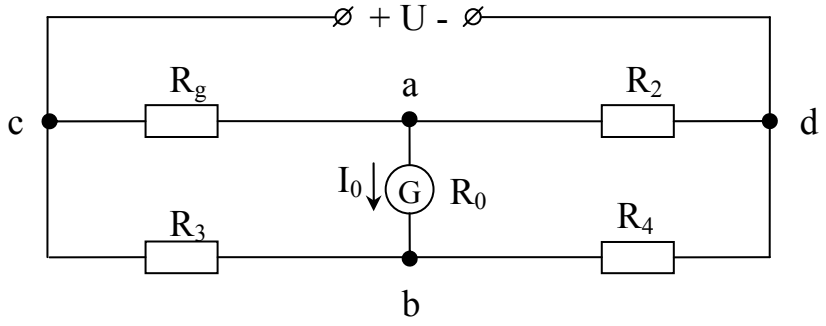


Рис. 12.1. Принципиальная схема неравновесного токового моста с одним датчиком

Для схемы, приведенной на рис. 12.1, ток в измерительной диагонали мостовой схемы I_0 имеет значение:

$$I_0 = U \frac{R_g R_4 - R_2 R_3}{R_0 (R_g + R_2)(R_3 + R_4) + R_g R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_g + R_2)}, \qquad (12.1)$$

где U – напряжение питания;

R_0 – сопротивление прибора в измерительной диагонали мостовой схемы;

R_g – сопротивление датчика;

R_2, R_3, R_4 – сопротивление плеч моста.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

1) сопротивление датчика R_g определяется соотношением

$$R_g = R_1 + \Delta R_1, \qquad (12.2)$$

где R_1 – начальное (исходное) сопротивление датчика;

ΔR_1 – изменение сопротивления датчика;

2) изменение сопротивления датчика много меньше сопротивления самого датчика, т. е.

$$\Delta R_1 << R_1, \tag{12.3}$$

где ΔR_1 и R_1 – определены выше;

3) в исходном состоянии мостовая схема уравновешена, т.е. справедливо равенство

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{12.4}$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше.

С учетом условий (12.2), (12.3) и (12.4) выражение (12.1) для тока I_0 в измерительной диагонали мостовой схемы принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{R_0(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_2(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + \Delta R_1 + R_4)}, \tag{12.5}$$

где I_0, U, R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, ΔR_1 – определены выше.

В зависимости от соотношения параметров различают следующие виды мостовых схем:

1) первой симметрии ($R_1 = R_2$; $R_3 = R_4$);

2) второй симметрии ($R_1 = R_3$; $R_2 = R_4$);

3) равноплечие ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$);

4) асимметричные ($R_1 \neq R_2$; $R_3 \neq R_4$).

Используя выражение (12.5), можно получить значения тока I_0 для каждого вида мостовых схем (для схем первой симметрии, второй симметрии, равноплечих и асимметричных).

Для схемы первой симметрии

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1}{2R_0(2R_1 + \Delta R_1) + 2R_1(R_1 + \Delta R_1) + R_4(2R_1 + \Delta R_1)} \tag{12.6}$$

Для схемы второй симметрии

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1}{R_0(R_1 + R_4 + \Delta R_1)(R_1 + R_4) + R_4(R_1 + \Delta R_1)(R_1 + R_4) + R_1 R_4 (R_1 + R_{4+}\Delta R_1)}. \tag{12.7}$$

Для равноплечей схемы

$$I_0 = U\frac{\Delta R_1}{2R_0\left(2R_1+\Delta R_1\right)+2R_1\left(R_1+\Delta R_1\right)+R_1\left(2R_1+\Delta R_1\right)}. \qquad (12.8)$$

Для асимметричной схемы

$$I_0 = U\frac{\Delta R_1}{R_0\left(R_1+R_2+\Delta R_1\right)\left(R_3+R_4\right)+R_2\left(R_1+\Delta R_1\right)\left(R_3+R_4\right)+R_3R_4\left(R_1+R_{2+}\Delta R_1\right)}. \qquad (12.9)$$

Считая, что $R_1 >> \Delta R_1$ и пренебрегая в силу этого значением ΔR_1 в знаменателе соотношений (11.4), (11.5), (11.6), (11.7), получим следующие уравнения:

для схемы первой симметрии

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1}{4R_0R_1+2R_1^2+2R_1R_4}; \qquad (12.10)$$

для схемы второй симметрии

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1R_4}{R_0\left(R_1+R_4\right)^2+2R_1R_4\left(R_1+R_4\right)}; \qquad (12.11)$$

для равноплечей схемы

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1}{4R_0R_1+4R_1^2}; \qquad (12.12)$$

для асимметричной схемы

$$I_0 = U\cdot\frac{\Delta R_1R_4}{R_0\left(R_1+R_2\right)+\left(R_3+R_4\right)+R_2R_1\left(R_3+R_4\right)+R_3R_4\left(R_1+R_2\right)}. \qquad (12.13)$$

где I_0, U, ΔR_1, R_0, R_1, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

Полученные соотношения (12.10), (12.11), (12.12) и (12.13) позволяют проанализировать рассматриваемые мостовые измерительные схемы с точки зрения их чувствительности и линейности. Соответствующие исследования приведены ниже, в последующей главе учебного пособия.

12.1.2. Основные соотношения

В главе 11 (пп. 11.1 и 11.2) показано, что чувствительность токовых мостовых схем при использовании электромеханических приборов для измерения тока I_0 тем выше, чем большая мощность выделяется в измерительной диагонали моста. Отсюда следует, что для токовых мостовых схем необходимо рас-

сматривать чувствительность по мощности (см. выражения (11.8) и (11.11), приведенные в п. 11.2 учебного пособия).

Тогда для рассмотренных схем (первой и второй симметрий, равноплечей и асимметричной) правомерны нижеследующие соотношения.

Схемы первой симметрии

Мощность, выделяемая в измерительной диагонали мостовой схемы, определяется соотношением

$$P_0 = I_0^2 \cdot R_0, \tag{12.14}$$

где I_0 – ток в измерительной диагонали;

R_0 – внутреннее сопротивление прибора, включенного в измерительную диагональ.

Значение тока I_0 для схемы первой симметрии оценивается по выражению (12.10), приведенному выше. Для дальнейшего анализа выражение (12.10) удобно преобразовать, разделив числитель и знаменатель на R_1 и введя обозначение $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$. Тогда выражение (12.10) примет вид

$$I_0 = U \frac{\varepsilon}{4R_0 + 2R_1 + 2R_4}, \tag{12.15}$$

где ε – относительное измерение сопротивления датчика.

Подставляя в (12.14) значение тока I_0, получим

$$P_0 = U^2 \varepsilon^2 \frac{R_0}{(4R_0 + 2R_1 + 2R_4)^2} \tag{12.16}$$

Как показано выше, чувствительность мостовой схемы по мощности $S(P_0)$ может быть оценена (при принятых допущениях) соотношением (12.17).

$$S(P_0) = \frac{P_0}{\Delta R_1}. \tag{12.17}$$

Таким образом, при ε = const чувствительность мостовой схемы прямо пропорциональна мощности, потребляемой в ее измерительной диагонали. Очевидно, что при ε = const $P_0 \rightarrow \max$ (см. (12.16), приведенное выше), если

$U \to \max$, а $R_4 \to 0$. Примем, что U =const и максимально возможно для рассматриваемой мостовой схемы, а $R_4 = 0$. Тогда выражение (12.16) принимает вид

$$P_0 = U^2 \varepsilon^2 \frac{R_0}{(4R_0 + 2R_1)^2}, \qquad (12.18)$$

где U = const, ε = const, R_1 = const.

Для оценки значения R_0 необходимо исследовать соотношение (12.18) на максимум. Для этого, как известно, надо найти производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравнять ее нулю.

$$\frac{dP_0}{dR_0} = U^2 \varepsilon^2 \frac{1 \cdot (4R_0 + 2R_1)^2 - R_0 \cdot 2 \cdot (4R_0 + 2R_1) \cdot 4}{(4R_0 + 2R_1)^2} = 0. \qquad (12.19)$$

Дробь равна нулю, если ноль – ее числитель. В числителе $U \neq 0$, $\varepsilon \neq 0$ (по условию). Приравниваем нулю оставшийся сомножитель числителя.

$$(4R_0 + 2R_1)^2 - 8R_0(4R_0 + 2R_1) = 0. \qquad (12.20)$$

$$(4R_0 + 2R_1)(4R_0 + 2R_1 - 8R_0) = 0. \qquad (12.21)$$

Если произведение двух сомножителей равно нулю, то ноль – один из сомножителей или равны нулю оба сомножителя.

Приравнивая к нулю первый сомножитель соотношения (12.21), получим $R_0 = -\frac{1}{2}R_1$ и, приравнивая к нулю второй сомножитель, получим $R_0 = \frac{1}{2}R_1$. Отрицательное значение сопротивления физического смысла не имеет, и отрицательный корень уравнения (12.21) отбрасывается.

Таким образом, при заданном исходном (начальном) сопротивлении датчика R, заданном и постоянном его абсолютном приращении ΔR (или заданном и постоянном относительном приращении ε) мостовая схема первой симметрии имеет максимальную чувствительность, если выполняются следующие условия:

$$U \to \max, R_2 = R_1, R_3 = R_4 \to 0, R_0 = \frac{1}{2}R_1.$$

Схемы второй симметрии

Мощность, выделяемая в измерительной диагонали мостовой схемы (независимо от вида симметрии), определяется соотношением (12.14), а ток в этой же диагонали для схемы второй симметрии – соотношением (12.11).

Для дальнейшего анализа выражение (12.11) удобно преобразовать, разделив числитель и знаменатель на $R_1 \cdot R_4$ и введя обозначение $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$.

В этом случае выражение (12.11) принимает вид

$$I_0 = U \frac{\varepsilon}{\frac{R_0}{R_1 \cdot R_4} \cdot \left(R_1 + R_4\right)^2 + 2\left(R_1 + R_4\right)}, \qquad (12.22)$$

где ε – относительное изменение сопротивления датчика.

Преобразуем принципиальную электрическую схему четырехплечего измерительного моста, представленную на рис. 12.1, и представим ее в виде схемы, приведенной на рис. 12.2.

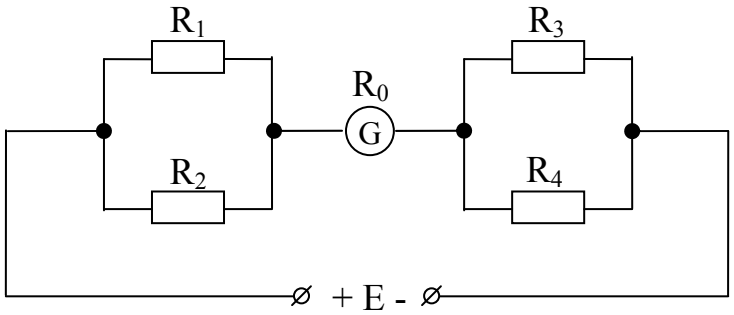


Рис. 12.2. Эквивалентная принципиальная схема четырехплечего моста постоянного тока

На схеме (см. рис. 12.2) величина E является некоторой эквивалентной ЭДС, зависящей от напряжения питания U и параметров мостовой схемы.

Рис. 12.2 позволяет заключить, что измеритель «G» питается через некоторое эквивалентное сопротивление $R_Э$, определяемое соотношением (12.3).

$$R_Э = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}. \qquad (12.23)$$

Учитывая, что для мостовой схемы второй симметрии $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$, получим

$$R_Э{}' = 2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4}. \qquad (12.24)$$

Для оптимального согласования нагрузки с сопротивлением источника сигнала необходимо, как известно, чтобы сопротивление нагрузки равнялось сопротивлению источника сигнала. В нашем случае необходимо, чтобы внутреннее сопротивление R_0 прибора G, являющегося нагрузкой для мостовой схемы, равнялось сопротивлению $R'_э$, являющемуся сопротивлением эквивалентного источника питания с ЭДС (Е).

$$R_0 = R'_Э = 2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4}. \qquad (12.25)$$

Подставляя найденное значение R_0 в (12.22), получим

$$I_0 = U \frac{\varepsilon}{4(R_1 + R_4)}. \qquad (12.26)$$

Подставляя найденное значение тока I_0 в (12.14), получим для мощности в измерительной диагонали:

$$P_0 = I_0^2 \cdot R_0 = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_1 \cdot R_4}{8\left(R_1 + R_4\right)^3} = 0. \qquad (12.27)$$

Для оценки значения R_4 необходимо исследовать соотношение (12.27) на максимум. Для этого, как известно, надо найти первую производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравнять ее нулю.

$$\frac{dP_0}{dR_4} = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_1 \cdot 8\left(R_1 + R_4\right)^3 - R_1 R_4 \cdot 24\left(R_1 + R_4\right)^2 \cdot 1}{64 \cdot \left(R_1 + R_4\right)^6} = 0. \qquad (12.28)$$

Решая уравнение (12.28) относительно R_4, получим

$$R_4 = \frac{2}{3} R_1. \qquad (12.29)$$

Подставляя найденное значение R_4 в (12.22), получим

$$R_0 = \frac{2}{3} R_1. \qquad (12.30)$$

Таким образом, при заданном начальном сопротивлении датчика R и принятых допущениях мостовая схема второй симметрии имеет максимальную чувствительность по мощности при $U \rightarrow \max$:

$$R_3 = R_1 R_4 = \frac{1}{2} R_1 R_0 = \frac{2}{3} R_1 .$$

Равноплечие мостовые схемы

Независимо от вида симметрии мощность P_0, выделяемая в измерительной диагонали мостовой схемы, определяется соотношением (12.14).

Ток I_0 в измерительной диагонали равноплечей мостовой схемы определяется соотношением (12.12).

Для дальнейшего анализа чувствительности рассматриваемой мостовой схемы по мощности удобно разделить числитель и знаменатель соотношения (12.12) на R_1 и ввести обозначение $\varepsilon = \frac{\Delta R_1}{R_1}$. В этом случае выражение для тока I_0 принимает вид

$$I_0 = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_0}{\left(4R_0 + 4R_1\right)}. \qquad (12.31)$$

Подставляя в (12.12) полученное значение тока I_0 (см. выражение (12.31), и приведенное выше), получим

$$P_0 = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{R_0}{\left(4R_0 + 4R_1\right)^2}. \qquad (12.32)$$

Для оценки значения R_0 необходимо исследовать на максимум полученное соотношение (12.32). Для этого найдем первую производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравняем ее нулю

$$\frac{dP_0}{dR_4} = U^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \frac{1\left(4R_0 + 4R_1\right)^2 - 2 \cdot \left(4R_0 + R_1\right) \cdot 4R_0}{\left(4R_0 + 4R_1\right)^4} = 0 . \qquad (12.33)$$

Решая уравнение (12.33) относительно R_0, получим

$$R_0 = R_1. \qquad (12.34)$$

Таким образом, при заданном сопротивлении датчика и принятых допущениях равноплечевая мостовая схема имеет максимальную чувствительность по мощности при $U \to \max$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$.

Асимметричные мостовые схемы

Независимо от вида симметрии мощность в измерительной диагонали мостовой схемы определяется соотношением (12.14), а ток в этой диагонали для асимметричной схемы – соотношением (12.13).

Для анализа чувствительности асимметричной мостовой схемы по мощности преобразуем принципиальную электрическую схему моста (см. рис. 12.1) и представим ее в виде схемы, приведенной на рис. 12.3.

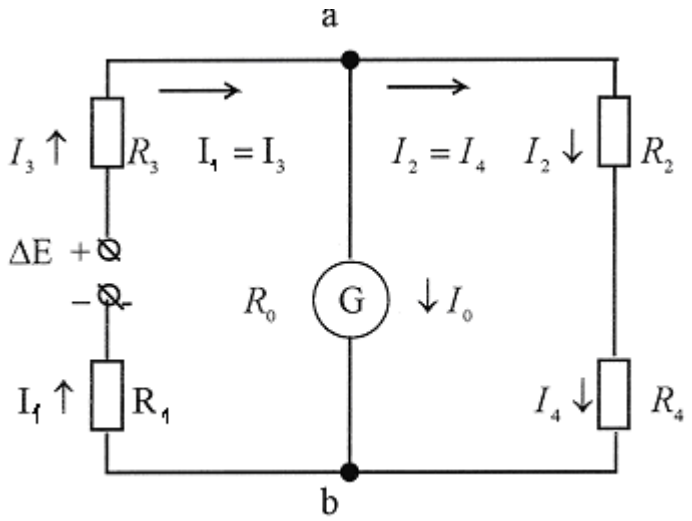


Рис. 12.3. Эквивалентная принципиальная схема четырехплечего моста постоянного тока: ΔE – эквивалентная ЭДС, зависящая от напряжения питания U и параметров мостовой схемы; R_1 – сопротивление датчика (начальное)

ΔE оценивается соотношением

$$\Delta E = \Delta R_1 \cdot I_1, \qquad (12.35)$$

где ΔR_1 – изменение сопротивления датчика;

I_1 – ток через датчик.

Отметим, что $I_1 = I_3$. По принятому условию $\Delta R_1 =$ const и много меньше сопротивления датчика в исходном (начальном) состоянии системы. Тогда справедливо положение, что $I_1 \cong$ const и $\Delta E \cong$ const.

При постоянстве значений ΔE и R_0 максимальное значение мощности в измерительной диагонали моста будет соответствовать максимальному значе-

нию тока I_0. Ток I_0 (при принятых допущениях) принимает максимальное значение при $R_0 \to 0$, а $(R_2 + R_4) \to \infty$. Считая, что $\Delta E = \text{const}$, $R_1 = \text{const}$, $R_3 = 0$, $(R_2 + R_4) \to \infty$, получим

$$I_0 = \frac{\Delta E}{R_1 + R_0}, \tag{12.36}$$

$$P_0 = I_0 \cdot R_0 = \Delta E^2 \cdot \frac{R_0}{(R_1 + R_0)^2}. \tag{12.37}$$

Для оценки значения R_0 необходимо исследовать на максимум полученное соотношение (12.37).

С этой целью найдем первую производную $\frac{dP_0}{dR_0}$ и приравняем ее нулю.

$$\frac{dP_0}{dR_0} = \Delta E^2 \cdot \frac{1 \cdot (R_1 + R_0) - 2 \cdot (R_1 + R_0) \cdot R_0}{(R_1 + R_0)^4} = 0. \tag{12.38}$$

Решая уравнение (12.38) относительно R_0, получим, что $R_0 = R$. Таким образом, при заданном сопротивлении датчика и принятых допущениях асимметричная мостовая схема имеет максимальную чувствительность по мощности при $U \to \max$, $R_2 + R_4 \to \infty$, $R_3 \to 0$, $R_0 = R_1$.

12.1.3. Выводы и рекомендации

Проведен анализ чувствительности неравновесных измерительных схем по мощности $S(P_0)$. Анализ проведен из предположений, что датчик с сопротивлением $R_g = R_1 + \Delta R_1$ включен в первое плечо моста, изменение сопротивления датчика $\Delta R_1 << R_1$, а мостовая схема в исходном (начальном) положении при $R_g = R_1$ уравновешена, где R_1 – исходное (начальное) сопротивление датчика.

Результаты анализа сведены в таблицу (табл. 12.1). В таблице приведены сведения по чувствительности токовых мостовых измерительных схем (асимметричных, 1-й симметрии, 2-й симметрии, равноплечих или симметричных). Вид рассматриваемой схемы приведен в 1-м столбце таблицы. Во 2-м столбце приведены характеристики мостовых схем, в 3-м – рассматриваемая чувствительность, в 4-м и 5-м – оптимальные соотношения.

Таблица 12.1

Сводная таблица по результатам анализа чувствительности неравновесных мостовых измерительных схем постоянного тока

Вид схемы	**Характеристика**	**Рассматриваемая чувствительность**	**Оптимальные соотношения**		$\left(\frac{P_0}{P_1}\right)_{\max}$
			теоретические	**практические**	
1	2	3	4	5	6
Асимметричная	$R_1 \neq R_2 \neq \neq R_3 \neq R_4$	$S(P_0)$	$R_2 + R_4 \to \infty,$ $R_3 \to 0,$ $R_0 \neq R_1$	$R_3 \approx 0{,}1R_1,$ $R_2 \approx 10R_1,$ $R_4 \approx R_1,$ $R_0 \approx R_1 + R_3$	$\frac{1}{4}\varepsilon^2$
1–й симметрии	$R_1 = R_2,$ $R_3 = R_4$	$S(P_0)$	$R_2 = R_1,$ $R_3 = R_4 \to 0,$ $R_0 \neq \frac{1}{2}R_1$	$R_1 = R_2,$ $R_3 = R_4 \approx 0{,}1R_1$ $R_0 \neq \frac{1}{2}(R_1 + R_4)$	$\frac{1}{8}\varepsilon^2$
Равноплечая	$R_1 = R_2 = = R_3 = R_4$	$S(P_0)$	$R_0 = R_2 = R_3 = = R_4 = R$	Совпадают с теоретическими	$\frac{1}{16}\varepsilon^2$
2–й симметрии	$R_2 = R_4$	$S(P_0)$	$R_2 = R_4 = \frac{1}{2}R_1,$ $R_3 = R_1,$ $R_0 = \frac{2}{3}R_1$	Совпадают с теоретическими	$\frac{1}{24}\varepsilon^2$

Табл. 12.1 содержит сведения по оптимальным параметрам различных типов неравновесных мостовых схем. Приведены как теоретические соотношения, так и практические рекомендации. Последний 6-й столбец таблицы, обозначенный $\left(\frac{P_0}{P_1}\right)_{\max}$, позволяет сравнить чувствительность различных типов неравновесных схем между собой. Из этого сравнения следует, что при прочих равных условиях наибольшей чувствительностью среди токовых схем облада-

ют асимметричные схемы, на втором месте по чувствительности – схемы 1-й симметрии, на третьем – равноплечие схемы и на последнем (четвертом) месте по чувствительности находятся мостовые схемы 2-й симметрии.

12.2. Линейность токовых мостовых схем

12.2.1. Общие положения

Линейность неравновесных токовых мостовых измерительных схем исследуется при допущении, что используются четыре датчика, включенные в первое, второе, третье и четвертое плечо мостовой схемы (рис. 12.4).

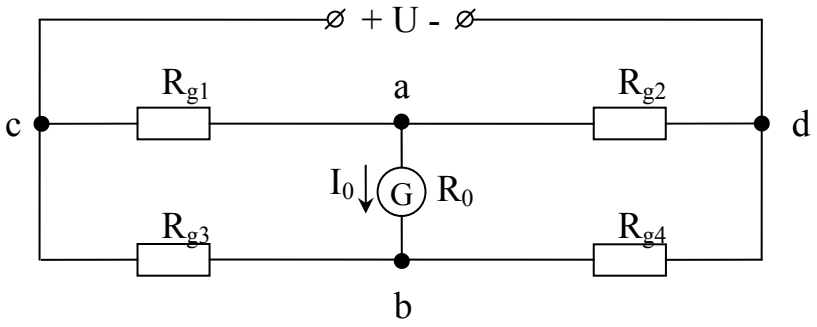


Рис. 12.4. Схема токового моста с четырьмя датчиками

Для схемы, приведенной на рис. 12.4, ток в измерительной диагонали мостовой схемы I_0 запишется в виде

$$I_0 = U\frac{R_{g1}\cdot R_{g4} - R_{g2}\cdot R_{g3}}{R_0\left(R_{g1}+R_{g2}\right)\left(R_{g3}+R_{g4}\right)+R_{g1}\cdot R_{g2}\left(R_{g3}+R_{g4}\right)+R_{g3}\cdot R_{g4}\left(R_{g1}+R_{g2}\right)}, \quad (12.39)$$

где U – напряжение питания;

R_0 – сопротивление прибора в измерительной диагонали мостовой схемы;

R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4} – сопротивления датчиков.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

1) сопротивления датчиков определяются соотношениями

$$R_{g1} = R_1 + \Delta R_1, \quad (12.40)$$

$$R_{g2} = R_2 + \Delta R_2, \quad (12.41)$$

$$R_{g3} = R_3 + \Delta R_3, \quad (12.42)$$

$$R_{g4} = R_4 + \Delta R_4, \quad (12.43)$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – начальные (исходные) сопротивления датчиков;

ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3 и ΔR_4 – измерения сопротивлений датчиков.

2) изменения сопротивлений датчиков много меньше сопротивлений самих датчиков, т. е.

$$\Delta R_1 << R_1, \tag{12.44}$$

$$\Delta R_2 << R_2, \tag{12.45}$$

$$\Delta R_3 << R_3, \tag{12.46}$$

$$\Delta R_4 << R_4, \tag{12.47}$$

где ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4, R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше;

3) в исходном состоянии мостовая схема уравновешена, т. е.

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{12.48}$$

где R_1, R_2, R_3 и R_4 – определены выше.

4) квадраты и кубы приращений датчиков малы и ими можно пренебречь, т. е. $\Delta R_1^2 \approx 0$, $\Delta R_1^3 \approx 0$, $\Delta R_2^2 \approx 0$, $\Delta R_2^3 \approx 0$ и т. д.

Принятые допущения позволяют значительно упростить соотношение (12.39), которое при подстановке значений сопротивлений датчиков и при выполнении принятых допущений принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4 - \Delta R_2 \cdot R_3 - \Delta R_3 \cdot R_2 + \Delta R_4 \cdot R_1}{A + B \cdot \Delta R_1 + C \cdot \Delta R_2 + D \cdot \Delta R_3 + F \cdot \Delta R_4}, \tag{12.49}$$

где $A = R_0\left(R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4\right) + R_1 \cdot R_2 \cdot \left(R_3 + R_4\right) +$

$+ R_3 \cdot R_4 \cdot \left(R_1 + R_2\right)$;

$B = R_0 \cdot R_3 + R_0 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4$;

$C = R_0 \cdot R_3 + R_0 \cdot R_4 + R_3 \cdot R_4 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4$;

$D = R_0 \cdot R_1 + R_0 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_4$;

$F = R_0 \cdot R_1 + R_0 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3$.

Отметим, что R_1, R_2, R_3, R_4 – постоянные сопротивления, соответствующие исходным сопротивлениям датчиков; ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4 – приращения (положительные или отрицательные) сопротивлений датчиков; A, B, C,

D, F – постоянные коэффициенты, зависящие от значений исходных сопротивлений датчиков и не зависящие от их приращений.

12.2.2. Основные соотношения

Схемы с одним датчиком

Предполагается, что датчик с начальным (исходным) сопротивлением R_1 расположен в первом плече мостовой схемы. В трех других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2, R_3 и R_4 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивления датчика удовлетворяют условию $\Delta R_1 \neq 0$. Все другие приращения тождественно равны нулю. В этом случае выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{A + B \cdot \Delta R}. \qquad (12.50)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R_1)$ приведен на рис. 12.5.

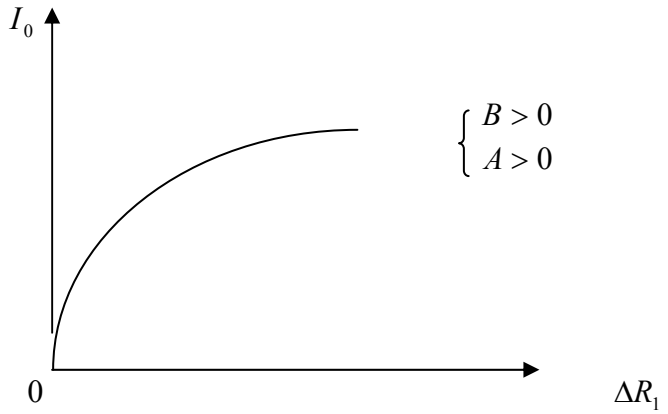


Рис. 12.5. Зависимость $I_0 = f(\Delta R_1)$ для неравновесной мостовой схемы с одним датчиком (датчик в первом плече)

Соотношение (12.50) и график свидетельствуют о том, что неравновесные мостовые измерительные схемы с одним датчиком, расположенным в первом плече, нелинейны. Этот вывод также справедлив при расположении одного датчика в любом другом плече неравновесной схемы. Последнее утверждение дается без доказательств, но оно может быть легко получено студентами самостоятельно при анализе соотношения (12.49).

Схемы с двумя датчиками

Датчики в первом и втором плечах моста

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_2 расположены соответственно в первом и втором плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_3 и R_4. Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |\Delta R|$. Приращения ΔR_3 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом допущений, изложенных в п. 12.2.1 и в данном параграфе учебного пособия, выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_3 + R_4)}{A + (B - C) \cdot \Delta R}. \qquad (12.51)$$

График зависимости тока в измерительной диагонали мостовой схемы I_0 от приращения сопротивлений датчика ΔR при различных соотношениях между B и C приведен на рис. 12.6.

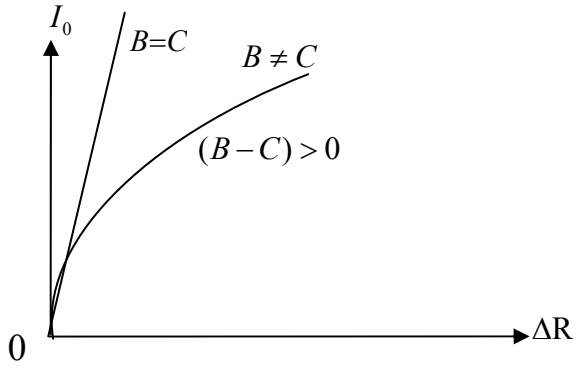


Рис. 12.6. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в первом и втором плечах схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $B \neq C$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $B = C$) рассматриваемая мостовая схема линейна. Сравнение выражений для коэффициентов B и C, приведенных в п. 12.2.1, показывает, что $B = C$ при $R_1 = R_2$.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в первом и втором плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления датчиков R_1 и R_2 в исходном состоянии должны быть равны;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_1 и ΔR_2 должны быть равны между собой по абсолютной величине и противоположны по знаку.

Отметим, что положительные приращения сопротивлений датчиков соответствуют увеличению их сопротивлений, а отрицательные приращения соответствуют уменьшению сопротивлений датчиков. Для выполнения второго условия линейности необходимо, чтобы при увеличении сопротивления датчика в первом плече на ΔR_1 сопротивление датчика во втором плече уменьшилось бы на это же значение.

Датчики в первом и четвертом плечах моста

Предполагается, что датчики с начальными сопротивлениями R_1 и R_4 расположены соответственно в первом и четвертом плечах мостовой схемы. Во втором и третьем плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_3. Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. С учетом допущений, изложенных в п. 12.2.1 и данном параграфе, выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_4)}{A + (B + F) \cdot \Delta R}. \qquad (12.52)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.7.

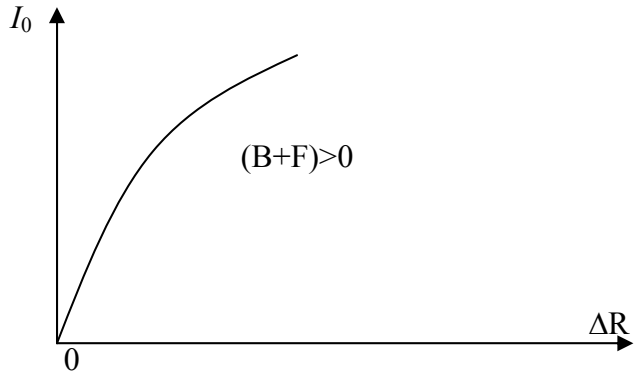


Рис. 12.7. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в первом и четвертом плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод, что мостовая измерительная схема с двумя датчиками в первом и четвертом плечах схемы нелинейна при любом соотношении параметров.

Датчики в первом и третьем плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_3 расположены соответственно в первом и третьем плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_4. Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. Приращения сопротивлений ΔR_2 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_4)}{A + (B - D) \cdot \Delta R}. \qquad (12.53)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.8.

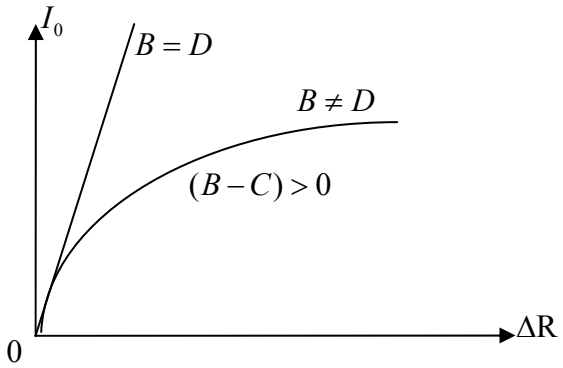


Рис. 12.8. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в первом и третьем плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $B \neq D$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $B = D$) рассматриваемая мостовая схема линейна. Для удовлетворения условия $B = D$ (см. п. 12.2.1) необходимо, чтобы $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$, $R_3 = R_4$, $R_1 = R_2$, т. е. сопротивления всех плеч мостовой схемы (в исходном положении при $\Delta R = 0$) должны быть равны между собой.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в первом и третьем плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления плеч мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 при $\Delta R = 0$ должны быть равны между собой;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_1 и ΔR_3 должны быть равны между собой и противоположны по знаку.

Отметим, что анализ проведен для случая, когда приращение ΔR_1 положительное, а приращение ΔR_3 – отрицательное.

Датчики во втором и четвертом плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_2 и R_4 расположены соответственно во втором и четвертом плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_3 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивлений датчиков R_2 и R_4 удовлетворяют условию $\left|-\Delta R_2\right| = \left|\Delta R_4\right| = \left|\Delta R\right|$. Приращения сопротивлений ΔR_1 и ΔR_3 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U\frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_4)}{A + (B + F)\cdot \Delta R} \qquad (12.54)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.9.

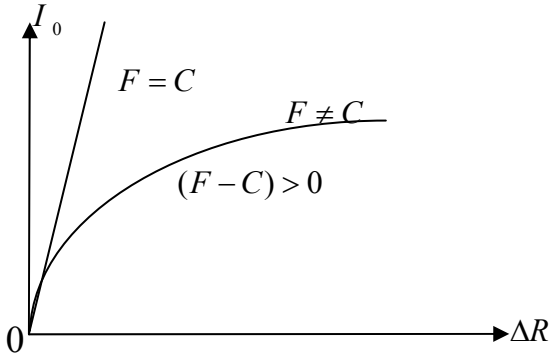


Рис. 12.9. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики во втором и четвертом плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $F \neq C$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $F = C$) рассматриваемая мостовая схема линейна (см. рис. 12.9). Сравнение выражений F и C показывает, что $F = C$, если $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, т. е. сопротивления всех плеч мостовой схемы (в исходном положении при $\Delta R = 0$) должны быть равны между собой.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными во втором и четвертом плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления плеч мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 при $\Delta R = 0$ должны быть равны между собой;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_2 и ΔR_4 должны быть равны между собой и противоположны по знаку.

Датчики в третьем и четвертом плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_3 и R_4 расположены соответственно в третьем и четвертом плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_2 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивлений датчиков R_3 и R_4 удовлетворяют условию $|-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. Приращения сопротивлений ΔR_1 и ΔR_2 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_4)}{A + (B - D) \cdot \Delta R}. \qquad (12.55)$$

График зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 12.10.

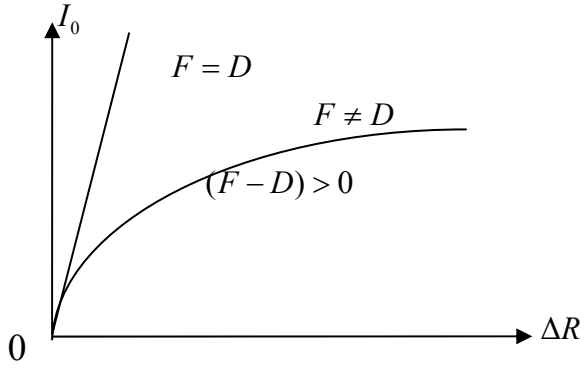


Рис. 12.10. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики в третьем и четвертом плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что в общем случае (при $F \neq D$) мостовая схема нелинейна. В частном же случае (при $F = D$) рассматриваемая мостовая схема линейна. Сравнение выражений F и D показывает, что $F = D$, если $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$, т. е. для линейности схемы в рассматриваемом случае необходимо использовать мостовую схему 1-й симметрии.

Таким образом, для линейности мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в третьем и четвертом плечах схемы, необходимо выполнение двух условий:

1) сопротивления плеч мостовой схемы R_1, R_2, R_3, R_4 при $\Delta R = 0$ должны удовлетворять условию 1-й симметрии;

2) приращения сопротивлений датчиков ΔR_2 и ΔR_4 должны быть равны между собой и противоположны по знаку.

Датчики во втором и третьем плечах схемы

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_2 и R_3 расположены соответственно во втором и третьем плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_4 (см. рис. 12.4). Приращения сопротивлений датчиков R_2 и R_3 удовлетворяют условию $|-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. Приращения сопротивлений ΔR_1 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot \left(R_3 + R_2 \right)}{A + \left(C + D \right) \cdot \Delta R} . \qquad (12.56)$$

График зависимости $I_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 12.11.

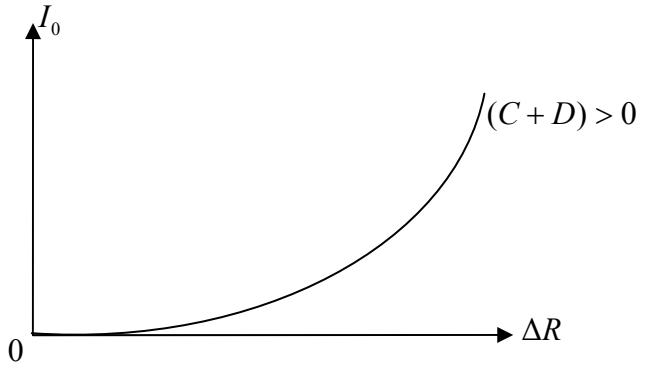


Рис. 12.11. Зависимость $I_0 = f\left(\Delta R\right)$ для неравновесной мостовой схемы с двумя датчиками (датчики во втором и третьем плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f\left(\Delta R\right)$ позволяет сделать вывод о том, что мостовая измерительная схема с двумя датчиками во втором и третьем плечах схемы нелинейна при любом соотношении параметров.

Схемы с тремя датчиками

Предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1, R_2, R_3 расположены соответственно в первом, во втором и в третьем плечах мостовой схемы. В четвертом плече мостовой схемы установлено постоянное сопротивление R_4 (см. рис. 12.4). Приращения датчиков R_1, R_2, R_3 удовлетворяют условию $\left|\Delta R_1\right| = \left|-\Delta R_2\right| = \left|-\Delta R_3\right| = \left|\Delta R\right|$. Приращение сопротивления R_4 тождественно равно нулю (т.е. $\Delta R_4 = 0$). С учетом изложенных допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot \left(R_3 + R_2 + R_4 \right)}{A + \left(B - C - D \right) \cdot \Delta R} . \qquad (12.57)$$

График зависимости (12.57) приведен на рис. 12.12.

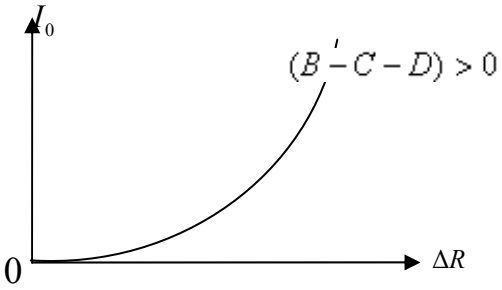


Рис. 12.12. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой измерительной схемы с тремя датчиками (датчики в первом, втором и третьем плечах мостовой схемы)

Анализ зависимости $I_0 = f(\Delta R)$ позволяет сделать вывод о том, что мостовая измерительная схема с тремя датчиками в первом, втором и третьем плечах схемы нелинейна при любом соотношении параметров.

Схемы с четырьмя датчиками

При анализе схемы с четырьмя датчиками будем полагать, что датчики включены во все плечи мостовой измерительной схемы и имеют в исходном состоянии сопротивления R_1, R_2, R_3, R_4 (датчик с сопротивлением R_1 включен в первое плечо моста, R_2 – во второе, R_3 – в третье, R_4 – в четвертое). Приращения сопротивлений датчиков должны удовлетворять условию: $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. С учетом принятых допущений выражение (12.49) принимает вид

$$I_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_3 + R_2 + R_4)}{A + (B - C - D + F) \cdot \Delta R}.$$

График зависимости (12.58) для различных соотношений между B, C, F, D имеет вид, приведенный на рис. 12.13

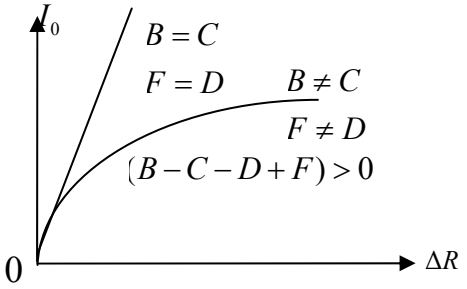


Рис. 12.13. Зависимость $I_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной мостовой измерительной схемы с четырьмя датчиками (датчики во всех плечах мостовой схемы)

Нетрудно видеть, что в общем случае (при $B \neq C$ и $F \neq D$) неравновесная мостовая схема нелинейна. Равенства $F = D$ и $B = C$ возможны при $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$, и в этом случае рассматриваемая схема линейна.

Таким образом, для линейности неравновесной мостовой измерительной схемы с четырьмя датчиками необходимо, чтобы сопротивления датчиков в первом и втором, третьем и четвертом плечах мостовой измерительной схемы были в исходном состоянии равны, а их приращения были равны и попарно разнозначны.

12.2.3. Выводы и рекомендации

Проведенные исследования линейности неравновесных токовых мостовых измерительных схем позволяют сделать вполне определенные выводы и дать практические рекомендации по включению датчиков в то или иное плечо мостовой схемы.

Ниже приводятся выводы и даются рекомендации при использовании одного, двух, трех и четырех датчиков.

1. Неравновесная токовая мостовая схема с одним датчиком нелинейна при любом включении датчика (в первое, второе, третье или четвертое плечо мостовой схемы). Схема с одним датчиком может быть рекомендована лишь при малых изменениях сопротивления датчика и при малых диапазонах измерений.

2. Мостовая схема с двумя датчиками может быть линейна, если датчики включены в первое и второе или третье и четвертое плечо мостовой схемы. При этом начальные (исходные) сопротивления датчиков должны быть равны, а их приращения равны и разнозначны (т. е. при росте сопротивления одного датчика сопротивление второго датчика должно на это же значение уменьшаться). При несоблюдении этих условий линейность мостовой схемы нарушается.

3. Мостовая схема с тремя датчиками нелинейна при любом их включении. Использовать схему с тремя датчиками не рекомендуется.

4. Мостовая схема с четырьмя датчиками может быть линейной при соблюдении ряда условий: используемые датчики должны иметь равные началь-

ные (исходные) сопротивления, а их приращения должны быть равными и попарно разнозначными, т. е. датчики в первом и четвертом плечах мостовой схемы должны иметь положительные приращения, а во втором и третьем – отрицательные. При несоблюдении этих условий линейность мостовой схемы нарушается.

13. НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

13.1. Чувствительность потенциальных мостовых схем

13.1.1. Общие положения

Исследование чувствительности неравновесных потенциальных мостовых измерительных схем проводится при допущении, что используется один датчик, включенный в первое плечо мостовой схемы (рис. 13.1).

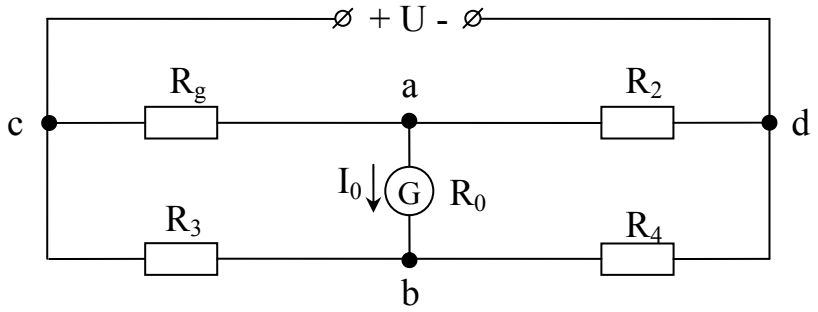


Рис. 13.1. Потенциальная мостовая измерительная схема с одним датчиком

В п. 11.1 учебного пособия было отмечено, что мостовая схема считается потенциальной, если сопротивление прибора *G*, включенного в измерительную диагональ моста, много больше сопротивлений плеч мостовой схемы. В этом же пункте сделан вывод основного соотношения потенциальной мостовой схемы (см. выражение (11.6)).

Для мостовой схемы, приведенной на рис. 13.1, выражение (11.6) принимает вид

$$U_0 = U\frac{R_g \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{\left(R_g + R_2\right)\left(R_3 + R_4\right)}, \qquad (13.1)$$

где U_0 – напряжение на измерительной диагонали мостовой схемы;

U – напряжение питания;

R_g – сопротивление датчика;

R_2, R_3, R_4 – сопротивление плеч моста.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

$$R_g = R_1 + \Delta R_1, \tag{13.2}$$

$$\Delta R_1 << R_1, \tag{13.3}$$

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{13.4}$$

где R_1 – начальное (исходное) сопротивление датчика;

ΔR_1 – измерение сопротивления датчика;

R_g, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

С учетом принятых допущений (13.2), (13.3) и (13.4) выражение (13.1) преобразуется в соотношение

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}, \tag{13.5}$$

где U_0, U, ΔR_1, R_1, R_2, R_3, R_4 – определены выше.

13.1.2. Основные соотношения

В п. 11.2 учебного пособия даны точное и приближенное определения чувствительности неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы. В данном пункте учебного пособия используется приближенное значение чувствительности по напряжению, приведенное ниже.

$$S(U_0) \approx \frac{\Delta U_0}{\Delta R_1}, \tag{13.6}$$

где $S(U_0)$ – чувствительность по напряжению;

ΔR_1 – изменение сопротивления датчика;

ΔU_0 – изменение напряжения в измерительной диагонали мостовой схемы при изменении сопротивления датчика на ΔR_1.

Дальнейший анализ проводится для оценки оптимальных параметров потенциальных мостовых измерительных схем, позволяющих получить максимальную чувствительность при заданных допущениях, т. е. при заданных условиях (13.2)–(13.4) и при заданном значении ΔR_1 можно найти значения U, R_2, R_3 и R_4, при которых чувствительность $S(U_0)$ максимальна. Из (13.6) следует,

что при $\Delta R_1 = \text{const}$ чувствительность максимальна при максимальном значении приращения ΔU_0, которое определяется соотношением

$$\Delta U_0 = U_0 - U_{0H}, \tag{13.7}$$

где U_{0H} – напряжение на измерительной диагонали в исходном состоянии мостовой схемы (при $\Delta R_1 = 0$);

ΔU_0, U_0 – определены выше.

Поскольку в исходном состоянии рассматриваемая мостовая схема уравновешена, то $U_{0H} = 0$ и $\Delta U_0 = U_0$ (см. выражение (13.7)).

Другими словами, для принятых допущений чувствительность $S(U_0) \to \max$, если напряжение U_0, определяемое соотношением (13.5), также стремится к максимальному значению.

Для дальнейшего анализа чувствительности рассматриваемой мостовой схемы по напряжению удобно разделить числитель и знаменатель выражения (13.5) на $R_1 \cdot R_4$ и ввести обозначение $\varepsilon = \dfrac{\Delta R_1}{R_1}$.

$$U_0 = U \frac{\varepsilon}{\left(1 + \dfrac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \dfrac{R_3}{R_4}\right)} \tag{13.8}$$

Обозначим отношение $\dfrac{R_2}{R_1}$ через K.

$$\frac{R_2}{R_1} = K. \tag{13.9}$$

Тогда, в силу равновесия моста в исходном состоянии, справедливы соотношения

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \tag{13.10}$$

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{1}{K}. \tag{13.11}$$

Подставляя (13.9) и (13.11) в уравнение (13.8), получим

$$U_0 = U\frac{\varepsilon \cdot K}{(1+K)^2}. \qquad (13.12)$$

Для оценки значения K необходимо исследовать полученное соотношение (13.12) на максимум. Для этого найдем первую производную $\frac{dU_0}{dK}$ и приравняем ее нулю.

$$\frac{dU_0}{dK} = U \cdot \varepsilon \cdot \frac{1\cdot(1+K)^2 - K\cdot 2\cdot(1+K)\cdot 1}{(1+K)^4} = 0. \qquad (13.13)$$

Произведение нескольких сомножителей равно нулю, если ноль – один из сомножителей. Соотношение (13.13) состоит из трех сомножителей. Первые два сомножителя (U и ε) не равны нулю, т. е. нулю равен третий сомножитель, представляющий собой дробь. Дробь, в свою очередь, равна нулю, если ноль – ее числитель. Приравнивая нулю числитель рассматриваемой дроби, получим

$$(1+K)^2 - 2K(1+K) = 0.$$

Полученное выражение, после приведения подобных, принимает вид

$$1 - K = 0.$$

Решая полученное уравнение относительно K, находим

$$K = 1. \qquad (13.14)$$

Из (13.14) следует, что $R_2 = R_1$ и $R_3 = R_4$.

Таким образом, при заданном сопротивлении датчика и принятых допущениях потенциальная мостовая измерительная схема имеет максимальную чувствительность по напряжению при $U \to \infty$, $R_2 = R_1$ и $R_3 = R_4$.

13.2. Линейность потенциальных мостовых схем

13.2.1. Общие положения

Исследование линейности неравновесных потенциальных мостовых измерительных схем проводится при допущении, что датчики включены во все четыре плеча мостовой схемы (рис. 13.2).

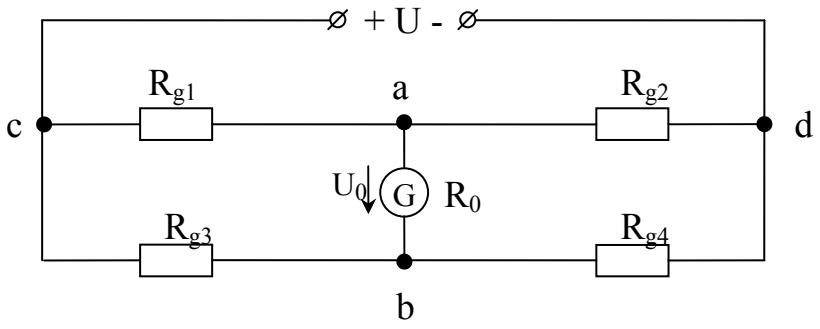


Рис. 13.2. Принципиальная схема неравновесного потенциального моста с четырьмя датчиками

Выведенное выше основное соотношение потенциальной мостовой схемы (11.6) для схемы, приведенной на рис. 13.2, принимает вид

$$U_0 = U \frac{R_{g1} \cdot R_{g4} - R_{g2} \cdot R_{g3}}{\left(R_{g1} + R_{g2}\right)\left(R_{g3} + R_{g4}\right)}, \qquad (13.15)$$

где U_0 – напряжение на измерительной диагонали мостовой схемы;

U – напряжение питания;

R_0 – сопротивление прибора G (принято, что $R_0 \to \infty$);

R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4} – сопротивление датчиков.

Дальнейший анализ рассматриваемой мостовой схемы проводится при следующих допущениях:

$$R_{g1} = R_1 + \Delta R_1, \qquad (13.16)$$

$$R_{g2} = R_2 + \Delta R_2, \qquad (13.17)$$

$$R_{g3} = R_3 + \Delta R_3, \qquad (13.18)$$

$$R_{g4} = R_4 + \Delta R_4, \qquad (13.19)$$

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3, \qquad (13.20)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 – начальные сопротивления датчиков;

$\Delta R_1, \Delta R_2$, ΔR_3, ΔR_4 – приращения сопротивлений датчиков.

Изменения сопротивлений датчиков ΔR_1, ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4 много меньше сопротивлений самих датчиков, т. е.

$$\Delta R_1 << R_1, \qquad (13.21)$$

$$\Delta R_2 << R_2, \qquad (13.22)$$

$$\Delta R_3 << R_3, \tag{13.23}$$

$$\Delta R_4 << R_4, \tag{13.24}$$

где $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$ – определены выше.

Квадраты и кубы приращений датчиков малы и ими можно пренебречь, т. е. $\Delta R_1^2 \approx 0$, $\Delta R_1^3 \approx 0$, $\Delta R_2^2 \approx 0$, $\Delta R_2^3 \approx 0$ и т. д.

С учетом принятых допущений (13.16) – (13.24) и равенства нулю квадратов и кубов приращений датчиков выражение (13.15) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4 + \Delta R_2 \cdot R_3 + \Delta R_3 \cdot R_2 + \Delta R_4 \cdot R_1}{A + \Delta R_1 \cdot B + \Delta R_2 \cdot C + \Delta R_3 \cdot D + \Delta R_4 \cdot F}, \tag{13.25}$$

где U, U_0, R_1, R_2, R_3, R_4, $\Delta R_1, \Delta R_2$, ΔR_3, ΔR_4 определены выше;

$A = R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_4$;

$B = C = R_3 + R_4$;

$D = F = R_3 + R_2$.

Полученное выражение (13.25) позволяет проанализировать линейность неравновесных потенциальных мостовых схем.

13.2.2. Основные соотношения

Полученное в п. 13.2.1 выражение (13.25) позволяет проанализировать линейность неравновесных потенциальных мостовых измерительных схем (см. рис. 13.2) при использовании одного, двух, трех и четырех датчиков.

Схемы с одним датчиком

При анализе мостовой схемы с одним датчиком предполагается, что датчик с начальным (исходным) сопротивлением R_1 расположен в первом плече мостовой схемы. В трех других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2, R_3, R_4. Приращение сопротивления датчика $\Delta R_1 \neq 0$. Все другие приращения (ΔR_2, ΔR_3, ΔR_4) тождественно равны нулю. В этом случае выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1 \cdot R_4}{A + \Delta R_1 \cdot B}, \tag{13.26}$$

где U_0, U, A, B, ΔR_1, R_4 – определены выше.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R_1)$ приведен на рис. 13.3.

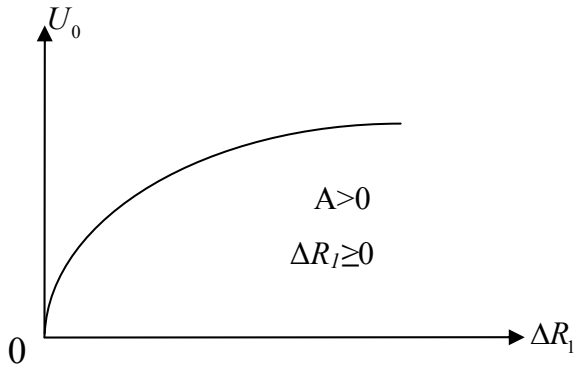


Рис. 13.3. Зависимость $U_0 = f(\Delta R_1)$ для потенциальной мостовой измерительной схемы с одним датчиком (датчик в первом плече схемы)

Соотношение (13.26) и график, приведенный на рис. 13.3, свидетельствуют о том, что неравновесная потенциальная мостовая измерительная схема с одним датчиком, расположенным в первом плече схемы, нелинейна. Этот вывод также справедлив при расположении одного датчика в любом другом плече схемы. Последнее утверждение дается без доказательств, но оно может быть легко получено студентами самостоятельно при анализе соотношения (13.25).

Схемы с двумя датчиками

Датчики в первом и втором плечах схемы

При анализе схемы с двумя датчиками принимаются следующие допущения (см. рис. 13.2): начальные (исходные) сопротивления датчиков R_1 и R_2; в исходном положении мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$); приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |\Delta R|$; приращения ΔR_3 и ΔR_4 тождественно равны нулю. С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_3 + R_4)}{A} \qquad (13.27)$$

где A – постоянный коэффициент (определен выше).

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.4.

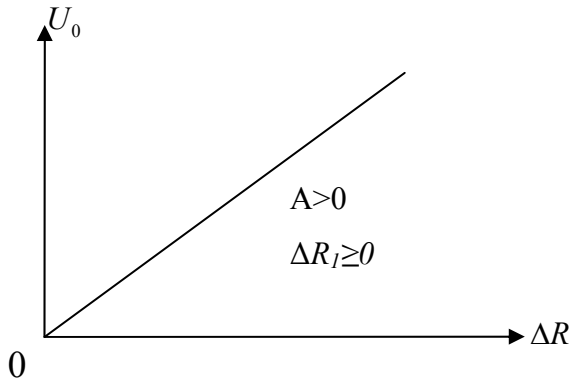


Рис. 13.4. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в первом и втором плечах схемы)

Соотношение (13.27) и график, приведенный на рис. 13.4, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с двумя датчиками (в первом и втором плечах) линейны, если выполняется условие $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |\Delta R|$.

Таким образом, для линейности неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками, размещенными в первом и втором плечах схемы, необходимо, чтобы приращения сопротивлений датчиков ΔR_1 и ΔR_2 были равны между собой по модулю и противоположны по знаку.

Отметим, что положительные приращения сопротивлений датчиков соответствуют увеличению их сопротивлений, а отрицательные приращения соответствуют уменьшению сопротивлений датчиков. Для выполнения условия линейности схемы необходимо, чтобы при увеличении сопротивления датчика в первом плече на ΔR сопротивление датчика во втором плече уменьшалось бы на эту же величину.

Датчики в первом и третьем плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_3 расположены в первом и третьем плечах мостовой схемы. В двух других плечах мостовой схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_4 (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. Приращения ΔR_2 и ΔR_4 тождественно равны нулю. Мостовая схема в исходном состоянии уравновеше-

на (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A + \Delta R \cdot \left(B - D\right)}, \tag{13.28}$$

где A, B, D – постоянные коэффициенты (определены выше).

Выражение (13.28) получено из предположения, что приращения сопротивлений датчиков равны и разнозначны. Очевидно, что это предположение может быть выполнено, если использованы одинаковые датчики с равными начальными сопротивлениями. Кроме того, для обеспечения равновесия мостовой схемы необходимо, чтобы были равны сопротивления, установленные во втором и четвертом плечах схемы. Таким образом, должны быть правомерны следующие равенства:

$$R_1 = R_3, \tag{13.29}$$

$$R_2 = R_4. \tag{13.30}$$

С учетом (13.29) и (13.30) выражение (13.28) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A - \Delta R}. \tag{13.31}$$

Учитывая, что $A >> \Delta R^2$, окончательно получим

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A} \tag{13.32}$$

График зависимости $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 13.5.

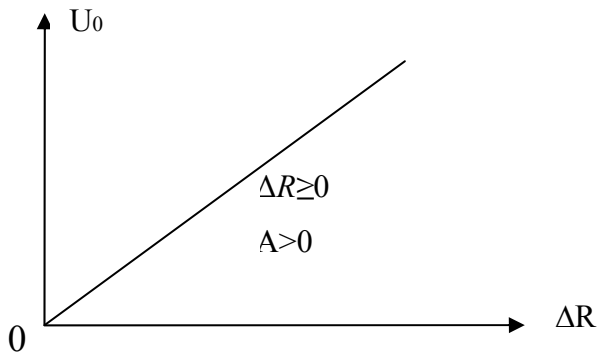


Рис. 13.5. Зависимость $U = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в первом и третьем плечах схемы)

Соотношение (13.31) и график, приведенный на рис. 13.5, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с двумя датчиками (в первом и третьем плечах) при выполнении принятых допущений линейны.

Датчики в первом и четвертом плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_4 расположены в первом и четвертом плечах мостовой схемы (см. рис. 13.2). В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_3 (приращения ΔR_2 и ΔR_3 соответственно равны нулю). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию: $|\Delta R_1| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. Предполагается также, что в исходном состоянии мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_4)}{A + \Delta R \cdot (B + F)}$$

где A, B, F – постоянные величины.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.6.

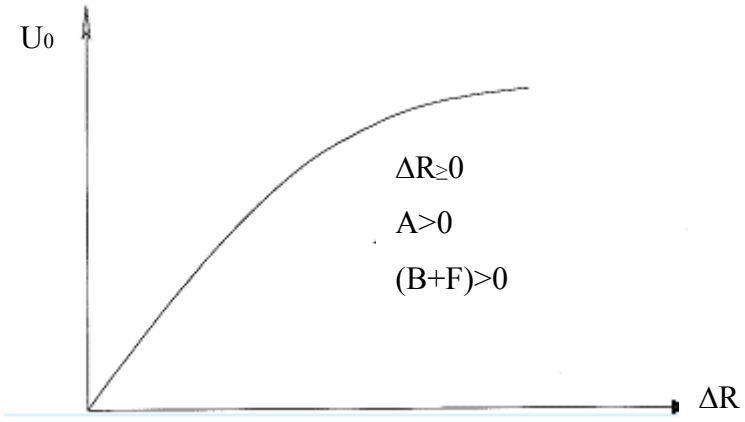


Рис. 13.6. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в первом и четвертом плечах схемы)

Соотношение (13.33) и график, приведенный на рис. 13.6, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками в первом и четвертом плечах нелинейны.

Датчики во втором и третьем плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_2 и R_3 расположены во втором и третьем плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию: $\left|-\Delta R_2\right| = \left|-\Delta R_3\right| = \left|\Delta R\right|$. В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления R_1 и R_4, и их приращения соответственно равны нулю. Предполагается также, что в исходном состоянии мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_3\right)}{A - \Delta R \cdot \left(B + D\right)}, \qquad (13.34)$$

где A, B, D – постоянные коэффициенты.

График зависимости $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 13.7.

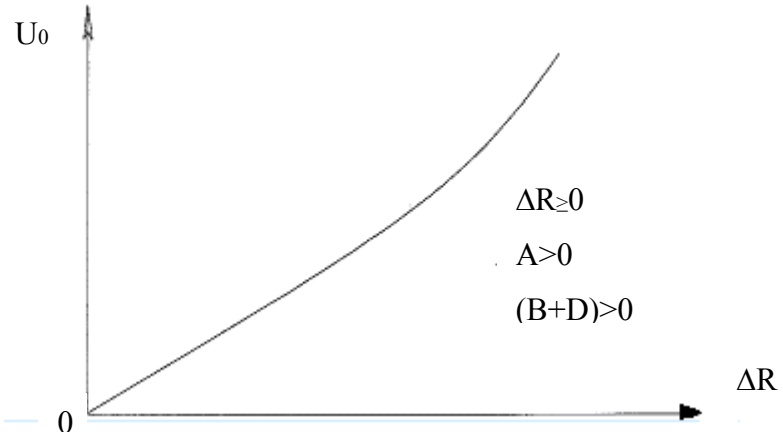


Рис. 13.7. Зависимость $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики во втором и третьем плечах схемы)

Соотношение (13.34) и график, приведенный на рис. 13.7, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками во втором и третьем плечах нелинейны.

Датчики во втором и четвертом плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1 и R_4 расположены во втором и четвертом плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $\left|-\Delta R_2\right| = \left|\Delta R_4\right| = \left|\Delta R\right|$. В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления R_2 и R_4, и их приращения соответственно равны нулю. Предполагается также, что в исходном состоянии мостовая схема уравновешена (т. е. $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$). С учетом изложенных допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_1 + R_3\right)}{A + \Delta R \cdot \left(F - B\right)}, \tag{13.35}$$

где A, B, F – постоянные коэффициенты.

Принимая, что $R_1 = R_4$, $R_2 = R_3$ окончательно получим

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot \left(R_2 + R_4\right)}{A} \tag{13.36}$$

График зависимости $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 13.8.

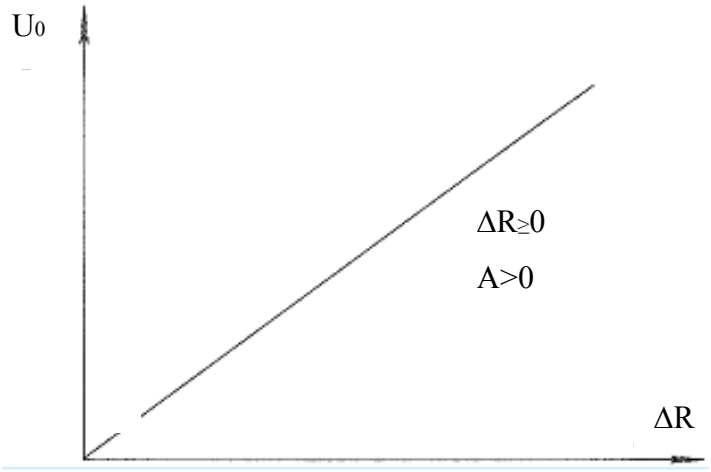


Рис. 13.8. Зависимость $U_0 = f\left(\Delta R\right)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики во втором и четвертом плечах схемы)

Соотношение (13.36) и график, приведенный на рис. 13.8, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с

датчиками во втором и четвертом плечах при выполнении принятых допущений линейны.

Датчики в третьем и четвертом плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_3 и R_4 расположены в третьем и четвертом плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. В двух других плечах схемы установлены постоянные сопротивления, и их приращения соответственно равны нулю. Предполагается также, что в исходном положении мостовая схема уравновешена и выполняется условие $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. С учетом принятых допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_2)}{A} \tag{13.37}$$

где A – постоянный коэффициент.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.9.

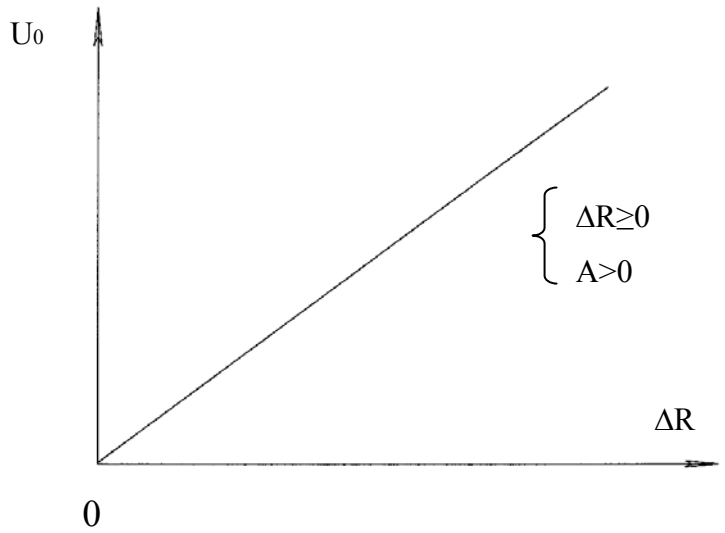


Рис. 13.9. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с двумя датчиками (датчики в третьем и четвертом плечах схемы)

Соотношение (13.37) и график, приведенный на рис. 13.9, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками в третьем и четвертом плечах схемы при выполнении принятых допущений линейны.

Схемы с тремя датчиками

Датчики в первом, втором и третьем плечах схемы

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1, R_2, R_3 расположены в первом, втором и третьем плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков удовлетворяют условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R|$. В четвертом плече схемы установлено постоянное сопротивление R_4. Предполагается также, что в исходном положении мостовая схема уравновешена и соответственно выполняется условие $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. С учетом принятых допущений, выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_2 + R_3 + R_4)}{A - \Delta R \cdot (C + D - B)}, \qquad (13.38)$$

где A, C, D – постоянные коэффициенты.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.10.

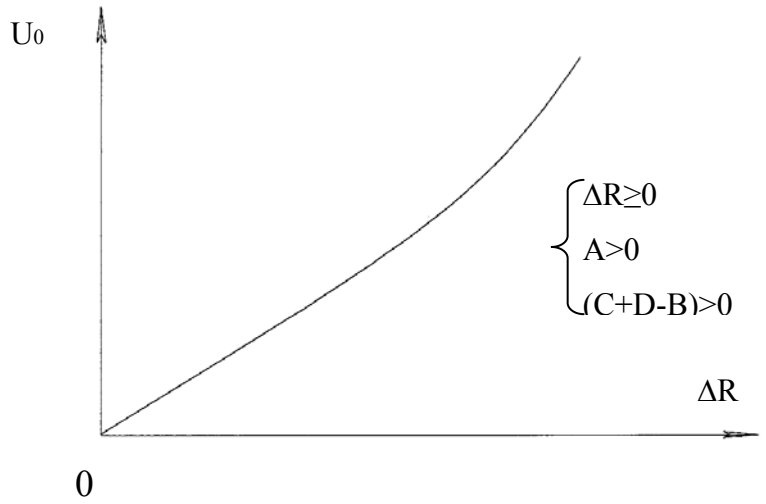


Рис. 13.10. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с тремя датчиками (датчики в первом, втором и третьем плечах схемы)

Соотношение (13.38) и график, приведенный на рис. 13.10, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с датчиками в первом, втором и третьем плечах схемы нелинейны. Нелинейность схемы сохраняется при размещении трех датчиков в любых других плечах мостовых измерительных схем.

Схемы с четырьмя датчиками

При анализе схемы в этом случае предполагается, что датчики с начальными (исходными) сопротивлениями R_1, R_2, R_3, R_4 размещены в первом, втором, третьем и четвертом плечах схемы (см. рис. 13.2). Приращения сопротивлений датчиков должны удовлетворять условию $|\Delta R_1| = |-\Delta R_2| = |-\Delta R_3| = |\Delta R_4| = |\Delta R|$. Предполагается также, что в исходном положении мостовая схема уравновешена и соответственно выполняется условие $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. С учетом принятых допущений выражение (13.25) принимает вид

$$U_0 = U \cdot \frac{\Delta R \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)}{A} \qquad (13.39)$$

где A – постоянный коэффициент.

График зависимости $U_0 = f(\Delta R)$ приведен на рис. 13.11.

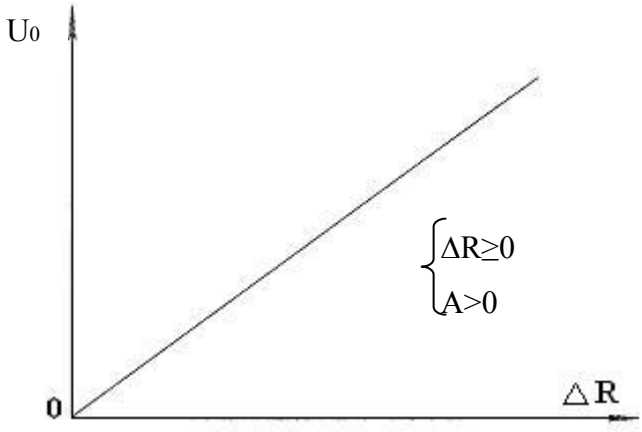


Рис. 13.11. Зависимость $U_0 = f(\Delta R)$ для неравновесной потенциальной мостовой измерительной схемы с четырьмя датчиками

Соотношение (13.39) и график, приведенный на рис. 13.11, свидетельствуют о том, что неравновесные потенциальные мостовые измерительные схемы с четырьмя датчиками (во всех плечах измерительной схемы) при выполнении принятых допущений линейны.

13.2.3. Выводы и рекомендации

Анализ линейности мостовых измерительных схем (как токовых, так и потенциальных) свидетельствует о том, что при нечетном числе датчиков схе-

мы нелинейны, а при четном (два или четыре датчика) могут быть линейны при выполнении ряда условий. Эти условия сводятся к следующему: мостовые схемы должны быть симметричными, исходные (начальные) сопротивления датчиков должны быть одинаковы, а их приращения равными и попарно разнозначными. Подробно условия линейности неравновесных мостовых измерительных схем приведены в пп. 13.2.1 и 13.2.2 настоящего учебного пособия.

Рассмотрим, насколько реализуемы условия линейности неравновесных мостовых измерительных схем, приведенные выше. Оценим возможность практического выполнения этих условий при построении измерительных устройств различного назначения.

Предположим, что требуется включить в мостовую измерительную схему четыре тензодатчика, наклеенных на балку (рис. 13.12).

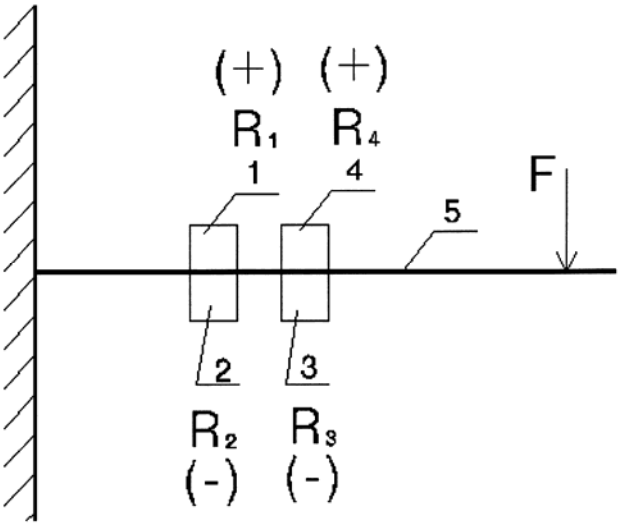


Рис. 13.12. Схема размещения тензодатчиков:
1, 2, 3, 4 – тензодатчики; 5 – балка; R_1, R_2, R_3, R_4 – сопротивления тензодатчиков; F – сила, изгибающая балку

Два тензодатчика наклеены сверху и при деформации балки имеют положительные приращения сопротивлений, а два других тензодатчика наклеены снизу и при деформации балки имеют отрицательные приращения сопротивлений.

Другими словами, при деформации балки 5 силой F сопротивления R_1 и R_4 будут возрастать, сопротивления R_3, R_4 – уменьшаться.

Для реализации условия линейности необходимо, чтобы сопротивления тензодатчиков в исходном состоянии (до деформации) были попарно равны ($R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$), а их приращения были попарно равны и разнозначны ($|\Delta R_1| = |-\Delta R_2|$, $|\Delta R_4| = |-\Delta R_3|$). Очевидно, что эти условия практически вполне выполнимы. Для этого необходимо использовать однотипные тензодатчики с одинаковыми характеристиками. При этом первый тензодатчик с сопротивлением R_1 необходимо включить в первое плечо, второй с сопротивлением R_2 – во второе плечо, третий – в третье и четвертый – в четвертое плечо неравновесной мостовой измерительной схемы, соединив их так, как это показано на рис. 13.2. В этом случае мостовая схема при принятых допущениях будет иметь линейную характеристику.

14. РАВНОВЕСНЫЕ МОСТОВЫЕ СХЕМЫ

14.1. Общие положения

В данной главе учебного пособия проведен анализ равновесных мостовых измерительных схем постоянного тока. Рассмотрены различные варианты включения датчиков в равновесные мостовые схемы, примеры расчета схем, а также сделаны выводы по результатам исследований и даны рекомендации по практическому использованию рассматриваемых устройств.

Принципиальная электрическая схема равновесной мостовой схемы приведена на рис. 14.1.

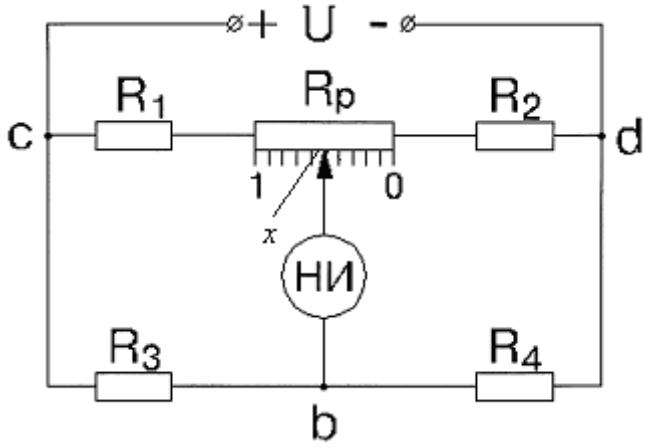


Рис. 14.1. Принципиальная электрическая схема равновесной мостовой измерительной схемы постоянного тока: $R_{\text{Р}}$ – сопротивление реохорда; x – координаты движка реохорда; НИ – нуль-индикатор; R_1, R_2, R_3, R_4 – электрические сопротивления; U – напряжение питания

Ниже рассматриваются четыре возможных варианта включения датчиков: датчик в первом плече; датчик во втором плече; датчик в третьем плече; датчик в четвертом плече мостовой схемы. Для каждого случая проведен анализ чувствительности и линейности мостовой схемы, сделаны соответствующие выводы.

14.2. Датчик в первом плече

Предполагается, что датчик с начальным (исходным) сопротивлением $R_{\text{Н}}$ включен в первое плечо равновесной мостовой измерительной схемы постоянного тока (см. рис. 14.1). Предполагая, что приращение сопротивления датчика

составляет ΔR_1, координата $x = 0$ при положении движка реохорда в крайнем правом положении и координата $x = 1$ при положении движка реохорда в крайнем левом положении, запишем условие равновесия для рассматриваемой схемы.

$$\left(R_H + \Delta R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot R_4 = \left(R_2 + R_p \cdot x\right) \cdot R_3 . \qquad (14.1)$$

Раскрыв скобки в уравнении (14.1), сделав приведение подобных (по принятому допущению $R_H \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$) и решив рассматриваемое уравнение относительно x, получим:

$$x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \Delta R_1 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} . \qquad (14.2)$$

Введем обозначение:

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} = A . \qquad (14.3)$$

С учетом (14.3) выражение (14.2) принимает вид

$$x = A + \Delta R_1 \cdot A \cdot \frac{1}{R_p} = A\left(1 + \Delta R_1 \cdot \frac{1}{R_p}\right). \qquad (14.4)$$

График полученной зависимости приведен на рис. 14.2.

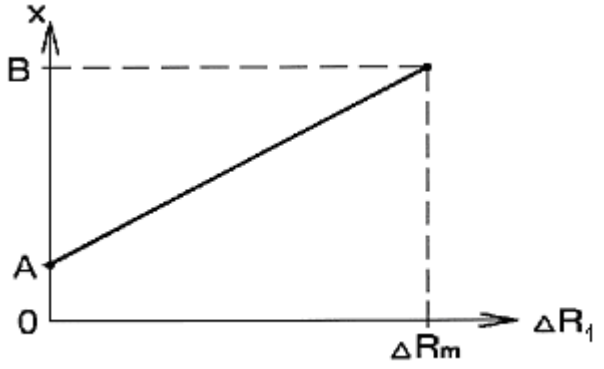


Рис. 14.2. Зависимость $x = f\left(\Delta R_1\right)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в первом плече

Отметим, что при ΔR_1=0 координата $x = A$, а при $\Delta R_1 = \Delta R_m$ (где ΔR_m – максимальное приращение сопротивления датчика) координата $x = B$, где B определяется соотношением

$$B = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_m}{R_\text{Р}}\right). \qquad (14.5)$$

Анализ зависимости $x = f(\Delta R_1)$ показывает, что при размещении датчика в первом плече равновесная мостовая измерительная схема линейна.

Чувствительность равновесной схемы S определяется выражением

$$S = \lim_{\Delta R_1 \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta R_1'}, \qquad (14.6)$$

где Δx – приращение выходной величины (изменение координаты движка реохорда);

ΔR_1 – приращение входной величины (изменение сопротивления датчика).

При $\Delta R_1 = \text{const}$ чувствительность S растет при росте приращения Δx. Приращение Δx растет в соответствии с (14.4) при уменьшении сопротивления $R_\text{Р}$. Таким образом, при прочих равных и неизменных условиях чувствительность равновесной схемы растет при уменьшении сопротивления реохорда. Отметим, что рост чувствительности в этом случае сопровождается уменьшением диапазона возможных изменений сопротивления датчика.

Рассмотрим зависимость $x = f(\Delta R_1)$ с датчиком в первом плече в общем случае, т. е. не накладывая какие-либо ограничения на значения параметров мостовой схемы (в том числе считаем, что $R_H \cdot R_4 \neq R_2 \cdot R_3$). Тогда, решая уравнение (14.1) относительно x, получим

$$x = \frac{R_H \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3 + R_p \cdot R_4 + \Delta R_1 \cdot R_4}{R_p \cdot (R_3 + R_4)}. \qquad (14.7)$$

Разделим числитель и знаменатель соотношения (14.7) на R_4 и введем обозначение:

$$a = \frac{R_3}{R_4}. \qquad (14.8)$$

С учетом (14.8) соотношение (14.7) принимает вид

$$x = \frac{R_H - a \cdot R_2 + R_p}{R_p \cdot (1 + a)} + \Delta R_1 \cdot \frac{1}{R_p \cdot (1 + a)}. \qquad (14.9)$$

Сравнивая выражения (14.4) и (14.9) легко убедиться, что усложнение зависимости $x = f(\Delta R_1)$ за счет отказа от равенства $R_H \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$ не дает каких–либо существенных преимуществ. Более того, при этом не меняются основные свойства мостовой схемы: $x = f(\Delta R_1)$ по-прежнему имеет линейный характер, а чувствительность мостовой схемы зависит от значения сопротивления реохорда $R_\text{Р}$ (чувствительность растет при уменьшении $R_\text{Р}$ и падает при росте этого сопротивления). Исходя из результатов анализов, можно заключить, что отказ от упрощения рассматриваемого соотношения не дает принципиально новых результатов. В силу этого все дальнейшие исследования проведены из предположения, что в исходном состоянии схемы справедливо равенство $R_H \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$.

14.3. Датчик во втором плече

Рассматривается случай включения датчика с начальным (исходным) сопротивлением R_{2H} во второе плечо равновесной мостовой измерительной схемы постоянного тока (см. рис. 14.1). Проведем исследование схемы при следующих допущениях: приращение (изменение) сопротивления датчика равно ΔR; координата $x = 0$ при крайнем правом положении движка реохорда; координата $x = 1$ при крайнем левом положении движка реохорда, кроме того, считаем справедливым соотношение

$$R_1 \cdot R_4 = R_{2H} \cdot R_3, \qquad (14.10)$$

где R_{2H} – начальное (исходное) сопротивление датчика ($R_2 = R_{2H} + \Delta R_2$).

Условие равновесия для исследуемой мостовой схемы запишется в виде

$$\left(R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot R_4 = \left(R_{2H} + \Delta R_2 + R_p \cdot x\right) \cdot R_3. \qquad (14.11)$$

Раскрывая скобки в уравнении (14.11), сокращая подобные члены и решая рассматриваемое уравнение относительно x, получим

$$x = \frac{R_4}{R_3 + R_4} + \Delta R_2 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}, \qquad (14.12)$$

где $\dfrac{R_4}{R_3 + R_4} = A$; $\dfrac{R_3}{R_3 + R_4} = C$.

Учитывая принятые обозначения, окончательно запишем зависимость $x = f(\Delta R_2)$:

$$x = A - \Delta R_2 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot C . \qquad (14.13)$$

График полученной зависимости приведен на рис. 14.3.

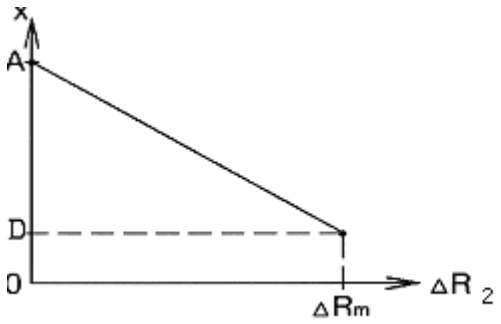


Рис. 14.3. Зависимость $x = f(\Delta R_2)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком во втором плече

Отметим, что при ΔR_2=0 координата $x = A$ и при $\Delta R_2 = \Delta R_m$ координата $x = D$ (где ΔR_m – максимальное приращение сопротивления датчика; D – величина, определяемая соотношением (14.13) при $\Delta R_2 = \Delta R_m$).

$$D = A - \frac{\Delta R_m}{R_P} C \qquad (14.14)$$

Характер зависимости $x = f(\Delta R_2)$ свидетельствует о том, что при размещении датчика во втором плече равновесная мостовая измерительная схема линейна.

Чувствительность рассматриваемой равновесной мостовой измерительной схемы (в соответствии с соотношением (14.6), приведенным выше) зависит от значения сопротивления реохорда $R_\text{Р}$. При росте сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы уменьшается, а при снижении сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы возрастает. Отметим, что при росте чувствительности мостовой схемы одновременно уменьшается диапазон возможных изменений сопротивления датчика.

14.4. Датчик в третьем плече

Предполагается, что датчик включен в третье плечо равновесной мостовой измерительной схемы (см. рис. 14.1) и имеет в исходном (начальном) состоянии сопротивление R_{3H}.

Исследование мостовой схемы проводится при следующих допущениях: приращение (изменение) сопротивления датчика равно ΔR_3; координата движка реохорда $x = 0$ при крайнем правом его положении; координата движка реохорда $x = 1$ при крайнем левом его положении; справедливо соотношение $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_{3H}$ $(R_3 = R_{3H} + \Delta R_3)$.

Условие равновесия для исследуемой мостовой схемы запишется в виде

$$\left(R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot R_4 = \left(R_2 + R_p \cdot x\right) \cdot (R_{3H} + \Delta R_3) . \qquad (14.15)$$

Раскрыв скобки в уравнении (14.15), сократив подобные члены и решив рассматриваемое соотношение относительно x, получим

$$x = \frac{R_4}{R_3 + R + \Delta R_3} - \Delta R_3 \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_2}{R_4 + R + R_3} . \qquad (14.16)$$

График полученной зависимости $x = f\left(\Delta R\right)$ приведен на рис. 14.4.

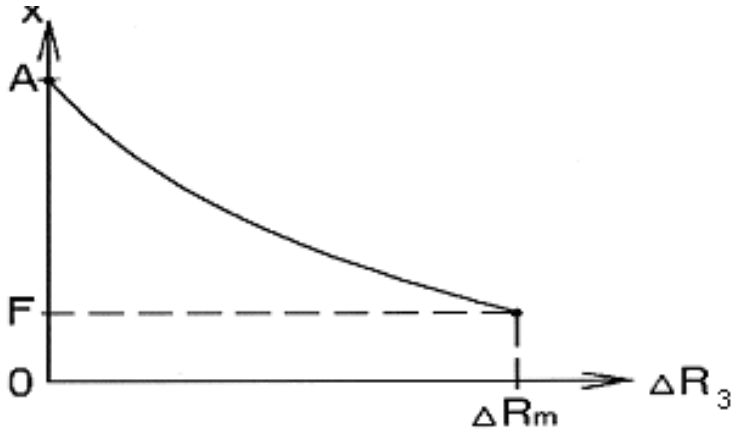


Рис. 14.4. Зависимость $x = f\left(\Delta R_3\right)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в третьем плече

Отметим, что при $\Delta R_3 = 0$ координата $x = A$ и при $\Delta R_3 = \Delta R_m$ координата $x = F$, где ΔR_m – максимальное приращение (изменение) сопротивления датчика; величина A – определяется соотношением (14.17), а величина F – соотношением (14.18).

$$A = \frac{R_4}{R_2 + R_{3H}}; \qquad (14.17)$$

$$F = \frac{R_4}{R_4 + R_{3H} + \Delta R_m} - \Delta R_m \cdot \frac{1}{R_p} \cdot \frac{R_2}{R_4 + R_{3H} + \Delta R_m}, \qquad (14.18)$$

где R_{3H} – начальное (исходное) сопротивление датчика.

Характер зависимости $x = f(\Delta R_3)$ свидетельствует о том, что при размещении датчика в третьем плече равновесная мостовая измерительная схема нелинейна.

Чувствительность рассматриваемой равновесной мостовой измерительной схемы (см. соотношение (14.6), приведенное выше) зависит от значения сопротивления реохорда $R_{\text{Р}}$. При росте сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы снижается, а при уменьшении сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы возрастает. Отметим, что при росте чувствительности мостовой схемы (за счет уменьшения $R_{\text{Р}}$) одновременно уменьшается диапазон возможных изменений сопротивления датчика.

14.5. Датчик в четвертом плече

Предполагается, что датчик включен в четвертое плечо равновесной мостовой измерительной схемы (см. рис. 14.1) и имеет в исходном (начальном) состоянии сопротивление R_{4H} ($R_4 = R_{4H} + \Delta R_4$).

Исследование мостовой схемы проводится при следующих допущениях: приращение (изменение) сопротивления датчика равно ΔR_4; координата движка реохорда $x = 0$ при крайнем правом его положении; координата движка реохорда $x = 1$ при крайнем левом его положении; справедливо соотношение

$$R_1 \cdot R_{4H} = R_2 \cdot R_3.$$

Условие равновесия для исследуемой мостовой схемы запишется в виде

$$\left(R_1 + R_p - R_p \cdot x\right) \cdot \left(R_{4H} + \Delta R\right) = (R_2 + R_p \cdot x) \cdot R_3. \qquad (14.19)$$

Раскрыв скобки в уравнении (14.19), сократив подобные члены и решив рассматриваемое соотношение относительно x, получим

$$x = \frac{R_{4H}}{R_{4H} + \Delta R_4 + R_3} + \Delta R_4 \cdot \frac{R_1 + R_p}{R_p \cdot (R_{4H} + \Delta R_4 + R_3}. \qquad (14.20)$$

График полученной зависимости $x = f(\Delta R_4)$ приведен на рис. 14.5.

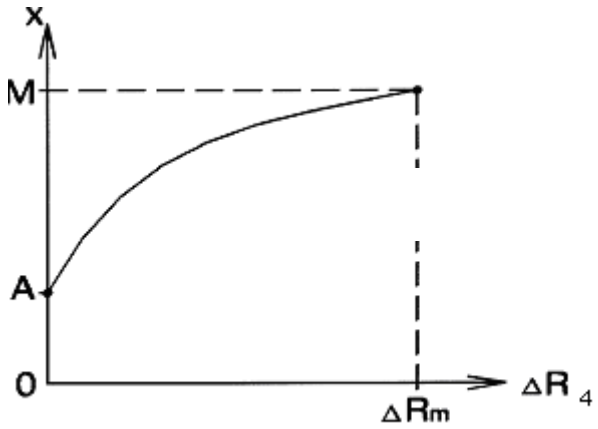


Рис. 14.5. Зависимость $x = f(\Delta R_4)$ для равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в четвертом плече

Проанализируем полученную зависимость $x = f(\Delta R_4)$. При отсутствии приращения (изменения) сопротивления датчика (при $\Delta R_4 = 0$) координата движка реохорда $x = A$, где величина A – определяется соотношением (14.21). При максимальном приращении (изменении) сопротивления датчика (при $\Delta R_4 = \Delta R_m$) координата движка реохорда $x = M$ определяется соотношением (14.22).

$$A = \frac{R_{4H}}{R_{4H} + R_3}; \qquad (14.21)$$

$$M = \frac{R_{4H}}{R_{4H} + \Delta R_m + R_3} - \Delta R_m \cdot \frac{R_1 + R_p}{R_p \cdot (R_{4H} + \Delta R_m + R_3}, \qquad (14.22)$$

где R_{4H} – начальное (исходное) сопротивление датчика R_{4H} ($R_4 = R_{4H} + \Delta R_4$).

Зависимость $x = f(\Delta R_4)$ в рассматриваемом случае нелинейна, что свидетельствует о нелинейности равновесной мостовой измерительной схемы при размещении датчика в четвертом плече (см. рис. 14.1).

Чувствительность равновесной мостовой измерительной схемы с датчиком в четвертом плече зависит от значения сопротивления реохорда (см. соотношения (14.6) и (14.20), приведенные выше), но в рассматриваемом случае эта

зависимость менее выражена и носит более сложный характер, чем в случаях размещения датчиков в других плечах мостовой схемы. Вместе с тем и при размещении датчика в четвертом плече с ростом сопротивления реохорда уменьшается чувствительность мостовой схемы, а при уменьшении сопротивления реохорда чувствительность мостовой схемы возрастает.

Влияние сопротивления реохорда на чувствительность мостовой схемы рассмотрено при условии неизменности всех других параметров схемы (сопротивлений плеч, сопротивления датчика и его приращения, напряжения питания, чувствительности нуль-индикатора). Необходимо также отметить, что при росте чувствительности мостовой схемы (за счет $R_{\text{Р}}$) уменьшается диапазон возможных изменений сопротивления датчика, а при уменьшении чувствительности (за счет увеличения $R_{\text{Р}}$) диапазон возможных изменений сопротивления датчика возрастает.

14.6. Примеры расчета равновесных схем

Пример 1

Считаются заданными следующие величины (см. рис. 14.1): начальное сопротивление датчика $R_{\text{н}}$; конечное сопротивление датчика $R_{\text{к}}$, значения сопротивлений R_3 и R_4. Датчик включен в 1-е плечо (R_1 – текущее сопротивление датчика).

Требуется найти значение сопротивления реохорда $R_{\text{Р}}$ и значение сопротивления R_2.

Предполагаем, что сопротивление датчика равно $R_{\text{н}}$ и движок реохорда при этом находится в крайнем левом положении (т. е. $x = 0$). Тогда условие равновесия (для схемы, изображенной на рис. 14. 1) запишется в виде

$$\left(R_{\text{н}} + R_{\text{Р}}\right) \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \qquad (14.23)$$

Разделим правую и левую части равенства (14.23) на R_4 и введем обозначение $a = \dfrac{R_3}{R_4}$, которое уже использовалось в п. 14.1 настоящего учебного посо-

бия (см. выражение (14.8), приведенное выше). В этом случае выражение (14.23) принимает вид

$$R_{\text{н}} + R_{\text{Р}} = R_2 \cdot a\,. \qquad (14.24)$$

Предполагая, что сопротивление датчика равно $R_{\text{к}}$ и движок реохорда при этом находится в крайнем правом положении (т. е. $x = 1$), запишем условие равновесия (для схемы на рис. 14.1):

$$R_{\text{к}}+R_4 = (R_2+R_{\text{Р}})\cdot R_3 \qquad (14.25)$$

Используя принятое обозначение $a = \dfrac{R_3}{R_4}$, запишем уравнение (14.25) в виде

$$R_{\text{к}} = (R_2+R_{\text{Р}})\cdot a \qquad (14.26)$$

Решая совместно уравнения (14.24) и (14.26) относительно $R_{\text{Р}}$ и R_2, получим

$$R_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}}{1+a}, \qquad (14.27)$$

$$R_2 = \frac{R_{\text{к}} + a \cdot R_{\text{н}}}{a \cdot (1+a)}. \qquad (14.28)$$

Полученные соотношения (14.27) и (14.28) позволяют рассчитать значения искомых величин R_P и R_2 по значениям заданных величин $R_{\text{Н}}$, $R_к$ и $a = R_3/R_4$.

Пример 2

Рассчитать мостовую схему, приведенную на рис. 14.6.

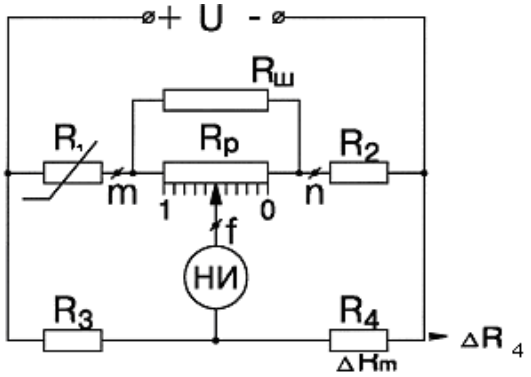


Рис. 14.6. Расчетная принципиальная схема равновесного моста постоянного тока с шунтом: $R_{\text{Ш}}$ – сопротивление шунта; R_{l} – сопротивление датчика (текущее)

Считаются заданными следующие величины: начальное сопротивление датчика $R_{\text{н}}$; конечное сопротивление датчика $R_{\text{к}}$; сопротивление реохорда $R_{\text{Р}}$; значение сопротивлений R_3 и R_4.

Требуется найти: значение сопротивления шунта $R_{\text{Ш}}$ и значение сопротивления R_2.

Рассмотрим параллельное соединение сопротивлений $R_{\text{Ш}}$ и $R_{\text{Р}}$.

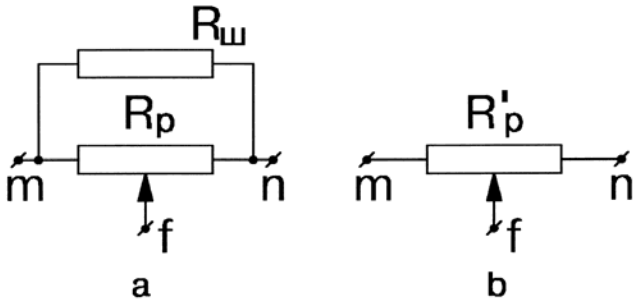


Рис. 14.7. Эквивалентные электрические схемы

Электрическая схема, приведенная на рис. 14.7, *a*, эквивалентна схеме, приведенной на рис. 14.7, *b*, если удовлетворяется условие

$$R'_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{Р}} \cdot R_{\text{Ш}}}{R_{\text{Р}} + R_{\text{Ш}}} \tag{14.29}$$

Таким образом, схема рис. 14.6 сводится к схеме, приведенной на рис. 11.1 (если принять $R_{\text{Р}} = R'_{\text{Р}}$), а пример 2 сводится к примеру 1, уже рассмотренному выше. Исходя из сказанного, можно записать для рассматриваемого случая:

$$R'_{\text{Р}} = \frac{R_{\text{к}} - R_{\text{н}}}{1 + a}, \tag{14.30}$$

$$R_2 = \frac{R_{\text{к}} + a \cdot R_{\text{н}}}{a \cdot (1 + a)}. \tag{14.31}$$

Решая уравнение (14.29) относительно $R_{\text{Ш}}$, получим

$$R_{\text{Ш}} = \frac{R_{\text{Р}} \cdot R'_{\text{Р}}}{R_{\text{Р}} - R'_{\text{Р}}}. \tag{14.32}$$

Подставляя в (14.32) значение $R'_{\text{Р}}$ в соответствии с выражением (14.30), найдем соотношение, связывающее значение сопротивления шунта $R_{\text{Ш}}$ с заданными по условию величинами:

$$R_{\text{Ш}} = \frac{R_{\text{Р}} \cdot \left(R_{\text{к}} - R_{\text{н}}\right)}{R_{\text{Р}} \cdot \left(1 + a\right) - R_{\text{к}} + R_{\text{н}}} \qquad (14.33)$$

Полученные соотношения (14.31) и (14.33) позволяют рассчитать значения величин R_2 и $R_{\text{Ш}}$ (по значениям заданных величин). Отметим, что шунтирование реохорда повышает чувствительность схемы и изменяет диапазон возможных изменений сопротивления датчика (диапазон при этом сокращается по сравнению со случаем без шунтирования реохорда).

15. МОСТОВЫЕ СХЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

15.1. Общие положения

В данном разделе рассмотрены основные положения и соотношения, используемые при анализе четырехплечих мостовых измерительных схем переменного тока (рис. 15.1).

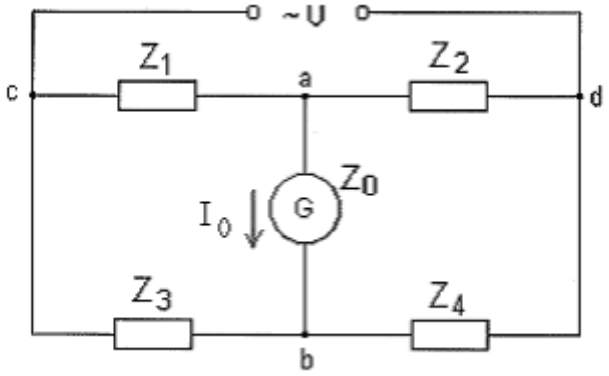


Рис. 15.1. Принципиальная электрическая схема
четырехплечего измерительного моста переменного тока

В главах 11, 12, 13 и 14 учебного пособия рассмотрены основные соотношения и характеристики применительно к мостовым измерительным схемам постоянного тока. Мостовая схема постоянного тока является частным случаем мостовой схемы переменного тока (когда $Z = R$ и $f = 0$, где f – частота питающего схему тока) и все соотношения для мостов постоянного тока в основном сохраняют правомерность и для мостов переменного тока, если в них активные сопротивления R заменить комплексными сопротивлениями Z, а напряжения и токи – комплексами соответствующих величин. При этом у мостов переменного тока появляются новые свойства, которыми не обладают мостовые схемы постоянного тока и которые будут рассмотрены ниже, в последующих параграфах учебного пособия. В данном разделе исследуем рассматриваемый вопрос чисто формально, путем замены величин R, I и U на комплексные величины.

Прежде чем проводить замены, рассмотрим принятый порядок обозначения комплексных величин.

Государственный стандарт ГОСТ 1494–77 [56] устанавливает следующие буквенные обозначения комплексных величин (табл. 15.1).

Таблица 15.1

Обозначение комплексных величин

Наименование величины	**Обозначение**	
	основное	**резервное**
Действительная часть	A'	$\mathrm{Re}\,\underline{A}$
Мнимая часть	A''	$\mathrm{Im}\,\underline{A}$
Комплексная величина	$\underline{A} = A' + jA''$ $\underline{A} = A \cdot e^{j\varphi}$ $\underline{A} = A \angle \varphi$	$\underline{A} = \mathrm{Re}\,\underline{A} + \mathrm{j}\,\mathrm{Im}\,\underline{A}$ $\underline{A} = \lvert\underline{A}\rvert \cdot e^{j\varphi}$ $\underline{A} = \lvert\underline{A}\rvert \angle \varphi$

Для комплексных величин следует применять обозначения типа $\underline{C} = \mathrm{Re}\,\underline{C} + j\mathrm{Im}\,\underline{C}$ или $\underline{C} = B + jD$, где под C, B, D понимаются любые величины. Кроме рассмотренной алгебраической формы записи комплексного числа, может быть использована показательная форма записи: $\underline{C} = C \cdot e^{j\varphi}$, где C – модуль комплексного числа; φ – аргумент комплексного числа.

Для электрических величин используемые буквенные обозначения приведены в 15.2.

Отметим, что по государственному стандарту [56] допускается модули комплексных величин, не являющихся изображениями функции времени, обозначать строчными буквами.

Допускается для обозначения комплексных действующих и амплитудных значений величин, являющихся синусоидальными функциями времени, взамен способов, указанных в табл. 15.1 и 15.2, над основным обозначением величины ставить точку.

Таблица 15.2

Обозначение электрических комплексных величин

Наименование величины	**Обозначение**	
	основное	**резервное**
Действительная часть (активное сопротивление)	R	$\mathrm{Re}\,\underline{Z}$
Мнимая часть (реактивное сопротивление)	X	$\mathrm{Im}\,\underline{Z}$
Комплексная величина (комплексное (полное) сопротивление)	$\underline{Z}=R+\mathrm{j}X$ $\underline{Z}=Z\cdot e^{j\varphi}$ $\underline{Z}=Z\angle\varphi$ $\dot{I}$; $\dot{I}_m$ $\dot{U}$; $\dot{U}_m$	$\underline{Z}=\mathrm{Re}\,\underline{Z}+\mathrm{j}\,\mathrm{Im}\,\underline{Z}$ $\underline{Z}=\lvert\underline{Z}\rvert\cdot e^{j\varphi}$ $\underline{Z}=\lvert Z\rvert\angle\varphi$

В табл. 15.2 приняты следующие обозначения: $\underline{Z}$ – комплексное сопротивление; Z – модуль комплексного сопротивления; R – активное сопротивление; X – реактивное сопротивление; φ – аргумент комплексного сопротивления (сдвиг по фазе между током и напряжением); $\dot{I}$ и $\dot{U}$ – комплексы действующих значений тока и напряжения; $\dot{I}_m$ и $\dot{U}_m$ – комплексы амплитудных значений тока и напряжения. Отметим, что в электротехнической литературе принято обозначать комплексное сопротивление через Z большое (печатное), а модуль комплексного сопротивления – через z малое (прописное). Представим ток в измерительной диагонали мостовой схемы с учетом приведенных обозначений:

$$\dot{I}_0=\dot{U}\cdot\frac{\underline{Z}_1\cdot\underline{Z}_4-\underline{Z}_2\cdot\underline{Z}_3}{\underline{Z}_0\cdot(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2)\cdot(\underline{Z}_3+\underline{Z}_4)+\underline{Z}_1\cdot\underline{Z}_2\cdot(\underline{Z}_3+\underline{Z}_4)+\underline{Z}_3\cdot\underline{Z}_4\cdot(\underline{Z}_1+\underline{Z}_2)} \quad (15.1)$$

где $\dot{I}_0$ – комплекс тока в измерительной диагонали;

$\dot{U}$ – комплекс напряжения питания;

$\underline{Z}_0$ – комплексное сопротивление прибора G, установленного в измерительной диагонали мостовой схемы;

$\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, $\underline{Z}_4$ – комплексные сопротивления плеч мостовой схемы.

Равновесие мостовой схемы наступает при таком подборе параметров моста, при котором $\dot{I}_0 = 0$, что имеет место при выполнении условия

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 . \qquad (15.2)$$

В развернутом виде выражения комплексных (полных) сопротивлений могут быть представлены в алгебраической или показательной форме. В алгебраической форме эти выражения принимают вид

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 , \qquad (15.3)$$

где R_1 и X_1 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления первого плеча мостовой схемы;

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 , \qquad (15.4)$$

где R_2 и X_2 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления второго плеча мостовой схемы;

$$\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 , \qquad (15.5)$$

где R_3 и X_3 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления третьего плеча мостовой схемы;

$$\underline{Z}_4 = R_4 + jX_4 , \qquad (15.6)$$

где R_4 и X_4 – активная и реактивная составляющие комплексного (полного) сопротивления четвертого плеча мостовой схемы.

В показательной форме рассматриваемые выражения принимают вид

$$\underline{Z}_1 = Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} , \qquad (15.7)$$

где $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления первого плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \dfrac{X_1}{R_1}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения в первом плече мостовой схемы;

$$\underline{Z}_2 = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} , \qquad (15.8)$$

где $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления второго плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \text{arctg}\dfrac{X_2}{R_2}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения во втором плече мостовой схемы;

$$\underline{Z}_3 = Z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \tag{15.9}$$

где $Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления третьего плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \text{arctg}\dfrac{X_3}{R_3}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения в третьем плече мостовой схемы;

$$\underline{Z}_4 = Z_4 \cdot e^{j\varphi_4}, \tag{15.10}$$

где $Z_4 = \sqrt{R_4^2 + X_4^2}$ – модуль комплексного (полного) сопротивления четвертого плеча мостовой схемы;

$\varphi_1 = \text{arctg}\dfrac{X_4}{R_4}$ – угол фазового сдвига тока относительно напряжения в четвертом плече мостовой схемы.

Подставляя в (15.2) значения $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$ и $\underline{Z}_4$ в показательной форме (15.7), (15.8), (15.9) и (15.10), получим

$$Z_1 \cdot e^{j\varphi_1} \cdot Z_4 \cdot e^{j\varphi_4} = Z_2 \cdot e^{j\varphi_2} \cdot Z_3 \cdot e^{j\varphi_3}, \tag{15.11}$$

$$Z_1 \cdot Z_4 \cdot e^{j(\varphi_1+\varphi_4)} = Z_2 \cdot Z_3 \cdot e^{j(\varphi_2+\varphi_3)}. \tag{15.12}$$

Выражение (15.12) правомерно, если выполняются условия:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3, \tag{15.13}$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \tag{15.14}$$

Таким образом, для уравновешивания мостовой схемы переменного тока необходимо выполнить два условия: (15.13) и (15.14). Другими словами, для уравновешивания рассматриваемой схемы необходимо две регулировки («по модулям» и «по фазам»), в то время как для уравновешивания мостовой схемы постоянного тока достаточно одной регулировки.

Условие (15.14) показывает, при каком расположении сопротивлений, в зависимости от их характера, можно уравновесить мостовую схему. Если смежные плечи моста, например третье и четвертое, имеют чисто активные сопротивления R_3 и R_4 (то есть $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$), то сопротивление двух других плеч должно иметь или индуктивный, или емкостной характер. Если противоположные плечи имеют чисто активные сопротивления, то одно из двух других должно иметь индуктивный характер, а второе – емкостной.

В мостах переменного тока (как и в мостах постоянного тока) в качестве измерительных и нуль-индикаторов могут использоваться электронные приборы с большим внутренним сопротивлением ($R_0 \to \infty$). Такие мосты, как уже отмечалось, называются *потенциальными мостовыми измерительными схемами*. Для этих схем напряжение между точками a и b (рис. 15.1) можно определить по соотношению

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_0 = \dot{U} \cdot \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 - \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_4) \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)}, \qquad (15.15)$$

где $\dot{U}_{ab}$, $\dot{U}_0$, $\dot{U}$ – комплексы соответствующих напряжений;

$\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$, $\underline{Z}_3$, $\underline{Z}_4$ – комплексные (полные) сопротивления, включенные соответственно в первое, второе, третье и четвертое плечи мостовой схемы.

Отметим, что если в момент считывая показаний мостовая схема уравновешена (соотношение (15.2) выполняется), то такая мостовая схема называется *равновесной*. Если же в момент считывания показаний мостовая схема не уравновешена (соотношение (15.2) не выполняется), то такая мостовая схема называется *неравновесной*. В дальнейшем основное внимание будет уделено равновесным мостовым схемам, а неравновесные схемы (как менее распространенные) будут рассмотрены сравнительно кратко в виде обзора возможных вариантов схем переменного тока.

15.2. Измерения параметров катушек индуктивности

Для измерения индуктивностей и для включения индуктивных датчиков широко используются равновесные мостовые схемы переменного тока. При

этом электрическая схема замещения катушек индуктивностей может быть последовательной (рис. 15.2) или параллельной (рис. 15.3).

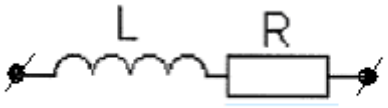


Рис. 15.2. Последовательная схема замещения реальной катушки индуктивностей:
L – идеальная индуктивность; R – активное сопротивление

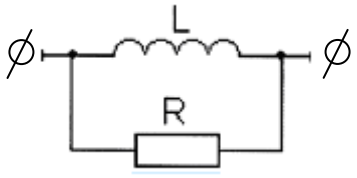


Рис. 15.3. Параллельная схема замещения реальной катушки индуктивностей:
L – идеальная индуктивность; R – активное сопротивление

Последовательная схема замещения используется при большой добротности исследуемой катушки индуктивности ($Q > 1$), а параллельная схема замещения используется при малой добротности исследуемой катушки индуктивности ($Q < 1$).

Добротность Q для обеих схем замещения определяется соотношением

$$Q = \frac{X_э}{R_э}, \tag{15.16}$$

где $X_э$ – эквивалентное реактивное сопротивление исследуемой катушки индуктивности;

$R_э$ – эквивалентное активное сопротивление исследуемой катушки индуктивности.

Для последовательной схемы замещения справедливы неравенства:

$$X_э = X = \omega L, \tag{15.17}$$

$$R_э = R, \tag{15.18}$$

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \tag{15.19}$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – частота тока, протекающего по плечам мостовой схемы.

Для параллельной схемы замещения можно записать (см. рис. 15.3):

$$\underline{Z}_э = \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L}, \tag{15.20}$$

$$\underline{Z}_э = \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j\frac{\omega L R^2}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{15.21}$$

$$\underline{Z}_э = R_э + jX_э, \tag{15.22}$$

$$R_э = \frac{\omega^2 L^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{15.23}$$

$$x_э = \frac{\omega L R^2}{R^2 + \omega^2 L^2}, \tag{15.24}$$

$$Q = \frac{X_э}{R_э} = \frac{R}{\omega L}. \tag{15.25}$$

Полученные выражения (15.19) и (15.25) позволяют рассчитать добротность катушек индуктивностей при использовании соответственно последовательной и параллельной схем замещения.

Необходимо отметить, что четырехплечие мосты обладают плохой сходимостью (трудно уравновешиваются) при малых значениях коэффициентов добротности (в том числе и при параллельной схеме замещения) и, в силу этого, используются редко. Чаще применяются (при измерениях малых значений коэффициентов добротности) шестиплечие мосты, описываемые ниже, в последующих пунктах учебного пособия.

В данном параграфе учебного пособия рассматривается измерение индуктивностей при использовании последовательной схемы замещения (рис. 15.4).

Условие равновесия для мостовой схемы рис. 15.4 запишется в виде

$$\left(R + j\omega L\right) \cdot R_4 = \left(R_2 + j\omega L_2\right) \cdot R_3, \tag{15.26}$$

$$R \cdot R_4 + j\omega L R_4 = R_2 \cdot R_3 + j\omega L_2 R_3. \tag{15.27}$$

Два комплексных числа равны между собой, если равны их вещественные и мнимые части. Приравнивая левые и правые вещественные и мнимые части уравнения (15.27) и решая полученные равенства относительно искомых величин R, L и Q, получим

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \qquad (15.28)$$

$$L = L_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}. \qquad (15.29)$$

Поскольку в данном случае использована последовательная схема замещения, добротность катушки индуктивностей оценивается соотношением (15.19).

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазинов сопротивлений R_2 и индуктивностей L_2, можно по выражениям (15.28), (15.29) и (15.19) определить измеряемые величины R, L и Q.

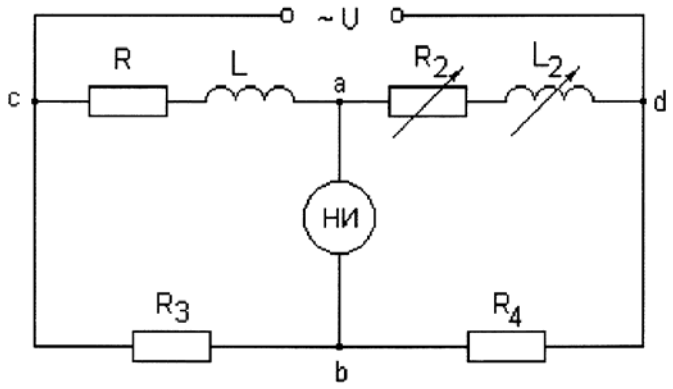


Рис. 15.4. Принципиальная электрическая схема четырехплечего моста для измерения параметров катушек индуктивностей (первый вариант): R, L – измеряемые величины; R_2 – магазин сопротивлений; L_2 – магазин индуктивностей; R_3, R_4 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

Для измерения искомых величин R и L, кроме описанной схемы рис. 15.4, может быть использована мостовая схема с магазином емкостей (рис. 15.5).

Комплексные сопротивления плеч моста следующие значения (см. рис. 15.5):

первое плечо $\underline{Z}_1 = R + j\omega L$;

второе плечо $\underline{Z}_2 = R_2$;

третье плечо $\underline{Z}_3 = R_3$;

четвертое плечо $\underline{Z}_4 = \dfrac{R_4 \cdot (j\omega C_4)^{-1}}{R_4 + (j\omega C_4)^{-1}} = \dfrac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$.

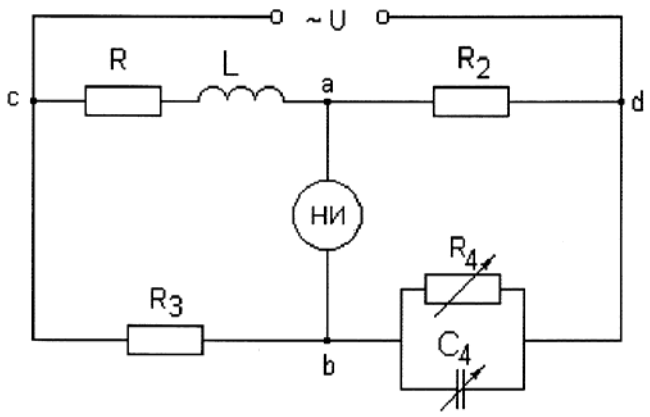


Рис. 15.5. Принципиальная электрическая схема четырехплечего моста для измерения параметров катушки индуктивностей (второй вариант): R, L – измеряемые величины; R_4 – магазин сопротивлений; C_4 – магазин емкостей; R_2, R_3 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

При равновесии мостовой схемы имеет место следующее соотношение:

$$(R + j\omega L) \cdot \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} = R_2 \cdot R_3, \qquad (15.30)$$

$$R \cdot R_4 + j\omega L R_4 = R_2 \cdot R_3 + j\omega C_4 R_2 R_3 R_4. \qquad (15.31)$$

Приравнивая левые и правые вещественные и мнимые части уравнения (15.31) друг другу и решая эти равенства относительно искомых величин R и L, получим

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \qquad (15.32)$$

$$L = C_4 R_2 R_3. \qquad (15.33)$$

Добротность исследуемой катушки индуктивностей записывается в виде

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \omega C_4 R_4. \qquad (15.34)$$

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазина сопротивлений R_4 и магазина емкостей C_4, можно по выражениям (15.32)–(15.34) определить измеряемые величины R, L и Q.

15.3. Измерение параметров конденсаторов

Реальный конденсатор представляется эквивалентной электрической схемой в виде идеальной емкости, последовательно или параллельно соединенной с активным сопротивлением, обусловленным потерями в исследуемом конденсаторе.

На рис. 15.6 приведены эквивалентные электрические схемы реального конденсатора с потерями.

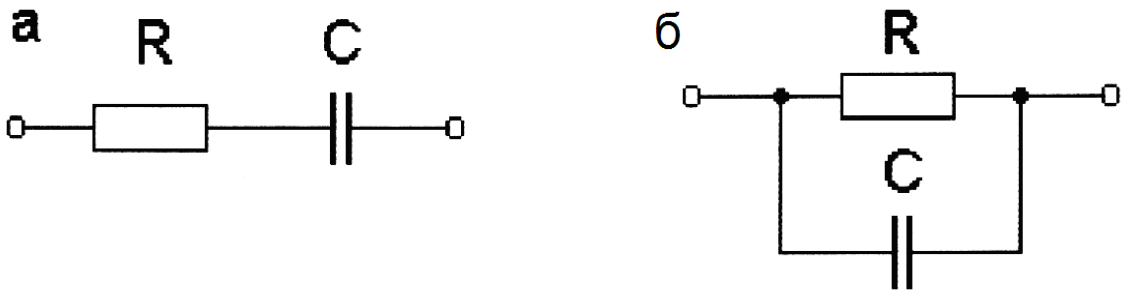


Рис. 15.6. Последовательная (*а*) и параллельная (*б*) электрические эквивалентные схемы реального конденсатора с потерями

Потери в реальном конденсаторе принято оценивать величиной тангенса угла потерь ($\mathrm{tg}\,\delta$), определяемого соотношением

$$tg\delta = \frac{R_э}{X_э}, \qquad (15.35)$$

где $R_э$ – активная составляющая эквивалентной схемы замещения конденсатора;

$X_э$ – реактивная составляющая эквивалентной схемы замещения конденсатора.

Для последовательной схемы замещения (рис. 15.6, *а*) справедливы равенства:

$$X_э = X_c = \frac{1}{\omega C}, \qquad (15.36)$$

$$R_э = R, \qquad (15.37)$$

$$\mathrm{tg}\,\delta = \omega \cdot C \cdot R, \qquad (15.38)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота.

Для параллельной схемы замещения (рис. 15.6, *б*) справедливы равенства:

$$\underline{Z}_э = \frac{R \cdot (j\omega \cdot C)^{-1}}{R + (j\omega \cdot C)^{-1}}, \tag{15.39}$$

$$\underline{Z}_э = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2} - j\frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \tag{15.40}$$

$$\underline{Z}_э = R_э - jx_э, \tag{15.41}$$

$$R_э = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \tag{15.42}$$

$$X_э = \frac{\omega C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \tag{15.43}$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega C R}. \tag{15.44}$$

Полученные выражения (15.38) и (15.44) позволяют рассчитать $\operatorname{tg}\delta$ при использовании соответственно последовательной и параллельной схем замещения реальных конденсаторов.

Для измерения параметров конденсаторов с малыми потерями используются последовательные схемы замещения (рис. 15.7).

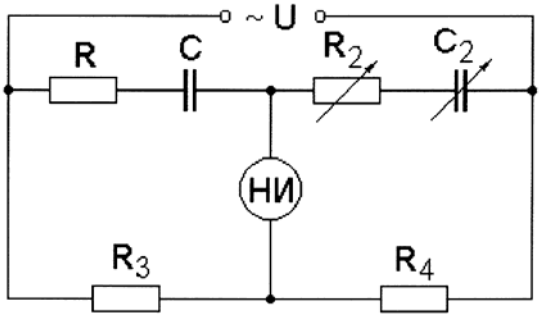


Рис. 15.7. Принципиальная электрическая схема моста переменного тока для измерения параметров реального конденсатора с использованием последовательной схемы замещения: R, C – измеряемые величины; R_2 – магазин сопротивлений; C_2 – магазин емкостей; R_3, R_4 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

Полные (комплексные) сопротивления плеч мостовой схемы, приведенной на рис. 15.7, имеют следующие значения:

первое плечо $\underline{Z}_1 = R - j\frac{1}{\omega C}$;

второе плечо $\underline{Z}_2 = R_2 - j\dfrac{1}{\omega C_2}$;

третье плечо $\underline{Z}_3 = R_3$;

четвертое плечо $\underline{Z}_4 = R_4$.

При равновесии рассматриваемой мостовой схемы должно выполняться условие (15.2), которое в нашем случае имеет вид

$$\left(R - j\frac{1}{\omega C}\right)\cdot R_4 = \left(R_2 - j\frac{1}{\omega C_2}\right)\cdot R_3, \tag{15.45}$$

$$R\cdot R_4 - j\frac{R_4}{\omega C} = R_2\cdot R_3 - j\frac{R_3}{\omega C_2}. \tag{15.46}$$

Два комплексных числа равны между собой, если равны их вещественные и мнимые части. Приравнивая вещественные и мнимые части уравнения (15.46) и решая полученные равенства относительно искомых величин R и C, получим

$$R = R_2\cdot\frac{R_3}{R_4}, \tag{15.47}$$

$$C = C_2\cdot\frac{R_4}{R_3}. \tag{15.48}$$

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы, приведенной на рис. 15.7, с помощью магазина сопротивлений R_2 и магазина емкостей C_2, можно по выражениям (15.47), (15.48) и (15.38) определить параметры реального конденсатора: R (эквивалентное активное сопротивление), C (идеальную емкость) и $\operatorname{tg}\delta$ (тангенс угла потерь).

Для измерения параметров конденсаторов с большими потерями используются параллельные схемы замещения (рис. 15.8).

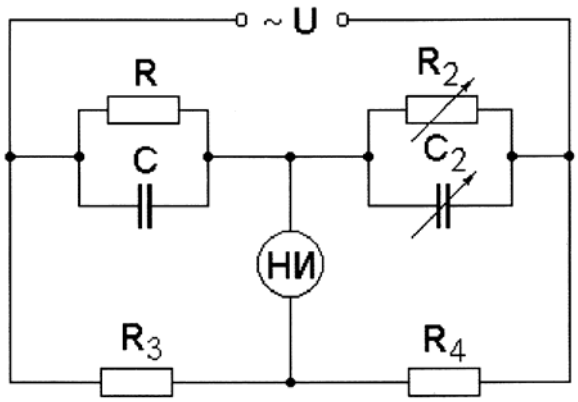


Рис. 15.8. Принципиальная электрическая схема моста переменного тока для измерения параметров реального конденсатора с использованием параллельной схемы замещения: R, C – измеряемые величины; R_2 – магазин сопротивлений; C_2 – магазин емкостей; R_3, R_4 – постоянные сопротивления; НИ – нуль-индикатор

Полные (комплексные) сопротивления плеч рассматриваемой мостовой схемы имеют следующие значения:

первое плечо $\underline{Z}_1 = \dfrac{R \cdot (j\omega C)^{-1}}{R + (j\omega C)^{-1}}$;

второе плечо $\underline{Z}_2 = \dfrac{R_2 \cdot (j\omega C)^{-1}}{R_2 + (j\omega C)^{-1}}$;

третье плечо $\underline{Z}_3 = R_3$;

четвертое плечо $\underline{Z}_4 = R_4$.

При равновесии исследуемой мостовой схемы должно выполняться условие (15.2), которое в рассматриваемом случае имеет вид

$$\frac{R \cdot (j\omega C)^{-1}}{R + (j\omega C)^{-1}} \cdot R_4 = \frac{R_2 \cdot (j\omega C)^{-1}}{R_2 + (j\omega C)^{-1}} \cdot R_2 . \qquad (15.49)$$

$$R \cdot R_2 \cdot R_4 \cdot \omega C_2 - jR \cdot R_4 = R \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \omega C - jR_2 \cdot R_3 . \qquad (15.50)$$

Приравнивая вещественные и мнимые части уравнения (15.50), находящиеся в левой и правой частях этого уравнения, и решая полученные равенства относительно искомых величин, получим

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \qquad (15.51)$$

$$C = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}. \qquad (15.52)$$

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазина сопротивлений R_2 и магазина емкостей C_2, можно по выражениям (15.51), (15.52) и (15.44) определить параметры исследуемого конденсатора: R (эквивалентное активное сопротивление), C (идеальную емкость) и $\mathrm{tg}\,\delta$ (тангенс угла потерь).

15.4. Шестиплечие мостовые схемы

Шестиплечие мостовые схемы нашли широкое применение для измерения параметров катушек индуктивностей (R, L и Q) при малых значениях коэффициентов добротности. Использование четырехплечих мостов в этом случае затруднительно, т. к. для них при коэффициенте добротности $Q = 1$ процесс уравновешивания схемы становится затруднительным, а при $Q < 0{,}5$ приведение моста в состояние равновесия практически невыполнимо. Хорошую сходимость при малых коэффициентах добротности имеют шестиплечие мосты. Принципиальная электрическая схема шестиплечего моста приведена на рис. 15.9.

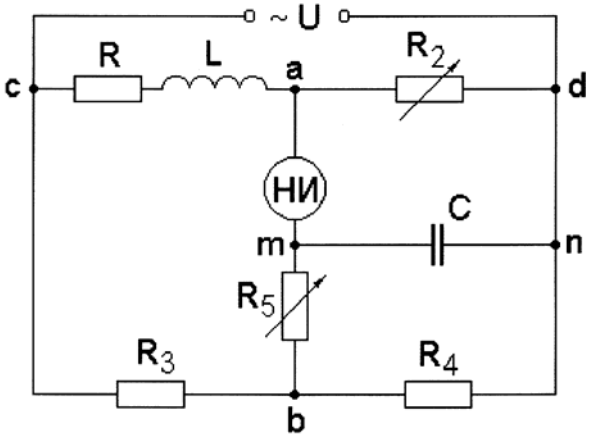


Рис. 15.9. Принципиальная электрическая схема шестиплечего моста для измерения параметров катушек индуктивностей с малой добротностью:
R, L – измеряемые величины; R_2, R_5 – магазины сопротивлений;
R_3, R_4 – постоянные сопротивления; C – постоянная емкость;
НИ – нуль-индикатор

Условия равновесия шестиплечего моста, приведенного на рис. 15.9, можно найти путем трансформации треугольника $m-n-b$, образованного элементами C, R_4 и R_5, в звезду. После такой трансформации шестиплечий мост преобразуется в четырехплечий, уравнение равновесия которого хорошо известно и уже многократно приводилось и использовалось.

После указанных преобразований находим два условия равновесия мостовой схемы:

$$R = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}, \tag{15.53}$$

$$L = C \cdot \frac{R_2}{R_4}\left(R_3 \cdot R_4 + R_5\left(R_2 + R_3\right)\right). \tag{15.54}$$

Мост уравновешивается регулировкой переменных сопротивлений R_2 и R_5. Первоначально изменением сопротивления R_2 выполняется первое условие равновесия моста (см. выражение (15.53)), затем изменением сопротивления R_5 выполняется второе условие равновесия моста (см. выражение (15.54)). Значение R_5 не входит в первое условие равновесия. Благодаря такому свойству шестиплечий мост обладает хорошей сходимостью, которая сохраняется и при малых значениях коэффициента добротности исследуемой катушки индуктивностей.

Таким образом, добившись равновесия мостовой схемы с помощью магазинов сопротивлений R_2 и R_5, можно по выражениям (15.53), (15.54) и (15.19) определить параметры исследуемой катушки: активное сопротивление R, индуктивность L и добротность Q.

15.5. Трансформаторные мостовые схемы

Четырехплечие трансформаторные измерительные мосты отличаются от мостов, рассмотренных выше, наличием индуктивно связанных плеч в диагонали источника питания (рис. 15.10) или в цепи нуль-индикатора (рис. 15.11).

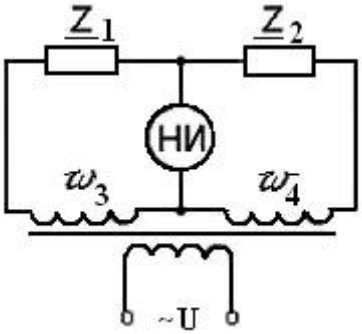


Рис. 15.10. Принципиальная электрическая схема трансформаторного измерительного моста с индуктивно связанными плечами (первый вариант): $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ – комплексные сопротивления; *w3*, *w4* – обмотки трансформатора, образующие третье и четвертое плечи мостовой схемы

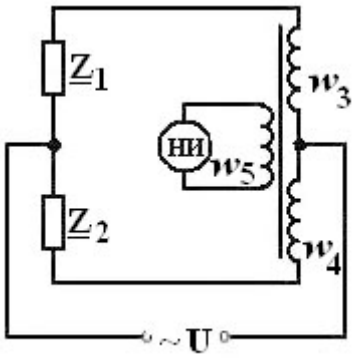


Рис. 15.11. Принципиальная электрическая схема трансформаторного измерительного моста с индуктивно связанными плечами (второй вариант): $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ – комплексные сопротивления; *w3*, *w4* – обмотки трансформатора, образующие третье и четвертое плечи мостовой схемы; *w5* – обмотка трансформатора в цепи нуль–индикатора

В мостах переменного тока, рассмотренных в пп. 15.1, 15.2, 15.3, 15.4 учебного пособия, третье и четвертое плечи содержат резисторы. Между тем на повышенных частотах начинают проявляться не только их активные сопротивления R_3 и R_4 (что использовано во всех рассмотренных случаях), но и реактивные параметры этих резисторов (индуктивность, емкость), что приводит к появлению дополнительных погрешностей при проведении измерений. Указанные погрешности можно уменьшить, если вместо резисторов использовать обмотки трансформатора с тесной индуктивной связью (см. рис. 15.10 и 15.11). Тесная индуктивная связь обмоток достигается тем, что проводники обмоток свиваются в жгут, который наматывается на сердечник трансформатора, образуя секции обмоток *w3*, *w4* и *w5*. При равновесии моста справедливо соотношение

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 \cdot \frac{w_3}{w_4}. \qquad (15.55)$$

Если $\underline{Z}_1$ – измеряемое комплексное сопротивление, то мост уравновешивается регулировкой известного комплексного сопротивления $\underline{Z}_2$ и переключением секций обмоток *w3* и *w4*. Условие равновесия трансформаторного измерительного моста, выражаемое формулой (15.55), обычно называется идеальным условием равновесия, т. к. в этом случае не учитываются потоки рассеяния обмоток и принимаются допущения об идеальной связи между ними и о пропорциональности потерь в проводах числу витков обмоток. На практике при реализации мостов этого типа всегда принимаются меры, позволяющие считать принятые допущения правомерными, а идеальное условие равновесия (15.55) справедливым.

Достоинством трансформаторных измерительных мостов является их практически постоянная чувствительность в широком диапазоне частот и сравнительно малая погрешность при проведении измерений.

Следует отметить широкие возможности при использовании трансформаторных мостовых схем для измерения неэлектрических величин электрическими методами (уровнемеры, влагомеры, измерительные преобразователи перемещений и т. п.).

Кроме рассмотренных четырехплечих мостов, известны также двойные и многоплечие трансформаторные мостовые измерительные схемы.

15.6. Выводы и рекомендации

Рассмотренные в данном параграфе учебного пособия мостовые измерительные схемы переменного тока позволяют решить самые разнообразные вопросы измерительной техники. Вместе с тем эти мостовые схемы требуют выполнения ряда обязательных условий при их использовании. В противном случае устройства начинают работать с большими погрешностями или становятся вообще неработоспособными. Сказанное в равной степени относится и к равновесным, и к неравновесным схемам. Последние используются сравнительно

редко, поэтому в учебном пособии основное внимание уделено равновесным мостовым схемам. Равновесие мостов переменного тока, как уже отмечалось в п. 15.1 пособия, возможно лишь при строгом соблюдении определенного характера сопротивлений в плечах мостовой схемы. Нарушение этих требований приводит к тому, что равновесие схем становится невозможным. Большое значение имеет влияние на равновесие схемы частоты питания. По влиянию частоты все мостовые схемы переменного тока делятся на схемы, равновесие которых не зависит от частоты питающего тока (частотно-независимые схемы), и схемы, равновесие которых зависит от частоты (частотно-зависимые схемы).

При измерении параметров электрических цепей частотная зависимость мостовой схемы приводит к дополнительным трудностям и дополнительным погрешностям. Поэтому все приведенные в учебном пособии мостовые схемы являются частотно-независимыми. Причем переход от одной схемы к другой (от частотно-независимой к частотно-зависимой) может произойти от переключения всего одного элемента одного из плеч схемы. Например, на рис. 15.5 приведена частотно-независимая схема. Однако стоит резистор R_4 (в четвертом плече схемы) подключить последовательно с конденсатором C_4 (а не параллельно конденсатору, как на рис. 15.5), и мостовая схема становится частотно-зависимой. Частотно-зависимые схемы тоже находят применение (например, для измерения частоты), но применения эти носят ограниченный характер и в данном учебном пособии не рассматриваются.

Таким образом, рассмотренные мостовые измерительные схемы могут проявить все свои возможности и достоинства лишь при соблюдении целого ряда условий, значительная часть которых изложена в настоящем учебном пособии и которые могут быть использованы как при изучении этого вопроса, так и при практическом использовании мостовых схем для измерения электрических и неэлектрических величин.

Дополнительные сведения по мостовым измерительным схемам можно найти в литературных источниках [1–3].

16. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАВНОВЕСНЫХ МОСТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

16.1. Двух- и трехпроводные схемы включения датчиков

Двухпроводная схема подключения резистивного датчика к равновесной мостовой измерительной схеме постоянного тока приведена на рис. 16.1.

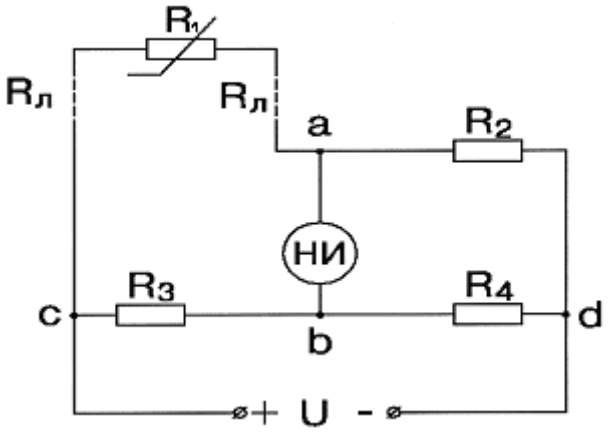


Рис. 16.1. Двухпроводная схема подключения датчиков:
R_1 – сопротивление датчика; $R_Л$ – сопротивление проводов,
составляющих двухпроводную линию связи датчика с мостовой схемой

Условие равновесия для рассматриваемого случая запишется в виде

$$\left(R_л + R_1 + R_л\right) \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 , \qquad (16.1)$$

где $(R_л + R_1 + R_л)$ – сопротивление первого плеча мостовой схемы (от точки c схемы, к которой подключено питание, до точки a схемы, к которой подключен нуль-индикатор НИ).

Легко заметить: изменение сопротивлений проводов соединительной линии $R_Л$ (за счет, например, повышения или понижения температуры окружающей среды) приведет к нарушению равенства (16.1), что является причиной возникновения дополнительной погрешности при проведении измерений с использованием двухпроводных схем подключения датчиков.

Трехпроводная схема подключения резистивного датчика к равновесной мостовой измерительной схеме постоянного тока приведена на рис. 16.2.

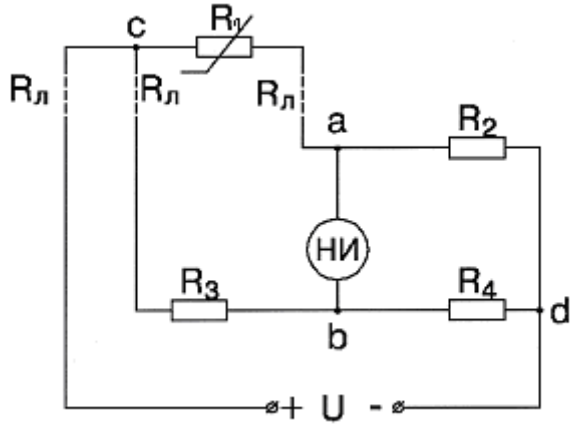


Рис. 16.2. Трехпроводная схема подключения датчиков (обозначения на рис. 16.2 аналогичны соответствующим обозначениям, принятым на рис. 16.1)

Условие равновесия для рассматриваемого случая запишется в виде

$$(R_1 + R_л)\cdot R_4 = R_2 \cdot (R_3 + R_л), \qquad (16.2)$$

где $(R_1 + R_л)$– сопротивление первого плеча мостовой схемы (от точки подключения питания (точка c) до точки подключения нуль-индикатора (точка a));

$R_1 + R_л$ – сопротивление третьего плеча мостовой схемы (от точки подключения питания (точка c) до точки подключения нуль-индикатора (точка b схемы)).

Сопротивления проводов соединительной линии $R_Л$ входят в левую и в правую части равенства (16.2). В результате изменение этих сопротивлений на одну и ту же величину (за счет, например, повышения или понижения температуры окружающей среды) не нарушает рассматриваемого равенства. Этот вывод правомерен при определенных соотношениях между сопротивлениями, образующими мостовую схему (например, при $R_2 = R_4$, $R_1 = R_3$, $R_л << R_1$, $R_л << R_3$). Таким образом, при использовании трехпроводной линии связи для подключения датчиков к равновесным мостовым схемам удается избежать дополнительных погрешностей при изменении сопротивлений подводящих проводов.

16.2. Автоматические мостовые схемы

На основе равновесных мостовых измерительных схем часто строятся автоматические устройства, используемые для измерения различных физических величин (например, температуры).

Упрощенная схема автоматического моста приведена на рис. 16.3.

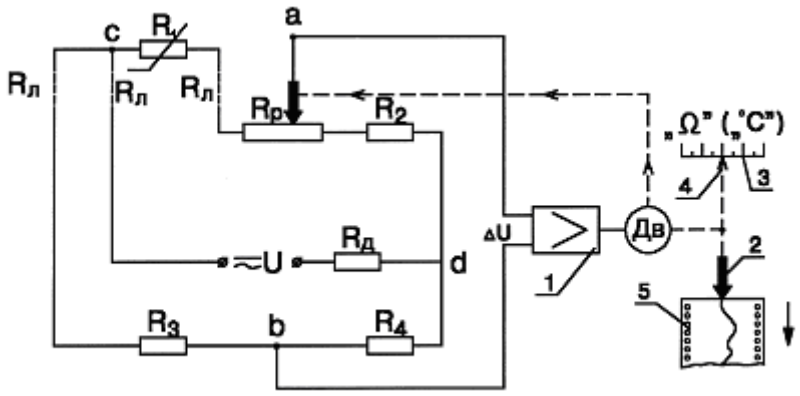


Рис. 16.3. Упрощенная принципиальная схема автоматического моста: R_1 – сопротивление датчика (например, реостатный датчик или терморезисторный датчик («термометр сопротивления»)); $R_Л$ – сопротивление проводов соединительной линии (использована трехпроводная схема подключения датчика); $R_Д$ – ограничительное сопротивление в цепи питания; $R_Р$ – сопротивление реохорда; R_2, R_3, R_4 – постоянные сопротивления; Дв – двигатель; 1 – усилитель; 2 – перо самописца; 3 – шкала; 4 – указатель (стрелка); 5 – диаграммная лента. Электрические цепи на схеме показаны сплошными линиями, а механические связи – пунктирными линиями

При использовании реостатного датчика прибор градуируется, как правило, в единицах сопротивления (Ом), а при использовании терморезисторного датчика – в единицах температуры ($°C$).

Питание мостовой схемы может осуществляться как постоянным током, так и переменным. Использование переменного тока не вызывает в данном случае каких–либо затруднений при уравновешивании схемы, т. к. в схеме нет реактивных элементов и все сопротивления чисто активные.

Если мост уравновешен, то напряжение между точками a и b (на измерительной диагонали моста) равно нулю и соответственно напряжение на входе усилителя 1 $\Delta U = U_{ab} = 0$. При изменении сопротивления датчика R_1 мостовая схема выходит из равновесия и на измерительной диагонали (между точками a и b) появляется напряжение ($\Delta U = U_{ab} \neq 0$). Это напряжение усиливается усилителем и подается на реверсивный двигатель Дв, который перемещает движок реохорда $R_Р$ в сторону достижения равновесия моста. Одновременно двигатель перемещает перо самописца 2 и указатель (стрелку) 3. Ротор двигателя вращается до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие рассматриваемой мосто-

вой схемы. Если автоматический мост предназначен для регулирования, то тем же двигателем приводятся в действие регулирующие устройства.

Промышленность выпускает различные типы автоматических мостов, различающихся габаритами, числом измеряемых величин и другими характеристиками. Так, например, запись измеряемых величин может производиться на диаграммную линейку в прямоугольной системе координат (как показано на рис. 16.3) или на дисковую диаграмму в полярной системе координат. Отметим, что в том и другом случае диаграммная бумага перемещается равномерно специальным синхронным двигателем (линейно или по кругу). Соответственно шкала 3 может быть линейной или круговой. Прямоугольно-координатные автоматические мосты имеют обозначения: ЭМП (старое обозначение), КСМ2, КСМ4 (новое обозначение) и т. д. Автоматические мосты с дисковыми диаграммами и круговыми шкалами обозначаются: ЭМД (старое обозначение) и КСМ3. Указанные обозначения получили наибольшее распространение, но есть автоматические мосты с другими обозначениями их типов.

Основная приведенная относительная погрешность автоматических мостов от ±0,25 до ±1 %.Наиболее часто встречаются автоматические мосты с относительной погрешностью ±0,5 %. Быстродействие автоматических мостов изменяется в широких пределах и зависит от исполнения и типа прибора. Время прохождения указателем шкалы составляет от 1 с до 10–20 с. В широких пределах изменяется также скорость перемещения диаграммной бумаги (как ленточной, так и дисковой), что позволяет фиксировать и быстро, и медленно изменяющиеся величины.

17. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

17.1. Общие положения

Аналоговые электромеханические измерительные приборы непосредственной оценки (в дальнейшем – «измерительные приборы») состоят из измерительной цепи (ИЦ), измерительного механизма (ИМ) и отсчетного устройства (ОУ) (рис. 17.1).

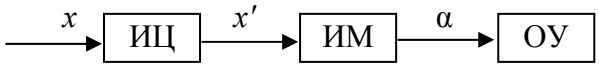


Рис. 17.1. Структурная схема аналоговых электромеханических измерительных приборов непосредственной оценки

Измерительная цепь (ИЦ) служит для преобразования измеряемой электрической величины x в электрическую же величину x', удобную для измерения и непосредственного воздействия на измерительный механизм.

Измерительный механизм (ИМ) преобразует электрическую величину x' в механическое перемещение α (угловое или линейное).

Отсчетное устройство (ОУ) служит для визуального отсчитывания значений измеряемой величины.

ИЦ содержит обычно резисторы (или другие элементы), необходимые для требуемого преобразования измеряемой величины.

ИМ состоит из подвижной и неподвижной частей. В зависимости от принципа построения различают измерительные механизмы магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, электростатические, индукционные, ферродинамические, вибрационные.

ОУ состоит из указателя (стрелочного или светового), связанного с подвижной частью измерительного механизма, и неподвижной шкалы. На шкалу наносятся деления в единицах измеряемой величины. Кроме того, на шкалу наносятся условные обозначения класса точности прибора, рода измеряемого тока, знака системы, рабочего положения прибора (например, вертикального или горизонтального), испытательного напряжения и т. д.

Условные обозначения, наносимые на шкалы и корпуса приборов, приведены в приложениях.

Ниже рассмотрены приборы наиболее распространенных систем. При рассмотрении приборов основное внимание уделено измерительным механизмам и несколько меньшее внимание – другим составным частям приборов (измерительным цепям и отсчетным устройствам).

Более детально затронутые вопросы рассмотрены в литературных источниках [1; 2; 5; 8; 35; 36].

17.2. Магнитоэлектрические приборы

Приборы магнитоэлектрической системы основаны на использовании взаимодействия поля постоянного магнита и катушки (рамки), обтекаемой электрическим током. Конструктивно магнитоэлектрические приборы могут быть выполнены с подвижной рамкой и с подвижным магнитом. Наибольшее распространение получили приборы с подвижной рамкой и внешним постоянным магнитом. Устройство такого прибора схематически показано на рис. 17.2.

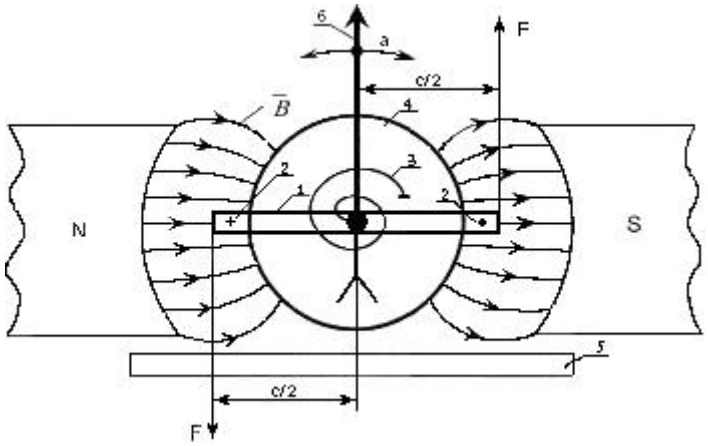


Рис. 17.2. Схема магнитоэлектрического прибора с подвижной рамкой:

1– рамка;	(+•) – направление тока в обмотках рамки;
2 – обмотка рамки;	(*F*–*F*) – пара сил, действующих на рамку;
3 – спиральная пружина;	(*N*–*S*) – полюсные наконечники постоянного магнита;
4 – ферромагнитный сердечник;	α – угол поворота подвижной части;
5 – магнитный шунт;	$\overline{B}$ – магнитная индукция;
6 – стрелка;	c/2 – половина ширины рамки

Постоянный магнит с магнитопроводом и полюсными наконечниками (на рис. 17.2 изображены только полюсные наконечники *N*–*S*) создает в воздушном зазоре магнитное поле с индукцией $\overline{B}$. Благодаря цилиндрическому сердечнику 4 индукция в воздушном зазоре радиальная и равномерная за исключением поля на краях полюсных наконечников («краевой эффект»). На рис. 17.2 краевой эффект (для наглядности) несколько преувеличен. В достоверности искажение магнитного поля на краях полюсных наконечников меньше показанного на

схеме. Магнитный шунт 5 служит для регулировки значения магнитной индукции в некоторых пределах (от 5 до 10 %), что позволяет изменять пределы измерения прибора. Магнитопровод, полюсные наконечники и магнитный шунт изготовляются из магнитомягкого материала.

Стрелка 6 жестко связана с рамкой 1. Спиральная пружина 3 служит для создания момента, противодействующего повороту рамки и стрелки. На рис. 17.2 показана одна спиральная пружина. В реальных приборах спиральных пружин две (или несколько), и они служат не только для создания противодействующего момента, но и для токоподвода к обмотке рамки. Рамка имеет прямоугольную форму. Ширина рамки – «*c*», ее длина – «*b*». При протекании по обмотке рамки постоянного тока *I* происходит его взаимодействие с магнитным полем и возникает пара сил «*F*–*F*», стремящихся повернуть рамку. Направление действия сил определяется правилом левой руки. Оно зависит от направления индукции магнитного поля и направления тока (направление индукции показано на рис. 17.2 стрелками, направление тока «от нас» показано знаком «+», направление тока «к нам» показано знаком «•». Значение каждой из сил *F* определяется соотношением

$$F = B \cdot I \cdot w \qquad (17.1)$$

где *w* – число витков обмотки рамки.

Каждая из сил *F* действует на плече «c/2». Вместе силы «*F*–*F*» создают вращающий момент:

$$-M_{\text{вр.}} = F\frac{c}{2} + F\frac{c}{2} = F \cdot c \qquad (17.2)$$

где *c* – ширина рамки.

Вращающий момент уравновешивается противодействующим моментом $M_{\text{пр}}$:

$$-M_{\text{пр.}} = D \cdot \alpha \qquad (17.3)$$

где *D* – удельный противодействующий момент;

α – угол поворота подвижной части прибора.

В момент считывания показаний $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, т. е. можно записать:

$$F \cdot c = D \cdot \alpha \qquad (17.4)$$

$$B \cdot w \cdot b \cdot c \cdot I = D \cdot \alpha \qquad (17.5)$$

Решая уравнение (17.5) относительно α, получаем

$$\alpha = \frac{1}{D} \cdot B \cdot w \cdot b \cdot c \cdot I , \qquad (17.6)$$

$$k_1 = \frac{B \cdot w \cdot b \cdot c}{D} , \qquad (17.7)$$

$$\alpha = k \cdot I \qquad (17.8)$$

Полученное выражение (17.8) носит название *«уравнение шкалы»*. Согласно уравнению шкалы угол отклонения подвижной части приборов магнитоэлектрической системы пропорционален току, протекающему по обмотке рамки. Коэффициент пропорциональности k_1 (см. (17.7)) называется *чувствительностью по току*.

Значение k_1 является величиной постоянной, зависящей от конструктивных параметров измерительного механизма и не зависящей от измеряемого тока I. Поэтому шкалы магнитоэлектрических приборов равномерны. Изменение направления тока ведет к изменению направления угла отклонения подвижной части прибора.

Приборы магнитоэлектрической системы могут использоваться как для измерения постоянных токов, так и для измерения постоянных напряжений. При измерении постоянного напряжения уравнение шкалы (см. (17.8)) принимает вид

$$\alpha = k_2 \cdot U , \qquad (17.8а)$$

где k_2 – постоянный коэффициент, характеризующий чувствительность по напряжению;

U – измеряемое напряжение.

При измерении постоянных токов и напряжений рассматриваемые магнитоэлектрические приборы являются самыми чувствительными и точными среди электромеханических приборов. Температура окружающей среды и внешние магнитные поля мало влияют на их работу. Равномерный характер шкалы и

малое потребление энергии также являются достоинствами этих приборов. Магнитоэлектрические приборы реагируют только на постоянную составляющую измеряемого тока или напряжения. Для измерений в цепях переменного тока требуется предварительное преобразование переменных величин в постоянные. К недостаткам этих приборов следует отнести их малую перегрузочную способность (сгорают токоподводы). Знак приборов магнитоэлектрической системы, наносимой на шкалу, приведен в прил. 4.

На основе магнитоэлектрических механизмов строятся приборы для измерения постоянных токов (амперметры), постоянных напряжений (вольтметры), электрических сопротивлений (омметры), малых токов и напряжений (гальванометры), количества электричества (баллистические гальванометры) и т. п.

Дополнительные сведения по затронутым вопросам приведены в литературе [1; 2; 5; 8; 35].

17.3. Электромагнитные приборы

Приборы электромагнитной системы основаны на взаимодействии магнитного поля, создаваемого током в неподвижной катушке, с подвижным ферромагнитным сердечником. В настоящее время находят применение электромагнитные механизмы с плоской катушкой и механизмы с круглой катушкой.

Схема, поясняющая принцип работы приборов электромагнитной системы, приведена на рис. 17.3.

При протекании тока I по катушке 1 создается магнитное поле, под действием которого сердечник 2 втягивается внутрь катушки. Благодаря тому, что сердечник выполнен из магнитомягкого материала, он втягивается в катушку независимо от направления тока (и соответственно независимо от полярности приложенного к катушке напряжения U). С сердечником 2 жестко связаны пружина 3 и стрелка (указатель) 4.

Пружина создает противодействующий момент, а стрелка позволяет проводить отсчет показаний по шкале 5.

Для быстрейшего «успокоения» подвижной части прибора используются специальные успокоители (обычно воздушные). Успокоители на рис. 17.3 не

показаны. Возможные конструкции успокоителей приведены, например, в [1; 2]. Рассмотренные ранее магнитоэлектрические приборы в специальных успокоителях не нуждались. Необходимое «успокоение» подвижной части этих приборов достигалось за счет взаимодействия вихревых токов, наводимых в рамке устройства, с магнитным полем.

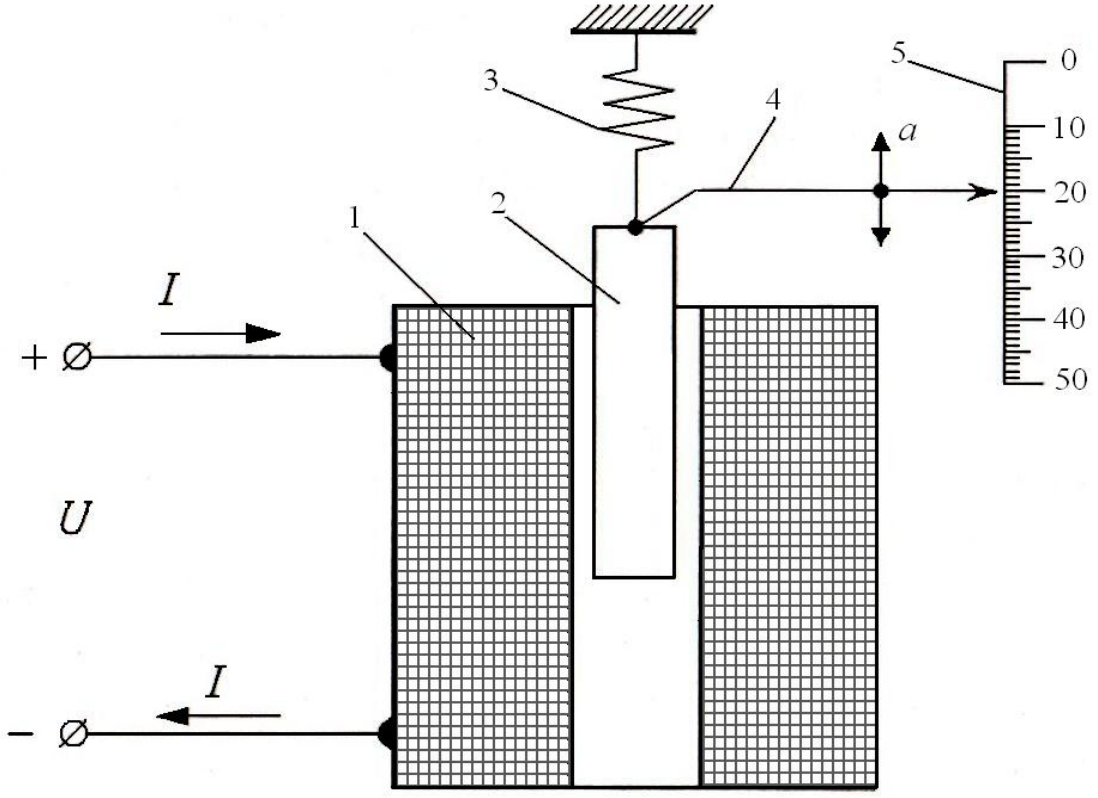


Рис. 17.3 Схема прибора электромагнитной системы:
1 – катушка с числом витков w и индуктивностью L; 2 – ферромагнитный сердечник (из магнитомягкого материала); 3 – пружина (с удельным противодействующим моментом D); 4 – стрелка; 5 – шкала

Положение подвижной части прибора электромагнитной системы в установившемся режиме можно определить из условия равенства вращающего и противодействующего моментов.

Согласно законам механики выражение для «вращающего» момента имеет вид

$$M = \frac{dW}{dx}, \qquad (17.9)$$

где M – «вращающий» момент, перемещающий подвижную часть устройства;

W – электрокинетическая энергия;

x – координата подвижной части устройства.

Для приборов электромагнитной системы:

$$W = W_{\text{М}} = \frac{1}{2} I^2 \cdot L, \tag{17.10}$$

где $W_{\text{М}}$ – энергия магнитного поля катушки

I – ток через катушку;

L – индуктивность катушки.

$$M = \frac{dW_{\text{М}}}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}, \tag{17.11}$$

где α – перемещение подвижной части прибора.

$$M_{\text{пр}} = D \cdot \alpha, \tag{17.12}$$

где $M_{\text{пр}}$ – противодействующий момент (создается пружиной);

D – удельный противодействующий момент.

При установившемся положении механизма $M = M_{\text{пр}}$, т. е.:

$$\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} = D \cdot \alpha, \tag{17.13}$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot I^2 \frac{dL}{d\alpha} \tag{17.14}$$

Выражение (17.14) носит название *«уравнение шкалы»* (или *«уравнение преобразования»*) приборов электромагнитной системы на постоянном токе.

Рассмотрим работу приборов на переменном токе.

$$i(t) = I_{\text{m}} \cdot \sin \omega t, \tag{17.15}$$

$$\text{I} = \sqrt{\frac{1}{\text{T}} \int_0^T [i(t)]^2 dt}, \tag{17.16}$$

где $i(t)$ – мгновенное значение переменного тока;

I_{m} – амплитудное значение переменного тока;

I – действующее значение переменного тока;

T– период переменного тока, протекающего по катушке прибора.

Мгновенное $m(t)$ и среднее $M_{\text{ср}}$ значения вращающего момента запишутся в виде

$$m(t) = \frac{1}{2}[i(t)]^2 \frac{dL}{d\alpha}, \qquad (17.17)$$

$$M = \frac{1}{T}\int_T^1 m(t)dx. \qquad (17.18)$$

Подставляя в (17.18) значение $m(t)$, получаем

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T}\int_0^T \frac{1}{2}[i(t)]^2 \frac{dL}{d\alpha} dt = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T}\int_0^T [i(t)]^2 dt. \qquad (17.19)$$

Среднее значение вращающего момента (на которое реагирует прибор) с учетом (17.16) принимает вид

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \qquad (17.20)$$

Учитывая, что в установившемся режиме $M_{\text{ср}} = M_{\text{пр}}$, можно записать:

$$\frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha} = D \cdot \alpha. \qquad (17.21)$$

Решая (17.21) относительно α, окончательно получим

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot I^2 \cdot \frac{dL}{d\alpha}, \qquad (17.22)$$

где I – действующее значение переменного тока.

Выражение (17.22) носит название *«уравнение шкалы»* (или *«уравнение преобразования»*) приборов электромагнитной системы на переменном токе.

Полученные соотношения (17.14) и (17.22) позволяют сделать вывод о нелинейности шкалы рассматриваемых приборов. Начало и конец шкалы сжаты (особенно начало). В результате до 10 % шкалы в ее начале вообще не используется. Середина шкалы имеет благоприятный равномерный характер.

На основе электромагнитных механизмов строятся приборы для измерения постоянных и переменных токов (амперметры), постоянных и переменных напряжений (вольтметры) и резонансные (вибрационные) частотомеры.

К достоинствам приборов электромагнитной системы относят: простоту конструкции, низкую стоимость, надежность, способность выдерживать боль-

шие перегрузки и универсальность (возможность использования в цепях постоянного и переменного тока).

К недостаткам этих приборов следует отнести: большое собственное потребление энергии, сравнительно малые чувствительность и точность, сильное влияние внешних магнитных полей. Последнее обстоятельство вынуждает применять специальные методы защиты (магнитные экраны и астазирование).

Приборы электромагнитной системы применяют обычно как щитовые амперметры и вольтметры переменного тока промышленной частоты (с классами точности 1,5 и 2,5). В отдельных случаях они используются на повышенных частотах (до нескольких сотен и даже тысяч герц). Эти приборы могут также использоваться как лабораторные переносные приборы классов точности 0,5 и 1,0.

Знак приборов электромагнитной системы, наносимый на шкалу, приведен в прил. 4. Приборы описаны в литературе [1; 2; 5; 8; 35].

17.4. Электродинамические приборы

Приборы электродинамической системы основаны на взаимодействии магнитных полей двух неподвижных и одной подвижной катушек, по которым протекает ток.

Схема, поясняющая принцип работы приборов электродинамической системы, приведена на рис. 17.4.

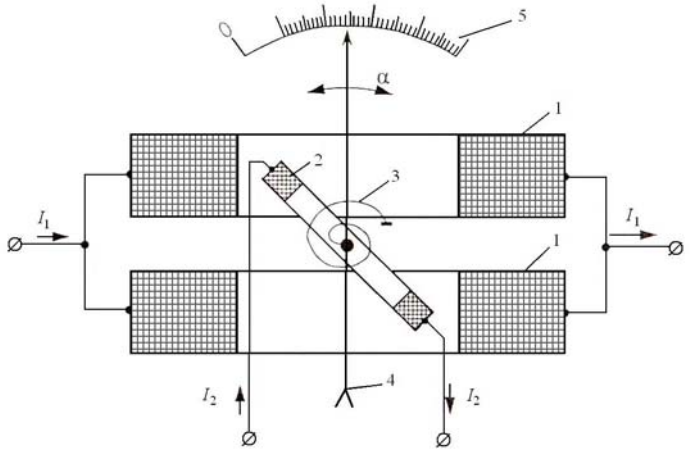


Рис. 17.4. Схема приборов электродинамической системы:
1 – неподвижные катушки; 2 – подвижная катушка; 3 – спиральная пружина;
4 – стрелка; 5– шкала; α – угол поворота подвижной части прибора

По неподвижным катушкам 1 протекает ток I_1. По подвижной катушке 2 протекает ток I_2. Стрелка 4 жестко связана с подвижной катушкой 2. Спиральная пружина 3 (с удельным противодействующим моментом D) создает противодействующий момент. На рис. 17.3 показана одна спиральная пружина. В реальных устройствах используются обычно две пружины (известны также конструкции, в которых используется несколько спиральных пружин). Пружины 3 одновременно могут быть токоподводами к подвижной катушке 2. Чаще подключение подвижной катушки к внешней цепи осуществляется с использованием специальных безмоментных токоподводов. Неподвижные катушки 1 имеют суммарную индуктивность L_1. Индуктивность подвижной катушки – L_2. Взаимная индуктивность между неподвижными и подвижной катушками – M. Для сокращения времени колебаний подвижной катушки используются специальные, обычно воздушные, успокоители (на рис. 17.4 они не показаны).

Энергия магнитного поля катушек с токами I_1 и I_2 запишется следующим образом:

$$W_M = \frac{1}{2} I_1^2 \cdot L_1 + \frac{1}{2} I_2^2 \cdot L_2 + I_1 I_2 M \,, \qquad (17.23)$$

где I_1, I_2, L_1, L_2, M – определены выше.

Поскольку индуктивности L_1 и L_2 не зависят от угла поворота подвижной части прибора α, то вращающий момент $M_{вр}$ запишется в виде

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} \,. \qquad (17.24)$$

Противодействующий момент, создаваемый спиральной пружиной с удельным противодействующим моментом D, определяется соотношением

$$M_{пр} = D \cdot \alpha \,, \qquad (17.25)$$

где $M_{пр}$ – противодействующий момент;

α – угол поворота подвижной части прибора.

В установившемся режиме $M_{вр} = M_{пр}$, т. е.

$$I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha} = D \cdot \alpha \,, \qquad (17.26)$$

$$\alpha = \frac{1}{D} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha} \quad . \tag{17.27}$$

Полученное выражение (17.27) носит название *«уравнение шкалы»* (или *«уравнение преобразования»*) приборов электродинамической системы на постоянном токе.

Рассмотрим работу приборов на переменном токе:

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \quad , \tag{17.28}$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \varphi) \quad , \tag{17.29}$$

где i_1, i_2 – мгновенные значения токов;

I_{1m}, I_{2m} – амплитудные значения токов;

φ – фазовый сдвиг между токами i_1 и i_2.

Мгновенное значение вращающего момента:

$$m(t) = i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot \frac{dM}{d\alpha} \quad . \tag{17.30}$$

Среднее значение вращающего момента, на которое реагирует прибор:

$$M_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T m(t) dt \quad . \tag{17.31}$$

Подставляя в (17.31) значение величины $m(t)$, определяемое соотношением (17.30), получим

$$M_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} \sin \omega t \cdot I_{2m} \sin(\omega t - \varphi) \frac{dM}{d\alpha} \quad , \tag{17.32}$$

$$M_{ср} = I_1 \cdot I_2 \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha} \quad , \tag{17.33}$$

где I_1, I_2 – действующие значения токов.

Приравняв значение $M_{ср}$ значению противодействующего момента $M_{пр}$, определяемого соотношением (17.25), и решив полученное равенство относительно угла поворота α, получим

$$\alpha = \frac{1}{D} I_1 I_2 \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha} \quad . \tag{17.34}$$

Полученное выражение (17.34) свидетельствует, что перемещение подвижной части рассматриваемого измерительного механизма зависит не только от токов в его катушках, но и от разности фаз между этими токами. Последнее позволяет использовать приборы электродинамической системы в качестве ваттметров (кроме использования в качестве амперметров и вольтметров).

Выражение (17.34) обычно называют *уравнением шкалы* (или *уравнением преобразования*) приборов электродинамической системы на переменном токе.

К достоинствам приборов электродинамической системы следует отнести их универсальность (т. е. возможность использовать их в цепях как постоянного, так и переменного тока) и высокую точность (эти приборы самые точные на переменном токе среди электромеханических приборов).

Недостатки приборов электродинамической системы: нелинейность шкалы (шкала сжата в начале, растянута в середине и в конце; из-за нелинейности до 5–8 % шкалы в начале не градуируется и вообще не используется); малая надежность (при перегрузках сгорают токоподводы к подвижной катушке); значительное влияние на показания приборов магнитных полей (для защиты используются магнитные экраны и астазирование); частотные погрешности при измерениях на переменном токе, а также некоторые другие.

Знак приборов электродинамической системы, наносимый на шкалу, приведен в прил. 4.

Более детально с приборами электродинамической системы можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 5; 8; 35].

17.5. Электростатические приборы

Приборы электростатической системы основаны на взаимодействии электрически заряженных проводников.

Схема, поясняющая принцип работы приборов электростатической системы, приведена на рис. 17.5.

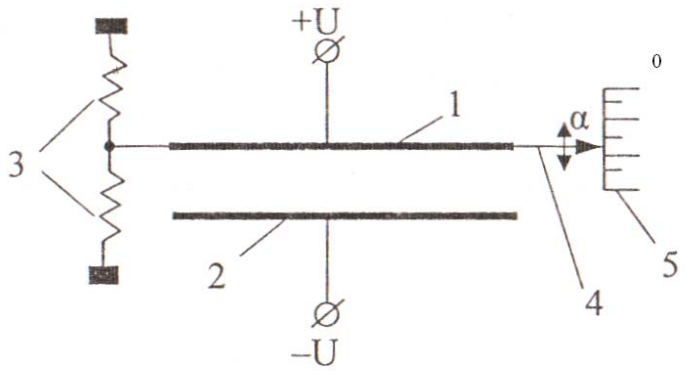


Рис. 17.5. Схема приборов электростатической системы:
1 – подвижная пластина; 2 – неподвижная пластина; 3 – пружины; 4 – стрелка; 5 – шкала

Подвижная пластина 1 жестко связана со стрелкой 4 и пружинами 3, создающими противодействующий момент. К пластинам 1 и 2 подводится измеряемое напряжение. Под действием электростатических сил подвижная пластина перемещается на величину α. Движение прекращается, когда противодействующий момент пружин становится равным вращающему моменту.

Энергия электростатического поля имеет следующее значение:

$$W_э = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2, \qquad (17.35)$$

где C – емкость между подвижной и неподвижной пластинами;

U – измеряемое напряжение.

«Вращающий» момент, перемещающий подвижную часть устройства:

$$M = \frac{dW_э}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \qquad (17.36)$$

Противодействующий момент:

$$M_{пр} = D \cdot \alpha, \qquad (17.37)$$

где D – удельный противодействующий момент;

α – перемещение подвижной пластины.

При равновесии $M = M_{пр}$, т. е.

$$D \cdot \alpha = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}. \qquad (17.38)$$

Решая (17.38) относительно α, получаем

$$\alpha = \frac{1}{2D} U^2 \frac{dC}{d\alpha} . \qquad (17.39)$$

В случае переменного напряжения следует произвести усреднение показаний во времени:

$$\alpha = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2D} \cdot u^2(t) \cdot \frac{dC}{d\alpha} dt ,$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \int_0^T u^2(t) dt ,$$

$$\alpha = \frac{1}{2D} \cdot \frac{dC}{d\alpha} \cdot U^2 , \qquad (17.40)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение измеряемого переменного напряжения;

U – действующее значение измеряемого переменного напряжения;

T – период времени, за который производится усреднение.

Выражение (17.39) является уравнением шкалы при измерении постоянного напряжения, а выражение (17.40) – при измерении переменного напряжения. Приборы электростатической системы пригодны для измерения только электрических напряжений.

К достоинствам приборов электростатической системы относятся: их универсальность (т. е. способность измерять постоянные и переменные напряжения), широкий частотный диапазон, малое потребление энергии, высокая надежность, независимость показаний от внешних магнитных полей.

К недостаткам следует отнести нелинейность шкалы (из-за нелинейности около 5 % шкалы в ее начале вообще не используется), низкую чувствительность, сравнительно невысокую точность, зависимость показаний от внешних электрических полей.

Знак приборов электростатической системы, наносимый на шкалу, приведен в прил. 4.

Более подробно с приборами электростатической системы можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 5; 8; 35].

17.6. Индукционные приборы

Индукционные приборы состоят из индукционного измерительного механизма, отсчетного устройства и элементов измерительной схемы.

Индукционный измерительный механизм основан на взаимодействии магнитных потоков электромагнитов и вихревых токов, наведенных магнитными потоками в подвижной части, выполненной в виде алюминиевого диска.

Индукционные измерительные механизмы по устройству делятся на несколько типов, основные из которых – однопоточные и многопоточные.

Однопоточные измерительные механизмы имеют один электромагнит и подвижную часть в виде диска, асимметрично расположенного на оси. Такие механизмы просты по устройству, но в настоящее время не применяются из-за малой величины вращающего момента.

В многопоточных механизмах на подвижную часть действуют два или более переменных потоков, не совпадающих по фазе и в пространстве. Эти потоки образуют вращающееся или бегущее магнитное поле, пересекающее подвижную часть механизма. От взаимодействия индуктируемых при этом в подвижной части вихревых токов с магнитным полем возникает вращающий момент, перемещающий подвижную часть механизма.

Индукционные приборы используются только на переменном токе. Они могут применяться как амперметры, вольтметры, ваттметры и счетчики электрической энергии. В настоящее время нашли широкое применение именно счетчики электроэнергии.

Устройство и схема включения индукционного счетчика показаны на рис. 17.6.

Для индукционного счетчика вращающий момент $M_{\text{вр}}$ пропорционален мощности переменного тока, т. е.

$$M_{\text{вр}} = kUI\cos(\varphi), \qquad (17.41)$$

где k – постоянный коэффициент;

U – напряжение;

φ – сдвиг по фазе между напряжением и током.

На подвижную часть счетчика (алюминиевый диск) действует противодействующий момент $M_{\text{пр}}$, пропорциональный скорости (частоте) вращения диска. Этот момент создается за счет взаимодействия магнитного поля постоянного магнита 4 и вихревых токов, наводимых в диске 3.

$$M_{\text{ПР}} = k_1 \cdot \frac{d\alpha}{dt} = k_1 \cdot v \,, \tag{17.42}$$

где k_1 – постоянный коэффициент;

$\frac{d\alpha}{dt} = v$ – скорость (частота) вращения диска.

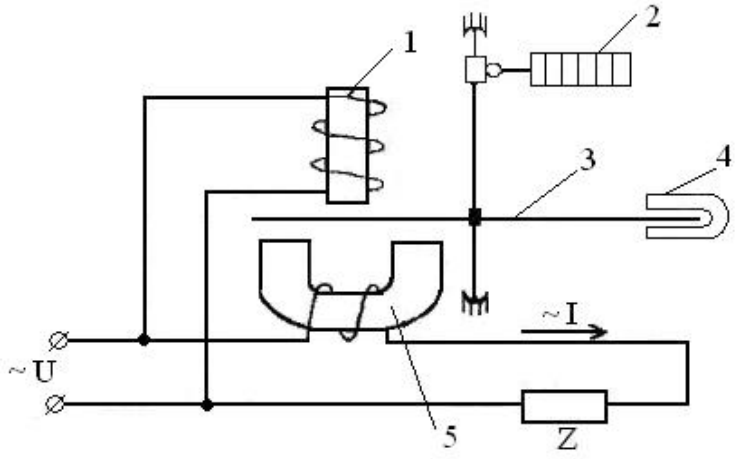


Рис. 17.6. Устройство и схема включения индукционного счетчика:
1 – трехстержневой магнитопровод с обмоткой напряжения; 2 – счетный механизм;
3 – алюминиевый диск, укрепленный на оси; 4 – постоянный магнит для создания тормозного момента; 5 – П-образный магнитопровод с токовой обмоткой; Z – полное сопротивление нагрузки

Если допустить, что момент трения отсутствует, то для установившейся скорости (частоты) вращения момент $M_{\text{вр}}$ равен тормозному моменту $M_{\text{ПР}}$:

$$k \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = k_1 \cdot v \,. \tag{17.43}$$

Интегрируя правую и левую части равенства (17.43) в пределах изменения времени от t_1 до t_2, получим

$$W = C \cdot N \,, \tag{17.44}$$

где W – энергия, «прошедшая» через нагрузку Z за время $\Delta = t_2 - t_1$,

$W = \int_{t_1}^{t_2} UI \cdot \cos\varphi \cdot dt$;

C – постоянный коэффициент ($C = \frac{k_1}{k \cdot k_2}$);

N – число оборотов диска за время $\Delta t = t_2 - t_1 (N = k_2 \cdot \int_{t_1}^{t_2} v \cdot dt)$.

Отсчет энергии производится по показаниям счетного механизма – счетчика оборотов, проградуированного в единицах энергии. Единице электрической энергии (обычно 1 кВт/ч), регистрируемой счетным механизмом, соответствует определенное число оборотов подвижной части счетчика. Это соотношение указывается на приборе. Выпускаемые счетчики активной энергии имеют следующие классы точности: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5; счетчики реактивной энергии – 1,5; 2,0; 4,0. Выпускаются однофазные и трехфазные счетчики активной и реактивной энергии. Дополнительные погрешности счетчиков возникают из-за искажения формы кривой тока и напряжения, колебаний напряжения и частоты, резкого перепада мощности и некоторых других факторов. К достоинству счетчиков следует отнести малое влияние на их показания температуры и внешних магнитных полей.

Знак приборов индукционной системы приведен в прил. 4.

Более подробно с приборами индукционной системы можно ознакомиться по литературным источникам [1; 8].

17.7. Логометры

К логометрам относятся электроизмерительные приборы с электрическим противодействующим моментом. Показания таких приборов пропорциональны отношению электрических величин (обычно – отношению электрических токов). Используются логометры следующих систем: магнитоэлектрические с подвижными рамками, магнитоэлектрические с подвижными магнитами, элек-

тромагнитные, электродинамические, ферродинамические, индукционные. Условные обозначения логометров приведены в приложении в табл. П. 4.1.

В настоящем учебном пособии рассматриваются магнитоэлектрические логометры с подвижными рамками (рис. 17.7).

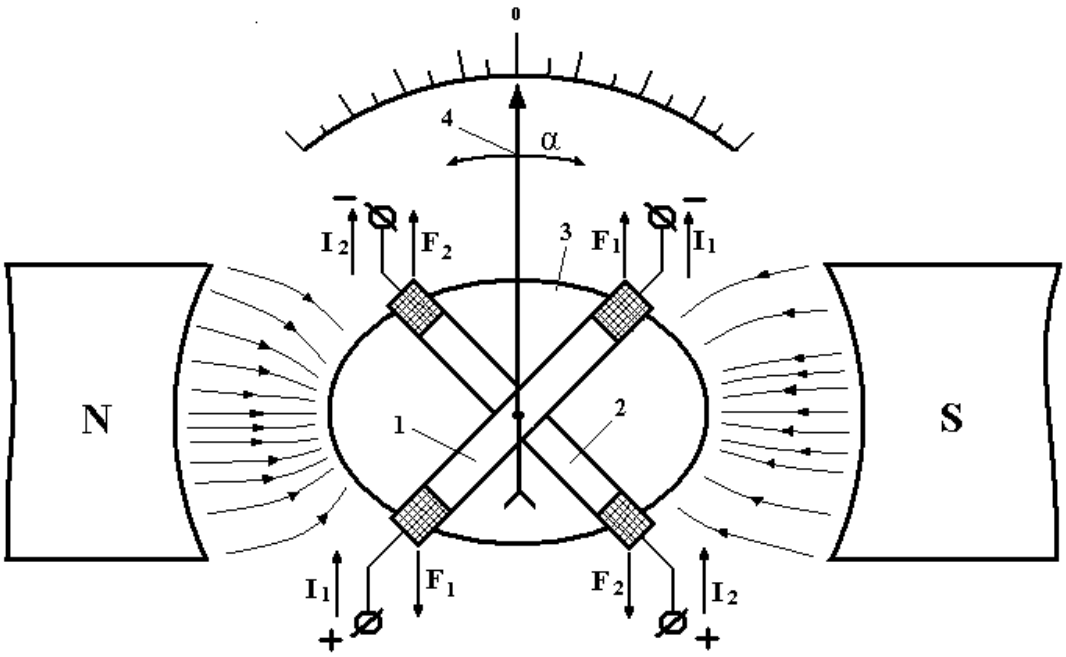


Рис. 17.7. Схема логометра магнитоэлектрической системы с подвижными рамками:
1 – первая рамка; 2 – вторая рамка; 3 – эллиптический ферромагнитный сердечник;
4 – стрелка (указатель); α – угол поворота; *N*–*S* – полюсные наконечники постоянного магнита

Рамки 1 и 2 жестко скреплены друг с другом и со стрелкой, которая перемещается вдоль проградуированной шкалы. По обмотке первой рамки протекает ток l_1. По обмотке второй рамки протекает ток l_2. К внешним цепям обмотки рамок подключаются с помощью безмоментных токоподводов (на схеме токоподводы не показаны). Создаваемое постоянным магнитом магнитное поле в воздушном зазоре прибора неравномерно благодаря эллиптическому ферромагнитному сердечнику: в центральной части системы индукция магнитного поля больше, а на периферии – меньше.

При взаимодействии тока l_1, протекающего по обмотке первой рамки, и магнитного поля возникает пара сил F_1–F_1. Пара сил F_1–F_1 создает вращающий момент M_1, который стремится повернуть рамки и указатель против часовой стрелки.

$$\mathrm{M}_1 = I_1 \cdot f_1(\alpha)\,, \qquad (17.45)$$

где l_1 – ток в обмотке первой рамки;

α – угол поворота подвижной части прибора.

При взаимодействии тока l_2, протекающего по второй обмотке, и магнитного поля возникает пара сил F_2–F_2, создающих вращающий момент M_2. Вращающий момент M_2 стремится повернуть рамки и указатель по часовой стрелке.

$$M_2 = I_2 \cdot f_2(\alpha), \tag{17.46}$$

где I_2 – ток в обмотке второй рамки.

Отметим, что из-за неравномерности магнитного поля вращающие моменты M_1 и M_2 возрастают при перемещении рамок с обмотками к центру и, наоборот, уменьшаются при перемещении рамок с обмотками к периферии.

При равенстве вращающих моментов M_1 и M_2 движение рамок и стрелки (указателя) прекращается. В этом случае:

$$I_1 \cdot f_1(\alpha) = I_2 \cdot f_2(\alpha), \tag{17.47}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f_3(\alpha). \tag{17.48}$$

Решая уравнение (17.48) относительно угла поворота α, получаем

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \tag{17.49}$$

Полученное выражение (17.49) носит название уравнения шкалы логометров магнитоэлектрической системы с подвижными рамками.

Уравнение шкалы свидетельствует, что показания магнитоэлектрических логометров пропорциональны отношению токов, протекающих по обмоткам рамок прибора.

Более детально логометры описаны в литературных источниках [1; 2; 8].

18. ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

18.1. Общие положения

Приборами сравнения (а также компенсаторами или потенциометрами) называют приборы для измерения методом сравнения напряжения, ЭДС или величин, связанных с ними определенной зависимостью. Существуют компенсаторы постоянного и переменного тока. Те и другие компенсаторы могут быть автоматическими и с ручным управлением.

Как известно, напряжение и ЭДС могут быть измерены с помощью электромеханических приборов непосредственной оценки. Такой способ измерения имеет существенный недостаток, так как электромеханические приборы непосредственной оценки обладают заметным собственным потреблением энергии. Например, электромеханические вольтметры непосредственной оценки шунтируют тот участок цепи, к которому подключаются. Это искажает режим цепи и меняет распределение потенциалов. С другой стороны, эти приборы имеют ограниченную точность. Их погрешность, в лучшем случае, составляет (0,1–0,2) %, а обычно – значительно больше.

Применение компенсаторов устраняет указанные недостатки. Общие сведения о компенсаторах приведены в литературе [1; 2; 8].

18.2. Компенсаторы постоянного тока с ручным управлением

Схема компенсатора приведена на рис. 18.1.

Нормальный элемент $E_{\text{о}}$ представляет собой гальванический элемент со стабильной ЭДС. Каждый нормальный элемент проходит индивидуальную аттестацию, и его ЭДС, определяемая при аттестации, заносится в паспорт. Допускаемое отклонение ЭДС за 1 год нормируется. В зависимости от класса точности (кл. т.) оно не должно превышать определенных значений. Например, для нормальных элементов Э–303 класса точности 0,02 допускаемое отклонение ЭДС за 1 год должно быть не более 190 мкВ; для нормальных элемен-

тов Х–480 класса точности 0,005 – не более 50 мкВ; для элементов Х–482 класса точности 0,002 – не более 10 мкВ.

Приведем значения ЭДС для некоторых конкретных нормальных элементов (ЭДС даны при температуре +20 ^{0}С):

ненасыщенный нормальный элемент Э–303 № 66901 кл. т. 0,02, E_0 = 1,01923 В;

Э–303 № 66902 кл. т. 0,02, E_0 = 1,01930 В;

Х–480 № 1525 кл. т. 0,005, E_0 = 1,018622 В.

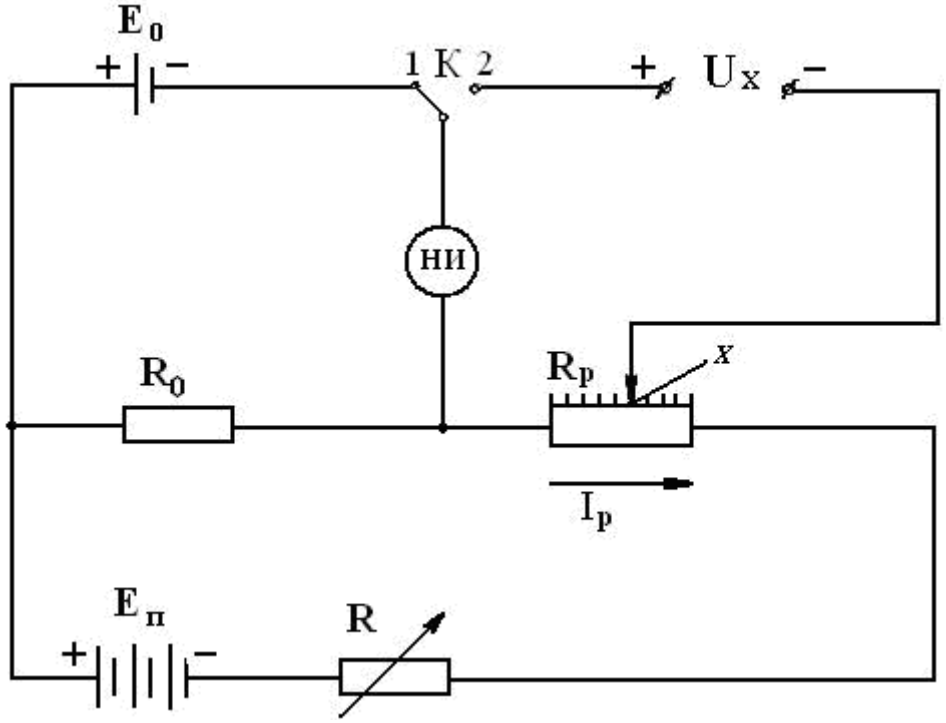


Рис. 18.1. Схема компенсатора с ручным управлением:

E_0 – нормальный элемент;
U_x – измеряемое напряжение;
R_0 – образцовое сопротивление;
$E_п$ – источник питания;
R – переменное сопротивление;
$R_р$ – реохорд;
НИ – нуль-индикатор;
К – ключ

К недостаткам нормальных элементов следует отнести значительную зависимость их ЭДС от температуры. Например, при поверке нормальных элементов температура окружающей среды должна быть +20 ^{0}С с точностью ±0,1 ^{0}С. При работе нормальные элементы высокого класса помещаются в специальные термостаты и без них эксплуатироваться не могут. Другим их недостатком является «боязнь» тряски, вибраций, ускорений и т. д.

Нормальные элементы должны соответствовать требованиям государственного стандарта ГОСТ 1954–84 [114].

Из-за эксплутационных недостатков нормальные элементы в последнее время частично заменяются источниками стабильных ЭДС на основе параметрических и электронных стабилизаторов.

Другим важным элементом компенсатора, обеспечивающим его малую погрешность, является образцовое сопротивление высокого класса R_0.

Работа компенсаторов постоянного тока протекает в следующей последовательности.

1-й этап. На первом этапе проводится установка рабочего тока $I_р$. Для этого переключатель К устанавливается в положение 1. В этом случае к нуль-индикатору НИ прикладывается разность ΔU_0 между ЭДС нормального элемента E_0 и падением напряжения U_0 на сопротивлении R_0.

$$U_0 = I_p \cdot R_0, \tag{18.1}$$

где $I_р$ – рабочий ток;

R_0 – образцовое сопротивление.

$$\Delta U_0 = U_0 - E_0, \tag{18.2}$$

где E_0 – ЭДС нормального элемента;

U_0 – падение напряжения на образцовом сопротивлении.

При $\Delta U_0 \neq 0$ показания НИ отличны от нуля. Изменяя переменное сопротивление R (и тем самым изменяя рабочий ток $I_р$), добиваются нулевых показаний нуль-индикатора НИ. При этом $\Delta U = 0$ и $E_0 = U_0$. Тогда, учитывая соотношение (18.1), можно записать

$$I_p = \frac{E_0}{R_0}. \tag{18.3}$$

2-й этап. На втором этапе проводится измерение искомого напряжения $U_х$. Для этого переключатель К переводится в положение 2. В этом случае к нуль-индикатору НИ прикладывается разность ΔU между измеряемым напряжением $U_х$ и падением напряжения на реохорде $U_р$.

$$U_p = I_p \cdot R_p \cdot x, \tag{18.4}$$

где $R_р$ – сопротивление реохорда;

x – координата движка реохорда.

$$\Delta U = U_X - U_p . \qquad (18.5)$$

Если $\Delta U \neq 0$, то показания НИ отличны от нуля. Перемещая движок реохорда, добиваются нулевых показаний нуль-индикатора НИ. При этом $\Delta U = 0$ и $U_х = U_р$.

Учитывая соотношения (18.4) и (18.3), можно записать

$$U_X = I_p \cdot R_p \cdot x = \frac{E_0}{R_0} \cdot R_p \cdot x . \qquad (18.6)$$

Полученное выражение (18.6) является «уравнением шкалы» компенсаторов постоянного тока с ручным управлением. Входящие в (18.6) величины E_0, R_0, $R_р$, x известны с высокой точностью, что позволяет со столь же высокой точностью измерять искомые напряжения и ЭДС. Классы точности компенсаторов обычно имеют значения: 0,5; 0,1; 0,05; 0,02 и выше. Другим достоинством компенсаторов является их большое внутреннее сопротивление в момент компенсации (и соответственно в момент считывания показаний).

К недостаткам компенсаторов относятся их громоздкость, которая растет с ростом класса точности, и малое быстродействие.

Компенсаторы постоянного тока с ручным управлением описаны также в литературных источниках [1; 2; 8].

18.3. Автоматические компенсаторы постоянного тока

Электрические цепи на схеме показаны сплошными линиями, а механические связи – пунктирами. Автоматические компенсаторы имеют много общего с компенсаторами ручного управления (см. п. 18.1). В автоматических компенсаторах также используются нормальные элементы (или заменяющие их электронные стабилизаторы), реохорды, источники питания и другие общие элементы схемы. Работа автоматических компенсаторов протекает в следующей последовательности.

Схема автоматического компенсатора приведена на рис. 18.2.

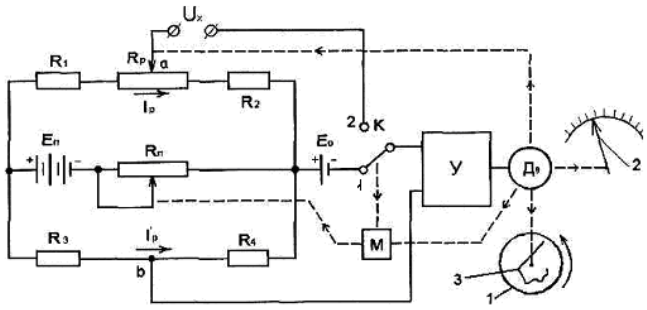


Рис. 18.2. Схема автоматического компенсатора постоянного тока:

1 – дисковая диаграмма;
2 – указатель;
3 – перо самописца;
У – усилитель;
Дв –двигатель;
М – электромеханическая муфта;
U_x – измеряемое напряжение;
$R_р$ – реохорд;
$E_п$ – источник питания;
$R_п$ – переменный резистор;
К – ключ;
E_0 – нормальный элемент;
R_1, R_2, R_3 и R_4 – постоянные резисторы

1-й этап. Установка рабочего тока

Для установки рабочего тока $I_р$ через реохорд и рабочего тока $I'_р$ в цепи сопротивлений R_3–R_4 необходимо перевести ключ К в положение 1. При этом включается электромеханическая муфта М. Через муфту М двигатель Дв соединяется с движком переменного резистора $R_п$. Одновременно образуется электрическая цепь: ключ К – нормальный элемент E_0 – образцовое сопротивление R_4 – точка «*b*» схемы. Напряжение ΔU_0, снимаемое с этой цепи, подается через вход усилителя.

$$\Delta U_0 = U_4 - E_0, \tag{18.7}$$

$$U_4 = I'_p \cdot R_4, \tag{18.8}$$

$$I'_p = \frac{E_{\ddot{I}}}{R_{\ddot{I}} + R_3 + R_4}, \tag{18.9}$$

где U_4 – падение напряжения на образцовом сопротивлении;

E_0 – ЭДС нормального элемента;

R_4 – образцовое сопротивление.

При $\Delta U_0 = 0$ усилитель У усиливает это напряжение. С выхода усилителя напряжение подается на двигатель Дв, который начинает работать и через муфту М перемещает движок резистора $R_П$. Перемещение движка приводит к изменению значения сопротивления $R_П$ и, в соответствии с (18.9), – к изменению значения тока $I'_р$. Ток $I'_р$ изменяется до тех пор, пока не выполняются условия:

$U_4 = E_0$ и $\Delta U_0 = 0$. При этом двигатель останавливается, и работа по установке рабочего тока прекращается.

2-й этап. Измерение

Для проведения измерения ключ К переводится в положение 2. При этом муфта М отключает двигатель Дв от движка переменного резистора $R_П$. Одновременно образуется электрическая цепь: ключ К – измеряемое напряжение U_x – точка схемы *«a»* – точка схемы *«b»*. Напряжение ΔU, снимаемое с этой цепи, подается на вход усилителя.

$$\Delta U_0 = U_X - U_{AB}, \qquad (18.10)$$

где U_X – измеряемое напряжение;

U_{AB} – разность потенциалов между точками схемы *«a»* и *«в»*.

Если $\Delta U \neq 0$, то это напряжение усиливается и подается на двигатель, который начинает работать и перемещать движок реохорда R_p, стрелку (указатель) 2 и перо самописца 3. Перемещение движка реохорда R_p приводит к изменению значения напряжения U_{AB}. Напряжение U_{AB} изменяется до тех пор, пока не станет равно измеряемому напряжению U_x. При этом в соответствии с (18.10) $\Delta U = 0$, двигатель останавливается. Результат измерения считывается со шкалы (в зависимости от положения указателя 2) и с дисковой диаграммы по кривой, нанесенной пером самописца. Шкалы могут быть круговыми (как на рис. 18.2) и прямолинейными. Диаграммы могут быть дисковыми (как на рис. 18.2) и ленточными. Компенсаторы градуируются в вольтах (или в милливольтах). Иногда компенсаторы (особенно часто автоматические) используются в комплекте с термопарами для измерения температуры. В этом случае приборы градуируются в градусах Цельсия. Погрешность таких приборов составляет, как правило, 0,5 %. Погрешность записи результатов измерений – около 1 %.

Дополнительные сведения по автоматическим компенсаторам постоянного тока можно почерпнуть в литературных источниках [1; 2; 8].

18.4. Полярно-координатные компенсаторы переменного тока

Для уравновешивания двух электрических величин на переменном токе необходимо выполнение следующих условий: равенство величин по модулю; противоположность их фаз; равенство частот; идентичность формы измеряемой и компенсирующей величин.

Возможность осуществления перечисленных условий обеспечивается конструкцией компенсаторов (потенциометров) и порядком их использования.

Полярно-координатные компенсаторы содержат фазорегулятор и делитель напряжения (реохорд), с помощью которых регулируется компенсирующее напряжение по фазе и по модулю (рис. 18.3).

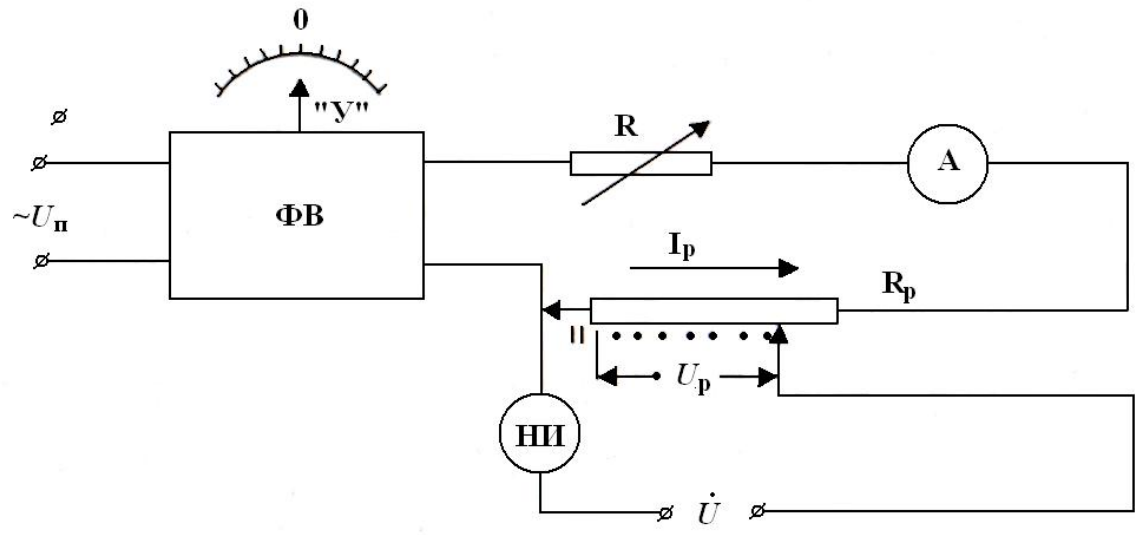


Рис. 18.3. Схема полярно-координатного компенсатора переменного тока:

ФВ – фазовращатель;
НИ – нуль-индикатор;
R – переменный резистор;
$R_р$ – реохорд;
$I_р$ – рабочий ток;
$U_П$ – напряжение питания;
$\dot{U}$ – измеряемое напряжение(комплексная величина)

Рабочий ток $I_р$ устанавливается с помощью переменного резистора R (изменением его сопротивления) по амперметру (или миллиамперметру). Класс точности используемых амперметров электродинамической системы не выше 0,1 или 0,2. Использование амперметров для установки $I_р$ снижает точность компенсаторов переменного тока (по сравнению с компенсаторами постоянного тока) и объясняется отсутствием меры ЭДС переменного тока, аналогичной нормальному элементу. В качестве нуль-индикатора обычно используется вибрационный галь-

ванометр. При измерении компенсация искомого напряжения $\overset{0}{U}$ проводится по модулю и по фазе. Перемещением движка реохорда $R_{\text{р}}$ и регулятора фазовращателя ФВ добиваются нулевых показаний нуль-индикатора НИ. При этом фазы измеряемого и компенсирующего напряжений противоположны, а модули равны:

$$\dot{U} = U_p \cdot e^{j\varphi}, \tag{18.11}$$

$$U_k = I_p \cdot R'_p, \tag{18.12}$$

где U_{k} – модуль компенсирующего напряжения;

φ – угол между компенсирующим напряжением и опорным (за опорное обычно принимается напряжение питания $U_{\text{П}}$);

$R'_{\text{р}}$ – сопротивление использованной части реохорда (от 0 до движка).

При заданном рабочем токе $I_{\text{р}}$ реохорд $R_{\text{р}}$ может быть проградуирован в вольтах (или милливольтах), что дает возможность непосредственного отсчета модуля действующего (или амплитудного) значения измеряемого напряжения. Отсчет угла φ осуществляется по шкале, которой снабжен фазовращатель ФВ.

Существенным недостатком этого типа компенсаторов является большая погрешность измерения фазы искомого напряжения (до 1^0). Причина – в трудности изготовления фазовращателей высокой точности. По этой причине полярно-координатные компенсаторы переменного тока не нашли широкого применения.

Дополнительные сведения по рассмотренным компенсаторам приведены в литературе [1; 2; 8].

18.5. Прямоугольно-координатные компенсаторы переменного тока

Принцип действия рассматриваемых компенсаторов переменного тока основан на раздельной компенсации активной и реактивной составляющих измеряемого напряжения соответствующими составляющими компенсирующего напряжения (рис. 18.4).

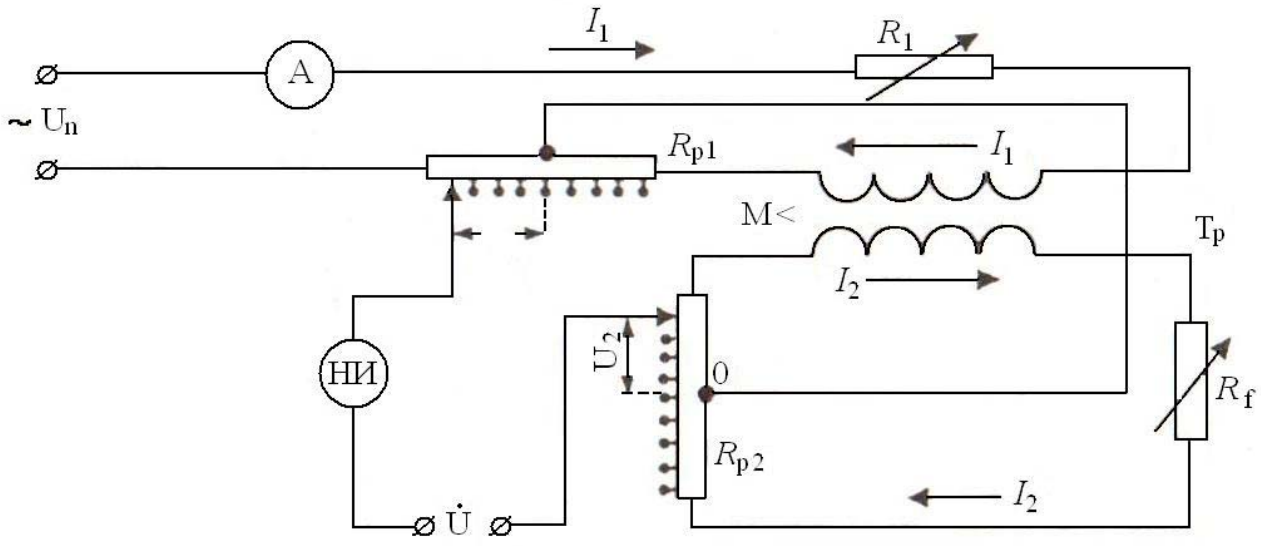


Рис. 18.4. Схема прямоугольно-координатного компенсатора переменного тока:
$R_{р1}$, $R_{р2}$ – реохорды;
$T_р$ – воздушный трансформатор;
R_f – переменный резистор;
$U_П$ – напряжение питания;
$\dot{U}$ – измеряемое напряжение (комплексная величина);
НИ – нуль-индикатор;
I_1 – рабочий ток первого контура;
I_2 – рабочий ток второго контура;
R_1 – переменное сопротивление;
M – взаимная индуктивность между обмотками трансформатора $T_р$

Прямоугольно-координатные компенсаторы имеют две рабочих цепи. Первая рабочая цепь состоит из реохорда $R_{р1}$, первичной обмотки воздушного трансформатора $T_р$, переменного сопротивления R_1 и амперметра. К этой цепи прикладывается питание (с напряжением $U_П$). Вторая рабочая цепь состоит из реохорда $R_{р2}$, вторичной обмотки воздушного трансформатора $T_Р$ и переменного сопротивления R_f. Рабочие цепи связаны между собой индуктивно (взаимная индуктивность между обмотками трансформатора M). Ток I_1 устанавливается по амперметру с помощью переменного сопротивления R_1. Значение тока I_2 зависит от взаимной индуктивности M и значений сопротивлений $R_{р2}$ и R_f. Сопротивление резистора R_f служит для поддержания требуемого значения I_2 при изменении частоты. Токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90^0. Падения напряжений от этих токов на сопротивлениях реохордов $R_{р1}$ и $R_{р2}$ также сдвинуты по фазе на 90^0. Середины реохордов соединены между собой перемычкой. В силу этого потенциалы средних точек реохордов могут быть приняты за ноль. Меняя путем перемещения движков реохордов величину падений напряжений U_1 и U_2 между движками и начальной точкой «0», можно

получить компенсацию измеряемого напряжения $\dot{U}$ в любом из четырех квадрантов координатной плоскости.

О компенсации измеряемого напряжения судят по показаниям нуль-индикатора НИ (в момент компенсации НИ показывает ноль). В этом случае измеряемое комплексное напряжение $\dot{U}$ уравновешивается геометрической суммой напряжений U_1 и U_2:

$$U = U_1 + jU_2 \,. \tag{18.13}$$

Модуль и фаза измеряемого напряжения равны:

$$|U| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \,, \tag{18.14}$$

$$\varphi = \text{arctg}\frac{U_2}{U_1}. \tag{18.15}$$

При синфазности рабочего тока первого контура I_1 и напряжения питания $U_\text{П}$ угол φ представляет собой фазовый сдвиг измеряемого напряжения относительно напряжения питания (как и в полярно-координатных компенсаторах).

Компенсаторы переменного тока значительно уступают по точности компенсаторам постоянного тока. Это связано с тем, что рабочий ток приходится устанавливать по электродинамическим амперметрам, классы точности которых, в лучшем случае, – 0,1 или 0,2. Поэтому, обладая большим входным сопротивлением (как и аналогичные приборы постоянного тока), прямоугольно-координатные компенсаторы переменного тока имеют относительные погрешности на уровне 0,2–0,5 %.

Дополнительные сведения по рассмотренным компенсаторам переменного тока приведены в литературных источниках [1; 2; 8].

19. АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

19.1. Общие положения

Аналоговые электронные приборы представляют собой средства измерений, в которых преобразование измеряемой величины осуществляется с помощью аналоговых электронных устройств (рис. 19.1). Аналоговые электронные приборы применяются при измерении практически всех электрических величин: напряжения, тока, мощности, частоты и т. д.

Применение электронных устройств значительно расширяет возможности средств измерений: повышается чувствительность приборов; расширяется диапазон измерений; уменьшается мощность, потребляемая от измерительных цепей, и т. п.

В настоящее время получили распространение такие приборы, как электронные вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока, омметры, измерители индуктивностей и емкостей, частотомеры, анализаторы спектров и др. Вместе с тем следует отметить, что аналоговые электронные приборы частично вытесняются соответствующими цифровыми приборами.

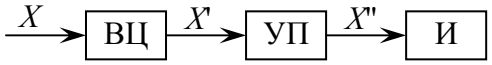


Рис. 19.1. Структурная схема аналоговых электронных приборов:
ВЦ – входная цепь; УП – усилитель–преобразователь; И – измеритель

В состав входной цепи (ВЦ) входят делители, фильтры, защитные устройства от перегрузки, переключатели пределов измерения и т. п. На вход ВЦ подается измеряемая электрическая величина X, а с выхода снимается электрическая величина X'.

Усилитель-преобразователь (УП) представляет собой блок, обеспечивающий усиление и преобразование электрической величины X'. Усилительно-преобразовательный блок строится на основе различных электронных устройств: полупроводниковых диодов, транзисторов, электронных ламп, микросхем и т. д. В общем случае УП и усиливает, и преобразует подавае-

мые на его вход электрические величины, но в частном случае это может быть только усилитель или только преобразователь. С выхода УП снимается электрическая величина X''.

Электрическая величина X'' подается на измеритель (И). В качестве измерителя обычно используются электромеханические приборы магнитоэлектрической системы. Могут также применяться электромеханические приборы электростатической системы и газоразрядные устройства.

Примеры обозначений аналоговых электронных приборов приведены в приложении (см. прил. 4).

Описание рассматриваемых приборов приведено в литературных источниках [1; 2; 36].

19.2. Вольтметры средних значений

Упрощенная схема вольтметра средних значений выпрямительной системы приведена на рис. 19.2.

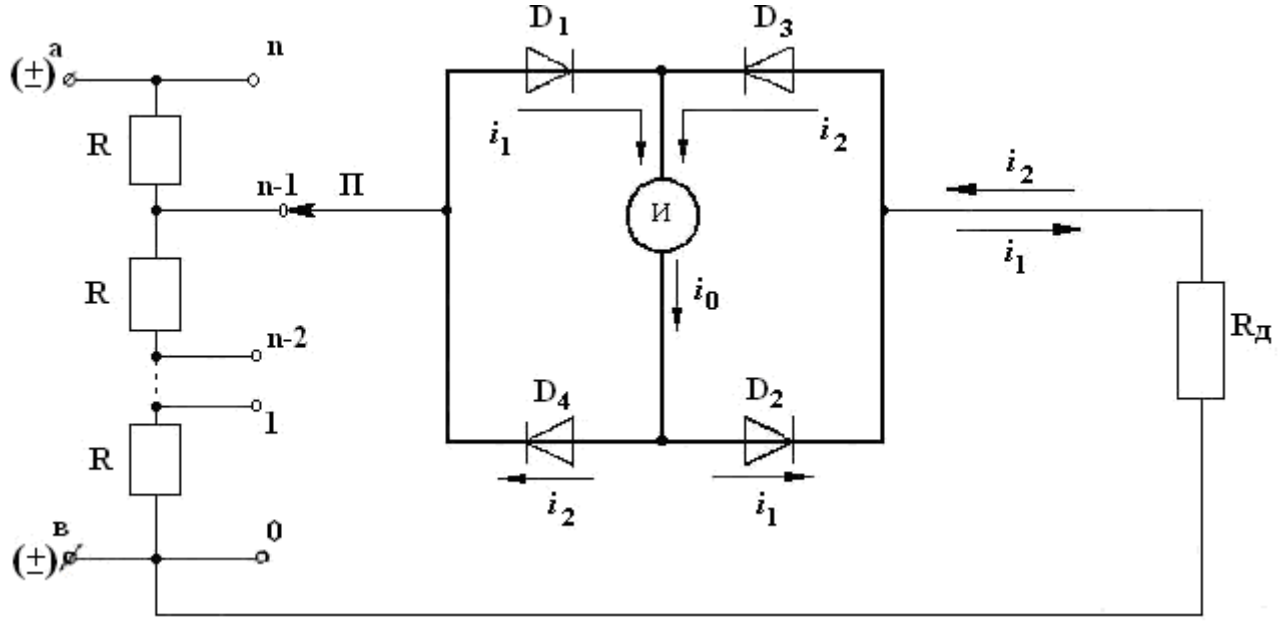


Рис. 19.2. Схема вольтметра средних значений: R – постоянные сопротивления; П – переключатель; 0-1-...-n – неподвижные контакты переключателя; ~U – измеряемое переменное напряжение; D_1; D_2; D_3; D_4 – полупроводниковые диоды; И – измеритель (электромеханический прибор магнитоэлектрической системы); $R_Д$ –постоянное сопротивление; +(–) – полярность точки «а» при положительных и отрицательных полупериодах измеряемого напряжения; –(+) – полярность точки «в» при отрицательных и положительных полупериодах измеряемого напряжения

Входная цепь (ВЦ) приведенного на рис. 19.2 вольтметра средних значений представляет собой делитель из n резисторов R. С помощью переключателя, перемещающегося по неподвижным контактам делителя, выбирают необходимое значение измеряемого напряжения. Выбранное напряжение подается на выпрямительный мост, собранный на диодах D_1, D_2, D_3, D_4, и далее (после выпрямления) – на измеритель И магнитоэлектрической системы. Графики напряжений и токов, действующих в рассматриваемой схеме, приведены на рис. 19.3.

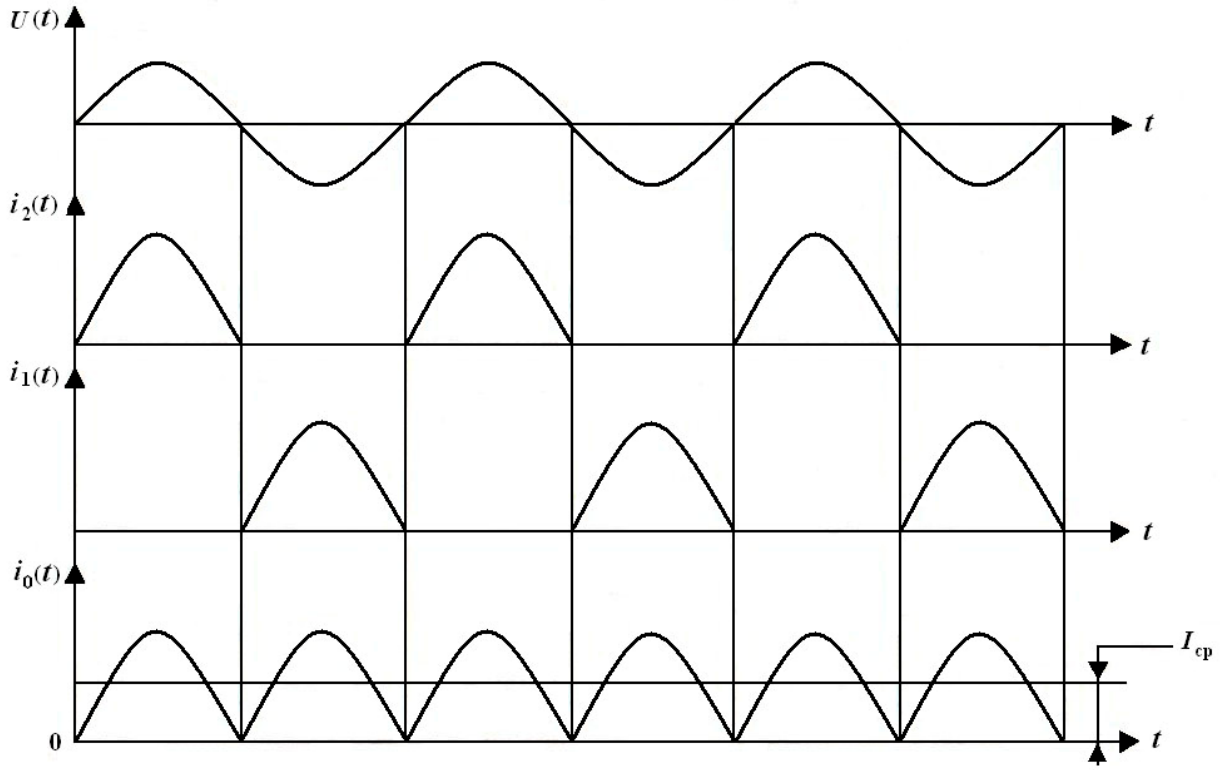


Рис. 19.3. Графики напряжений и токов: $\mathcal{U}(t)$ – мгновенное значение измеряемого напряжения; $i_1(t)$ – мгновенное значение тока в положительные полупериоды измеряемого напряжения; $i_2(t)$ – мгновенное значение тока в отрицательные полупериоды измеряемого напряжения; $i_0(t)$ – мгновенное значение тока, протекающего через измеритель; $I_{ср}$ – среднее значение тока; t – время

Работа вольтметра средних значений протекает в следующей последовательности. При положительном полупериоде измеряемого напряжения (в этом случае «+» приложен к точке *«а»* схемы и «–» приложен к точке *«в»* (см. рис. 19.2)) ток i_1 протекает по цепи: точка *«а»* – сопротивление R – диод D_1 – измеритель И – диод D_2 – сопротивление $R_Д$ – точка *«в»*. При отрицательном полупериоде измеряемого напряжения («+» в точке *«в»*, «–» в точке *«а»*) ток i_2

протекает по цепи: точка *«в»* – сопротивление $R_Д$ – диод D_3 – измеритель И – диод D_4 – переключатель П – резистор R – точка *«а»*.

Через измеритель И в оба полупериода протекает суммарный ток i_0, являющийся током двухполупериодного выпрямления.

Измеритель И магнитоэлектрической системы реагирует на средний ток $I_{ср}$. Показания измерителя:

$$\alpha = K_I \cdot I_{ср}, \tag{19.1}$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i_0(t)dt, \tag{19.2}$$

где α – показание прибора (измерителя);

K_I – коэффициент пропорциональности по току;

$I_{ср}$ – среднее значение тока;

T – период измеряемого напряжения.

$$I_{ср} = \frac{U_{ср}}{R_\Sigma}, \tag{19.3}$$

где $U_{ср}$ – среднее значение измеряемого напряжения;

R_Σ – суммарное сопротивление в цепи измерителя.

Подставляя в (19.1) значение $I_{ср}$ по (19.3), получаем

$$\alpha = \frac{K_I}{R_\Sigma} \cdot U_{ср}, \tag{19.4}$$

$$\alpha = K_2 \cdot U_{ср}, \tag{19.5}$$

где K_2 – коэффициент пропорциональности по среднему значению напряжения.

Полученное выражение (19.5) свидетельствует, что показания рассматриваемого вольтметра (см. рис. 19.2) прямо пропорциональны среднему значению измеряемого переменного напряжения.

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [U(t)]^2 dt}, \tag{19.6}$$

$$U_{ср} = \frac{U}{k_ф}, \qquad (19.7)$$

где U – действующее (эффективное) значение измеряемого напряжения;

$k_ф$ – коэффициент формы.

Подставляя (19.7) в (19.5), получаем

$$\alpha = \frac{K_2}{k_ф} \cdot U = K \cdot U, \qquad (19.8)$$

где K – коэффициент пропорциональности по действующему значению синусоидального напряжения;

$k_ф = 1{,}11$ – для синусоидального напряжения.

Описываемый вольтметр является вольтметром средних значениий и, согласно (19.5), может быть проградуирован в средних значениях ($U_{ср}$) независимо от формы измеряемого напряжения.

При градуировке прибора в действующих значениях измеряемого напряжения его показания, согласно (19.8), зависят от формы этого напряжения. Для синусоидального напряжения будут одни показания прибора, для прямоугольного напряжения – другие показания, для треугольного – третьи и т. д.

Если вольтметр проградуирован в действующих значениях, то в обязательном порядке указывается форма измеряемого напряжения. Как правило, такие вольтметры предназначены для измерения действующих значений синусоидальных напряжений. Измерение напряжений, отличных от синусоидальных, приводит в этом случае к появлению дополнительных погрешностей, которые тем больше, чем больше измеряемое напряжение отлично от синусоидального.

Отметим, что рассматриваемые вольтметры называют также приборами выпрямительной системы. Обозначения этих приборов приведены в приложении (см. прил. 4).

Дополнительные сведения по вольтметрам средних значений приведены в литературных источниках [1; 2; 5; 36].

19.3. Вольтметры амплитудных значений

В зависимости от принципа построения различают вольтметры амплитудных значений (или «пиковые вольтметры») с открытым входом (рис. 19.4) и вольтметры с закрытым входом (рис. 19.6). На рис. 19.5 приведены временные диаграммы сигналов вольтметров амплитудных значений с открытым входом.

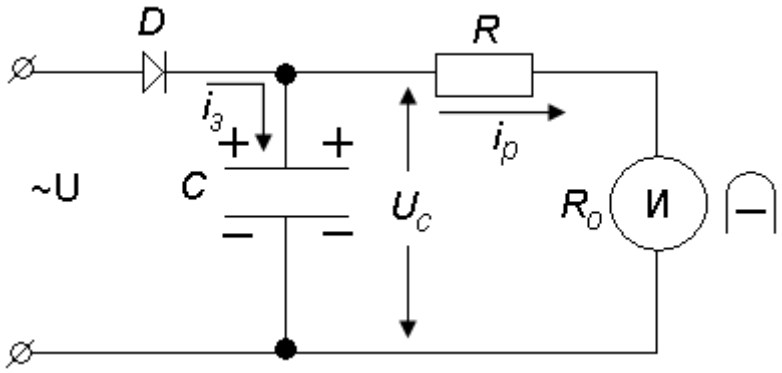


Рис. 19.4. Схема амплитудного вольтметра с открытым входом:

$\sim U$ – измеряемое (входное) напряжение;

D – полупроводниковый диод;

C – емкость конденсатора;

R – постоянное сопротивление;

И – измеритель магнитоэлектрической системы;

R_o – внутреннее сопротивление измерителя

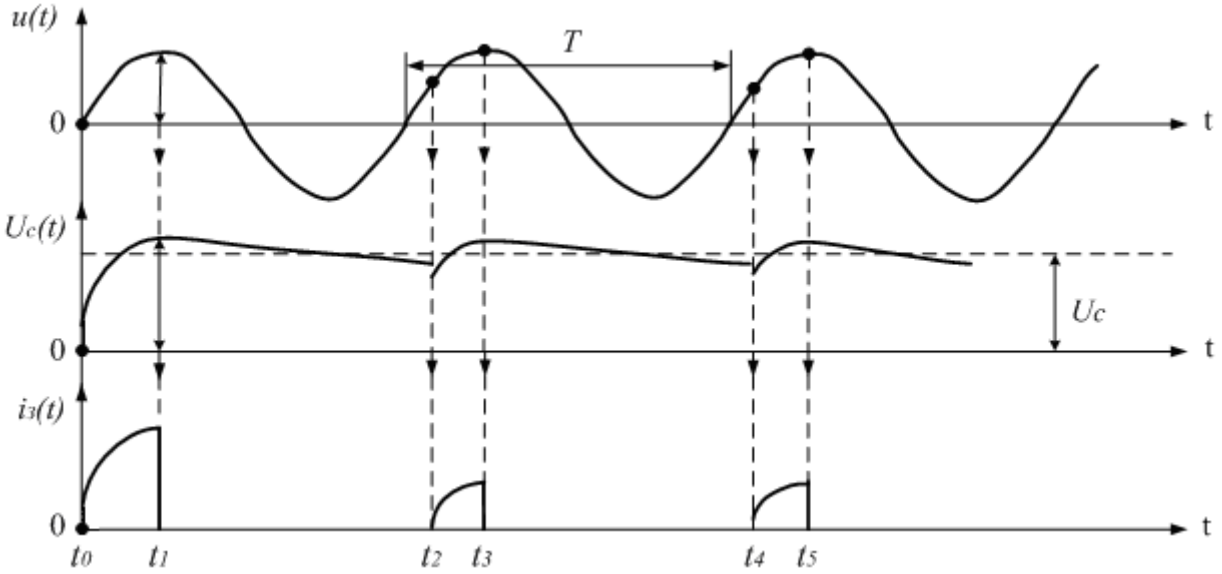


Рис. 19.5. Временные диаграммы сигналов амплитудных вольтметров с открытым входом: *u(t)* – мгновенное значение измеряемого (входного) напряжения; u_c *(t)* – мгновенное значение напряжения на конденсаторе; i_3 – мгновенное значение тока заряда

Рассмотрим работу амплитудных вольтметров с открытым входом при подаче на вход синусоидального напряжения. Пусть в некоторый момент времени t_0 на вход рассматриваемого вольтметра (см. рис. 19.4) прикладывается

синусоидальное напряжение $U = U_m \sin(wt)$, которое через открытый диод D начинает заряжать конденсатор C.

Постоянная времени заряда T_3:

$$T_3 = (R_c + R_д) \cdot C \qquad (19.9)$$

где R_c – внутреннее сопротивление источника сигнала;

$R_д$ – сопротивление открытого диода;

C – емкость конденсатора.

Конденсатор C заряжается до амплитудного значения измеряемого напряжения U_m (см. рис. 19.5) при выполнении условия

$$T_3 < 0{,}5T, \qquad (19.10)$$

где T – период измеряемого напряжения.

На этом же рисунке показан зарядный ток i_3 в первую четверть периода (от t_0 до t_1). С момента времени t_1 входное напряжение уменьшается, диод закрывается. Конденсатор будет разряжаться через сопротивления R и R_0 (ток разряда $i_р$) до момента времени t_2, когда входное (измеряемое) напряжение становится равным напряжению на конденсаторе, после чего диод открывается и конденсатор подзаряжается до U_m (момент времени t_2–t_3). Ток подзаряда в моменты времени от t_2 до t_3 показан на рис. 19.5. Аналогично происходит подзаряд конденсатора в моменты времени t_4–t_5 и t_6–t_7.

Постоянная времени разряда конденсатора C:

$$T_р = (R + R_0), \qquad (19.11)$$

где $T_р$ – постоянная времени разряда;

R – сопротивление цепи;

R_0 – внутреннее сопротивление измерителя магнитоэлектрической системы.

Для медленного разряда конденсатора необходимо выполнить условие:

$$T_р >> T. \qquad (19.12)$$

При выполнении условия (19.12) среднее значение напряжения на конденсаторе $U_{ср}$ близко к U_m (см. рис. 19.5), т. е.

$$U_m = U_{ср}. \qquad (19.13)$$

Показания измерителей магнитоэлектрической системы пропорциональны средним значениям электрических величин. С учетом (19.13) можно записать:

$$\alpha = k \cdot U_m, \qquad (19.14)$$

где α – показание амплитудного вольтметра;

k – коэффициент пропорциональности;

U_m – амплитуда входного (измеряемого) напряжения.

При наличии постоянной составляющей во входном сигнале $\pm U_0$ выходное напряжение (и соответственно показание) амплитудного вольтметра с открытым входом пропорционально величине $U_\text{m} \pm U_0$, т. е.

$$\alpha = k(U_m \pm U_0). \qquad (19.15)$$

Приведенная на рис. 19.4 схема предназначена для измерения амплитуды входного сигнала положительной полярности. Для измерения амплитуды отрицательной полярности необходимо изменить полярность включения диода.

На рис. 19.6 приведена схема амплитудного вольтметра с закрытым входом.

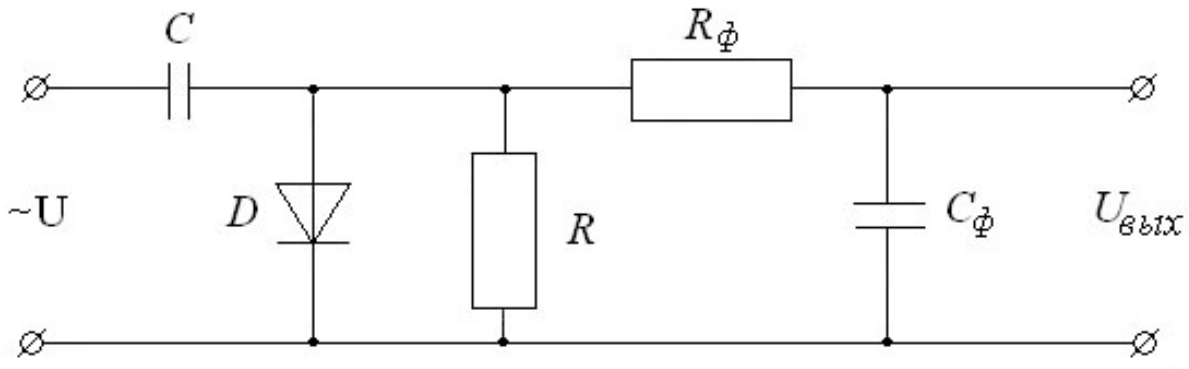


Рис. 19.6. Схема амплитудного вольтметра с закрытым входом: U – действующее значение измеряемого (входного) напряжения; $R_\text{ф}$, $C_\text{ф}$ – сопротивление и емкость фильтра; $U_\text{вых}$ – выходное напряжение; R – постоянное сопротивление

В этой схеме процесс заряда конденсатора аналогичен процессу, рассмотренному в схеме амплитудного вольтметра с открытым входом. Напряжение на конденсаторе устанавливается и остается близким к значению U_m. С помощью фильтра $R_\text{ф}C_\text{ф}$ напряжение усредняется. Выходное напряжение $U_\text{вых}$ постоянно и

близко к U_m. Амплитудные вольтметры с закрытым входом не реагируют на постоянную составляющую входного (измеряемого) напряжения.

Напряжение $U_{вых}$ может быть измерено с помощью, например, измерителя магнитоэлектрической системы так же, как для амплитудных вольтметров с открытым входом. В этом случае уравнение шкалы для вольтметров с закрытым входом аналогично уравнению шкалы для вольтметров с открытым входом (см. соотношение (19.14)).

Следует отметить, что лучшие результаты обеспечивает подключение магнитоэлектрических измерителей к амплитудным вольтметрам через электронные усилители. Использование электронных усилителей позволяет легче выполнить условие (19.12) и получить более благоприятные метрологические характеристики приборов.

Рассмотренные вольтметры обычно градуируются в амплитудных значениях измеряемого напряжения. В этом случае показания вольтметров не зависят от формы входного (измеряемого) напряжения. Если же приборы проградуированы в действующих значениях синусоидального напряжения, то при измерении напряжений другой формы необходимо делать соответствующий пересчет с учетом коэффициента амплитуды измеряемого напряжения.

Более детально с амплитудными вольтметрами можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 36].

19.4. Конденсаторные частотомеры

Электронные конденсаторные частотомеры используются для измерения частоты периодических напряжений в диапазоне от 20 Гц до 500 кГц. Приведенная погрешность таких приборов обычно находится в пределах 1,0–2,5 %.

Принцип действия электронного конденсаторного частотомера поясняется схемой, приведенной на рис. 19.7, и временными диаграммами, приведенными на рис. 19.8.

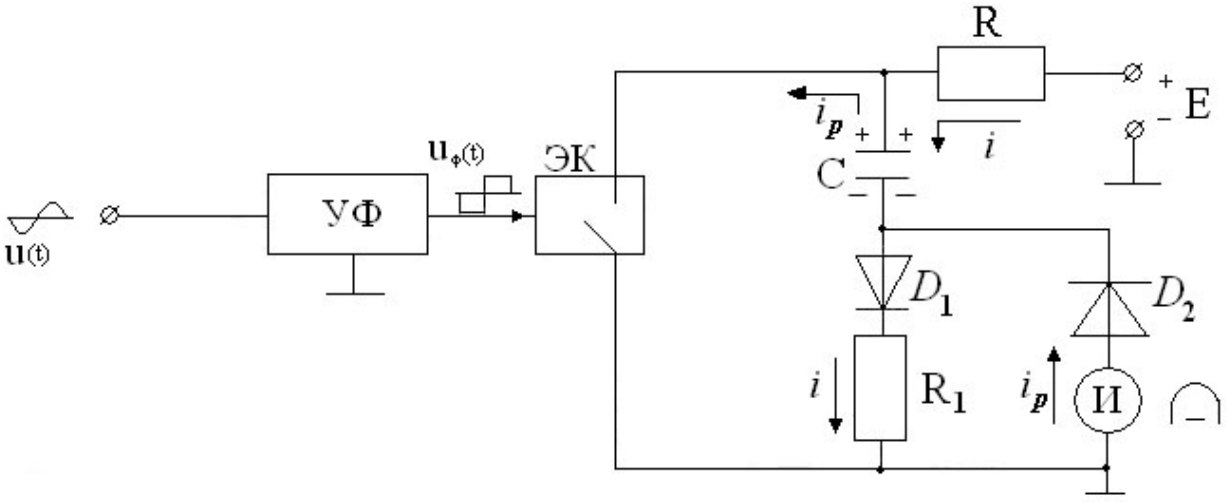


Рис. 19.7. Схема электронного конденсаторного частотомера:
УФ – усилитель-формирователь; ЭК – электронный ключ; D_1, D_2 – полупроводниковые диоды; И – измеритель магнитоэлектрической системы; R, $R1$ – постоянные сопротивления

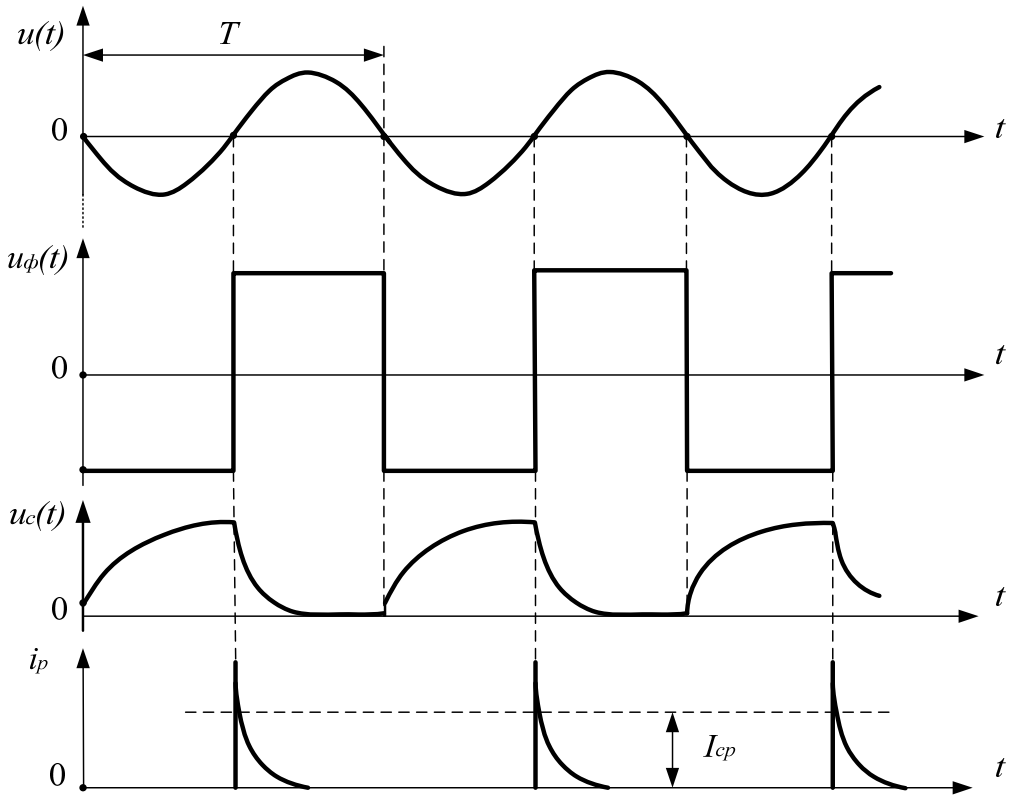


Рис. 19.8. Временная диаграмма сигналов электронного конденсаторного частотомера:
$u(t)$ – входной сигнал; $u_c(t)$ – напряжение на конденсаторе C;
$u_ф(t)$ – напряжение на выходе усилителя – формирователя; $i_р$ – ток разряда

Напряжение, частота которого изменяется $u(t)$ (рис. 19.7, 19.8), подается на вход усилителя-формирователя УФ, усиливающего входное напряжение и

формирующего из него прямоугольное напряжение. Этим напряжением управляется схема электронного ключа ЭК. Предполагается, что при отрицательных сигналах ЭК разомкнут, а при положительных замкнут. При разомкнутом состоянии ключа в течение половины периода конденсатор C через R_A заряжается до значения E. Ток заряда i_3 протекает через диод D_1. При замыкании ЭК конденсатор C разряжается через замкнутый ключ, измеритель И и диод D_2.

Заряд конденсатора C до напряжения питания произойдет при выполнении условия

$$t_3 < 0{,}5T\,, \tag{19.16}$$

где t_3 – время заряда;

T – период входного напряжения.

Полный разряд конденсатора C произойдет при выполнении условия

$$t_p < 0{,}5T\,, \tag{19.17}$$

где $t_р$ – время разряда.

При выполнении условий (19.16) и (19.17) конденсатор C за первую половину периода запасает заряд q. За вторую половину периода это количество электричества проходит через измеритель И.

$$q = E \cdot C\,, \tag{19.18}$$

где E – ЭДС источника питания.

Показания измерителя магнитоэлектрической системы пропорциональны среднему току, проходящему через него.

$$\alpha = K_П \cdot I_{ср}\,, \tag{19.19}$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^t i_p(t)dt\,, \tag{19.20}$$

$$q = \int_0^t i_p(t)dt\,, \tag{19.21}$$

$$f = \frac{1}{T}, \tag{19.22}$$

где α – показания прибора;

$K_П$ – коэффициент пропорциональности;

$I_{ср}$ – среднее значение разрядного тока;

$i_р$ – мгновенное значение тока разряда конденсатора;

t – текущее время;

f – частота входного напряжения.

На основании соотношений (19.18)–(19.22) можно записать:

$$\alpha = K_П \cdot \frac{1}{T} \cdot q = K_П \cdot f \cdot E \cdot C, \tag{19.23}$$

$$K = K_П \cdot E \cdot C, \tag{19.24}$$

$$\alpha = K \cdot f, \tag{19.25}$$

где K – коэффициент пропорциональности по частоте.

Выражение (19.25) свидетельствует, что показания рассматриваемого прибора прямо пропорциональны частоте входного сигнала.

Дополнительные сведения по электронным конденсаторным частотомерам приведены в литературных источниках [1; 2].

19.5. Омметры

Электронные омметры широко используются для измерения активных сопротивлений резисторов, контактов, изоляции, поверхностных и объемных сопротивлений и в других случаях.

Погрешность таких омметров составляет от 1–2 до 10–15 %. Особенно велики погрешности при измерении особо больших сопротивлений (при $R > (10^{10}–10^{12})$ Ом). В зависимости от диапазона измерений рассматриваемые приборы называют миллиомметрами, омметрами, мегаомметрами, тераоммметрами.

Работа электронных омметров основана, как правило, на преобразовании измеряемого сопротивления в постоянное напряжение, которое подается на магнитоэлектрический измеритель со шкалой, проградуированной в единицах сопротивления.

Наибольшее распространение получили схемы омметров, приведенные на рис. 19.9; 19.10; 19.11.

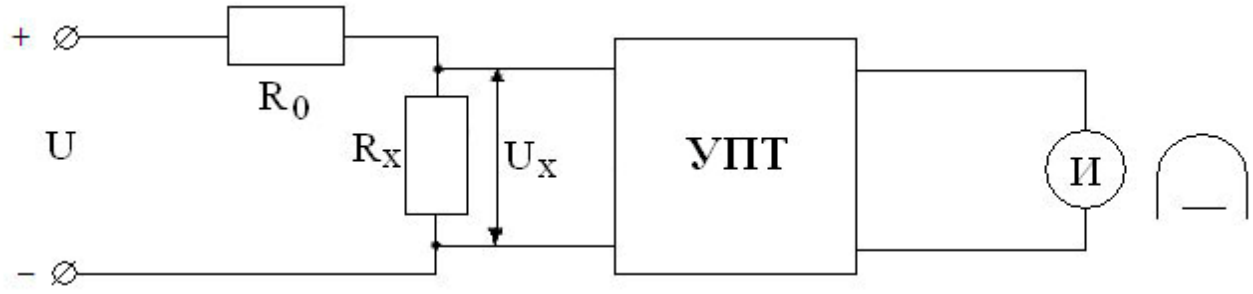


Рис. 19.9. Первый вариант омметра с усилителем постоянного тока

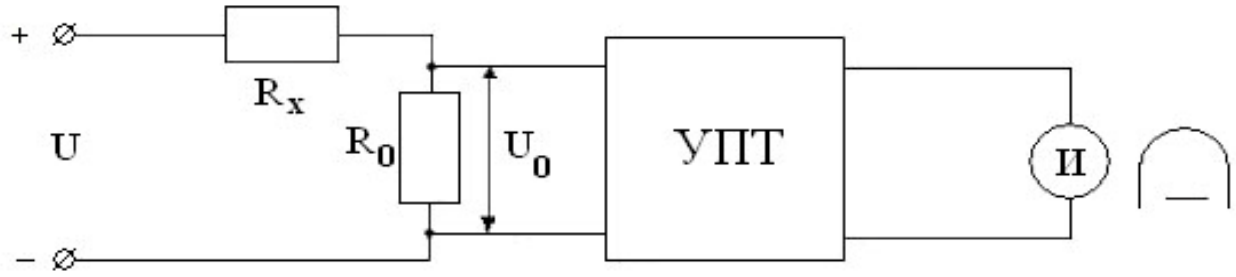


Рис. 19.10. Второй вариант омметра с усилителем постоянного тока:
U – напряжение стабильного источника питания; УПТ – усилитель постоянного тока;
R_0 – образцовое известное сопротивление; R_x – измеряемое сопротивление;
И – измеритель магнитоэлектрической системы

Для схемы, приведенной на рис. 19.9, можно записать:

$$U_x = U\frac{R_x}{R_x + R_0}. \qquad (19.26)$$

Считая, что $R_x << R_0$, получаем

$$U_x = U\frac{R_x}{R_0}, \qquad (19.27)$$

$$\alpha = k \cdot U_x = k \cdot U \cdot \frac{R_x}{R_0}, \qquad (19.28)$$

где α – показание измерителя магнитоэлектрической системы (совпадает с показаниями омметра);

k – коэффициент преобразования УПТ и измерителя.

Соотношение (19.28) свидетельствует, что показания омметра, построенного по схеме рис. 19.9, прямо пропорциональны измеряемому сопротивлению.

Для схемы, приведенной на рис. 19.10, можно записать:

$$U_0 = U \cdot \frac{R_0}{R_x + R_0}. \qquad (19.29)$$

Считая, что $R_x >> R_0$, получаем

$$U_0 = U \cdot \frac{R_0}{R_x}, \qquad (19.30)$$

$$\alpha = k \cdot U_0 = k \cdot U \cdot \frac{R_0}{R_x}. \qquad (19.31)$$

Соотношение (19.31) свидетельствует, что показания омметра, построенного по схеме рис. 19.10, обратно пропорциональны измеряемому сопротивлению.

Очевидно, что омметры по первой схеме (см. рис. 19.9) целесообразно использовать при измерении малых сопротивлений, а омметры по второй схеме (см. рис. 19.10*)* – для измерения больших сопротивлений.

В омметрах, построенных по схеме рис. 19.11, использован операционный усилитель, в цепь отрицательной обратной связи которого включен резистор R_x.

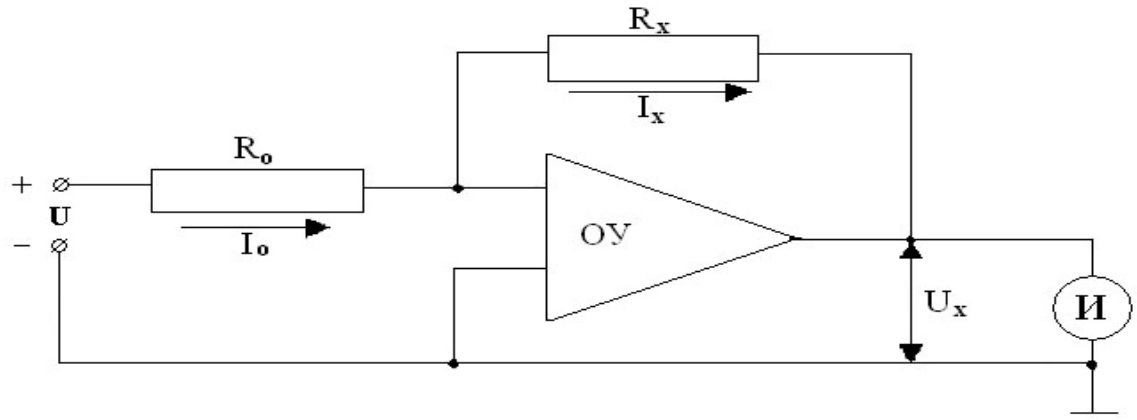


Рис. 19.11. Схема электронного омметра с операционным усилителем:
ОУ – операционный усилитель; R_x – измеряемое сопротивление; R_o – образцовое известное сопротивление; U – напряжение стабильного источника питания; И – измеритель магнитоэлектрической системы

Операционный усилитель (ОУ) имеет большой коэффициент усиления K, большое входное сопротивление и очень малые входные токи, которыми можно пренебречь. Тогда потенциал точки *«а»* близок к нулю и падение напряжения на R_x можно принять равным напряжению на измерителе (см. рис. 19.11). Следовательно, токи I_0 и I_x равны и справедливы соотношения

$$I_0 = I_x = \frac{U_0}{R_0} = \frac{U_x}{R_x}, \tag{19.32}$$

$$U_0 = U, \tag{19.33}$$

$$U_x = U \cdot \frac{R_x}{R_0}, \tag{19.34}$$

$$\alpha = S_U \cdot U \cdot \frac{R_x}{R_0}, \tag{19.35}$$

где α – показание измерителя магнитоэлектрической системы, являющееся одновременно показанием рассматриваемого омметра;

S_U – чувствительность измерителя И по напряжению.

Таким образом, согласно (19.35), показания электронного омметра, построенного по схеме рис. 19.11, прямо пропорциональны измеряемому сопротивлению.

Рассмотренные схемы нашли применение в приборах, выпускаемых серийно. Омметры типов Е6-12; Е6-15 имеют структуру, близкую к схемам рис. 19.9 и 19.10. Омметры типов Е6-10; Е6-13 построены по схеме, приведенной на рис. 19.11.

Сведения по электронным омметрам приведены в литературных источниках [1; 67; 73; 101; 108; 109].

Мостовые методы измерения сопротивлений, широко используемые на практике, в настоящем учебном пособии не рассматриваются. Сведения по этим методам измерений приведены во многих других учебных пособиях (см., например, [1; 2]).

20. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

20.1. Общие положения

Работа большинства цифровых измерительных приборов основана на преобразовании непрерывной (аналоговой) измеряемой величины в дискретную (цифровую). Исключение составляют некоторые приборы, предназначенные для измерения дискретных величин (счетчики ядерных частиц, счетчики числа импульсов и т. д.). Процесс цифрового кодирования непрерывной величины является совокупностью квантования (дискретизации) этой величины по уровню и по времени.

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) происходит автоматическое преобразование входной измеряемой величины в цифровой код. Автоматизм преобразования измеряемой величины в цифровой код является определяющим признаком ЦИП. На этом основании приборы, в которых результат измерения хотя и выводится на цифровое отсчетное устройство, но образуется за счет ручных операций, к цифровым не относятся. Так, компенсаторы напряжения постоянного тока и мосты с декадными магазинами сопротивлений, в которых уравновешивание выполняется вручную, цифровыми приборами считать не принято.

ЦИП включают в себя два обязательных функциональных узла: аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и цифровые отсчетные устройства (ЦОУ). Кроме АЦП и ЦОУ, цифровые приборы могут содержать цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). АЦП и ЦАП применяют не только как узлы ЦИП, но и как автономные устройства.

В результате квантования измеряемой величины по уровню возникает погрешность дискретности, обусловленная тем, что бесконечное множество значений измеряемой величины отражается лишь ограниченным количеством показаний ЦИП.

Погрешность дискретности присуща ЦИП и отсутствует у аналоговых приборов. Однако эта погрешность не является препятствием для увеличения

точности приборов, так как соответствующим выбором числа уровней квантования погрешность дискретности можно сделать сколь угодно малой. Практика показывает, что ЦИП, как правило, имеют значительно меньшие погрешности, чем аналоговые приборы, предназначенные для измерения тех же самых физических величин.

Дискретизация непрерывной величины $x(t)$ по времени проводится в целях преобразования $x(t)$ в дискретную (прерывную) во времени величину, которая совпадает с соответствующими значениями $x(t)$ только в определенные моменты времени. Промежуток времени между двумя соседними моментами времени дискретизации называется шагом дискретизации, который может быть постоянным или переменным.

Дискретизация по времени (так же, как и квантование по уровню) непрерывной измеряемой величины является принципиальным источником погрешности ЦИП. Однако выбором соответствующего шага дискретизации (как и уровня квантования) рассматриваемая погрешность может быть сведена к минимуму.

В конструктивном отношении ЦИП можно разделить на электромеханические и электронные. В первых используются контактные элементы (шаговые двигатели, реле), во вторых – бесконтактные элементы (электронные или полупроводниковые). Развитие ЦИП идет по пути замены контактных устройств бесконтактными.

В зависимости от преобразования измеряемой величины в код различают ЦИП последовательного преобразования, ЦИП пространственного преобразования, ЦИП поразрядного уравновешивания (кодоимпульсные) и др.

По роду измеряемой величины ЦИП подразделяют на вольтметры, частотомеры, омметры, фазометры и т. д. Часто ЦИП являются универсальными, что позволяет одним прибором измерять разные электрические величины. Например, универсальный цифровой прибор может быть предназначен для измерения постоянных и переменных напряжений, постоянных и переменных токов, электрических сопротивлений и т. д.

Дополнительные сведения по ЦИП приведены в литературных источниках [1; 2; 5; 35].

20.2. Электромеханические цифровые приборы

Электромеханические («контактные») цифровые приборы имеют в своем составе шаговые двигатели, реле, переключатели и т. д. В силу того, что они имеют большое время измерения и небольшой срок службы, они не нашли широкого применения. К достоинствам этих приборов следует отнести их малую погрешность. В качестве примера ниже рассматривается электромеханический цифровой вольтметр, предназначенный для измерения постоянных напряжений (рис. 20.1).

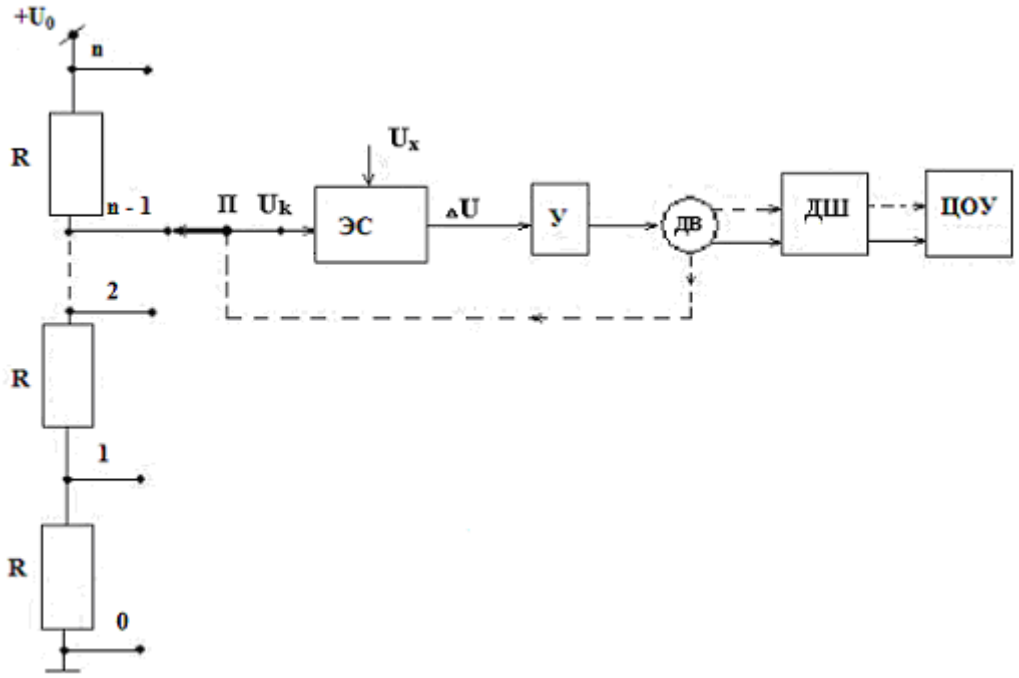


Рис. 20.1. Упрощенная схема электромеханического цифрового вольтметра:

U_x – измеряемое напряжение;
U_o – опорное напряжение;
ЭС – элемент сравнения;
У – усилитель;
ДВ – шаговый двигатель;
ДШ – дешифратор;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
П – переключатель

Сплошными линиями на рис. 20.1 показаны электрические цепи, а пунктиром – механические связи. Шаговый двигатель ДВ может быть связан с ДШ и ЦОУ электрически или механически, в зависимости от конструктивного исполнения конкретного типа прибора, что отмечено на рисунке двумя линиями (сплошной и пунктирной).

Компенсирующее напряжение U_k, подаваемое на ЭС для сравнения с измеряемым напряжением U_x, определяется соотношением

$$U_k = \frac{U_0}{n} \cdot n_i, \qquad (20.1)$$

где n – число сопротивлений R (общее число ступеней делителя напряжения);
n_i – число включенных ступеней делителя напряжения.

Отметим, что U_k изменяется ступенями с дискретностью $\Delta U_k = U_0/n$. Значение ΔU_k определяет погрешность дискретности прибора. Теоретически погрешность дискретности может быть сколь угодно малой (ограничения имеют конструктивный и технический характер). Она зависит от числа сопротивлений, образующих делитель напряжения. Значение ΔU на выходе элемента сравнения напряжения равно разности напряжений U_x и U_k:

$$\Delta U = U_x - U_k. \qquad (20.2)$$

Если $U_x \neq U_k$, то $\Delta U \neq 0$ подается на вход усилителя y и после усиления воздействует на шаговый двигатель ДВ, который начинает перемещать подвижный контакт переключателя П. При этом изменяется компенсирующее напряжение U_k, снимаемое с делителя. Увеличение U_k (если $U_x > U_k$) или его уменьшение (если $U_x < U_k$) происходит до тех пор, пока U_k не станет примерно равно измеряемому напряжению U_x. При этом двигатель ДВ останавливается и с ЦОУ производится отсчет показаний. Дешифратор ДШ, связанный с двигателем и управляющий цифровым отсчетным устройством ЦОУ, обычно (как и ЦОУ) – электронное устройство. В этом случае связи между ДВ, ДШ и ЦОУ электрические. Но рассматриваемые устройства могут быть и электромеханическими. Тогда связи между ними механические.

Следует отметить, что вместо шагового двигателя часто используются электромеханические реле, которые осуществляют необходимую коммутацию в измерительных цепях. Делители напряжений выполняются, как правило, декадными (например, декада целых единиц измеряемой величины, декада десятых долей, декада сотых долей и т. д.).

Быстродействие электромеханических ЦИП составляет 1–2 измерения в секунду. Типичный класс точности – 0,05. Известны электромеханические цифровые приборы и более высокого класса точности (от 0,01 до 0,005).

20.3. Электронные цифровые приборы

20.3.1. Времяимпульсные вольтметры

Времяимпульсные вольтметры относятся к приборам последовательного преобразования. Они основаны на преобразовании измеряемого напряжения во временной интервал и измерении полученного интервала путем заполнения его высокочастотными импульсами (рис. 20.2).

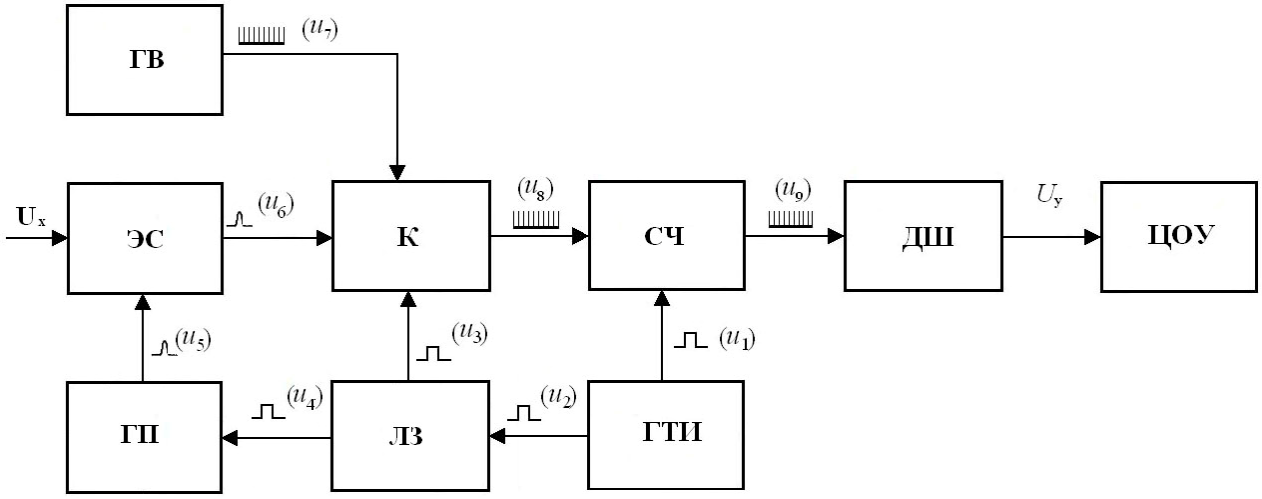


Рис. 20.2. Структурная схема времяимпульсного вольтметра:

ГТИ – генератор тактовых импульсов;
ЛЗ – линия задержки;
ДШ – дешифратор;
ЭС – элемент сравнения;
К– ключ;
СЧ – счетчик импульсов;
ГП – генератор пилообразного напряжения;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ГВ – генератор высокочастотных импульсов;
U_x – измеряемое напряжение (постоянное или медленно меняющееся);
U_y – управляющее напряжение

Работа прибора протекает в следующей последовательности. Такт работе прибора задает генератор тактовых импульсов (ГТИ), вырабатывающий с заданной периодичностью прямоугольные импульсы u_1 и u_2. Импульс u_1 поступает на счетчик импульсов (СЧ) и переводит его в исходное состояние («сбрасывает на ноль»). Импульс u_2 поступает на линию задержки (ЛЗ). С некоторой задержкой (необходимой для перевода СЧ в исходное состояние) на выходе ЛЗ

появляются импульсы u_3 и u_4. Импульс u_3 поступает на ключ (к) и открывает его. Импульс u_4 поступает на генератор пилообразного напряжения (ГП) и запускает его. С выхода ГП пилообразное напряжение u_5 поступает на элемент сравнения (ЭС). Одновременно на ЭС подается измеряемое напряжение U_x. Через открытый ключ К высокочастотные импульсы u_7 поступают на СЧ. Счет импульсов счетчиком СИ продолжается до тех пор, пока напряжения U_x и u_5 не станут равны друг другу и ЭС не выработает импульс u_6, который закроет ключ К. Число импульсов, накопленное в счетчике СЧ, преобразуется дешифратором (ДШ) в управляющее напряжение U_y, воздействующее на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), с которого и производится отсчет результата измерения.

На рис. 20.3 приведены временные диаграммы, поясняющие работу рассматриваемого прибора. Быстродействие времяимпульсных вольтметров обычно составляет 10–15 измерений в секунду. В отдельных случаях быстродействие может достигать 50–60 измерений в секунду.

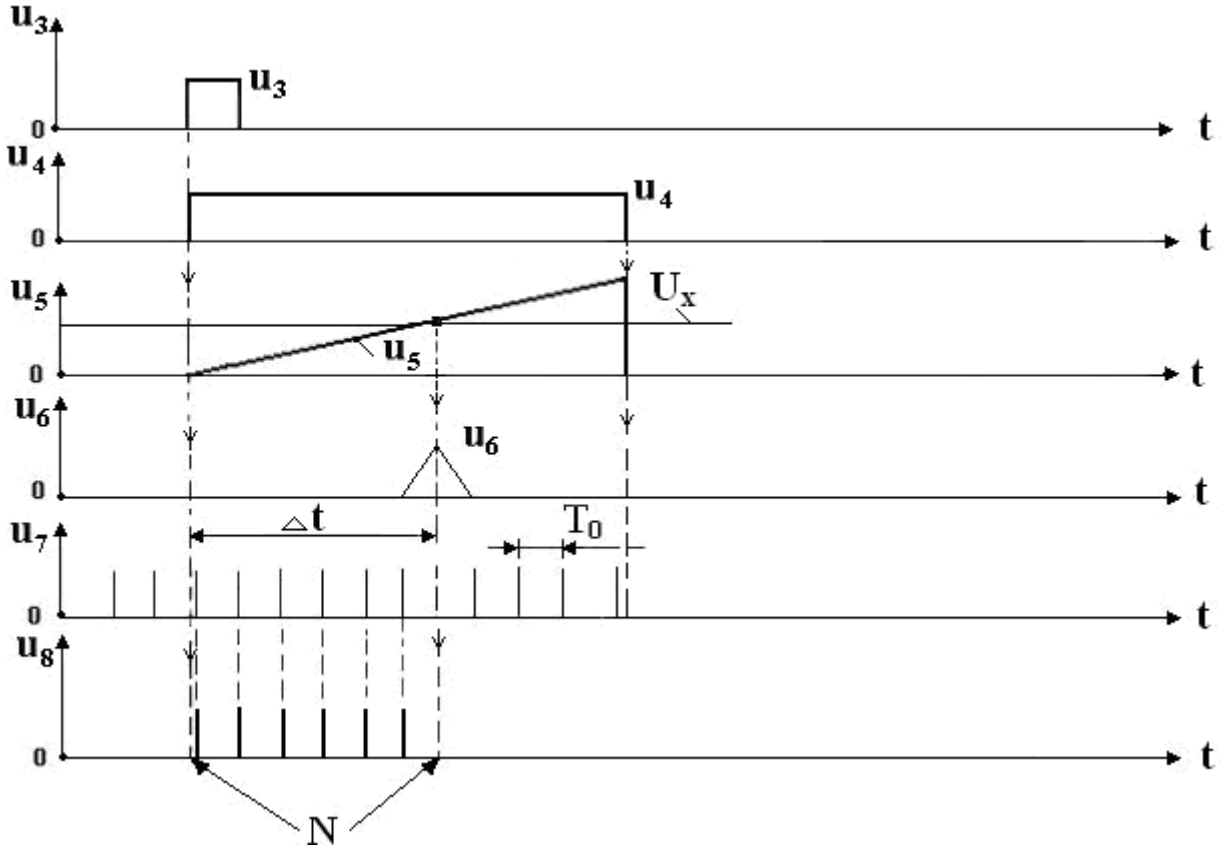


Рис. 20.3. Временные диаграммы

Отметим еще раз, что измеряемое напряжение преобразуется во временной интервал Δt, который заполняется импульсами, следующими с частотой $f_0 = 1/T_0$. Количество импульсов $N \approx \Delta t/T_0$ подсчитывается счетчиком и отображается на цифровом отсчетном устройстве прибора.

Времяимпульсные приборы имеют сравнительно большие погрешности. Это объясняется наличием погрешности дискретности из-за несовпадения появления счетных импульсов с началом и концом интервала Δt, а также за счет нелинейного коэффициента преобразования. Другим недостатком этих приборов является их низкая помехозащищенность, что требует применения специальных фильтров для подавления помех.

Промышленность выпускает ЦИП, построенные на описанном принципе. Все они имеют погрешности нисколько большие, чем цифровые приборы, построенные на других принципах. Например, погрешность универсального вольтметра типа ВК7-10А/1 при измерении постоянного напряжения составляет около 0,1–0,2 %.

20.3.2. Уравновешивающие вольтметры

В вольтметрах уравновешивающего преобразования (другое название – вольтметры сравнения) используется обратная связь, которая предполагает наличие в схеме цифро-аналогового преобразователя, преобразующего код (или число импульсов) в аналоговое напряжение. Существует несколько способов уравновешивания (сравнения) измеряемого напряжения с аналоговым напряжением обратной связи. Ниже рассмотрен уравновешивающий вольтметр с реверсивным счетчиком (рис. 20.4).

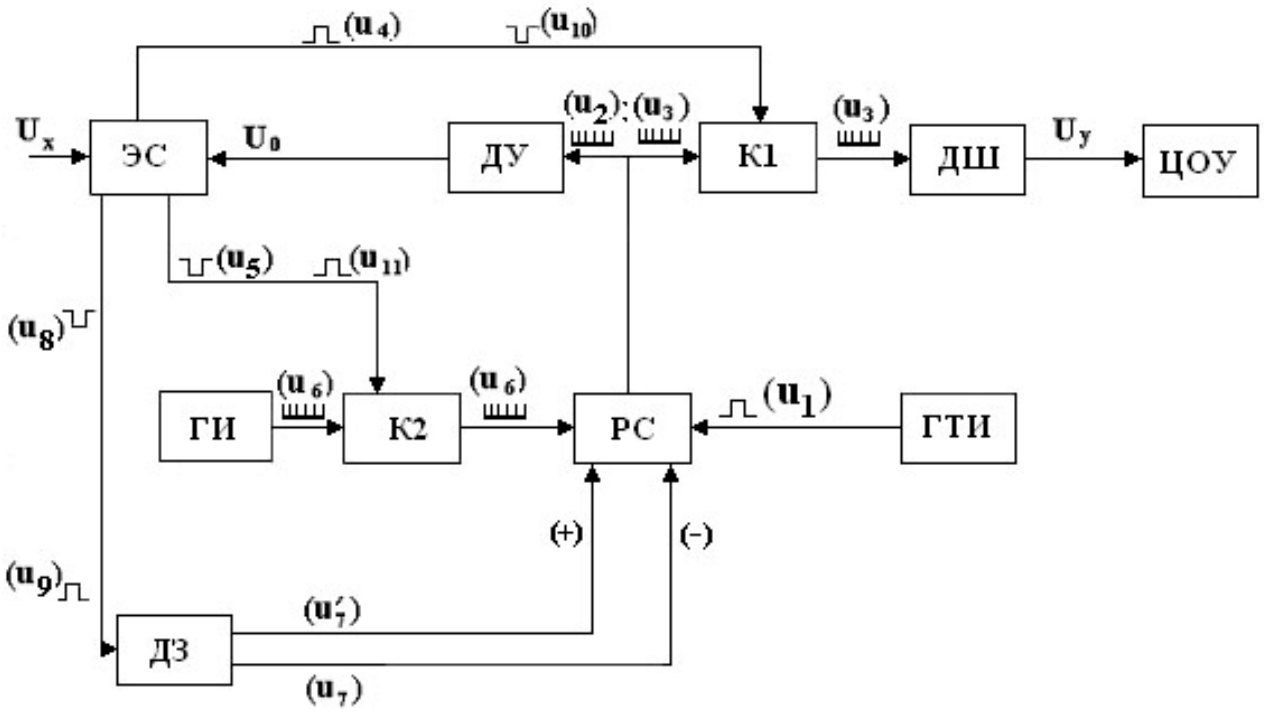


Рис. 20.4. Структурная схема уравновешивающего вольтметра с реверсивным счетчиком:

ЭС – элемент сравнения;
ДУ – декодирующее устройство;
К1, К2 – ключи;
ДШ – дешифратор;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ГИ – генератор высокочастотных импульсов;
РС – реверсивный счетчик;
ГТИ – генератор тактовых импульсов;
ДЗ – дискриминатор знака;
U_x – измеряемое напряжение;
U_0 – компенсирующее напряжение;
U_y – управляющее напряжение

Работа вольтметра протекает в следующей последовательности. Генератор тактовых импульсов ГТИ выдает тактовый импульс u_1, который воздействует на реверсивный счетчик РС и тем самым запускает всю схему. РС выдает серию из импульсов на декодирующее устройство ДУ (u_2) и на ключ $K1$ ($u_3 = u_2$), сохранившихся в РС от предыдущих измерений. ДУ преобразует импульсное напряжение u_2 в аналоговое напряжение U_0 ($U_0 = f(N)$). Дальнейшая работа прибора зависит от соотношения напряжений U_0 и U_x. Здесь возможны три случая: $U_0 = U_x$; $U_0 > U_x$; $U_0 < U_x$.

Первый случай ($U_0 = U_x$). Элемент сравнения ЭС вырабатывает импульсы u_4 и u_5. Импульс u_4 открывает ключ K_1, напряжение U_3 в виде серии импульсов (число импульсов – N) через K_1 поступает на дешифратор ДШ и преобразуется в управляющее напряжение U_y. Напряжение U_y воздействует на цифровое

отсчетное устройство ЦОУ, с которого и производится считывание результатов измерений в цифровой форме (например: 127,3 mV; 4,856 V и т. д.)

Второй случай ($U_0 > U_x$). В этом случае ЭС вырабатывает импульсные сигналы u_8, u_{10}, u_{11}. Импульс u_{10} закрывает ключ K_1, и доступ импульсов на ДШ прекращается. Импульс u_{11} открывает ключ K_2, и высокочастотные импульсы u_6 с генератора импульсов ГИ через K_2 начинают поступать на РС. Импульс u_8 воздействует на дискриминатор знака $Д_3$, который вырабатывает коммутационное напряжение u_7, переводящее РС в режим вычитания. Благодаря режиму вычитания вновь поступающие на РС импульсы u_6 вычитаются из того, что уже было накоплено в реверсивном счетчике. Уменьшение числа импульсов в РС приводит к уменьшению их числа на входе ДУ и соответственно к уменьшению аналогового компенсирующего напряжения U_0. Уменьшение напряжения U_0 происходит до тех пор, пока оно не станет равно измеряемому напряжению U_x. При $U_0 = U_x$ повторяется работа прибора, описанная выше (первый случай).

Третий случай ($U_0 < U_x$). В этом случае ЭС вырабатывает импульсные сигналы u_9, u_{10}, u_{11}. Импульс u_{10} закрывает ключ K_1, и доступ импульсов на ДШ прекращается. Импульс u_{11}, ключ K_2 и высокочастотные импульсы u_6 с генератора импульсов ГИ через K_2 начинают поступать на РС. Импульс u_9 воздействует на дискриминатор знака $Д_3$, который вырабатывает коммутационное напряжение u_7, переводящее РС в режим суммирования. Благодаря режиму суммирования вновь поступающие на РС импульсы u_6 суммируются с теми импульсами, которые уже были накоплены в реверсивном счетчике. Увеличение числа импульсов в РС приводит к увеличению их числа на входе ДУ и соответственно к увеличению компенсирующего напряжения U_0. Увеличение U_0 происходит до тех пор, пока оно не станет равно измеряемому напряжению U_x. При $U_x = U_0$ повторяется уже описанная работа прибора (первый случай).

Приборы сравнения имеют повышенные метрологические характеристики. Их погрешность при измерении постоянного напряжения обычно не превосходит 0,01–0,05 %. Быстродействие этих приборов может достигать 500–600 измерений в секунду.

20.3.3. Электронно-счетные частотомеры

Цифровые частотомеры предназначены для измерения среднего или мгновенного значения частоты периодического сигнала, а также для измерения абсолютного или относительного отклонения частоты от номинального значения.

Электронно-счетные частотомеры, рассматриваемые в данном пункте учебного пособия, основаны на подсчете числа импульсов частотой f_x за интервал времени T_0 (рис. 20.5).

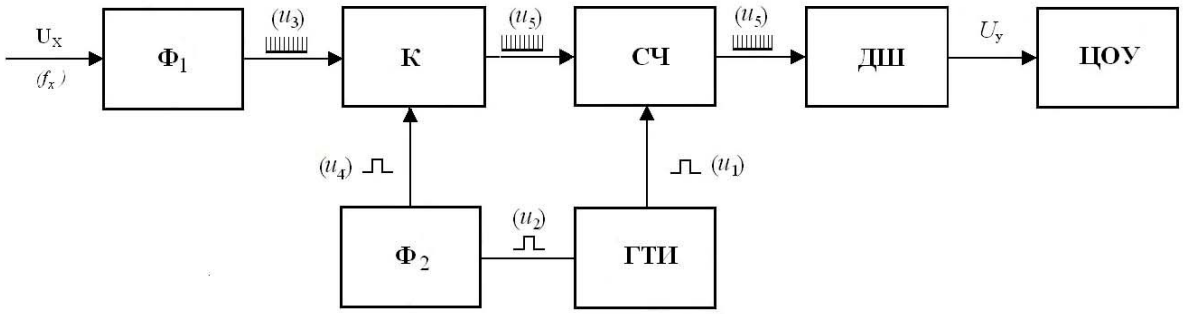


Рис. 20.5. Структурная схема электронно-счетного частотомера:

Ф1, Ф2 – формирователи;
К– ключ;
СЧ – счетчик импульсов;
ДШ – дешифратор;
ГТИ – генератор тактовых импульсов;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
f_x – измеряемая частота

На временных диаграммах показаны напряжения на входе (U_x) и на выходе отдельных элементов схемы (u_3, u_4, u_5). Эти же (и другие) напряжения показаны на структурной схеме (см. рис. 20.5).

Запуск прибора осуществляет генератор тактовых импульсов ГТИ, вырабатывающий импульсные напряжения u_1 и u_2. Импульс u_1 переводит счетчик СЧ в исходное состояние (срабатывает на «ноль»). Импульс u_2 воздействует на формирователь Ф2, который вырабатывает нормированный импульс u_4 с длительностью T_0 (рис. 20.5 и 20.6). Импульс u_4 подается на ключ *К* и открывает его на время T_0.

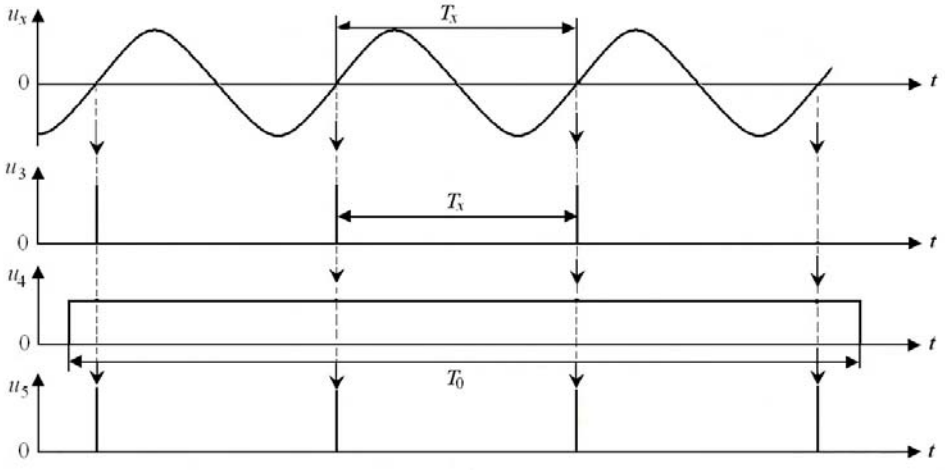


Рис. 20.6. Временные диаграммы работы электронно-счетного устройства

Периодическое напряжение U_x (его частота f_x измеряется) подается на формирователь $Ф_1$, который формирует импульсное напряжение u_3, подаваемое на ключ К. Отметим, что $Ф_1$ вырабатывает один импульс в начале каждого периода входного напряжения. Импульсы u_3 «проходят» через ключ К, пока действует импульс u_4. На счетчик импульсов СЧ подается серия импульсов u_5, число которых N зависит от длительности импульса u_4 (T_0) и периода входного напряжения (T_x):

$$N = \frac{T_0}{T_x} = T_0 f_x, \tag{20.3}$$

где $f_x = \frac{1}{T_x}$ – частота входного напряжения.

Напряжение u_5, содержащее N импульсов сосчитанных СЧ, подается на дешифратор ДШ. Последний преобразует его в управляющее напряжение U_y, воздействующее на цифровое отсчетное устройство ЦОУ. ЦОУ индицирует результат измерения в цифровой форме.

Если длительность интервала $T_0 = 1$ с, то число N дает непосредственное значение измеряемой частоты. В практических схемах частотомеров также предусматривается возможность задания других значений T_0 из ряда $T_0 = 10^m$ с, где m – целое положительное или отрицательное число. Это дает возможность измерять кратные или дольные значения f_x.

Погрешность прибора складывается из погрешности задания T_0 и погрешности дискретности. Благодаря использованию кварцевой стабилизации погрешность задания T_0 не превосходит 10^{-7} % (этой погрешностью обычно пренебрегают). Погрешность дискретности, возникающая в процессе квантования временного интервала, как правило, существенна, и ее необходимо учитывать.

$$\delta_g = \pm \frac{1}{T_0 \cdot f_x} \cdot 100\%, \qquad (20.4)$$

где δ_g – относительная погрешность дискретности;

T_0, f_x – определены выше.

Очевидно, что с увеличением временного интервала T_0 и значения измеряемой частоты f_x погрешность дискретности уменьшается. Например, при $T_0 = 1$ с и $f_x = 500$ Гц $д_g = \pm 0{,}2$ %; при $T_0 = 1$ с и $f_x = 5000$ Гц $д_g = \pm 0{,}02$ %; при $T_0 = 10$ с и $f_x = 5000$ Гц $д_g = \pm 0{,}002$ %.

При измерении низких частот погрешность дискретности становится определяющей и ограничивает точность измерений. Для снижения $д_g$ можно задавать большие T_0, однако это заметно увеличивает время измерения. Например, при измерении частоты промышленной сети ($f_x = 50$ Гц) для снижения $д_g$ до 0,02 % необходимо задать $T_0 = 100$ с. Для низкочастотных сигналов более рациональным оказывается измерение периода исследуемого напряжения.

20.3.4. Измерители временных интервалов

В измерителях временных интервалов (хронометрах) временной интервал (в том числе и период исследуемого напряжения) может быть измерен путем подсчета числа импульсов стабильной частоты $f_0 \left(f_0 = \frac{1}{T_0} \right)$, прошедших за измеряемое время T_x. В качестве примера ниже рассмотрен измеритель периодов (рис. 20.7).

При измерении временных интервалов вместо периодического напряжения u_x на формирователь Ф подаются импульсные напряжения $u_н$ (старт-импульс) и $u_к$ (стоп-импульс). Старт-импульс запускает формирователь, а стоп-импульс его останавливает. В результате вырабатывается импульс T_x, длитель-

ность которого равна длительности измеряемого временного интервала. Отметим, что $u_н$ и $u_к$ показаны на рис. 20.7 пунктиром, при измерении периода напряжения $u_х$ они не используются (вместо них на Ф подается $u_х$).

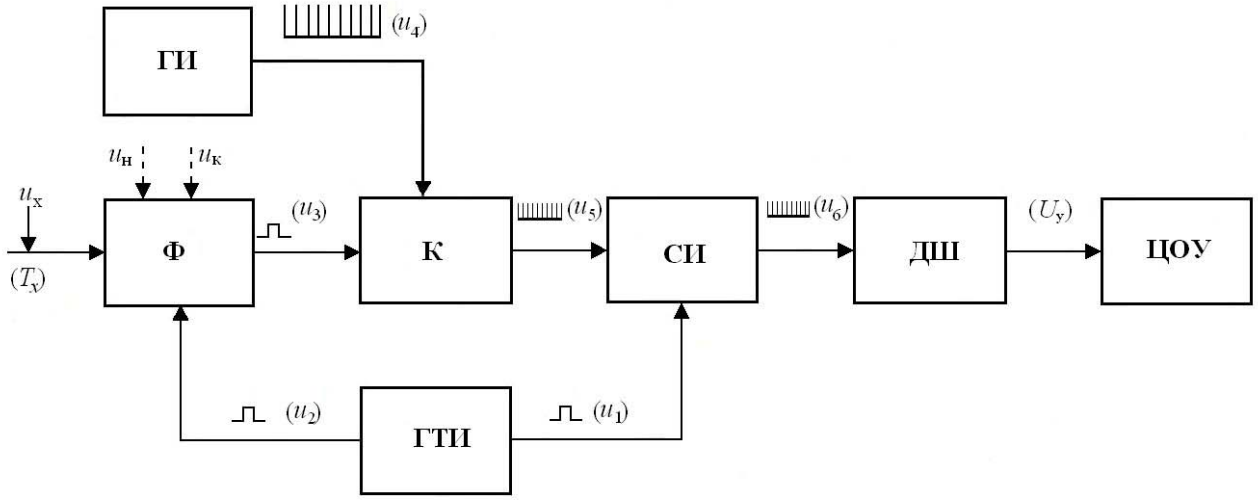


Рис. 20.7. Структурная схема измерителя периодов:

ГИ – стабильный генератор высокоточных импульсов;
Ф – формирователь;
К – ключ;
СЧ – счетчик импульсов;
ДШ – дешифратор;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ГТИ – генератор тактовых импульсов;
$u_х$ – напряжение с периодом $T_х$

Рассмотрим работу измерителя периодов более детально. Запуск прибора осуществляет ГТИ, вырабатывающий импульсные напряжения u_1 и u_2. Импульс u_1 «сбрасывает» СЧ на ноль, а импульс u_2 воздействует на формирователь Ф, который вырабатывает импульс u_3. Длительность импульса u_3 равна $T_х$ и соответствует периоду исследуемого напряжения (рис. 20.8). Импульс u_3 подается на ключ К и открывает его на время $T_х$. Одновременно на К подается высокочастотное импульсное напряжение u_4 со стабильной частотой $f_0 = \frac{1}{T_0}$. Напряжение u_5 с выхода ключа подается на СЧ. Число импульсов N, содержащееся в u_5 и сосчитанное СЧ, зависит от $T_х$ и $T_0 = \frac{1}{f_0}$.

$$N = \frac{T_x}{T_0} = T_x \cdot f_0 . \qquad (20.5)$$

Напряжение u_6 со счетчика импульсов подается на ДШ и преобразуется в управляющее напряжение U_y, которое воздействует на цифровое отсчетное устройство ЦОУ. ЦОУ индицирует результат измерения в цифровой форме.

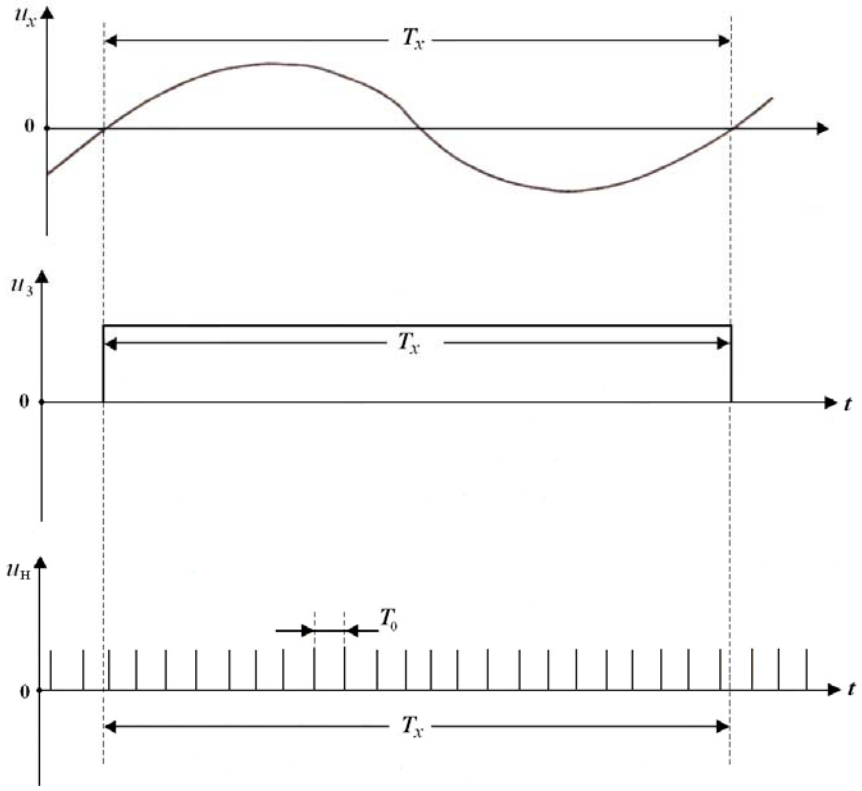


Рис. 20.8. Временные диаграммы работы измерителя периодов

Значение частоты f_0 целесообразно выбрать из ряда возможных значений, определяемых равенством $f_0 = 10^m$ Гц, где m – положительное целое число. Тогда число импульсов N совпадает со значением T_x, выраженным в секундах или дольных единицах секунды.

Погрешности цифрового периодомера определяются нестабильностью частоты f_0 генератора ГИ и дискретностью квантования T_x. Погрешность за счет нестабильности f_0 мала (обычно не более 10^{-7} %), и ею, как правило, пренебрегают. Погрешность дискретности $д_g$ чаще всего существенна, и ее необходимо учитывать.

$$\delta_g = \pm \frac{1}{T_x \cdot f_0} \cdot 100\% = \pm \frac{T_0}{T_k} \cdot 100\%, \qquad (20.6)$$

где δ_g – относительная погрешность дискретности;

T_0, T_x, f_0 – определены выше.

Очевидно, что с уменьшением $T_0 = \frac{1}{f_0}$ и увеличением T_x погрешность дискретности уменьшается. Например, при f_0 = 10 кГц и T_x = 0,1 с δ_g =±0,1 %; при f_0 = 100 кГц и T_x = 0,1 с $д_g$ = ±0,01 %; при f_0 = 100 кГц и T_x = 1 с δ_g = ±0,001 %.

Измерители периода иногда используются для измерения низких частот. Недостатком такого измерения является необходимость пересчета показаний периодомера в частоту (по формуле $f_x = \frac{1}{T_x}$).

В цифровых частотомерах и периодомерах используются одни и те же функциональные узлы, что позволяет выпускать универсальные приборы, предназначенные для измерения частоты, периода, интервалов времени, отношения двух частот и числа импульсов.

20.3.5. Измерители разности фаз

В измерителях разности фаз (цифровых фазометрах) используется преобразование фазового сдвига в соответствующий интервал времени, а также измерение этого интервала цифровым методом. Цифровые фазометры могут предназначаться для измерения мгновенных значений сдвига фаз и для измерения среднего значения сдвига фаз. Ниже рассмотрены цифровой фазометр мгновенных значений (рис. 20.9) и диаграммы напряжений этого фазометра (рис. 20.10)

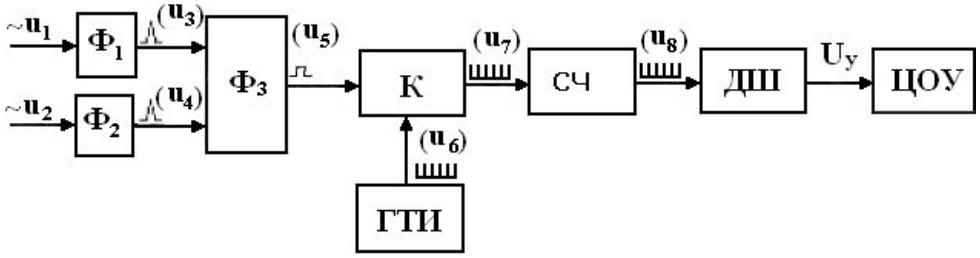


Рис. 20.9. Упрощенная структурная схема цифрового измерителя разности фаз:

$Ф_1$, $Ф_2$, $Ф_3$ – формирователи;
К– ключ;
ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;
ДШ – дешифратор;
СЧ – счетчик импульсов;
u_1 и u_2 – периодические входные напряжения, между которыми измеряется сдвиг по фазе;
ГТИ – генератор стабильных высокочастотных импульсов

Напряжения u_1 и u_2 поступают на формирователи Φ_1 и Φ_2, которые вырабатывают импульсы u_3 и u_4, соответствующие моментам перехода входных сигналов через ноль (импульсы u_3 и u_4 вырабатываются один раз за период напряжений u_1 и u_2, см. рис. 20.9 и 20.10). Импульсы u_3 и u_4 воздействуют на формирователь Φ_3 (первый как старт-импульс, а второй как стоп-импульс), на выходе которого образуется импульс u_5 с длительностью T_x, соответствующей измеряемому фазовому сдвигу α. Импульс u_5 открывает ключ К на интервал времени T_x, и в течение этого времени через К на счетчик импульсов СИ с генератора ГТИ поступают импульсы. Частота поступающих импульсов $f_0 = \frac{1}{T_0}$. Число импульсов N, сосчитанное СЧ, определяется соотношением (рис. 20.10)

$$N = \frac{T_x}{T_0}. \tag{20.7}$$

Измеряемый фазовый сдвиг φ

$$\varphi = K \cdot N \tag{20.8}$$

где K – коэффициент пропорциональности.

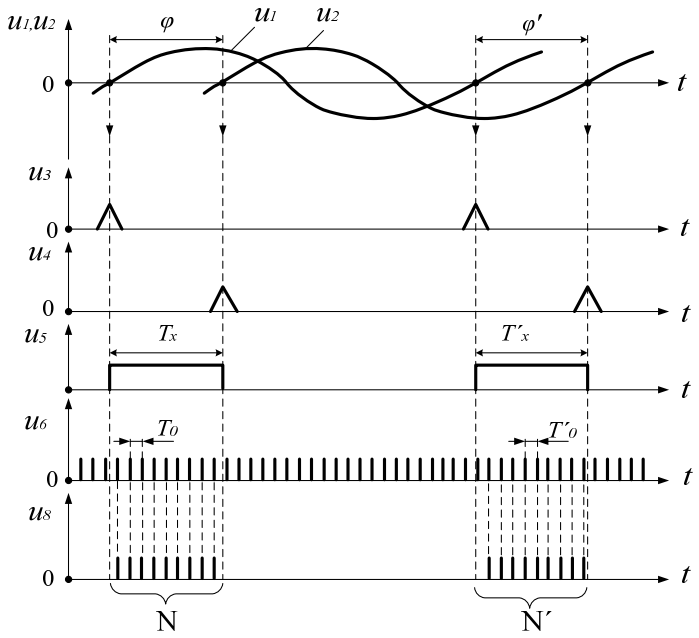


Рис. 20.10. Временные диаграммы измерителя разности фаз

Напряжение u_8 с выхода счетчика СЧ, содержащее N импульсов, подается на дешифратор ДШ, преобразуется в управляющее напряжение U_y и индицируется на ЦОУ в цифровой форме.

Составляющие погрешности прибора: погрешность квантования интервала T_x импульсами с частотой $f_0 = \frac{1}{T_0}$; погрешность задания частоты $f_0 = \frac{1}{T_0}$; погрешность от неточности формулирования и передачи напряжений u_3, u_4 и временного интервала T_x. Суммарная погрешность цифровых фазометров обычно не превосходит $\pm 0{,}3^0$ в широком частотном диапазоне.

20.4. Мультиметры

Термин «мультиметр» обычно используется для наименования универсальных цифровых измерительных приборов (ЦИП). Также приборы обычно имеют в своем составе встроенные микропроцессоры. Вместе с тем, терминология в области ЦИП еще окончательно не установилась, и аналогичные некоторые отечественные приборы с микропроцессорами или без них называют универсальными вольтметрами (например, прибор В7-34, имеющий в своем составе микропроцессор, официально именуется «Вольтметр универсальный цифровой»). Соответствующие импортные приборы всегда назывались мультиметрами, и этот термин постепенно приобретает признание как в отечественной литературе, так и в практической деятельности. Он используется и в настоящем учебном пособии.

Цифровые мультиметры применяются для измерения постоянных и переменных токов, постоянных и переменных напряжений, сопротивлений резисторов, частоты электрических колебаний и т .д.

На микропроцессоры в ЦИП возлагаются следующие функции:

1) управление процессом аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования;

2) управление работой преобразователей различных физических величин в электрические (для последующего их измерения);

3) автоматический выбор пределов измерения;

4) управление приборным интерфейсом;

5) управление цифровыми отсчетными устройствами;

6) статистическая обработка результатов измерений;

7) автоматическая коррекция систематических погрешностей и автокалибровка;

8) диагностика неисправностей.

Наличие в составе мультиметров микропроцессоров повышает надежность ЦИП, значительно улучшает их метрологические и эксплуатационные характеристики. Вместе с тем наметившаяся тенденция в развитии цифровой измерительной техники приводит к резкому повышению стоимости цифровых приборов (стоимость цифровых приборов, как правило, в 2–3 раза выше стоимости компьютеров). Высокая цена затрудняет широкое применение ЦИП, альтернативой которым может быть расширение использования аналоговых измерительных приборов (электромеханических и электронных), а также применение измерительно-компьютерных систем.

21. ИЗМЕРИТЕЛЬНО-КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время сформировалось новое направление в измерительной технике – измерительно-компьютерные системы (ИКС).

ИКС представляет собой имеющий соответствующее программное обеспечение персональный компьютер, в состав которого введена специальная измерительная плата.

ИКС заменяет стандартные измерительные приборы (вольтметры, осциллографы, генераторы и т. д.) системой виртуальных средств измерений (или виртуальных приборов). Причем на одном компьютере может быть одновременно или поочередно воспроизведен целый ряд стандартных измерительных приборов.

К преимуществам измерительно-компьютерных систем следует отнести:

1) наличие стандартных программ, что позволяет решать широкий круг прикладных задач (сбор и обработку данных, исследование полученных результатов, выработку управляющих сигналов и т. д.);

2) наличие внутренней и внешней памяти компьютеров, позволяющей накапливать и хранить большой объем измерительной информации;

3) наличие компьютерных сетей (локальных и глобальных), позволяющих оперативно передавать результаты измерений и исследований;

4) наличие возможности составлять компьютерные программы для решения конкретных измерительных задач;

5) наличие в составе компьютеров аналоговых (графопостроители) и цифровых (принтеры) регистрирующих устройств, позволяющих оперативно документировать результаты измерений;

6) меньшая стоимость измерений (по сравнению со стоимостью измерений с помощью отдельных цифровых измерительных приборов).

На рис. 21.1 приведена упрощенная структурная схема ИКС.

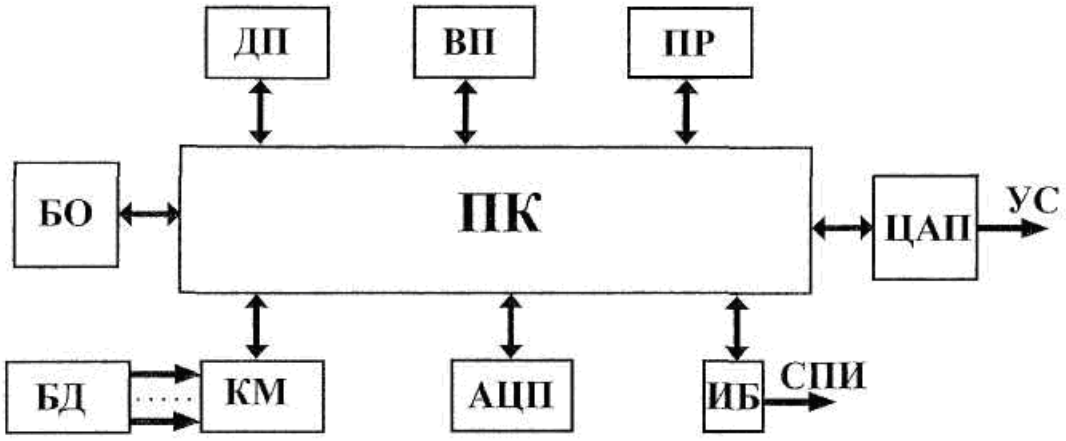


Рис. 21.1 Упрощенная структурная схема измерительно-компьютерной системы:

ПК – персональный компьютер;
ДП – дисплей;
ВП – внутренняя память;
ПР – принтер;
БО – блок образцовых мер;
БД – блок датчиков;
КМ – коммутатор;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
ИБ – интерфейсный блок;
СПИ – сигнал приборного интерфейса;
ЦАП – цифроаналоговый преобразователь;
УС – управляющий сигнал

Основу ИКС составляет персональный компьютер ПК, через который взаимодействуют друг с другом все элементы системы: дисплей, внешняя память, принтер, коммутатор, АЦП, блок образцовых программно-управляемых

мер (меры напряжения, сопротивления, частоты и т. д.). ЦАП позволяет вырабатывать (если требуется для решения поставленной задачи) аналоговые управляющие сигналы. Интерфейсный блок (ИБ) осуществляет подключение к магистрали приборного интерфейса. Коммутатор (КМ) обеспечивает подключение аналоговых сигналов (обычно в виде напряжений) от блока датчиков (БД). С помощью БД осуществляется преобразование (при необходимости) и подача на ИКС измеряемых величин. ИКС могут быть специализированными и универсальными. Специализированные ИКС предназначены для измерения какой-либо одной физической величины (например, только постоянного напряжения или только температуры). Универсальные ИКС – для измерения нескольких физических величин (например, постоянного и переменного напряжения, постоянного и переменного тока, частоты, температуры, давления и т.д.).

Одним из элементов ИКС является блок образцовых мер (БО). В качестве образцовых мер чаще всего используются образцовые меры (ОМ) напряжения и частоты. Обычно образцовыми мерами напряжения являются термостатированные стабилитроны, а в качестве образцовых мер частоты применяются кварцевые генераторы. В последнее время в ИКС стала использоваться возможность компенсировать температурную нестабильность ОМ программными методами. Предусматривается также возможность компенсации влияния температуры на параметры различных элементов ИКС, например на такие, как усилители постоянного тока, переключатели и т. п. Непрерывный контроль температуры отдельных элементов и блоков ИКС (с помощью специальных температурных датчиков и программных средств) позволяет автоматически корректировать возникающие погрешности измерений.

Измерительно-компьютерные системы являются своеобразными виртуальными приборами. Программная часть такого виртуального прибора создает на экране дисплея компьютера виртуальную панель управления обычного (реального) измерительного прибора. Такая панель с виртуальными кнопками, ручками, переключателями становится панелью управления виртуального прибора. С помощью клавиатуры, мыши или специализированной прикладной про-

граммы оператор воздействует на панель управления, выбирая измеряемую величину, режим работы виртуального прибора и выполняя другие необходимые операции для проведения измерения. Результат измерения выводится на дисплей компьютера и, если требуется, на принтер или графопостроитель. В зависимости от используемой измерительной платы и программного обеспечения пользователь получает виртуальный прибор под ту или иную задачу. При этом может быть реализован виртуальный осциллограф, виртуальный вольтметр, виртуальный термометр и т. д. Соответственно на дисплей компьютера выводится осциллограмма исследуемых сигналов (если реализован осциллограф), значение напряжения (если реализован вольтметр) или значение температуры (если реализован термометр) в цифровой форме.

Отметим еще раз преимущество виртуальных приборов перед микропроцессорными цифровыми приборами. Виртуальные приборы дают пользователю доступ к обширным объемам прикладных программ, к внешней памяти большой емкости и к различным устройствам документирования результатов измерений. Виртуальные приборы имеют высокую экономическую эффективность: практически любая измерительная плата и компьютерная программа по обработке информации намного дешевле стандартного цифрового измерительного прибора со встроенным микропроцессором.

Сочетание измерительной платы, специализированной программы и персонального компьютера представляет пользователю новые возможности, недостижимые автономными измерительными приборами [1; 2; 33; 34; 36–38].

22. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

22.1. Общие положения

Измерение силы электрического тока (в дальнейшем – измерение тока) является одной из наиболее распространенных операций в области электрических измерений. Измерение токов может проводиться аналоговыми электромеханическими приборами различных систем, аналоговыми электронными приборами, цифровыми измерительными приборами (ЦИП) [1; 2; 6]. Кроме того,

для измерения тока могут быть использованы виртуальные приборы (ВП), появившиеся в последнее время и реализуемые с помощью компьютеров (см. гл. 21 в настоящем учебном пособии и соответствующие разделы в учебниках [2; 6]).

Выбор средства измерения (для измерений тока) определяется совокупностью факторов: значением измеряемой величины, родом тока, требуемой точностью, условиями измерений и т. д. Приборы для измерения тока принято называть *амперметрами*. Если требуется подчеркнуть значение измеряемого тока, то это отражается в названии прибора. Так, например, приборы для измерения больших токов именуются *килоамперметрами*, малых токов – *миллиамперметрами* или *микроамперметрами* и т. д.

Измерение тока может осуществляться прямыми, косвенными или компенсационными методами. Каждый из перечисленных методов измерений обладает определенной методической погрешностью (см. параграф 2.4 в данном учебном пособии).

Диапазон измеряемых токов весьма широк. Например, при биологических исследованиях измеряемые токи могут составлять доли наноампер, а на металлургических предприятиях измеряемые токи могут достигать многих тысяч ампер. Для расширения пределов измерения приборов применяют шунты и измерительные трансформаторы, которые рассматриваются в последующих паранрафах учебного пособия. Использование шунтов и трансформаторов позволяет строить многопредельные приборы, которые позволяют измерять токи в широком диапазоне.

Косвенным показателем большей или меньшей пригодности используемого амперметра для измерения тока в исследуемой цепи является значение мощности, потребляемое этим амперметром:

$$P_A = I_A^2 R_A, \qquad (22.1)$$

где P_A – мощность, потребляемая амперметрами из измерительной цепи;

I_A – измеряемый ток;

R_A – сопротивление амперметра.

Погрешность от искажения режима работы исследуемой цепи тем меньше, чем меньше мощность P_A, определяемая соотношением (22.1).

22.2. Измерение постоянного тока

Для измерения постоянного тока используются аналоговые электромеханические приборы (магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические), аналоговые электронные и цифровые измерительные приборы.

Из электромеханических приборов наибольшее распространение для измерения постоянных токов получили приборы магнитоэлектрической системы. При непосредственном включении этих приборов их можно нагружать токами только до 40–50 мА. При больших токах повреждаются токопроводы к обмотке рамки магнитоэлектрического измерителя или выходит из строя сама обмотка рамки, выполняемая, как правило, тонким проводом.

Для измерения токов, больших 40–50 мА, магнитоэлектрические измерительные механизмы используются совместно с шунтами, которые включаются параллельно измерительному механизму (рис. 22.1). Электромеханические приборы других систем с шунтами не используются.

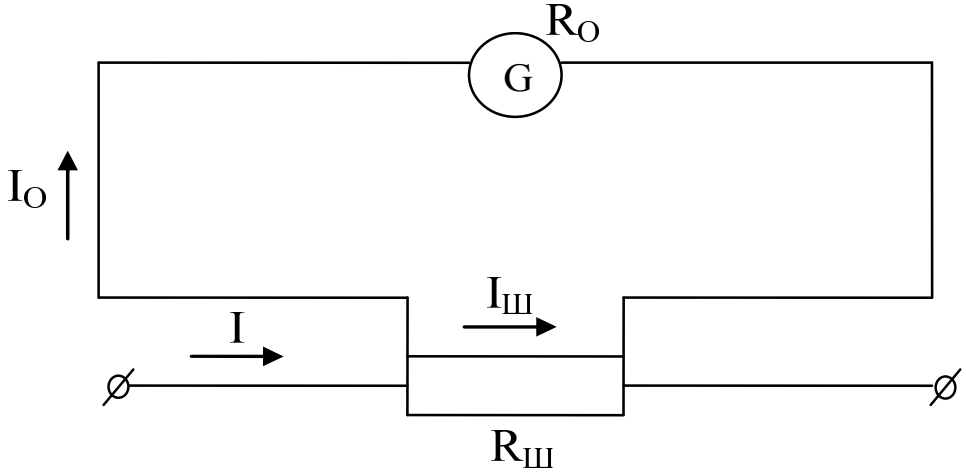


Рис. 22.1. Схема включения шунта:
$R_Ш$ – сопротивление шунта; G – магнитоэлектрический измерительный механизм;
R_0 – сопротивление измерительного механизма G; I – измеряемый ток;
$I_Ш$ – ток через шунт; I_0 – ток через измерительный механизм G

Сопротивление шунта $R_Ш$ выбирают таким, чтобы большая часть измеряемого тока I протекала по шунту, а остальная часть тока не превышала бы допустимого для измерителя значения.

Отношение токов I / I_0 обозначают n и называют *коэффициентом шунтирования*. Значение измеряемого тока $I = n \bullet I_0$, где n – целое число (n = 2; 5; 10 и т. д.). Шунты обычно изготавливают из манганина – сплава с малым температурным коэффициентом сопротивления. Типичная конструкция шунта приведена на рис. 22.2.

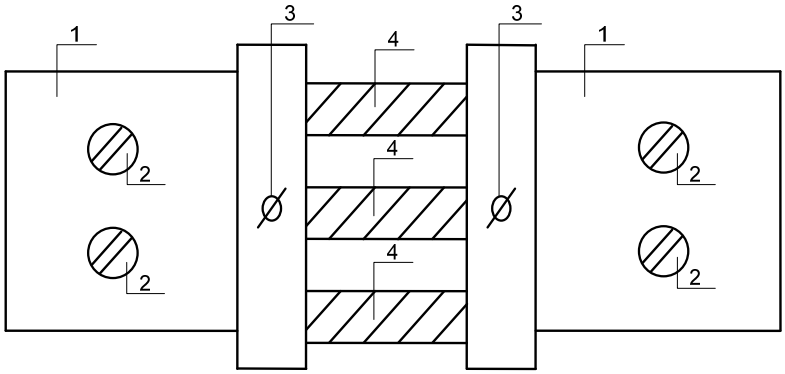


Рис. 22.2. Типичная конструкция шунта:
1 – массивные медные пластины; 2 – токовые зажимы;
3 – потенциальные зажимы; 4 – манганиновые пластины

С помощью зажимов 2 шунт включается в исследуемую цепь, а к зажимам 3 подключается магнитоэлектрический измерительный механизм.

Сопротивление шунта определяется из следующих равенств (см. рис. 22.1):

$$I_{Ш}R_{Ш} = I_0R_0, \tag{22.2}$$

$$I = nI_0, \tag{22.3}$$

$$I_{Ш} = I–I_0 = nI_0–I_0, \tag{22.4}$$

где n – коэффициент шунтирования.

Подставляя в (22.2) значение тока $I_{Ш}$, определяемое соотношением (22.4), получим

$$I_0(n–1)R_{Ш} = I_0R_0, \tag{22.5}$$

откуда сопротивление шунта

$$R_{Ш} = \frac{R_0}{n-1},$$

где R_0, n – определены выше.

Шунты для измерения сравнительно небольших токов (до 30 А) монтируются в корпусе прибора и называются *внутренними*. Токи от 30 до 7500 А

измеряют с помощью наружных шунтов. Шунты могут быть однопредельными и многопредельными.

Шунты делятся на *индивидуальные*, пригодные только для того измерительного механизма, с которым проградуированы, и *калиброванные*, рассчитанные на определенные номинальные токи и определенные номинальные падения напряжения. Калиброванные шунты изготавливают обычно на номинальные напряжения 75 и 100 мВ, но могут быть шунты на другие номинальные напряжения (например, на 30, 45, 60, 150 или 300 мВ). Сопротивление шунта можно определить по закону Ома делением номинального напряжения на номинальный ток. В зависимости от точности изготовления шунты делятся на классы 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0. При подключении шунта температурная погрешность измерения тока возрастает. Для ее уменьшения используются разные способы температурной компенсации. Например, может использоваться включение в цепь измерителя терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.

В прил. 9 приведены технические характеристики некоторых стандартных шунтов.

Шунты используются при измерении токов до 7,5 кА. При измерении токов от 7,5 до 150 кА используются трансформаторы постоянного тока (рис. 22.3).

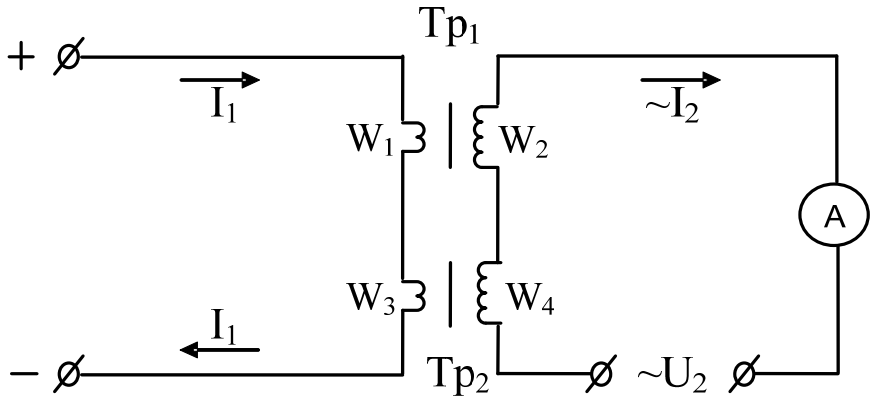


Рис. 22.3. Упрощенная схема включения трансформатора постоянного тока:
I_1 – измеряемый ток; $Тр_1$, $Тр_2$ – трансформаторы; $W_1 = W_3$ – первичные обмотки трансформаторов; $W_2 = W_4$ – вторичные обмотки трансформаторов;
U_2 – вспомогательное переменное напряжение;
I_2 – переменный ток во вторичном контуре

Трансформаторы $Тр_1$, $Тр_2$ имеют идентичные ферромагнитные сердечники из магнитомягкого материала с большой магнитной проницаемостью. Первичные обмотки трансформаторов включены встречно для компенсации в них ЭДС, возникающих при протекании тока I_2 по вторичным обмоткам трансформаторов (вторичные обмотки включены между собой согласно).

Значение тока во вторичном контуре:

$$I_2 = \frac{U_2}{\sqrt{R_2 + (\omega L_2)^2}} \qquad (22.7)$$

где R_2 – активная составляющая вторичной цепи;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – циклическая частота;

L_2 – суммарная индуктивность обмоток трансформаторов.

Индуктивность L_2 зависит от магнитной проницаемости μ_a сердечников трансформаторов $Тр_1$ и $Тр_2$ (при постоянстве всех других параметров). В свою очередь, значение μ_a зависит от степени насыщения ферромагнитных сердечников трансформаторов магнитными потоками, создаваемыми измеряемым постоянным током I_1 при его протекании по первичным обмоткам трансформаторов W_1 и W_2 .

Таким образом, можно сделать вывод, что индуктивность L_2 зависит от тока I_1. Зависимость $L_2 = f(I_1)$ приведена на рис. 22.4.

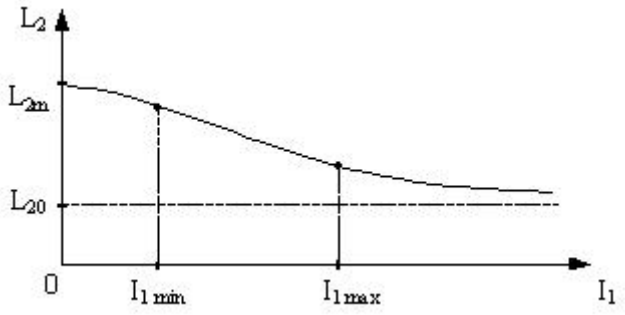


Рис. 22.4. Зависимость индуктивности обмоток трансформаторов от измеряемого тока

При изменении L_2 и при постоянстве U_2, R_2 и w (см. соотношение (22.7)) изменяется ток I_2 во вторичном контуре. Причем рост I_1 приводит к уменьшению L_2, а уменьшение L_2 – к росту тока I_2. При изменении I_1 от некоторого ми-

нимального значения I_{1min} до некоторого максимального значения I_{1max} справедливо равенство

$$I_2 = kI_1 \tag{22.8}$$

где k – коэффициент трансформации ($k >> 1$).

Коэффициент трансформации k нормируется и примерно постоянен в диапазоне измерений.

Благодаря постоянству (в пределах нормируемой погрешности) коэффициента k, амперметр А, измеряющий ток вторичного контура I_2, может быть проградуирован непосредственно в значениях искомого тока I_1, что обычно и используется в стандартных приборах с трансформаторами постоянного тока. Характеристики одного из устройств на основе трансформаторов постоянного тока приведены в прил. 10.

Пределы измерения постоянных токов приборами разных типов приведены в табл. 22.1.

Таблица 22.1

Пределы измерения постоянных токов

Типы приборов	**Пределы измерения, А**				
	Наименьшее значение	**Наибольшее значение**			
		прямое включение	**с внутренним шунтом**	**с внешним шунтом**	**с трансформатором постоянного тока**
Цифровые	10^{-17}	–	10	$7{,}5 \cdot 10^{3}$	–
Электронные аналоговые	$5 \cdot 10^{-17}$	–	1	10	–
Магнито-электрические	$3 \cdot 10^{-17}$	0,05	30	$7{,}5 \cdot 10^{3}$	$1{,}5 \cdot 10^{5}$
Электромагнитные	$5 \cdot 10^{-3}$	200	–	–	–
Электродинамические	$5 \cdot 10^{-3}$	10	–	–	–

Погрешность измерения постоянного тока в большой степени зависит от его значения (рис. 22.5).

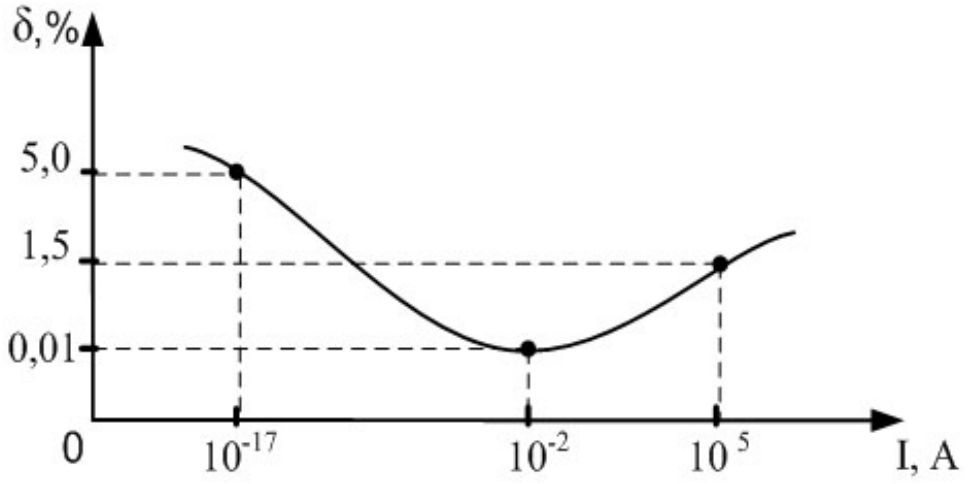


Рис. 22.5. Зависимость погрешности измерения постоянного тока от его значения:
δ – относительная погрешность измерения; *I* – значения измеряемого тока

Для наглядности на рис. 22.5 использован переменный масштаб по обеим осям координат.

Приведенный рисунок свидетельствует, что наименьшая погрешность достигается при измерении токов от 1 до 100 мА (примерно при 10 мА). Погрешность растет с ростом тока (при $I > 100$ мА) и особенно значительно возрастает при измерении малых токов (при $I < 1$ мА). Отметим, что рассматриваемая зависимость $\delta = f(I)$ правомерна для рабочих средств измерений.

В качестве примера в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющих измерять постоянные токи в широком диапазоне их значений.

22.3. Измерение переменного тока

Для измерения переменного тока используются аналоговые электромеханические приборы (электромагнитные, электродинамические, реже – индукционные), аналоговые электронные и цифровые измерительные приборы. Наибольшее распространение получили приборы электромагнитные, электродинамические, аналоговые электронные и цифровые. Для измерений могут также использоваться компенсаторы переменного тока, электронные осциллографы,

регистрирующие устройства, универсальные, комбинированные и виртуальные приборы.

Приборы для измерения переменных токов, аналогично приборам для измерения постоянных токов, именуются (в зависимости от значения измеряемой величины) амперметрами, микроамперметрами, миллиамперметрами или килоамперметрами.

Для синусоидального тока можно записать:

$$I(t) = I_{\text{m}}\sin\omega t \tag{22.9}$$

где $i(t)$ – мгновенное значение тока;

I_{m} – амплитудное значение тока;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – циклическая частота;

t – время.

Как следует из (22.9), переменный ток может быть полностью представлен мгновенными значениями в любой момент времени. Это измерение можно осуществить с помощью электронного осциллографа или регистратора. Переменные токи могут быть охарактеризованы своими отдельными параметрами (например, амплитудным значением) или интегральными параметрами, в качестве которых используются действующие значения (см. (22.10)) и средние значения (см. (22.11)) тока.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T [i(t)]^2\,dt} \tag{22.10}$$

$$I_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,dt \tag{22.11}$$

где I – действующее значение измеряемого переменного тока;

$I_{\text{ср}}$ – среднее значение измеряемого переменного тока;

T – период измеряемого тока ($T = \frac{1}{f}$).

На практике чаще всего приходится измерять синусоидальные переменные токи, которые обычно характеризуются действующим значением и (реже)

средним значением или амплитудным. Поэтому подавляющее большинство приборов градуируется в действующих значениях синусоидального переменного тока. Приборы, проградуированные в средних или амплитудных значениях тока, используются сравнительно редко. Из этих соображений численные значения токов, приведенные в учебном пособии, даны, как правило, в действующих значениях. Измерение действующих значений переменных токов осуществляют, как уже отмечалось, различными средствами измерений, наиболее распространенные из которых приведены в табл. 22.2.

Для расширения пределов измерения переменных токов могут использоваться шунты (в составе выпрямительных приборов, в составе электронных аналоговых приборов, в составе термоэлектрических приборов или в составе цифровых измерительных приборов) и токовые измерительные трансформаторы. В табл. 22.2 приведены сведения о пределах измерения для четырех типов приборов.

Таблица 22.2

Характеристики измерителей действующих значений переменных токов

Виды приборов	**Верхний предел измерения, А**			**Частотный диапазон, Гц**
	наименьший	**наибольший**		
		с шунтом	**с измерительными трансформаторами**	
Цифровые	10^{-17}	10	–	$20–2•10^4$
Электронные аналоговые	10^{-5}	5	–	$10–10^7$
Термоэлектрические	$5•10^{-3}$	50	10^2	$1–10^8$
Выпрямительные	$2{,}5•10^{-5}$	$2•10^2$	10^4	$30–2•10^4$

В качестве примера в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющих измерять действующие значения переменных токов в широком диапазоне частот.

Более подробно с методами измерения электрических токов можно познакомиться по литературным источникам, приведенным в библиографическом списке в конце учебного пособия [1; 2; 4–7; 9; 36; 38].

23. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

23.1. Общие положения

Измерение значения электрического напряжения (в дальнейшем – измерение напряжения) является наиболее распространенной операцией в области электрических измерений. Большая часть электроизмерительных приборов предназначена именно для измерения напряжения (это вольтметры и универсальные вольтметры). Отметим, что приборы для измерения больших напряжений именуются киловольтметрами, а для измерения малых напряжений – милливольтметрами, микровольтметрами и т. д. Измерение напряжения может производиться с помощью аналоговых электромеханических приборов различных систем, с помощью аналоговых электронных, цифровых и виртуальных приборов (см., например, учебники [2; 6]).

При подключении вольтметр шунтирует исследуемую цепь, что приводит к появлению дополнительной (методической) погрешности. Особенно значительна эта погрешность при использовании аналоговых электромеханических приборов, так как их внутреннее сопротивление сравнительно невелико. Рассмотрим вопрос о методической погрешности более детально.

а *б*



Рис. 23.1. Исследуемые схемы: *а* – исходная схема; *б* – схема после подключения вольтметра; U – напряжение источника питания; R_1, R_2 – постоянные сопротивления; R_V – внутреннее сопротивление вольтметра; U_2 – напряжение на сопротивлении R_2; U_V – показание вольтметра; I – ток в цепи до подключения вольтметра; I' – ток в цепи после подключения вольтметра

Падение напряжения на сопротивлении R_2 до подключения вольтметра определяется соотношениями

$$U_2 = IR_2, \tag{23.1}$$

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}, \tag{23.2}$$

$$U_2 = \frac{UR_2}{R_1 + R_2}, \tag{23.3}$$

Падение напряжения на сопротивлении R_2 после подключения вольтметра определяется соотношениями

$$U_V = I'R_{2V}, \tag{23.4}$$

$$I' = \frac{U}{R_1 + R_{2V}}, \tag{23.5}$$

$$U_V = I'R_{2V}, \tag{23.6}$$

$$U_V = \frac{UR_{2V}}{R_1 + R_{2V}}, \tag{23.7}$$

где R_{2V} – эквивалентное сопротивление (эквивалентное параллельно включенным сопротивлениям R_2 и R_V).

Абсолютная методическая погрешность измерения, возникающая при подключении к сопротивлению R_2 вольтметра V с внутренним сопротивлением R_V (см. рис. 23.1, *б*) запишется в виде

$$\Delta_M = U_2 - U_V \tag{23.8}$$

где Δ_M – абсолютная методическая погрешность;

U_2, U_V – определены выше.

Подставив в (23.8) значения U_2 и U_V и выполнив приведение подобных, получим

$$\Delta_M = U\frac{R_1(R_2 - R_{2V})}{(R_1 + R_2)(R_1 + R_{2V})}. \tag{23.9}$$

Относительная методическая погрешность измерения определяется соотношением

$$\delta_M = \frac{\Delta_M}{U_2} \cdot 100\% \tag{23.10}$$

где δ_M – относительная методическая погрешность.

После подстановки в (23.10) значений Δ_M и U_2 и приведения подобных получим

$$\delta_M = \frac{R_{12}}{R_{12} + R_V} 100\%, \tag{23.11}$$

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \tag{23.12}$$

где R_{12} – эквивалентное сопротивление исследуемой цепи (эквивалентное параллельно включенным сопротивлениям R_1 и R_2);

R_1, R_2, R_V – определены выше.

Отметим, что формула (23.12) правомерна, если внутреннее сопротивление источника питания мало и им можно пренебречь. Если этим сопротивлением пренебречь нельзя, то его надо приплюсовать к сопротивлению R_1.

Выражения (23.9) и (23.11) свидетельствуют о том, что рассматриваемые методические погрешности зависят от соотношения сопротивлений R_1, R_2 и R_{12}, с одной стороны, и сопротивления R_V, с другой стороны. Особенно это очевидно при рассмотрении относительной погрешности δ_M по (23.11). Действительно, для уменьшения методической погрешности в данном случае необходимо выполнить условие

$$R_V >> R_{12} \tag{23.13}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что использование вольтметров высокого класса еще не гарантирует получение малых погрешностей, так как методические погрешности, не зависящие от класса точности, могут значительно превзойти инструментальные погрешности результата измерений.

Отметим, что вопрос о методических погрешностях особенно актуален при использовании приборов непосредственной оценки и прямых методов измерений. При использовании приборов сравнения (см. главу 18 и параграфы 18.1, 18.2, 18.3, 18.4 и 18.5) и компенсационных методов измерения методические погрешности малы и ими в этом случае, как правило, пренебрегают.

23.2. Измерение постоянного напряжения

Для измерения постоянного напряжения могут быть использованы аналоговые электромеханические приборы различных систем, аналоговые электронные приборы и цифровые измерительные приборы. Перечисленные средства

измерений принято относить к приборам непосредственной оценки. Кроме того, для измерения постоянных напряжений используются приборы сравнения (компенсаторы постоянного тока).

Из аналоговых электромеханических приборов наибольшее распространение для измерения постоянных напряжений получили приборы магнитоэлектрической системы. Для использования магнитоэлектрического механизма в качестве вольтметра необходимо последовательно с ним включить добавочное сопротивление R_g. Изменяя сопротивление R_g, можно изменять (в широких пределах) диапазон измеряемых напряжений. Рассмотрим вопрос о расширении пределов измерении вольтметров более детально (рис. 23.2).

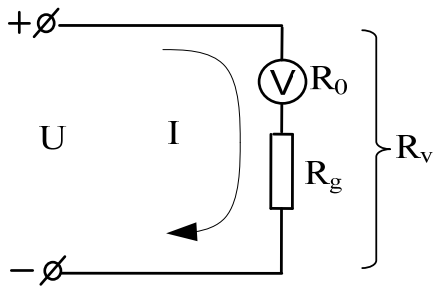


Рис. 23.2. Схема вольтметра:
U – измеряемое напряжение; R_0 – сопротивление измерительного механизма;
R_g – добавочное сопротивление; R_V – сопротивление вольтметра; I – ток в цепи

Обозначим через U_0 предельно допускаемое напряжение для используемого измерительного механизма и введем в рассмотрение коэффициент пропорциональности m, определяемый соотношением

$$m = \frac{U}{U_0}, \tag{23.14}$$

где m – коэффициент пропорциональности;

U, U_0 – определены выше.

Измеряемое напряжение U может быть записано в виде равенства

$$U = U_0 + U_g \tag{23.15}$$

где U_g – падение напряжения на добавочном сопротивлении.

$$U_0 = IR_0, \tag{23.16}$$

$$U_g = IR_g, \tag{23.17}$$

$$U = mU_0 \tag{23.18}$$

Учитывая соотношения (23.15)–(23.18), получим

$$U = IR_0 + IR_g, \tag{23.19}$$

$$mU_0 = IR_0 + IR_g,$$

$$mIR_0 = IR_0 + IR_g. \tag{23.20}$$

Сокращая в (23.20) ток I в левой и правой частях равенства, получим

$$mR_0 = R_0 + R_g. \tag{23.21}$$

Решая уравнение (23.21) относительно Rg, окончательно получаем

$$R_g = R_0 (m–1). \tag{23.22}$$

Соотношение (23.22) позволяет рассчитывать требуемое добавочное сопротивление R_g по заданному сопротивлению измерительного механизма R_0 и по заданному коэффициенту пропорциональности $m = U / U_0$, где U – измеряемое напряжение, а U_0 – предельно допускаемое напряжение для выбранного измерительного механизма.

Добавочные сопротивления могут использоваться, как уже отмечалось, с магнитоэлектрическими измерительными механизмами, а также с механизмами электромагнитной и электродинамической систем. С механизмами электростатической системы добавочные сопротивления не используются.

Добавочные сопротивления нормируются по току, по напряжению и по классу точности (табл. 23.1).

Таблица 23.1

Нормирование добавочных сопротивлений

Нормируемый параметр	**Значение нормируемого параметра**
Электрический ток, мА	0,5; 1,0; 3,0; 7,5; 15; 30
Электрическое напряжение, В	600; 1000; 1500; 3000 … 30 000
Класс точности	0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0

Добавочные сопротивления изготавливают из материала с малым температурным коэффициентом (например, из манганина), что позволяет снизить температурные погрешности.

Аналогично шунтам добавочные сопротивления могут быть внутренние и наружные, однопредельные и многопредельные, индивидуальные и калиброванные. Внутренние добавочные сопротивления используются, если измеряемое напряжение не превосходит 600 В. При измерении больших напряжений используются наружные сопротивления.

Наружные добавочные сопротивления монтируют в специальном корпусе с выведенными на панель зажимами от различных секций, соответствующих разным пределам измерения. Индивидуальные наружные сопротивления предназначаются для работы с определенным прибором и снабжаются надписью с указанием типа и номера этого прибора.

Калиброванные добавочные сопротивления могут применяться с любым прибором, ток полного отклонения которого не превосходит тока, на который рассчитано добавочное сопротивление.

В качестве примера в прил. 11 приведены технические характеристики добавочного сопротивления типа Р-109.

Пределы измерения постоянных напряжений приборами разных типов и их погрешности (наименьшие) приведены в табл. 23.2.

В качестве примера в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющие измерять в том числе и постоянные напряжения.

Таблица 23.2

Пределы и погрешности измерения постоянных напряжений

Типы приборов	Пределы измерений			Погрешность (наименьшая), %
	Минимальное значение, В	Максимальное значение, В	С внешним шунтом, кВ	
Цифровые	$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	до 40	0,001
Аналоговые электронные	$5 \cdot 10^{-8}$	10^3	–	0,5
Магнитоэлектрические	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^3$	до 20	0,05
Электромагнитные	1,5	600	–	0,5
Электродинамические	7,5	600	–	0,1
Электростатические	30	$75 \cdot 10^3$	–	0,5

23.3. Измерение переменного напряжения

Для измерения переменного напряжения используются аналоговые электромеханические приборы (электромагнитные, электродинамические, редко – индукционные), аналоговые электронные приборы (в том числе выпрямительной системы) и цифровые измерительные приборы. Для измерений могут также использоваться компенсаторы, осциллографы, регистрирующие устройства и виртуальные приборы.

При измерении переменного напряжения следует различать: мгновенное, амплитудное, среднее и действующее значения искомого напряжения.

Синусоидальное переменное напряжение может быть представлено в виде следующих соотношений:

$$u(t) = U_m \sin \omega t, \tag{23.23}$$

$$U_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)dt\,, \tag{23.24}$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T \left[u(t)\right]^2 dt}\,. \tag{23.25}$$

где $u(t)$ – мгновенное значение напряжения;

U_{m} – амплитудное значение напряжения;

$\omega - 2\pi f$ – угловая частота;

f – циклическая частота;

t – время;

$U_{ср}$ – среднее значение напряжения;

T – период ($T = 1/f$) искомого синусоидального напряжения;

U – действующее значение напряжения.

Мгновенное значение переменного тока может быть отображено на электронном осциллографе или с помощью аналогового регистратора (самописца).

Средние, амплитудные и действующие значения переменных напряжений измеряются стрелочными или цифровыми приборами непосредственной оценки или компенсаторами переменных напряжений. Приборы для измерения средних и амплитудных значений используются сравнительно редко. Большая часть приборов градуируется в действующих значениях напряжения. Из этих соображений численные значения напряжений, приведенные в учебном пособии, даны, как правило, в действующих значениях (см. выражение (23.25)).

При измерениях переменных величин большое значение имеет форма искомых напряжений, которые могут быть синусоидальными, прямоугольными, треугольными и т. д. В паспортах на приборы всегда указывается, для измерения каких напряжений рассчитан прибор (например, для измерения синусоидальных напряжений или прямоугольных). При этом всегда указывается, какой параметр переменного напряжения измеряется (амплитудное значение, среднее значение или действующее значение измеряемого напряжения). Как уже отмечалось, большей частью используется градуировка приборов в действующих значениях искомых переменных напряжений. В силу этого все далее рассматриваемые переменные напряжения даны в действующих значениях.

Для расширения пределов измерения вольтметров переменных напряжений используются добавочные сопротивления, измерительные трансформаторы и добавочные емкости (с приборами электростатической системы).

Использование добавочных сопротивлений для расширения пределов измерения уже рассмотрено в п. 23.2 применительно к вольтметрам постоянного

напряжения и поэтому в данном разделе не рассматривается. Не рассматриваются также измерительные трансформаторы напряжения и тока. Сведения по трансформаторам даны в литературе, приведенной в библиографическом списке [5].

Рассмотрим более детально использование добавочных емкостей для расширения пределов измерения электростатистики вольтметров. С этой целью может использоваться одна дополнительная емкость (рис. 23.3, *а*) или же две (рис. 23.3, *б*).

Для схемы с одной дополнительной емкостью измеряемое напряжение U распределяется между емкостью вольтметра C_V и дополнительной емкостью C обратно пропорционально значениям C_V и C, т. е.

$$\frac{U_C}{U_V} = \frac{C_V}{C}, \tag{23.26}$$

где U_C, U_V, C_V, C – определены выше.

Учитывая, что $U_C = U - U_V$, можно записать

$$\frac{U - U_v}{U_V} = \frac{C_V}{C}. \tag{23.28}$$

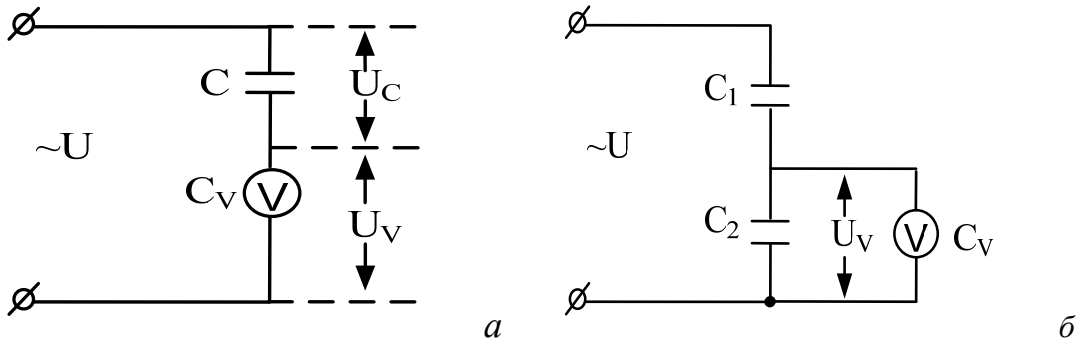


Рис. 23.3. Схема расширения пределов измерения электростатических вольтметров:
а – схема с одной добавочной емкостью; *б* – схема с двумя добавочными емкостями;
U – измеряемое переменное напряжение (действующее значение);
C, C_1, C_2 – добавочные емкости; C_V – емкость используемого электростатического вольтметра V; U_C – падение напряжения на дополнительной емкости C;
U_V – показание электростатического вольтметра

Решая уравнение (23.27) относительно U, получим

$$U = U_V \frac{C_V + C}{C}. \tag{23.28}$$

Из (23.28) следует, что чем больше измеряемое напряжение U по сравнению с предельно допускаемым напряжением для данного электростатического механизма, тем меньше должна быть емкость C по сравнению с емкостью C_V.

Следует отметить, что формула (23.22) правомерна лишь при идеальной изоляции конденсаторов, образующих емкости C и C_V. Если же диэлектрик, изолирующий пластины конденсаторов друг от друга, имеет потери, то возникают дополнительные погрешности. Кроме того, емкость вольтметра C_V зависит от измеряемого напряжения U, т. к. от U зависят показания вольтметра и соответственно взаимное расположение подвижных и неподвижных пластин, образующих электростатический измерительный механизм. Последнее обстоятельство приводит к появлению еще одной дополнительной погрешности.

Лучшие результаты получаются, если вместо одной добавочной емкости использовать две добавочные емкости C_1 и C_2, образующие делитель напряжения (см. рис. 23.3, *б*).

Для схемы с двумя добавочными емкостями правомерно соотношение

$$\frac{U_{C1}}{U_V} = \frac{C_2 + C_V}{C_1}, \tag{23.29}$$

где U_{C1} – падение напряжения на емкости C_1.

Учитывая, что $U_{C1} = U – U_V$, можно записать

$$\frac{U - U_V}{U_V} = \frac{C_2 + C_V}{C_1}. \tag{23.30}$$

Решая уравнение (23.30) относительно U, получим

$$U = U_V \frac{C_V + C_1 + C_2}{C_1}. \tag{23.31}$$

Из (23.31) можно сделать вывод, что если емкость конденсатора C_2, к которому подключен вольтметр, значительно превышает емкость самого вольтметра, то распределение напряжения практически не зависит от показания вольтметра. Кроме того, при $C_2 >> C_V$ изменение сопротивления изоляции конденсаторов C_1 и C_2 и частоты измеряемого напряжения также мало влияют на

показания прибора. То есть при использовании двух добавочных емкостей дополнительные погрешности результатов измерений значительно снижаются.

Пределы измерения переменных напряжений приборами разных типов и наименьшие погрешности этих приборов приведены в табл. 23.3.

В качестве примеров в табл. П. 5.1 приведены технические характеристики универсальных вольтметров, позволяющих измерять, в том числе, и переменные напряжения.

В табл. П. 5.1 приведены технические характеристики вольтметров для измерения переменных напряжений.

Таблица 23.3

Пределы и погрешности измерения переменных напряжений

Типы приборов	**Пределы измерений, В**				**Частотный диапазон, Гц**	**Наименьшая погрешность, %**
	наименьший	**наибольший**				
		прямое включение	**с внешним добавочным сопротивлением**	**с измерительным трансформатором**		
Цифровые	10^{-5}	10^{3}	–	–	$4–10^{8}$	0,15
Аналоговые электронные	$3 \cdot 10^{-6}$	300	–	–	$10–10^{9}$	0,5
Электромагнитные	0,5	600	750	$6 \cdot 10^{5}$	$45–10^{4}$	0,5
Электростатические	30	$7{,}5 \cdot 10^{4}$	–	–	$20–10^{7}$	0,5
Электродинамические	7,5	600	–	$3 \cdot 10^{4}$	$45–2 \cdot 10^{3}$	0,1

В заключение следует отметить следующее.

Погрешности измерения токов (постоянных и переменных) приборами одного типа и в равных условиях всегда больше погрешностей измерения напряжений (и постоянных, и переменных). Погрешности измерения переменных

токов и напряжений приборами одного типа и в равных условиях всегда больше погрешностей измерения постоянных токов и напряжений.

Более подробно по затронутым вопросам можно ознакомиться по литературе, приведенной в библиографическом списке [1; 2; 4–7; 9; 36; 38].

24. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

24.1. Общие положения

Выбор метода измерения сопротивления и соответствующей измерительной аппаратуры зависит от значения измеряемого сопротивления, требуемой точности и условий, при которых производится измерение.

На практике приходится измерять сопротивления в чрезвычайно широком диапазоне – от тысячных и миллионных долей ома (например, при измерении сопротивления металлических контактов) до сопротивлений 10^{14}–10^{15} Ом (например, при измерении сопротивления изоляционных материалов).

Весьма различны и требования к точности измерений. Например, при поверке образцовых катушек сопротивлений допускаемая погрешность измерения обычно не превышает тысячных долей процента, а при измерении, например, сопротивления заземления погрешность 10–15 % является, в ряде случаев, вполне допускаемой.

Для измерения сопротивлений используются следующие методы:

1) метод вольтметра и амперметра;
2) метод сравнения с образцовой мерой;
3) метод заряда и разряда конденсатора известной емкости.

Для измерения сопротивлений можно пользоваться как аппаратурой общего назначения (амперметрами, вольтметрами, магазинами сопротивлений и др.), собирая соответствующие измерительные схемы, так и приборами, специально предназначенными для измерения сопротивлений (аналоговыми и цифровыми омметрами, мостовыми схемами и др.), позволяющими производить измерение удобнее и быстрее.

Используемые методы и приборы для измерения сопротивлений в большой степени зависят от значения измеряемых сопротивлений, которые подразделяются на малые, средние, большие и сверхбольшие (табл. 24.1).

Таблица 24.1

Классификация сопротивлений

Наименование сопротивлений	**Значение сопротивлений, Ом**
Малые	< 1
Средние	от 1 до 10^6
Большие	от 10^6 до 10^{12}
Сверхбольшие	$> 10^{12}$

Мостовые методы измерения сопротивлений частично уже рассмотрены в главах 11–15 учебного пособия. Ниже приводятся наиболее распространенные методы измерения малых, средних и больших сопротивлений (как с использованием мостовых схем, так и без их использования).

Наиболее универсальным методом измерения сопротивлений является метод вольтметра и амперметра. Этот метод может быть использован для измерения и малых, и средних, и больших сопротивлений. Схемы включения приборов при реализации метода вольтметра и амперметра приведены на рис. 24.1 (первый вариант) и на рис. 24.2 (второй вариант).

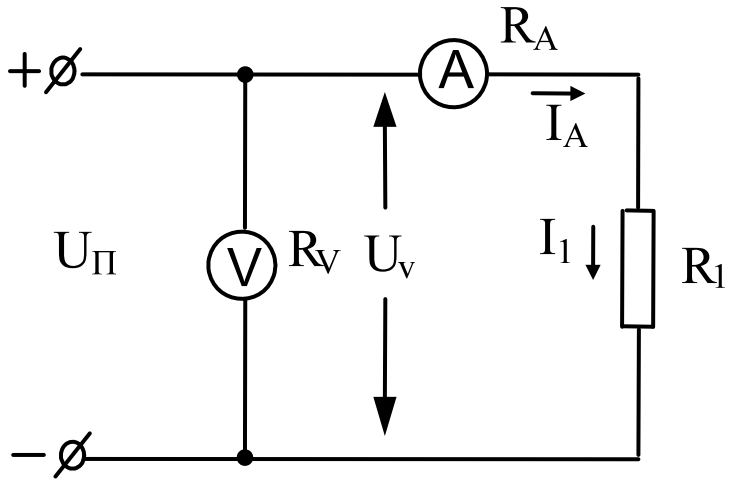


Рис. 24.1. Первый вариант включения приборов при измерении сопротивлений методом вольтметра и амперметра

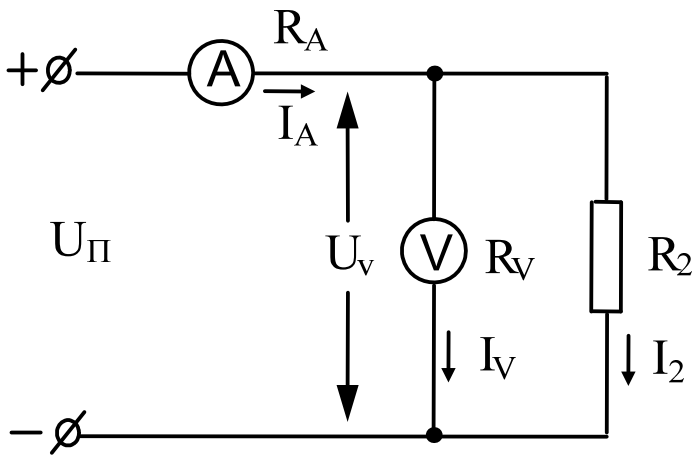


Рис. 24.2. Второй вариант включения приборов при измерении сопротивлений методом вольтметра и амперметра

На рис. 24.1 и 24.2 приняты следующие обозначения:

$U_П$ – напряжение питания;

I_A – показание амперметра;

U_V – показание вольтметра;

R_V – внутреннее сопротивление вольтметра;

R_A – внутреннее сопротивление амперметра;

I_V – ток через вольтметр (вторая схема включения приборов);

R_1 – искомое сопротивление при первом варианте включения приборов;

R_2 – искомое сопротивление при втором варианте включения приборов;

$I_1 = I_A$ – ток через сопротивление R_1 (первый вариант включения приборов);

I_2 – ток через сопротивление R_2 (второй вариант включения приборов).

Для обеих схем включения приборов измеряемые (искомые) сопротивления R_1 и R_2 могут быть приближенно оценены (в соответствии с законом Ома) по формулам

$$R_1^{'} = U_V / I_A, \tag{24.1}$$

$$R_2^{'} = U_V / I_A, \tag{24.2}$$

где U_V, I_A – определены выше;

$R_1^{'}$, $R_2^{'}$ – значения сопротивлений, найденные по показаниям приборов.

К недостаткам рассматриваемого метода измерения сопротивлений следует отнести использование двух приборов (вольтметра и амперметра) и необходимость проведения вычислений для получения искомого результата.

Кроме того, нетрудно заметить, что при включении приборов по схеме рис. 24.1 отношение напряжения U_V к току I_A (см. выражение (24.1)) равно сумме искомого сопротивления R_1 и сопротивления амперметра R_A. Т. е. для получения значения искомого сопротивления с поправкой необходимо из результата по (24.1) вычесть значение R_A:

$$R_1 = R_1^{'} - R_A, \tag{24.3}$$

где R_1 – значение искомого сопротивления с поправкой для первого варианта включения приборов («истинное» значение искомого сопротивления).

При включении приборов по схеме рис. 24.2 ток I_A является суммой токов I_V и I_2 (в соответствии с первым законом Кирхгофа). Т. е. для получения значения искомого сопротивления с поправкой необходимо из тока I_A (см. выражение (24.2)) вычесть ток I_V. В этом случае значение искомого сопротивления с поправкой запишется в виде

$$R_2 = \frac{U_V}{I_A - I_V}, \tag{24.4}$$

где R_2 – значение искомого сопротивления с поправкой для второго варианта включения приборов («истинное» значение искомого сопротивления).

Учитывая, что $I_V = U_V / R_V$, значение R_2 может быть получено в виде соотношения

$$R_2 = \frac{U_V}{I_A - U_V / R_V}, \tag{24.5}$$

где U_V, I_A, R_V – определены выше.

Кроме введения поправок, возможен и другой подход к решению рассматриваемой задачи по измерению сопротивлений методом вольтметра и амперметра. Другой подход заключается в определении искомых значений сопротивлений по (24.1) и (24.2) без поправок и в оценке возникающих при этом методических погрешностей.

Абсолютная методическая погрешность измерения сопротивлений методом вольтметра и амперметра при использовании первого варианта включения приборов оценивается соотношением

$$\Delta_1 = R_1^{'} - R_1, \tag{24.6}$$

где Δ_1 – абсолютная методическая погрешность при первом варианте включения приборов;

$R_1^{'}$ – результат измерения по показаниям приборов (см. выражение (24.1));

R_1 – «истинное» значение искомого сопротивления (см. выражение (24.3)).

Подставляя в (24.6) значение R_1 по (24.3), получим абсолютную методическую погрешность при первом варианте включения приборов:

$$\Delta_1 = R_A. \tag{24.7}$$

Относительная методическая погрешность при использовании первого варианта включения приборов запишется в виде

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{R_1}100\% = \frac{R_A}{R_1}100\% \tag{24.8}$$

где δ_1 – относительная методическая погрешность при первом варианте приборов.

Абсолютная методическая погрешность измерения сопротивлений методом вольтметра и амперметра при использовании второго варианта включения приборов оценивается соотношением

$$\Delta_2 = R'_2 - R_2 \tag{24.9}$$

где Δ_2 – абсолютная методическая погрешность при втором варианте включения приборов;

$R_2^{'}$ – результат измерения по показаниям приборов (см. выражение (24.2));

R_2 – «истинное» значение искомого сопротивления (см. выражение (24.5)).

Отметим, что «истинными» значениями искомых сопротивлений R_1 и R_2 названы значения измеряемых сопротивлений с поправками.

Результат измерения по показаниям приборов может быть записан в виде

$$R_2^{'} = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I_2 + I_V} = \frac{U_V}{U_V(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V})} = \frac{R_V R_2}{R_V + R_2}. \qquad (24.10)$$

Подставляя в (24.9) значение $R_2^{'}$ по (24.10), получаем

$$\Delta_2 = \frac{R_V R_2}{R_V + R_2} - R_2 = -\frac{R_2^2}{R_V + R_2},$$

$$\Delta_2 = -\frac{R_2^2}{R_V + R_2}. \qquad (24.11)$$

Относительная методическая погрешность при использовании второго варианта включения приборов запишется в виде

$$\delta_2 = \frac{\Delta_2}{R_2} 100\% = \frac{R_2^2}{R_2(R_\text{V} + R_2)} 100\%$$

$$\delta_2 = \frac{R_2}{R_\text{V} + R_2} 100\% \qquad (24.12)$$

где δ_2 – относительная методическая погрешность при втором варианте включения приборов.

Таким образом, методические погрешности при косвенном измерении искомого сопротивления методом вольтметра и амперметра оцениваются соотношениями (24.7) и (25.8) для первого варианта включения приборов и соотношениями (24.11) и (24.12) для второго варианта включения приборов.

Отметим, что схема первого варианта включения приборов, приведенная на рис. 24.1, обеспечивает меньшие погрешности при измерении больших сопротивлений, а схема, приведенная на рис. 24.2 (второй вариант включения приборов), – при измерении малых сопротивлений.

24.2. Измерение малых сопротивлений

При измерении малых сопротивлений необходимо учитывать, что значения сопротивлений соединительных проводов и сопротивлений контактов в местах соединения проводов с измеряемым сопротивлением могут быть сравнимыми со значением искомого сопротивления. Поэтому, чтобы сопротивления

проводов и контактов не искажали результат измерения, необходимо обратить серьезное внимание на способ подключения измерительных приборов, на способ включения измеряемого сопротивления в измерительную схему и на метод проведения измерений. Для измерения малых сопротивлений используются различные методы. В учебном пособии рассматривается три метода измерения: метод вольтметра и амперметра, метод сравнения и метод, основанный на использовании мостовых измерительных схем.

Метод вольтметра и амперметра

Измерение сопротивлений методом вольтметра и амперметра уже рассмотрено в параграфе 24.1. В данном параграфе учебного пособия описаны особенности этого метода при измерении малых сопротивлений. Для исключения больших погрешностей при измерении малых сопротивлений в последних всегда должны быть выделены четыре зажима – два токовых и два потенциальных.

Рассмотрим использование метода вольтметра и амперметра на примере измерения сопротивления медной шины (рис. 24.3).

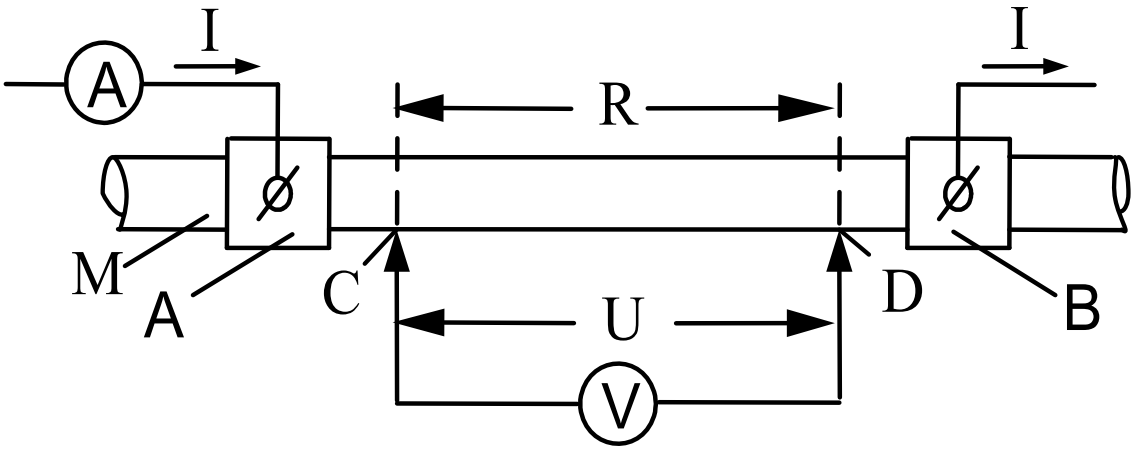


Рис. 24.3. Схема эксперимента при измерении методом вольтметра и амперметра сопротивления участка медной шины: *M* – медная шина; *A*, *B* – токовые зажимы; *C*, *D* – потенциальные контакты; *R* – искомое сопротивление; *A* – амперметр; *V* – вольтметр; *I* – ток в цепи; *U* – разность потенциалов между точками *C* и *D*

Искомое сопротивление *R* определяется соотношением

$$R = U / I \qquad (24.13)$$

Ток *I*, пропускаемый через исследуемую шину, подводят к зажимам *A* и *B* (токовым зажимам), а напряжение *U* измеряют между контактами *C* и *D* (по-

тенциальными зажимами), выполненными обычно в виде двух призм (ножей), прижатых острыми ребрами к шине. Для уменьшения погрешности при измерении U необходимо, чтобы сопротивление вольтметра было много больше сопротивления соединительных проводов и сопротивления контактов в точках C и D. Рассматриваемая погрешность будет полностью или частично отсутствовать, если измерение напряжения U производится без потребления тока (или этим током можно пренебречь). Подобное возможно, если напряжение измеряется с помощью потенциометра или электровольтметра, входное сопротивление которого весьма велико.

Метод сравнения

При измерении малых сопротивлений методом сравнения по схеме рис. 24.4 измеряемое и образцовое сопротивления следует подключать к источнику тока и соединять между собой посредством токовых зажимов (зажимы A, B и A', B' на рис. 24.4), а напряжение измерять между потенциальными зажимами C, D и C', D'.

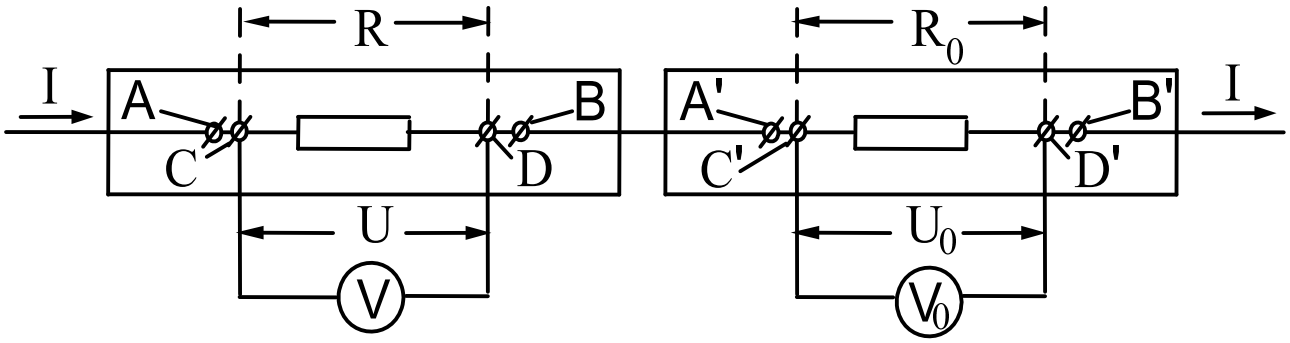


Рис. 24.4. Схема эксперимента при измерении малых сопротивлений методом сравнения: R – искомое сопротивление (четырехзажимное); R_0 – образцовое сопротивление (четырехзажимное); V, V_0 – вольтметры; U – падение напряжения на R; U_0 – падение напряжения на R_0; I – ток в цепи; A, B, A', B' – токовые зажимы; C, D, C', D' – потенциальные зажимы

Искомое сопротивление R определяется с использованием следующих соотношений:

$$R = \frac{U}{I},$$

$$I = \frac{U_0}{R_0},$$

$$R = R_0 \frac{U}{U_0}, \qquad (24.14)$$

где R, R_0, U, U_0 – определены выше.

Погрешность косвенного измерения искомого сопротивления по (24.14) может быть найдена в соответствии с рекомендациями, приведенными в п. 7.3 и табл. 7.1 данного учебного пособия.

$$\vartheta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2},$$

где ϑ – относительная суммарная погрешность косвенного измерения значения сопротивления R (%);

δ_1 – относительная суммарная погрешность прямого измерения значения сопротивления R_0 (%);

δ_2 – относительная суммарная погрешность прямого измерения значения напряжения U (%);

δ_3 – относительная суммарная погрешность прямого измерения значения напряжения U_0 (%).

Абсолютная суммарная погрешность косвенного измерения значения сопротивления R:

$$\Delta = \frac{R}{100\%} \vartheta \qquad (24.15)$$

где Δ – абсолютная суммарная погрешность косвенного измерения искомого сопротивления (Ом).

Мостовые методы

Четырехплечные мостовые схемы, описанные в главах 11–15 учебного пособия, малопригодны для измерения малых сопротивлений. Для этой цели применяются обычно двойные мосты (рис. 24.5).

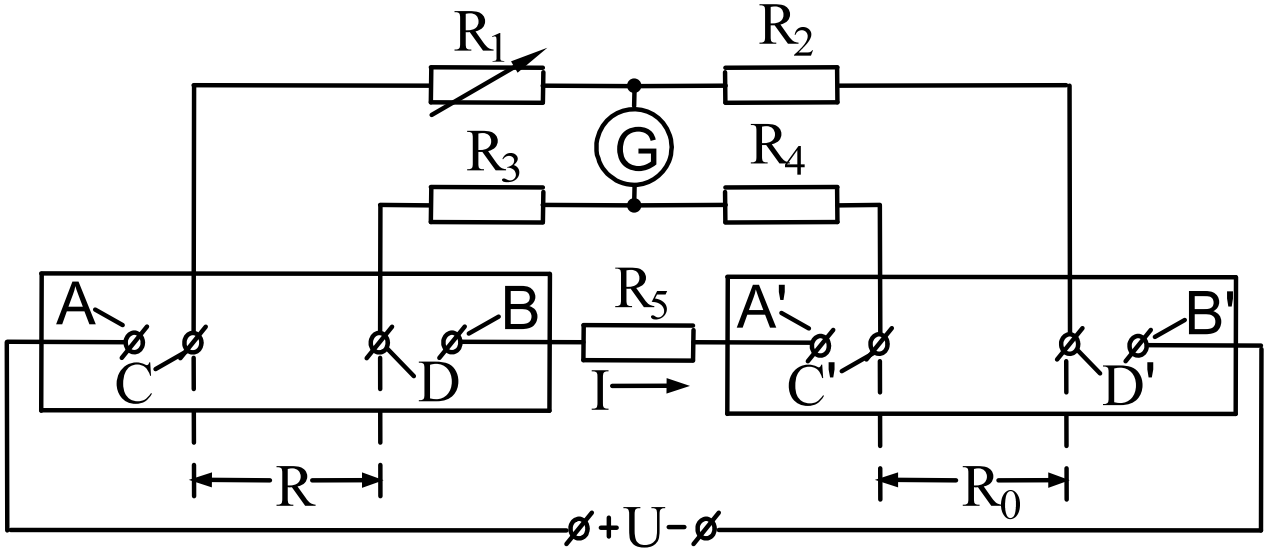


Рис. 24.5. Схема двойного моста: R – измеряемое (искомое) сопротивление; R_0 – образцовое сопротивление; A, B, A', B' – токовые зажимы (контакты); C, D, C', D' – потенциальные зажимы (контакты); R_1 – переменное (регулируемое) сопротивление; R_2, R_3, R_4, R_5 – постоянные сопротивления; G – гальванометр (используется в режиме ноль- индикатора); U – напряжение питания

Измеряемое (искомое) сопротивление R и образцовое сопротивление R_0 должны быть четырехзажимными и иметь значения одного порядка.

Для вывода уравнения, описывающего равновесное состояние моста, надо преобразовать треугольник, образованный сопротивлениями R_3, R_4, R_5 , в эквивалентную звезду. При этом двойной мост преобразуется в четырехплечий с плечами R_1, R_2, $R+R_\text{m}$ и R_0+R_n . Условием равновесия этого моста, а следовательно, и исходного двойного моста является соотношение

$$R_1(R_0 + Rn) = R_2(R + Rm). \tag{24.16}$$

Сопротивления R_n и R_m эквивалентной звезды, как известно:

$$Rn = \frac{R_4 R}{R_3 + R_4 + R_5}, \tag{24.17}$$

$$Rm = \frac{R_3 R}{R_3 + R_4 + R_5}. \tag{24.18}$$

Подставляя значения R_n и R_m в (24.16) и решая полученное уравнение относительно измеряемого (искомого) сопротивления R, получим

$$R = R_0 \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_5}{R_3 + R_4 + R_5}\left(\frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_2}\right). \tag{24.19}$$

Использование соотношения (24.19) для определения значения R по значениям сопротивлений остальных плеч схемы затруднительно. Одна из причин затруднений – наличие в (24.19) сопротивления R_5, которое включает в себя не только сопротивление , но и сопротивление контактов в точках схемы B и A'.

Значение сопротивления R_5, в силу этого, непостоянно и обычно неизвестно. Выражение (24.19) упрощается, если подобрать сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_4 так, чтобы

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \qquad (24.20)$$

Если условие (24.20) выполняется, то выражение (24.19) принимает вид

$$R = R_0 \frac{R_1}{R_2}. \qquad (24.21)$$

Обычно в двойных мостах подбирают $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$, при этом в большинстве мостов сопротивление R_1 – регулируемое. Имеются, однако, мосты, в которых сопротивления R_1, R_2, R_3 и R_4 – постоянны, а регулируемым является сопротивление R_0.

Для измерения сопротивления R изменяют регулируемые сопротивления мостовой схемы (R_1 или R_0) до тех пор, пока мост не будет уравновешен. О равновесии моста судят по показаниям гальванометра G (в момент равновесия его показания нулевые). После достижения равновесия искомое значение R определяют по формуле (24.21).

Для того чтобы свести к минимуму погрешность измерения, необходимо сделать возможно малым сопротивление R_5, т. е. соединять сопротивления R и R_0 по возможности коротким проводом большого сечения. Это особенно важно при измерении предельно малых сопротивлений, имеющих значения десятитысячных долей ома и менее.

Ниже приведена табл. 24.2 с техническими характеристиками универсального измерительного моста типа Р-329.

Таблица 24.2

Технические характеристики универсального измерительного моста типа Р-329

Предел измерения, Ом	Класс точности	Вид схемы
10^{-6} … 10^{-5}	1,5	Двойной мост (шестиплечий)
10^{-5} … 10^{-4}	1,0	
10^{-4} … 10^{-3}	0,5	
10^{-3} … 100	0,05	
50 … 10^{5}	0,05	Одинарный мост (четырехплечий)
10^{5} … 1,1 • 10^{6}	0,5	

В заключение данного параграфа учебного пособия следует отметить, что заметные погрешности при измерении малых сопротивлений могут быть вызваны паразитными ЭДС, возникающими в местах контакта проводов из-за неоднородности материала последних (контактные ЭДС). Кроме того, при отличии температур различных частей измерительной схемы возникает термоЭДС. Во многих случаях влияния контактных и термоЭДС можно в значительной мере исключить, проводя измерение два раза при различных полярностях измерения питания. При этом паразитные ЭДС при одной полярности питающего напряжения суммируются с полезными сигналами, а при другой полярности – вычитаются из них. В качестве результата (при двух измерениях) принимается среднее арифметическое значение по результатам обоих измерений.

24.3. Измерение средних сопротивлений

Для измерения средних сопротивлений могут быть использованы уже рассмотренные методы: метод вольтметра и амперметра, метод сравнения и метод с использованием мостовых измерительных схем. Так как эти методы уже описаны выше, в данном параграфе учебного пособия они не рассматриваются.

Средние сопротивления наиболее часто встречаются на практике, в силу чего разработано большое количество методов, часть из которых будет рассмотрена ниже.

Метод одного амперметра

При использовании одного амперметра измеряемое сопротивление может включаться последовательно с амперметром («последовательный» омметр) и параллельно к амперметру («параллельный омметр).

Схема «последовательного» омметра приведена на рис. 24.6.

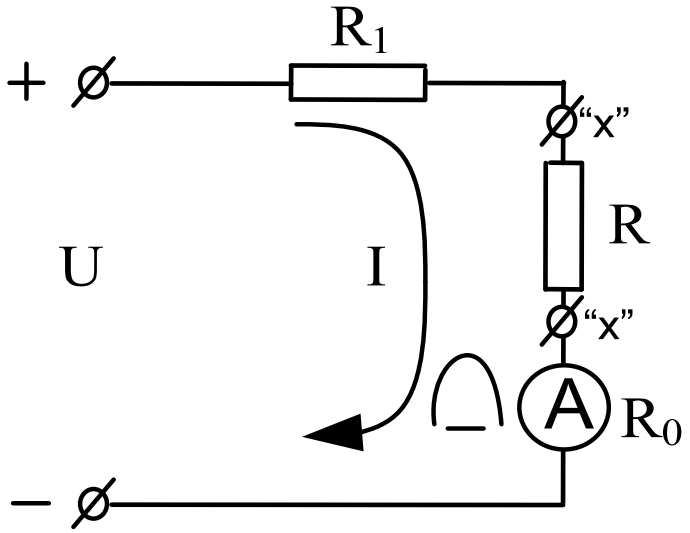


Рис. 24.6. Схема «последовательного» омметра:
R – измеряемое сопротивление; R_1 – добавочное (известное) сопротивление; R_0 – внутреннее сопротивление амперметра; A – амперметр магнитоэлектрической системы; U – напряжение питания; I – ток в схеме; "x" – x-зажимы, к которым подключается измеряемое сопротивление

Измерительный прибор, использованный в схеме на рис. 24.6, обозначен как амперметр. В действительности токи в цепи составляют тысячные и десятитысячные доли амперметра. Т. е. фактически используются миллиамперметры и микроамперметры магнитоэлектрической системы.

Показания прибора по схеме рис. 24.6 определяются следующими соотношениями:

$$\alpha = KI,$$

$$I = \frac{U}{R_0 + R_1 + R},$$

$$\alpha = KU\frac{1}{R_0 + R_1 + R}, \qquad (24.22)$$

где α – показание прибора;

K – коэффициент, характеризирующий чувствительность прибора;

U, R_0, R_1, R – определены выше.

Из выражения (24.22) следует, что показания прибора α обратно пропорциональны измеряемому сопротивлению R. Зависимость $\alpha = f(R)$ приведена на рис. 24.7.

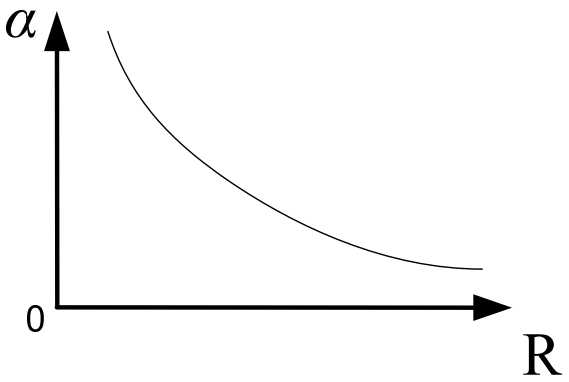


Рис. 24.7. График зависимости $\alpha = f(R)$ для «последовательного» омметра

Пример шкалы «последовательного» омметра приведен на рис. 24.8.

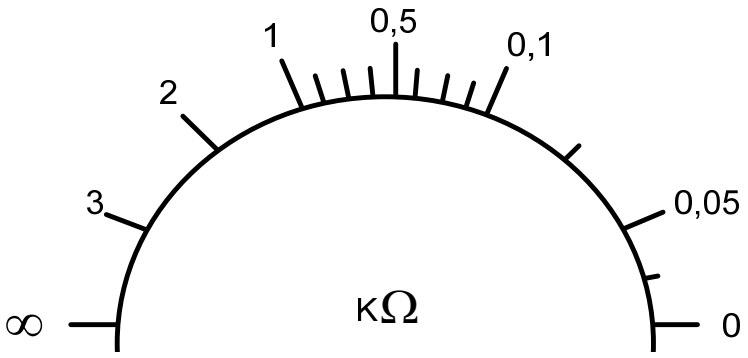


Рис. 24.8. Пример шкалы «последовательного» омметра

Выражение (24.22) и рис. 24.7 свидетельствуют, что при измеряемом сопротивлении $R = 0$ $\alpha = \alpha_{max}$; при $R \to \infty$ $\alpha \to 0$. Следует также отметить, что шкала рассматриваемого омметра градируется в единицах сопротивления, нелинейна и имеет ноль справа. «Последовательные» омметры используются, как правило, для измерения сравнительно больших сопротивлений (тысячи и миллионы ом). Соответственно на шкалу прибора наносятся единицы измерений “kΩ” (как на рис. 24.8) или “MΩ”.

Схема «параллельного» омметра приведена на рис. 24.9.

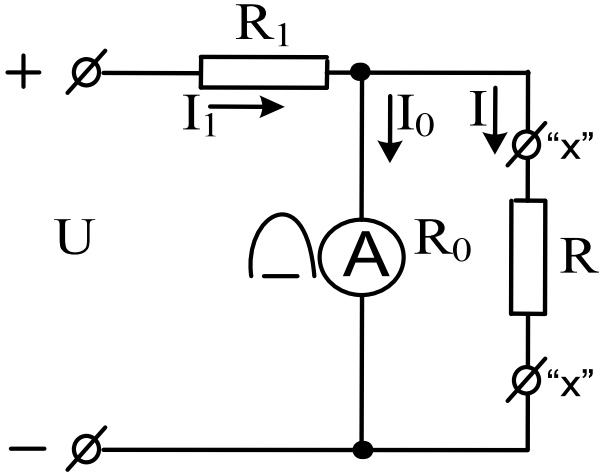


Рис. 24.9. Схема «параллельного» омметра:
R – измеряемое сопротивление; R_0 – внутреннее сопротивление амперметра;
R_1 – добавочное (известное) сопротивление; A – амперметр магнитоэлектрической системы; U – напряжение питания; I – ток через измеряемое сопротивление;
I_0 – ток через амперметр

Аналогично «последовательным» омметрам в цепях «параллельных» омметров протекают небольшие токи (миллиамперы и микроамперы), так что использование в схеме рис. 24.9 амперметра является несколько условным и применено для общности рассуждений.

Показания прибора по схеме рис. 24.9 определяются следующими соотношениями:

$$\alpha = kI_0$$

$$I_0 = \frac{U - I_1 R_1}{R_0},$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R_2},$$

$$R_2 = \frac{R_0 R}{R_0 + R_1},$$

$$\alpha = U \frac{kR}{R_1 R_0 + R(R_1 + R_0)}, \qquad (24.23)$$

где α – показание прибора;

k – коэффициент, характеризирующий чувствительность прибора;

U, R, R_0, R_1 – определены выше.

Из выражения (24.23) следует, что показания прибора α пропорциональны измеряемому сопротивлению R. Зависимость $\alpha = f(R)$ для рассматриваемого случая приведена на рис. 24.10.

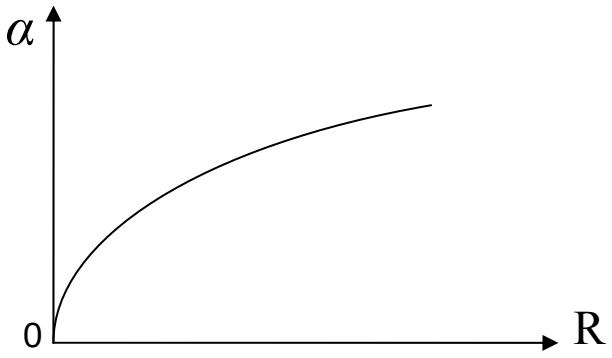


Рис. 24.10. График зависимости $\alpha = f(R)$ для «параллельного» омметра

Выражение (24.23) и рис. 24.10 свидетельствуют, что при значении измеряемого сопротивления, равном нулю, $\alpha = 0$, а при $R \to \infty$ $\alpha \to \alpha_{max}$. Шкала рассматриваемого омметра нелинейна и имеет ноль слева (рис. 24.11). Градуируется шкала в единицах сопротивления.

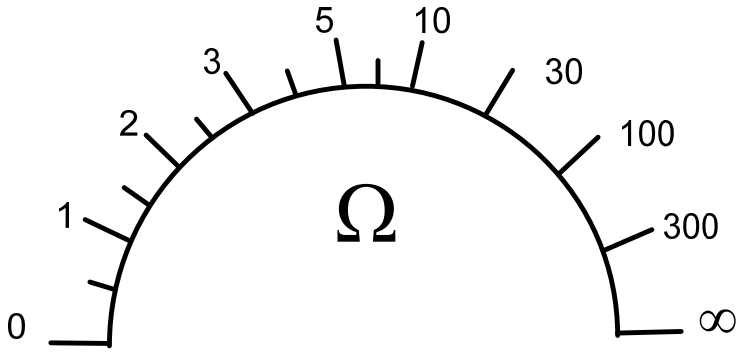


Рис. 24.11. Пример шкалы «параллельного» омметра

«Параллельные» омметры используются, как правило, для измерения сравнительно небольших сопротивлений (обычно это единицы, десятки и сотни ом). При больших значениях измеряемого сопротивления R (по сравнению с сопротивлением амперметра R_0) относительно значительные изменения R вызывают малое изменение показания прибора.

Метод одного вольтметра

Схема устройства, реализующего измерение сопротивления методом одного вольтметра, приведена на рис. 24.12. На этом рисунке приняты следующие обозначения:

U – напряжение питания;

V – вольтметр;

П – переключатель;

R – измеряемое сопротивление;

R_V – внутреннее сопротивление вольтметра;

I_1, I_2 – токи, протекающие в схеме при 1-м и 2-м положениях переключателя П.

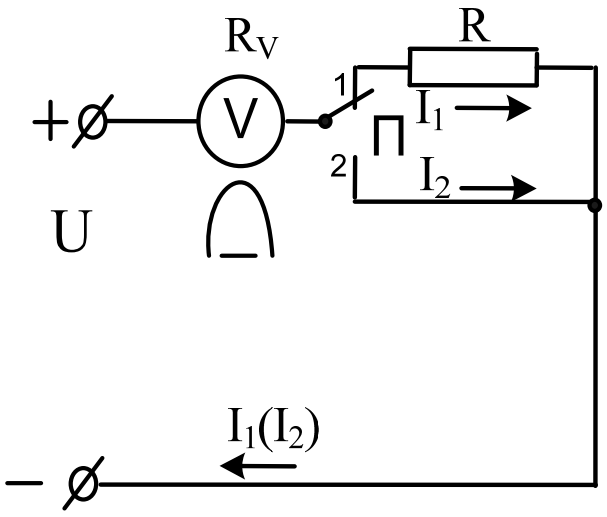


Рис. 24.12. Схема устройства при измерении сопротивления методом одного вольтметра

Показания прибора по схеме рис. 24.12 определяются нижеследующими соотношениями.

При переводе переключателя П в положение «1» ток в цепи I_1 будет иметь значение

$$I_1 = \frac{U}{R_V + R}. \qquad (24.24)$$

Показание вольтметра α_1 в этом случае запишется в виде

$$\alpha_1 = kI_1 = k\frac{U}{R_V + R} \qquad (24.25)$$

где k – коэффициент, характеризирующий чувствительность вольтметра.

При переводе переключателя П в положение «2» значение тока I_2 будет следующим:

$$I_2 = \frac{U}{R_V}. \tag{24.26}$$

Показание вольтметра α_2 в этом случае запишется в виде

$$\alpha_2 = kI_2 = k\frac{U}{R_\text{V}}. \tag{24.27}$$

Решая уравнения (24.25) и (24.27) относительно U, получим

$$U = \frac{\alpha_1(R_\text{V} + R)}{k}, \tag{24.28}$$

$$U = \frac{\alpha_2 R_\text{V}}{k}. \tag{24.29}$$

Приравнивая правые части равенств (24.28) и (24.29) и сокращая на k, получим

$$\alpha_1 = \left(R_\text{V} + R\right) = \alpha_2 R_\text{V}. \tag{24.30}$$

Решая соотношение (24.30) относительно R, окончательно получим соотношение

$$R = R_V \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1}, \tag{24.31}$$

где R – измеряемое сопротивление;

R_V – сопротивление вольтметра;

α_1 – показание вольтметра при переводе переключателя П в положение «1»;

α_2 – показание вольтметра при переводе переключателя П в положение «2».

Соотношение (24.31) правомерно, если напряжение питания U стабильно и не изменяется в ходе эксперимента по измерению искомого сопротивления.

Метод замещения

Схема устройства для измерения сопротивления методом замещения приведена на рис. 24.13, где приняты следующие обозначения:

U – напряжение питания;

И – измеритель;

К – ключ;

R – измеряемое сопротивление;

R_0 – магазин сопротивлений;

I_1, I_2 – токи в схеме (направление токов зависит от полярности напряжения питания);

R_g – добавочное сопротивление (ограничивает ток в цепи измерителя и при малых R).

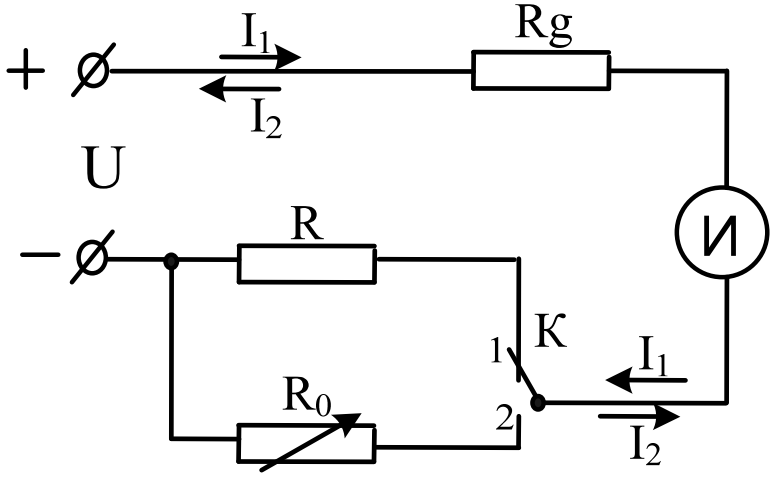


Рис. 24.13. Схема устройства для измерения сопротивления методом замещения

В качества измерителя «И» может быть использован миллиамперметр или вольтметр (миллиамперметр используется, если $R > 1$ кОм, и используется вольтметр, если измеряемое сопротивление $R < 1$ кОм).

Для проведения измерения сопротивления методом замещения необходимо выполнить нижеследующие операции.

Перевести ключ К в положение «1» и зафиксировать показания измерителя И при заданном напряжении питания U и заданном добавочном сопротивлении R_g.

Не меняя напряжение питания U и сопротивление R_g, перевести ключ К в положение «2». Изменяя сопротивление R_0, установить показание измерителя И

то же самое, что было в первом случае (при положении ключа К в позиции «1»).

При выполнении указанных условий измеряемое сопротивление R будет равно установленному сопротивлению R_0. Напомним, что R_0 представляет собой магазин сопротивлений, что позволяет набирать и удобно считывать набранные значения в широком диапазоне измерений. Например, магазин сопротивлений типа Р-33 позволяет набирать сопротивления от 0 до 99 999,9 Ом с шагом 0,1 Ом.

Измерение искомого сопротивления повторяется при смене полярности напряжения питания. Это делается с целью исключить влияние на результат контактных ЭДС и термоЭДС.

За результат измерения принимается среднее арифметическое значение по результатам двух экспериментов с разной полярностью напряжения питающего устройство источника питания.

Отметим, что добавочное сопротивление R_g необходимо при использовании в качестве измерителя И миллиамперметра и не требуется при использовании в качестве измерителя вольтметра.

24.4. Измерение больших сопротивлений

При измерении больших и особенно сверхбольших сопротивлений (например, сопротивление изоляционных материалов) необходимо считаться с тем, что сопротивление изоляции соединительных проводов соизмеримо с искомым сопротивлением. Для исключения больших погрешностей, возникающих из-за этого обстоятельства, в измерительные схемы вводят специальные «охранные кольца» и используются специфические методы измерений.

Наибольшее распространение для измерения больших сопротивлений получил метод вольтметра и амперметра, уже рассмотренный в п. 24.1 учебного пособия.

При измерении больших сопротивлений различают метод измерения объемных и метод измерения поверхностных сопротивлений. Рассмотрим оба метода более детально.

Измерение объемных сопротивлений

Схема устройства для измерения объемного сопротивления приведена на рис. 24.14.

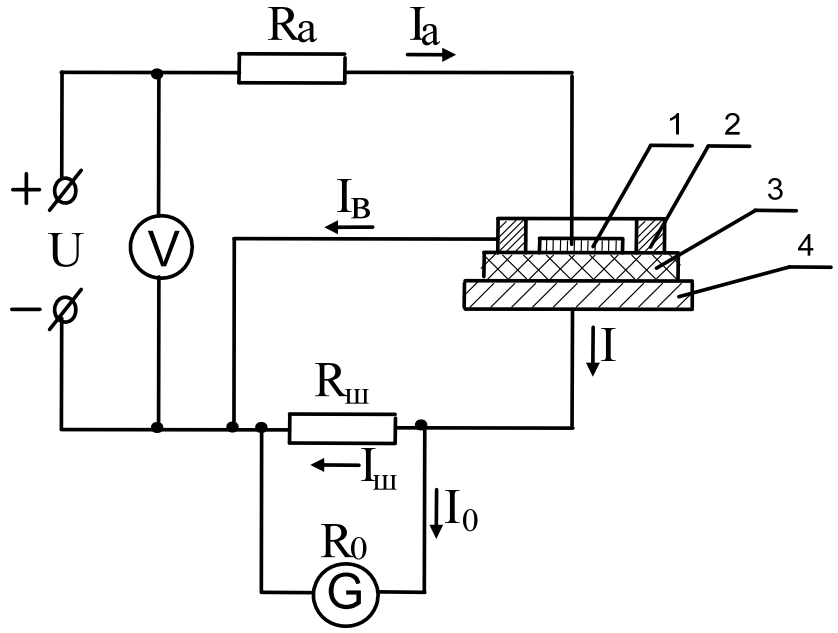


Рис. 24.14. Схема устройства для измерения объемного сопротивления:
1, 4 – контактные пластины; 2 – охранное кольцо; 3 – исследуемый образец;
U – напряжение источника питания; V – вольтметр; $R_а$ – защитное сопротивление;
$R_ш$ – сопротивление шунта; G – гальванометр; $R_о$ – внутреннее сопротивление гальванометра

Плоский образец изоляционного материала 3, объемное сопротивление которого измеряется, помещается между двумя металлическими (обычно – медными) электродами 1 и 4 (см. рис. 24.14).

К поверхности образца, на которой расположен электрод 1, прижат третий металлический электрод 2, выполненный в виде кольца («охранное кольцо»). Этот электрод («охранное кольцо») соединен с источником питания, как показано на рис. 24.13. Таким образом, через гальванометр G (вместе с шунтом $R_ш$) протекает тот же ток I, что и через измеряемое сопротивление. Отметим, что $I = I_а – I_в$ и что гальванометр градуируется вместе с шунтом и его показания соответствуют измеряемому току I. Шунт к гальванометру предусмотрен в связи с тем, что измеряемые сопротивления и соответственно ток I могут изме-

няться в широких пределах. Наличие шунта позволяет расширить диапазон измерения гальванометра, что расширяет возможности устройства в целом.

Защитное сопротивление R_a, предусмотренное в схеме, защищает устройство от возможных коротких замыканий. Обычно сопротивление R_a = 1 МОм. А поскольку устройство предназначено для измерения очень больших объемных сопротивлений, достигающих значений (10^{13}–10^{14}) Ом, то погрешность от введения в схему сопротивления R_a мала и практического значения не имеет.

Искомое объемное сопротивление образца определяется по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}, \tag{24.32}$$

где R – искомое объемное сопротивление исследуемого образца 3 (см. рис. 24.14);

U – показание вольтметра V;

I – показание гальванометра G.

Выражение (24.32) правомерно, если гальванометр проградуирован совместно с шунтом. В этом случае искомое объемное сопротивление исследуемого образца будет определяться соотношением

$$R = n\frac{U}{I_0}, \tag{24.33}$$

где n – коэффициент шунтирования, зависящий от значения сопротивлений $R_ш$ и R_0 (см. п. 22.2 учебного пособия);

I_0 – ток через гальванометр;

R, U – определены выше.

Измеритель G должен обеспечить измерение малых токов, значения которых могут быть не более 10^{-6}–10^{-9} А.

Использование в качестве G нормальных гальванометров магнитоэлектрической системы позволяет измерять объемные сопротивления R от 10^{14} Ом; использование баллистических гальванометров позволяет измерять значения R до 10^{16} Ом; использование в качестве измерителей электронных приборов позволяет повысить верхний предел измерения до 10^{17} Ом.

Измерение поверхностных сопротивлений

Схема устройства для измерения поверхностного сопротивления приведена на рис. 24.15.

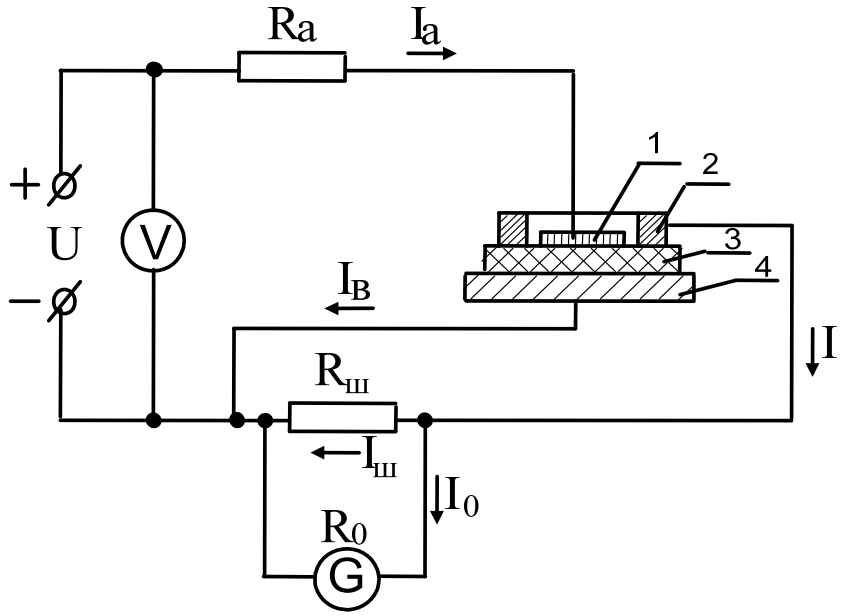


Рис. 24.15. Схема устройства для измерения поверхностного сопротивления:
1, 4 – контактные пластины; 2 – кольцевой электрод; 3 – исследуемый образец;
U – напряжение источника питания; V – вольтметр; $R_а$ – защитное сопротивление;
$R_ш$ – сопротивление шунта; G – гальванометр; R_0 – сопротивление гальванометра

Плоский образец изоляционного материала 3, поверхностное сопротивление которого измеряется, помещается между двумя металлическими электродами 1 и 4. К поверхности образца, на которой расположен электрод 1, прижат третий металлический электрод 2, выполненный в виде кольца. Как видно из схемы (см. рис. 24.15), через гальванометр G протекает ток I, идущий от электрода 1 к кольцевому электроду 2 по поверхности исследуемого образца, тогда как ток $I_в$, протекающий от электрода 1 к электроду 4 через толщу образца, минует цепь гальванометра. Поэтому отношение напряжения U к току I равно сопротивлению части поверхности образца, заключенной между электродом 1 и кольцом 2, т. е.

$$R = \frac{U}{I}, \tag{24.34}$$

где R – искомое поверхностное сопротивление исследуемого образца;

U, I – определены выше.

Сведения о подключении и градуировке гальванометра, а также о требованиях к чувствительности гальванометра уже приведены в пункте «Измерения объемных сопротивлений». Эти сведения целиком правомерны для рассматриваемого случая (при измерении поверхностного сопротивления) и, в силу этого, в данном пункте не рассматриваются.

Примеры стандартных приборов для измерения сопротивлений (малых, средних и больших), выпускаемых промышленностью, приведены в прил. 5 (см. табл. П. 5.1, П. 5.2 и П. 5.3).

Технические характеристики тераомметра типа Е6-14, рассматриваемые в качестве примера, приведены в табл. 24.3.

Таблица 24.3

Основные технические характеристики тераомметра типа Е6-14

Измеряемая величина	**Диапазон измерений, Ом**	**Допускаемая погрешность измерения**	**Габариты, мм Масса, кг**
Сопротивление постоянному току	$10^{17}…10^{17}$	± (4–10) % длины рабочей части шкалы	Прибора 320×210×295; Измерительной камеры 380×240×345; 14 (с измерительной камерой)

В данном пункте учебного пособия рассмотрена только часть методов, используемых для измерения сопротивлений (как малых, так и средних, и больших). Дополнительные сведения по методам измерения сопротивления можно найти в литературе, приведенной в библиографическом списке [1; 2; 5–7; 9; 36].

25. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

25.1. Общие положения

Температура характеризует тепловое состояние вещества. Оно определяется кинетической энергией поступательного движения молекул. Чем больше кинетическая энергия молекул, тем выше температура.

Верхний предел температуры пока не установлен. Примеры высоких температур: температура поверхности Солнца – примерно 6 000 °С; температура внутри Солнца – около $20 \cdot 10^6$ °С; еще более высокие температуры имеют белые и голубые звезды-карлики.

Нижний предел температуры соответствует такому состоянию вещества, при котором прекращается поступательное движение молекул. Это происходит при температуре, равной абсолютному нулю: 0 К или –273,15 °С. Абсолютный нуль – величина расчетная. Экспериментально достигнутая минимальная температура отличается от абсолютного нуля на сотые доли градуса.

Непосредственно воспринимать температуру человек может лишь качественно (холодно, тепло, горячо).

Для количественной оценки температуры необходимы технические средства. Технические средства преобразуют температуру с помощью термометрических тел к виду, удобному для восприятия человеком (в дальнейшем – оператором). Например, температура может преобразовываться в длину столбика ртути (ртутные термометры), в электрическое сопротивление (измерители температуры на основе термосопротивлений ТС), в термоЭДС (измерители температуры на основе термопар ТП) и т. д. Отметим, что электрическое сопротивление и термоЭДС не могут быть восприняты оператором непосредственно. Преобразователи ТС и ТП подключаются к вторичным приборам, с которых и производится отсчет показаний.

Для количественной характеристики теплового состояния вещества введены температурные шкалы. В настоящее время нашли практическое применение четыре шкалы: шкала Фаренгейта (используется в США), шкала Реомюра

(используется в Западной Европе); шкала Кельвина (используется в научных исследованиях); шкала Цельсия (используется в большинстве стран, в том числе и в России, как практическая шкала).

Рассмотрим перечисленные температурные шкалы. В 1715 г. немецкий физик Г.Д. Фаренгейт изготовил ртутный термометр и предложил температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Фаренгейта» и градуируемую в градусах Фаренгейта (°F). За градус Фаренгейта была принята температура смеси: лед + соль + нашатырь; температура тающего льда принята за +32 °F; температура кипящей воды принята за +212 °F. Температурный интервал от тающего льда до кипящей воды разделен на 180 частей, и 1/180 часть этого интервала принята за 1 °F.

В 1730 г. французский естествоиспытатель Р.А. Реомюр изготовил спиртовой термометр и предложил свою температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Реомюра», которая градуируется в «градусах Реомюра» (°R). Реомюр предложил разделить температурный интервал от температуры тающего льда (принятого за 0 °R) до температуры кипящей воды (принятой за +80 °R) на 80 частей. 1/80 часть этого интервала принята за 1°R.

В 1742 г. шведский физик и астроном Цельсий предложил стоградусную температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Цельсия». Цельсий предложил разделить температурный интервал от температуры тающего льда (принятой за 0 °C) до температуры кипящей воды (принятой за 100 °C) на 100 частей. 1/100 часть этого интервала принята за 1 °C.

Отметим, что температура тающего льда и температура кипящей воды соответствует нормальному атмосферному давлению (равному 760 мм рт. ст.).

В 1848 г. английский физик лорд Кельвин (до присвоения почетного титула лорда имел имя Уильям Томсон) ввел понятие абсолютного температурного нуля и предложил абсолютную температурную шкалу, получившую в дальнейшем наименование «шкала Кельвина» или «абсолютная термодинамическая шкала». Единица измерения абсолютной температурной шкалы до 1967 г. именовалась «градус Кельвина» и обозначалась – 1°К. После 1967 г. единица изме-

рения абсолютной температурной шкалы стала именоваться «Кельвин» и обозначаться 1 К.

Основные реперные точки абсолютной температурной шкалы:

0 К – абсолютный ноль (–273,15 °С);

273,15 К – температура тающего льда (0 °С) при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.;

373,15 К – температура кипящей воды (100 °С) при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

Искомые значения, выраженные в единицах разных температурных шкал, связаны между собой соотношением

$$\theta_1\,^0\mathrm{C} = \frac{5}{4}\theta_2\,^0R = \frac{5}{9}(\theta_3 - 32)\,^0\mathrm{F} = (T - 273{,}15)\ \mathrm{K}, \qquad (25.1)$$

где θ_1, θ_2, θ_3 – значения температуры, выраженные (соответственно) в единицах шкал Цельсия, Реомюра, Фаренгейта;

T – значение термодинамической температуры, выраженное в единицах шкалы Кельвина.

Международная система единиц (СИ), узаконенная на территории Российской Федерации государственным стандартом ГОСТ 8.417–202 [116], использует в качестве основной единицы термодинамическую температуру. Кроме термодинамической температуры, допускается применять температуру Цельсия. Термодинамическую температуру, как уже отмечалось, выражают в кельвинах, температуру Цельсия – в градусах Цельсия. По размеру градус Цельсия равен кельвину (1 К = 1°С).

Использование температурных шкал Фаренгейта и Реомюра и соответственно выражение температуры в градусах Фаренгейта и Реомюра государственным стандартом [49] не предусмотрено.

В п. 1.4.2 учебного пособия приведено определение единицы измерения кельвин (см. табл. 1.1). Приведем это определение еще раз:

«Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды».

Тройная точка воды – это равновесное состояние трех фаз вещества: твердой, жидкой и газообразной (рис. 25.1, точка «А»).

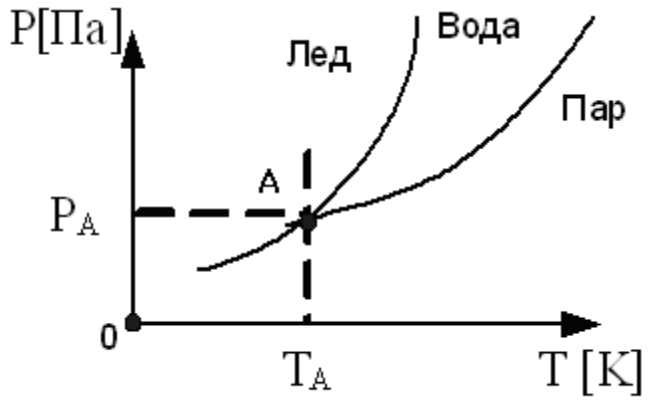


Рис. 25.1. Зависимость P = f(T) для воды:
P – давление; *T* – температура; *A* – тройная точка воды.

Температура тройной точки (точки одновременного сосуществования льда, воды и пара) T_A = +0,01 °С (273,16 К) при давлении P_A = 4,58 мм рт. ст. (610,6 Па).

Эталон для воспроизведения единицы температуры Кельвина хранится в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (эталон описан в учебных пособиях [3; 153; 154]).

Особенность температуры состоит в том, что она является неаддитивной физической величиной. Поэтому, если для измерения, например, длины, массы и других аддитивных величин можно ограничиться одним эталоном (эталоном метра, килограмма и др.), то для температуры воспроизведения одной эталонной точки недостаточно. Измерение температуры требует точного воспроизведения многих температурных точек, совокупность которых образует температурную шкалу. Температуры, определяемые по этой шкале, должны максимально совпадать с термодинамической шкалой Кельвина. Сформулированным требованием отвечает Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90). При этом основной реперной точкой шкалы остается кельвин (К), воспроизводимый в тройной точке воды. Эталон, воспроизводящий размер кельвина, был и остается «держателем» единицы температуры.

В табл. 25.1 приведены основные «приписанные» Международным комитетом по мерам и весам значения температур фазового равновесия веществ и материалов. Все значения температуры фазового равновесия даны для нормального атмосферного давления (P = 101 325 Па).

Таблица 25.1

Основные реперные точки по МТШ-90

Состояние фазового равновесия	**Значения по МТШ-90**	
	T_{90}, К	**t_{90},°С**
Давление насыщенных паров гелия	0,65…5	–272,50…–268,15
Тройная точка водорода	13,803	–259,346
Точка кипения водорода	20,280	–252,870
Тройная точка аргона	83,805	–189,344
Тройная точка ртути	234,315	–38,834
Тройная точка воды	273,16	+0,01
Точка кипения воды	373,15	100
Точка плавления индия	429,748	156,598
Точка плавления скандия	505,078	231,928
Точка плавления цинка	692,677	419,527
Точка плавления алюминия	933,473	660,323
Точка плавления серебра	1234,93	961,78
Точка плавления золота	1337,33	1064,18
Точка плавления меди	1357,77	1084,62

МТШ-90 охватывает область от 0,65 К до наивысшей температуры, практически доступной измерению в соответствии с законом излучения Планка (для монохроматического излучения). Приписанные значения температуры МТШ-90 обозначаются символом T_{90} при выражении температуры в кельвинах и символом t_{90} при выражении температуры в градусах Цельсия.

В соответствии с реперными точками, приведенными в табл. 25.1, созданы соответствующие эталоны для температур, лежащих выше и ниже температур тройной точки воды.

Измерение температуры может проводиться контактными и бесконтактными методами. При контактном методе измерения температуры измерители

температуры непосредственно контактируют со средой, температура которой измеряется. Приборы для контактного измерения температуры называются *термометрами*.

При бесконтактном измерении температуры измерители непосредственно со средой, температура которой измеряется, не контактируют. Измерение в этом случае осуществляется дистанционно. Приборы для бесконтактного (дистанционного) измерения температуры принято называть *пирометрами*.

25.2. Термометры

Термометрами принято называть приборы, используемые для контактного измерения температуры. Наибольшее распространение получили средства измерения температуры следующих типов:

1) жидкостные;
2) манометрические;
3) дилатометрические;
4) биметаллические;
5) электрические.

Электрические измерители температуры строятся на основе термочувствительных преобразователей (например, термосопротивлений или термопар), работающих совместно с вторичной аппаратурой. Термочувствительные преобразователи (датчики) и вторичная аппаратура уже рассмотрены выше и повторно в данном параграфе учебного пособия не приводятся.

Жидкостные термометры

На рис. 25.2 приведена одна из возможных конструкций жидкостного термометра.

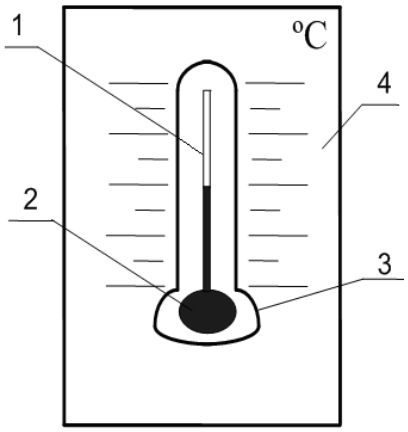


Рис. 25.2. Жидкостный термометр:
1 – капиллярная трубка; 2 – термометрическая жидкость; 3 – баллон (резервуар); 4 – шкала

Термометрическая жидкость 2 заполняет баллон 3 и часть капиллярной трубки 1. Свободное пространство в капилляре заполняется инертным газом под давлением или из него выкачивается воздух. Об измеряемой температуре судят по высоте жидкости в капилляре. Отсчет показаний производится по шкале 4. Шкала может быть нанесена на капилляр или может быть приложена к капиллярной трубке (как показано на приводимом рисунке).

Термометры с нанесенной на капилляр шкалой называются термометрами типа А («палочными»), а при отдельной прикладной шкале – типа Б (с вложенной шкальной пластиной).

Термометрические жидкости, используемые в жидкостных термометрах, и их основные характеристики приведены в табл. 25.2. Максимальная измеряемая температура приведена для двух случаев: свободное пространство над термометрической жидкостью в капиллярной трубке заполнено инертным газом под давлением от 5 до 7 МПа (обозначено 5–7 МПа) и из свободного пространства над жидкостью откачен воздух (обозначено 0 МПа).

Таблица 25.2

Основные характеристики термометрических жидкостей

Термометрическая жидкость	Измеряемая температура, °С		
	Минимальная	Максимальная	
		0 МПа	5–7 МПа
Ртуть	–35	350	900
Подкрашенный спирт	–100	+45	+79
Толуол	–90	+90	+111
Пентан технический	–200	+25	+36
Подкрашенный эфир	–100	+20	+35

Жидкостные термометры выпускаются трех разновидностей: промышленные (основные обозначения «ТП»); лабораторные («ТЛ»); образцовые («ТО»).

Промышленные термометры имеют шкалы с ценой деления от 0,5 до 10 °С и позволяют проводить измерение температуры с погрешностью от 0,5 до 10 °С.

Лабораторные термометры имеют цену деления шкалы от 0,2 до 2 °С и погрешность от 0,2 до 2 °С.

Образцовые термометры имеют цену деления шкалы от 0,01 до 0,1 °С и погрешность от 0,015 до 0,1 °С.

В качестве примера в прил. 12 приведены технические характеристики нескольких типов промышленных, лабораторных и одного образцового термометров.

Показания жидкостного термометра зависят не только от температуры баллона (резервуара), но и от температуры столбика жидкости в капилляре. Образцовые термометры и некоторые лабораторные градуируются при полном погружении термометра в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Если глубина погружения термометра не соответствует условиям градуировки, то появляется дополнительная погрешность, что необходимо учитывать.

Промышленные (называемые иногда «технические») и часть лабораторных термометров градуируются при частичном погружении на определенную глубину. Глубина погружения нормируется (см. прил. 12) и, как правило, приводится в паспортных данных конкретных типов термометров.

Для защиты от механических повреждений промышленные (технические) термометры часто помещают в защитную арматуру. Для удобства наблюдения сами термометры и защитная арматура к ним выпускаются прямыми и угловыми.

Выпускаются также ртутные электроконтактные термометры, предназначенные для сигнализации или поддержания заданной температуры. Термометры выпускаются с заданными постоянными контактами (ТЗК) или с подвижным контактом (ТПК). Кроме электроконтактных термометров, выпускаются бесшкальные термоконтакторы, которые настроены на определенные температуры замыкания электрических контактов. Дополнительные сведения по жидкостным термометрам и их паспортным данным можно найти в литературе [3; 32; 38].

Манометрические термометры

Схема манометрического термометра приведена на рис. 25.3.

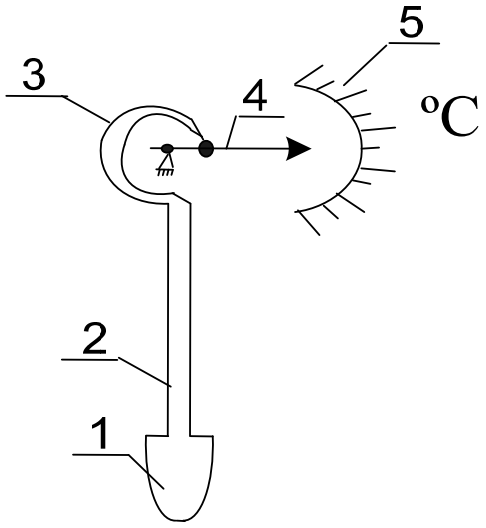


Рис. 25.3. Схема манометрического термометра:
1 – термометрический баллон; 2 – капиллярная трубка; 3 – трубчатая пружина (деформационный манометрический преобразователь); 4 – стрелка прибора; 5 – шкала, проградуированная в градусах Цельсия

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давления рабочего вещества в замкнутом объеме в зависимости от температуры чувствительного элемента (термометрического баллона).

Основными частями манометрических термометров являются термобаллон (чувствительный элемент), капиллярная трубка и трубчатая пружина (деформационный манометрический преобразователь), связанная со стрелкой прибора.

Различают три типа манометрических термометров: газовые, жидкостные и конденсационные.

В газовых приборах термобаллон и вся система заполняются газом (азотом, гелием или каким-либо другим инертным газом).

В жидкостных приборах термобаллон и вся система заполняются термометрической жидкостью с большим коэффициентом теплового расширения (ртуть, керосин, лигроин и др.). Могут также использоваться термометрические жидкости, приведенные в табл. 25.2.

В конденсационных приборах термобаллон на 2/3 заполняется жидкостью, кипящей при низких температурах (фреон, ацетон, CO_2 и др.). Оставшаяся часть термобаллона и вся система (капилляр и трубчатая пружина) заполняются при этом парами этой жидкости.

Газовые и жидкостные приборы имеют линейную шкалу. У конденсационных приборов шкала нелинейна.

При нагреве термобаллона газ или жидкость, находящиеся в нем, нагреваются и в системе создается повышенное давление. Трубчатая пружина 3 (см. рис. 25.3) под действием повышенного давления разворачивается и перемещает стрелку 4 вдоль оцифрованной шкалы 5. При понижении измеряемой температуры и соответственно температуры термобаллона давление жидкости или газа понижается, трубчатая пружина 3 под действием упругих сил сворачивается и стрелка 4 перемещается в сторону малых температур на шкале 5.

В конденсационных приборах при нагреве термобаллона усиливается испарение рабочей жидкости, за счет чего повышается давление паров и трубчатая пружина 3 разворачивается.

При понижении температуры термобаллона пары жидкости конденсируются и их давление понижается, что приводит к сворачиванию трубчатой пружины 3 и соответствующему перемещению стрелки 4.

При разворачивании и сворачивании трубчатой пружины развиваются значительные усилия, что позволяет нагружать подвижную часть манометрических термометров не только указательной стрелкой, но и электрическими контактами.

Газовые манометрические термометры выпускаются на температуры от -200 °С до +600 °С с классом точности (1,0–1,5).

Жидкостные приборы выпускаются на температуры от –50 °С до +600 °С класса точности (1,5–2,5).

Конденсационные приборы выпускаются на температуры от 0 °С до +400 °С класса точности (1,5–2,5).

Капиллярная трубка 2 (см. рис. 25.3) для всех типов манометрических термометров имеет длину от 1–2 м до 20–25 м и даже более, что позволяет использовать эти приборы для дистанционных измерений температуры.

В качестве примера в прил. 13 приведены технические характеристики нескольких типов газовых, жидкостных и конденсационных манометрических термометров. Дополнительные сведения по рассмотренным приборам можно найти в литературе [3; 32; 38].

Дилатометрические термометры

Схема дилатометрического термометра приведена на рис. 25.4.

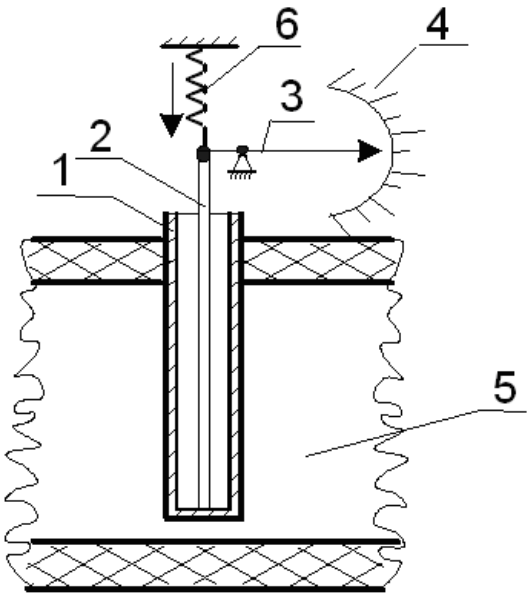


Рис. 25.4. Схема дилатометрического термометра:
1 – термочувствительный стакан; 2 – шток; 3 – стрелка; 4 – шкала;
5 – исследуемая среда; 6 – пружина (прижимает шток ко дну стакана)

Термометрический стакан 1 и шток 2 изготовляются из материалов, имеющих различные коэффициенты линейного температурного расширения α_1 и α_2. Обычно стакан изготовляют из алюминия ($\alpha_1 = 23 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$), а шток – из инвара (железоникелевого сплава) ($\alpha_2 = 1 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$). Таким образом, при изменении температуры исследуемой среды 5 длина стакана 1 изменяется значительно больше, чем длина штока 2. Шток прижимается пружиной 6 к дну стакана.

При увеличении температуры стакан удлиняется и шток (под действием пружины) вместе с концом стрелки, жестко скрепленной со штоком, перемещается вниз. При уменьшении температуры длина термометрического стакана уменьшается и шток (вместе с концом стрелки), преодолевая сопротивление пружины 6, перемещается вверх.

Стрелка 3 перемещается вдоль шкалы, проградуированной в градусах Цельсия, по которой и производится отсчет показаний.

При температурных деформациях стакана 1 развиваются значительные усилия, что позволяет нагружать подвижную часть прибора электрическими контактами и строить на его основе терморегуляторы.

Дилатометрические термометры работают в диапазоне температур от 0 °С до 1000 °С с погрешностью до ±5 %. Из-за большой погрешности дилатометрических устройств их редко используют в качестве термометров. Чаще их используют как терморегуляторы, термовыключатели и тепловые реле.

К достоинствам рассматриваемых устройств следует отнести их дешевизну, надежность и большие перестановочные усилия. Недостаток устройств – малая точность и большая инерционность.

Дополнительные сведения по дилатометрическим термометрам приведены в литературных источниках, представленных в библиографическом списке (см., например, [57]).

Биметаллические термометры

Схема биметаллического термометра приведена на рис. 25.5.

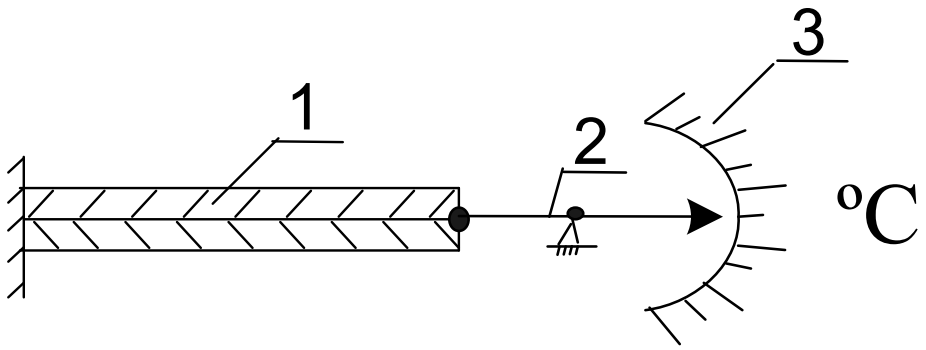


Рис. 25.5. Схема биметаллического термометра:
1 – двухслойная металлическая лента; 2 – стрелка (указатель); 3 – шкала

Биметаллические термометры состоят их двухслойных металлических лент (сваренных или спаянных между собой), образованных материалами с различными коэффициентами линейного температурного расширения. Наибольшее распространение получили латунь (сплав меди и цинка) и инвар (железоникелевый сплав).

При нагревании биметаллических элементов 1 происходит их деформация, которая используется для приведения в действие стрелки 2, перемещающейся вдоль оцифрованной шкалы 3.

Для плоской биметаллической пластины перемещение ее свободного конца при консольном закреплении:

$$x = S\Delta\theta \tag{25.2}$$

$$S = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)l^2}{4h}, \tag{25.3}$$

где x – перемещение свободного конца биметаллической пластины;

S – чувствительность;

$\Delta\theta$ – приращение температуры;

α_1, α_2 – температурные коэффициенты линейного расширения сваренных (или спаянных) пластин;

l – общая длина пластин;

h – общая толщина пластин.

Биметаллические термометры используются в диапазоне температур от 0 до 500 °С. Погрешность измерения температуры такими термометрами велика и может достигать ±5 %. Из-за большой погрешности биметаллические устройства редко используют для измерения температуры. Чаще их применяют в качестве чувствительных элементов в терморегуляторах (например, в утюгах), а также в качестве элементов компенсации температурных погрешностей приборов. К достоинствам рассматриваемых устройств следует отнести их дешевизну, надежность и большие перестановочные усилия, что позволяет нагружать их сравнительно мощными электрическими контактами. К недостаткам следует отнести малую точность и большую инерционность.

В заключение отметим особенности измерения температуры контактным методом с использованием рассмотренных термометров.

Во всех термометрах чувствительный элемент (ЧЭ) соприкасается с контролируемой средой, температура которой измеряется. При этом температура ЧЭ (в идеале) должна совпадать с температурой среды. Совпадение этих температур зависит от многих факторов, в том числе от размеров, формы и материала ЧЭ и от условий передачи тепла от среды к ЧЭ.

Передача тепла может происходить путем конвекции, лучеиспускания и теплопроводности. Теплообмен путем конвекции имеет место при измерении температуры жидкостей и газов.

При измерении температуры твердых тел в основе передачи тепла лежит теплопроводность.

Очевидно, что для улучшения теплообмена между ЧЭ и средой необходимо увеличивать площадь их соприкосновения. При измерении температуры жидкости и газов к этому требованию добавляется необходимость увеличивать теплопередачу путем, например, увеличения скорости обтекания ЧЭ средой.

При изменении температуры исследуемой среды возникают динамические погрешности. Под динамической погрешностью понимают запаздывание в показаниях термометра, вызванное конечной скоростью передачи тепла от исследуемой среды к ЧЭ. Подробно этот вопрос рассмотрен в главе 10 учебного пособия, где рассматривается динамика термочувствительных датчиков, которые выступают в качестве ЧЭ соответствующего термометра.

Более детально с методами контактного измерения температуры и с используемыми при этом термометрами можно ознакомиться по литературным источникам [1; 2; 3; 8; 32; 33; 37; 38; 57–59].

25.3. Пирометры

Пирометрами называют приборы для бесконтактного измерения температуры. Работа пирометров основана на использовании энергии теплового излучения нагретых тел. Оно характеризуется распространением электромагнитных излучений, которые могут восприниматься другими телами. Электромагнитные излучения имеют широкий частотный спектр (от ультрафиолетового до инфракрасного). Пирометры используют все части спектра, но наибольшее распространение получили приборы, работающие в оптической (видимой) и инфракрасной частях спектра.

По принципу действия различают следующие типы пирометров:

1) оптические;
2) радиационные;
3) яркостные;
4) цветовые и некоторые другие.

Оптические пирометры работают в оптической (видимой) части спектра. В этих приборах интенсивность свечения исследуемого тела (температура которого измеряется) сравнивается с интенсивностью свечения нити лампы накаливания.

Радиационные пирометры основаны на измерении интенсивности интегрального (суммарного) излучения во всем спектре (от ультрафиолетового излучения до инфракрасного).

Яркостные пирометры основаны на измерении спектральной интенсивности излучения в определенной части спектра.

Цветовые пирометры основаны на измерении отношения спектральной интенсивности в двух частях спектра.

Ниже приводятся описания оптических и радиационных пирометров.

Оптические пирометры

Схема оптического пирометра приведена на рис. 25.6.

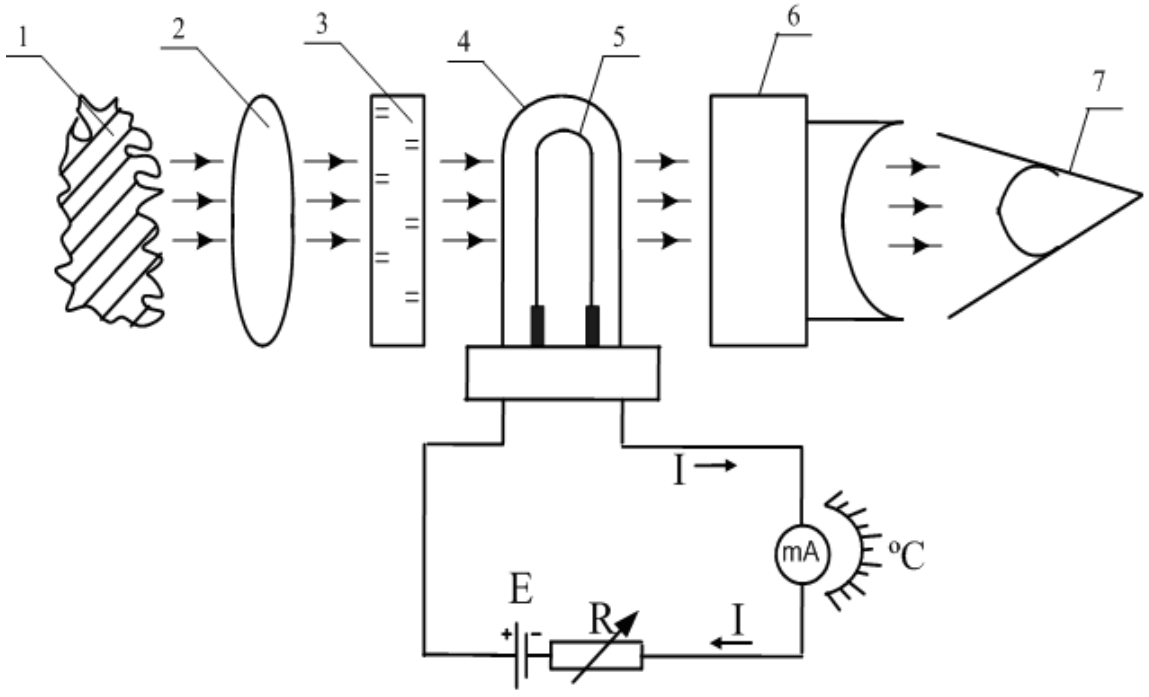


Рис. 25.6. Схема оптического пирометра:
1 – исследуемый объект, температура которого измеряется;
2 – оптическая система; 3 – светофильтр; 4 – термометрическая лампа;
5 – нить накаливания; 6 – окуляр; 7 – глаз оператора;
E – ЭДС источника питания; *R* – переменное сопротивление;
I – ток в цепи; mA – миллиамперметр, проградуированный в градусах Цельсия

Для проведения измерения оператор должен направить пирометр на исследуемый объект, температура которого измеряется. При этом оператор видит одну их трех картинок (рис. 25.7, *a*, рис. 25.7, *b*, рис. 25.7, *c*).

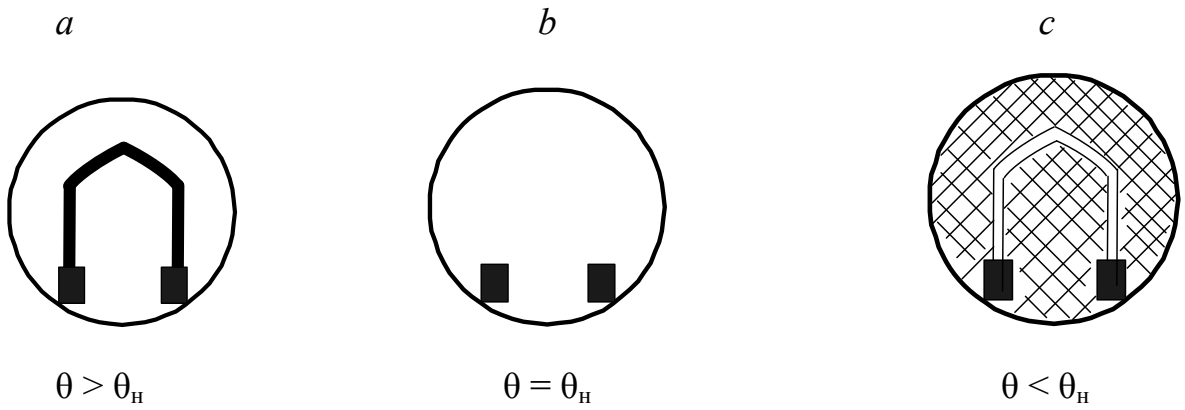


Рис. 25.7. Характерный вид «картинок» при проведении измерений:
$\theta_н$ – температура исследуемого тела; $\theta_н$ – температура нити накаливания;
a – измеряемая температура больше температуры нити накаливания термометрической лампы; *b* – измеряемая температура равна температуре нити накаливания термометрической лампы; *c* – измеряемая температура меньше температуры нити накаливания термометрической лампы

Если температура исследуемого тела 1 больше температуры нити накаливания 5 термометрической лампы 4, то оператор видит в окуляре 6 темную нить на светлом фоне (рис. 25.7, *a*). Яркость свечения нити регулируется переменным сопротивлением *R* (см. рис. 25.6). Оператор изменяет сопротивление *R* до тех пор, пока нить не сольется с фоном, который дает исследуемый объект (рис. 25.7, *b*). В этом случае температура нити накаливания равна температуре исследуемого объекта, что достигается при вполне определенном токе *I*, протекающем по нити накаливания и по миллиамперметру под воздействием ЭДС источника питания.

При измеряемой температуре меньшей температуры нити накаливания оператор видит в окуляре светлую нить на темном фоне (рис. 25.7, *c*). В этом случае с помощью переменного сопротивления *R* уменьшается ток *I* до тех пор, пока нить накаливания не сольется с фоном от объекта исследования.

Отсчет показаний проводится по миллиамперметру (mA), проградуированному в градусах Цельсия. Градуировка проводится по абсолютному черному телу, что приводит к дополнительным погрешностям из-за неполноты излуче-

ния реальных физических тел (излучения реальных физических тел меньше излучения абсолютно черного тела).

Нижний предел измерения оптических пирометров органичен порогом светимости тел при нагревании. Тела начинают светиться при температуре около 600 °С. При этой температуре появляется слабое малиновое свечение, которое трудно уловить и трудно сравнить со свечением нити накаливания. Во избежание значительных погрешностей нижний предел измерения выбирается больше порога светимости. Как правило, нижний предел измерения оптических пирометров равен 800 °С.

Нить термометрической лампы допустимо накаливать до определенной температуры (обычно не более 1400 °С). Для увеличения верхнего предела измеряемых температур в пирометр вводится светофильтр 3 (иногда – несколько светофильтров с разной оптической плотностью для уменьшения светимости исследуемого тела в определенное число раз).

Промышленность выпускает различные типы оптических пирометров, с разными пределами измерения. Например, известен оптический пирометр типа ОППИР-017 с диапазоном от 800 до 6000 °С. Диапазон измерения разбит на пять следующих поддиапазонов:

(800–1400) °С – 1-й поддиапазон измерений;

(1400–3000) °С – 2-й поддиапазон измерений;

(3000–4000) °С – 3-й поддиапазон измерений;

(4000–5000) °С – 4-й поддиапазон измерений;

(5000–6000) °С – 5-й поддиапазон измерений.

Измерения на 1-м поддиапазоне проводятся без светофильтра; измерения на 2-м поддиапазоне проводятся с использованием светофильтра Ф1; на 3-м поддиапазоне – со светофильтром Ф2; на 4-м поддиапазоне – со светофильтром Ф3 и на 5-м – со светофильтром Ф4. Погрешность измерения зависит от поддиапазона измерений и составляет от 1,0 до 2,0 %.

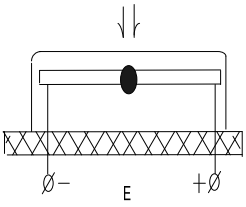
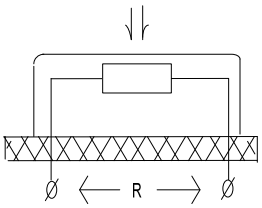
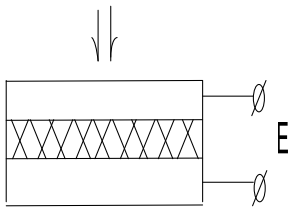
Описание и технические характеристики оптического пирометра «Проминь» приведены в прил. 14.

Радиационные пирометры суммарного излучения

Радиационные пирометры этого типа называют также пирометрами интегрального или полного излучения. Приемниками излучения в радиационных пирометрах суммарного излучения могут быть термобатареи (набор термопар); термосопротивления, в том числе полупроводниковые термисторы; пироэлектрические кристаллы (табл. 25.3). Приемники суммарного или полного излучения отличаются тем, что их спектральная чувствительность постоянна в широком диапазоне длин волн от дальней инфракрасной области до ближней ультрафиолетовой.

Таблица 25.3

Основные характеристики приемников суммарного (полного) излучения

Тип	**Термобатареи**	**Термосопротивления**	**Пироэлектрические приемники**
Принципиальная схема			
Инерционность, с	10^{-2}	10^{-3}	10^{-7}
Достоинства	Высокая временная стабильность	Большая чувствительность	Малая инерционность
Недостатки	Большая инерционность	Необходимость источника питания	Потеря работоспособности выше точки Кюри

Термобатареи выполняются на основе термопар, соединенных последовательно (до 20 термопар). Их горячие спаи располагаются на малом участке поверхности, на которой фокусируется излучение. Выходным параметром термобатареи является термоЭДС «±E».

Термосопротивления (полное наименование – «термопреобразователи сопротивления») изготавливаются из металлической фольги (обычно из материала пластины) либо из полупроводниковых материалов (термистов). В иностранной литературе термопреобразователи сопротивления (ТС) обычно назы-

вают *болометрами*. В отечественной технической литературе термин «болометр» иногда используется для обозначения полупроводниковых ТС. Выходным параметром ТС является активное сопротивление *R*.

Пироэлектрические приемники излучения – это кристаллы, в которых при изменении температуры появляется эффект спонтанной поляризации. Поэтому эти приемники излучения не требуют дополнительных источников питания. Пироэлектрические свойства проявляются в таких материалах, как монокристаллы триглицинсульфата и ниобата бария-стронция, монокристаллы и керамика титаната бария и некоторых других. При температуре выше точки Кюри поляризация исчезает. Для монокристаллов триглицинсульфата точка Кюри соответствует температуре +49 °С.

Фотоэлектрические приемники излучения (широко используемые в пирометрии) для пирометров суммарного излучения не применяются, т. к. их спектральная чувствительность неодинакова для различных длин волн и наиболее велика в видимой и ближней инфракрасной области спектра.

Схема радиационного пирометра суммарного излучения приведена на рис. 25.8.

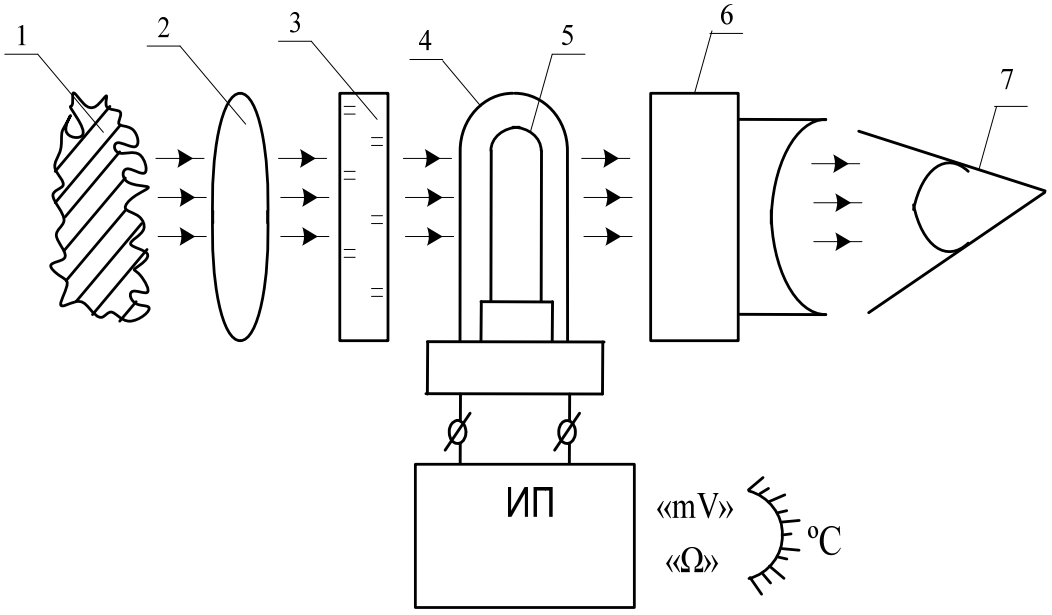


Рис. 25.8. Схема радиационного пирометра суммарного излучения:
1 – исследуемый объект, температура которого измеряется; 2 – оптическая система; 3 – светофильтр; 4 – термометрическое устройство; 5 – термочувствительный элемент; 6 – окуляр; 7 – глаз оператора; ИП – измерительный прибор (милливольтметр «mV» или омметр «Ω» в зависимости от типа термочувствительного элемента)

Работа описываемого пирометра протекает в следующей последовательности. Оператор через окуляр 6 направляет прибор на исследуемый объект. При этом суммарное излучение от исследуемого объекта 1 поступает на оптическую систему 2, которая направляет его через светофильтр 3 (вместо светофильтра может использоваться диафрагма) на приемник излучения 5. Приемник излучения может представлять собой, как уже отмечалось, батарею термопар, термосопротивление или пироэлектрический элемент.

Приемник излучения преобразует излучение в электрический сигнал (в темроЭДС, или в пироЭДС, или в электрический параметр (сопротивление)). Полученный электрический сигнал подается на электроизмерительный прибор ИП, проградуированный в единицах температуры (в градусах Цельсия). При использовании параметрических датчиков излучение преобразуется в сопротивление, для измерения которого может быть использован один из методов измерений сопротивления, описанных в главе 24 учебного пособия. Чаще используются мостовые методы измерения (в том числе автоматические мосты), но могут использоваться и обычные омметры, проградуированные в градусах Цельсия. При измерении термоЭДС и пироЭДС используются автоматические потенциометры, но могут быть применены стандартные аналоговые и цифровые милливольтметры, проградуированные в градусах Цельсия.

Конструктивно оптическая система, светофильтр, диафрагма, термочувствительный элемент и окуляр, как правило, составляют самостоятельный блок пирометра, который принято называть «телескоп». Измерительные приборы (ИП) образуют отдельный, самостоятельный блок пирометра.

Принципиально показания радиационного пирометра не должны зависеть от расстояния до исследуемого объекта при условии, что изображение излучающей поверхности полностью перекрывает термочувствительный элемент. Однако при близком расположении телескопа от излучающей поверхности происходит нагрев его корпуса, что вызывает дополнительные температурные погрешности или даже может вывести телескоп из строя. При большом удалении начинает сказываться столб атмосферного воздуха между объектом и теле-

скопом, который поглощает часть излучения. Особенно значительно возрастает поглощение излучения, если в воздухе присутствует пыль, дым, пар, углекислый газ или окись углерода. Наличие стекла между телескопом пирометра и излучателем также увеличивает погрешность измерения.

Нижний предел измеряемых температур для радиационных пирометров суммарного излучения составляет от 20–30 °С до 100–400 °С. Верхний предел измерения может быть от сотен до нескольких тысяч градусов Цельсия.

Для измерения температур в широком диапазоне выпускаются радиационные пирометры нескольких типов. Среди них, например, радиационные пирометры типа РАПИР с телескопом типа Тера-50, позволяющие бесконтактно измерять температуру от +100 до 400 °С с погрешностью от 4 до 8 %.

В прил. 15 приводится описание телескопа пирометра суммарного излучения типа ПИРС-019 с усилителем для бесконтактного измерения радиационной температуры поверхностей нагретых тел в диапазоне от +20–300 °С с погрешностью от ± 2,0 до ± 4,5 °С.

Более подробно с методами бесконтактного измерения температуры и с используемыми при этом средствами измерений можно ознакомиться по литературным источникам [1–3; 32–38; 57–59].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительно ограниченный объем учебного пособия не позволил рассмотреть все вопросы, возникающие при изучении метрологии и технических измерений. Степень важности опущенных или кратко рассмотренных вопросов различна. Одни из них носят чисто познавательный характер (например, история развития метрологии), другие – производственный (например, технология изготовления средств измерений), третьи имеют сугубо теоретический аспект (например, теоретические основы случайных погрешностей). При необходимости углубленные сведения по затронутым вопросам можно найти в литературных источниках, приведенных в обширном библиографическом списке [1–61].

Вопросы истории развития метрологии более подробно, чем в учебном пособии, изложены в литературе [10; 11].

Теоретическая метрология и вопросы обработки результатов измерений рассмотрены сравнительно кратко. При необходимости информацию в данных областях можно найти в [10; 11; 13; 27–30].

Поверка средств измерений, их калибровка, метрологическая аттестация и градуировка изучаются, обычно, в прикладной метрологии, и в настоящем пособии этим вопросам уделено мало внимания. Дополнительные сведения об этом приведены в [22].

Вопросы погрешностей средств измерений и погрешностей результатов измерений рассмотрены в пособии более или менее детально. Углубленные сведения по погрешностям можно почерпнуть в [7–11; 13; 19–21].

В учебном пособии рассмотрены лишь основные типы датчиков, что естественно при современном их многообразии. Дополнительные сведения о датчиках, о принципах их построения, применения и сопряжения с ЭВМ приведены в [3; 8; 32–34; 37; 38; 50].

Мостовые измерительные схемы рассмотрены в данном учебном пособии лишь с одной точки зрения – с точки зрения включения в них параметрических

датчиков. Более общий подход к мостовым измерительным схемам изложен в [35; 60].

Дополнительные сведения по электроизмерительным приборам можно почерпнуть в [6–9; 35; 36; 61].

Метрология и технические измерения относятся к областям, которые стремительно развиваются. Это приводит к тому, что учебники и учебные пособия быстро устаревают. Отсюда большое значение приобретает знакомство студентов с периодической литературой. Для облегчения поиска необходимой информации в библиографическом списке приведены ссылки на журнальные статьи [39; 40; 43].

Точностными характеристиками средств измерений и результатов измерений в настоящее время является погрешности. Существует предложение перейти на новую точностную характеристику – «неопределенность». В учебном пособии показано, что такой переход (от «погрешностей результатов измерений» к «неопределенностям результатов измерений) возможен при рассмотрении результатов измерений. Что же касается средств измерений, то переход от их погрешностей к неопределенностям затруднен (если вообще возможен). Нормативные документы по неопределенности, а также периодические издания по этой теме приведены в библиографическом списке [39–43].

Методы измерения электрических и неэлектрических величин и используемые при этом средства измерений рассмотрены сравнительно кратко. Дополнительные сведения по методам и средствам измерений можно найти в литературе [1–9; 18; 19; 33–37; 57; 58; 61–65].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Основы метрологии и электрические измерения**: учебник для вузов / под ред. Е.М. Душина. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

2. **Измерения электрических и неэлектрических величин**: учеб. пособие / под ред. Н.Н. Евтихаева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

3. **Туричин, А.М.** Электрические измерения неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / А.М. Туричин. – М.; Л. : Энергия, 1966. – 690 с.

4. **Методы электрических измерений**: учеб. пособие для вузов / под ред. Э.И. Цветкова. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

5. **Куликовский, К.Л.** Методы и средства измерений: учеб. пособие для вузов / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

6. **Метрология и радиоизмерения**: учебник для вузов / под ред. В.И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2003. – 526 с.

7. **Раннев, Г.Г.** Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 5-е изд., стер. – М. : Издат. центр «Академия», 2008. – 336 с.

8. **Миронов, Э.Г.** Метрология и технические измерения: учеб. пособие / Э.Г. Миронов, Н.П. Бессонов. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2005. – 299 с.

9. **Дворяшин, Б.В.** Метрология и радиоизмерения: учеб. пособие / Б.В. Дворяшин. – М. : Издат. центр «Академия», 2005. – 304 с.

10. **Кузнецов, В.А.** Основы метрологии: учеб. пособие / В.А. Кузнецов, Г.А. Ялунина. – М. : Изд-во стандартов, 1998. – 336 с.

11. **Кузнецов, В.А.** Метрология / В.А. Кузнецов, Л.К. Исаев, И.А. Шайко. – М. : Стандартинформ, 2005. – 300 с.

12. **Шишкин, И.Ф.** Теоретическая метрология: учебник для вузов / И.Ф. Шишкин. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.

13. **Маликов, М.Ф.** Основы метрологии / М.Ф. Маликов. – М. : Комитет по делам мер и измерительных приборов, 1949. – 290 с.

14. **Марков, Н.С.** Основы теории обработки результатов измерений / Н.С. Марков. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 176 с.

15. **Миронов ,Э.Г.** Основы метрологии: учеб. пособие для вузов / Э.Г. Миронов. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2000. – 113 с.

16. **Сергеев, А.Г.** Метрология: учеб. пособие для вузов / А.Г. Сергеев, В.В. Крохин. – М. : Логос, 2000. – 408 с.

17. **Лифиц, И.М.** Основы стандартизации, метрологии и сертификации: учебник для вузов / И.М. Лифиц. – М. : Юрайт, 2001. – 286 с.

18. **Тартаковский, Д.Ф.** Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учебник для вузов / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М. : Высшая школа, 2001. – 205 с.

19. **Радкевич, Я.М.** Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе, Б.И. Лактионов. – М. : Высшая школа, 2004. – 767 с.

20. **Земельман, М.А.** Метрологические основы технических измерений / М.А. Земельман. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 288 с.

21. **Рабинович, С.Г.** Погрешности измерений / С.Г. Рабинович. – Л. : Энергия, 1978. – 262 с.

22. **Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники** / под ред. В.А. Кузнецова. – М. : Радио и связь, 1990. – 240 с.

23. **Багаев, Е.** Всякое дело мера красит / Е. Багаев // Наука и жизнь. 1998. № 2. С. 102–107.

24. **Власов, А.Д.** Единицы физических величин в науке и технике: справочник / А.Д. Власов, Б.П. Мурин. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.

25. **Деньгуб, В.М.** Единицы величин: словарь-справочник / В.М. Деньгуб, В.Г. Смирнов. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 240 с.

26. **Основные термины в области метрологии**: словарь-справочник / под ред. Ю.В. Тарбеева. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 113 с.

27. **Балакирев, В.С.** Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В.С. Балакирев, Е.Г. Дудников, А.М. Цирлин. – М. : Энергия, 1967. – 206 с.

28. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей: учебник для вузов / Е.С. Венцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

29. **Диткин, В.А.** Справочник по операционному исчислению / В.А. Диткин, А.П. Прудников. – М. : Высшая школа, 1995. – 260 с.

30. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров: пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – 720 с.

31. **Бронштейн, И.Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М. : Наука, 1964. – 608 с.

32. **Левшина, Е.С.** Электрические измерения физических величин. Измерительные преобразователи / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.

33. **Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC**: пер. с англ. / под ред. У. Топкинса. – М. : Мир, 1992. – 592 с.

34. **Васин, Н.Н.** Устройства связи с объектом автоматизации на базе IBM PC / Н.Н. Васин. – Самара : СГАУ, 1994. – 56 с.

35. **Харт, Х.** Введение в измерительную технику: пер. с нем. / Х. Харт. – М. : Мир, 1999. – 391 с.

36. **Классен, К.Б.** Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике: пер. с англ. / К.Б. Классен. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.

37. **Агейкин, Д.И.** Датчики контроля и регулирования / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.

38. **Васин Н.Н.** Датчики автоматизированных величин: учеб. пособие / Н.Н. Васин. – Самара : РИП «Кредо», 1987. – 34 с.

39. **Миронов, Э.Г.** Погрешности и неопределенности измерений / Э.Г. Миронов, В.А. Фирсанов // Практика приборостроения, 2004. № 2. С. 79–84.

40. **Кузнецов, В.П.** Сопоставительный анализ погрешности и неопределенности измерений / В.П. Кузнецов // Измерительная техника. 2003. № 8. С. 21–27.

41. **Руководство по выражению неопределенности измерения**: пер. с англ / под ред. В.А. Слаева. – СПб. : ВНИИМ, 1999. – 20 с.

42. **РМГ 43–2001. ГСОЕИ.** Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». Рекомендации межгосударственные. Введ. с 01.01.2003 впервые. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 38 с.

43. **Тарбеев, Ю.В.** Проблемы применения в России межгосударственного руководства по выражению неопределенности измерений / Ю.В. Тарбеев, А.В. Слаев, А.Г. Чуновкина // Измерительная техника. – 1997. №2. С. 69–72.

44. **ГОСТ 8.009–84.** ГСИ. Нормирование и использование метрологических характеристик средств измерений. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 34 с.

45. **ГОСТ 8.401–80.** ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.

46. **ГОСТ 8.207–76. ГСИ.** Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 9 с.

47. **ГОСТ 8.508–84. ГСИ.** Метрологические характеристики средств измерений и точностные характеристики средств автоматизации ГСП. Общие методы оценки и контроля. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 52 с.

48. **МИ 2083–90.** ГСИ. Измерения косвенные. Определения результатов из-мерений и оценивание их погрешностей. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.

49. **ГОСТ 8.417–2002.** ГСОЕИ. Единицы величин. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 28 с.

50. **ГОСТ Р 8.585–2001.** ГСОЕИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М. : Изд-во стандартов, 2002. – 36 с.

51. **ГОСТ 6651–84.** Термообразователи сопротивления ГСП. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 34 с.

52. **РД 50–453–84.** Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчета: методические указания. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 17 с.

53. **РМГ 29–99 ГСИ.** Метрология. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 28 с.

54. **Р 50.2.038–2004.** Рекомендации по метрологии. ГСОЕИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений. – М. : Стандартинформ, 2005. – 7 с.

55. **Метрология и электроизмерения в телекоммуникационных системах:** учебник для вузов / под ред. В.И. Нефедова. – М. : Высшая школа, 2001. – 383 с.

56. **ГОСТ 1494–77.** Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. Введен с 01.07.1978 взамен ГОСТ 1494–61. Переиздан с изменениями в марте 1983 г. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 36 с.

57. **Хоффман, Д.** Техника измерений и обеспечение качества: справочная книга / пер. с нем.; под ред. Л.М. Закса, С.С. Кивилиса. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.

58. **Мейдза, Ф.** Электронные измерительные приборы и методы измерения: пер. с англ. / Ф. Мейдза. – М. : Мир, 1990. – 535 с.

59. **Чистяков, В.С.** Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В.С. Чистяков. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

60. **Воробьев, С.А.** Электрические измерения неэлектрических величин. Вып. 2. Основы теории и расчета неуравновешенных мостовых схем с датчиками сопротивления / С.А. Воробьев. – Свердловск : УПИ им. С.М. Кирова, 1975. – 232 с.

61. **Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника**: учеб. пособие / под ред. К.К. Кима. – СПб. : Питер, 2006. – 386 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Статистические таблицы

Таблица П. 1.1

Интеграл вероятности $\Phi(T) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^T e^{-\frac{t^2}{2}} dt$

T	$\Phi(T)$	T	$\Phi(T)$	T	$\Phi(T)$	T	$\Phi(T)$
0,00	0,0000	0,75	0,5467	1,50	0,8664	2,25	0,9756
0,05	0,0399	0,80	0,5763	1,55	0,8789	2,30	0,9786
0,10	0,0797	0,85	0,6047	1,60	0,8904	2,35	0,9812
0,15	0,1192	0,90	0,6319	1,65	0,9011	2,40	0,9836
0,20	0,1585	0,95	0,6579	1,70	0,9109	2,45	0,9857
0,25	0,1974	1,00	0,6827	1,75	0,9199	2,50	0,9876
0,30	0,2358	1,05	0,7063	1,80	0,9281	2,60	0,9907
0,35	0,2737	1,10	0,7287	1,85	0,9357	2,70	0,9931
0,40	0,3108	1,15	0,7499	1,90	0,9426	2,80	0,9949
0,45	0,3473	1,20	0,7699	1,95	0,9488	2,90	0,9963
0,50	0,3829	1,25	0,7887	2,00	0,9545	3,00	0,99730
0,55	0,4177	1,30	0,8064	2,05	0,9596	3,81	0,99806
0,60	0,4515	1,35	0,8230	2,10	0,9643	3,20	0,99863
0,65	0,4843	1,40	0,8385	2,15	0,9684	3,50	0,99953
0,70	0,5161	1,45	0,8529	2,20	0,9722	4,00	0,99994

Таблица П. 1.2

Значение коэффициентов Стьюдента *t* в зависимости от доверительной вероятности *P* и числа измерений *n*

n	Доверительная вероятность *P*					
	0,8	**0,9**	**0,95**	**0,98**	**0,99**	**0,999**
4	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
5	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	8,61
6	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03	6,86
7	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	5,96
8	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50	5,41
9	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	5,04
10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	4,78
11	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17	4,59
12	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11	4,44
13	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06	4,32
14	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01	4,22
15	1,35	1,76	2,15	2,62	2,98	4,14
16	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95	4,07
17	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92	4,02
18	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90	3,97
19	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88	3,92
20	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86	3,88
21	1,33	1,73	2,09	2,53	2,85	3,85
22	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83	3,82
23	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82	3,79
24	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81	3,77
25	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80	3,75
26	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79	3,73
27	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78	3,71
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77	3,69
29	1,31	1,70	2,05	2.47	2,76	3,67
30	1,31	1,70	2,05	2,46	2,76	3,66
31	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75	3,65
40	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70	3,55
60	1,30	1,67	2,00	2,39	2,66	3,46
120	1,29	1,66	1,98	2,36	2,62	3,37
∞	1,28	1,65	1,96	2,33	2,58	3,29

Таблица П. 1.3

Значение коэффициентов γ_1 и γ_2в зависимости от доверительной вероятности *P* и числа измерений *n*

n	Доверительная вероятность *P*							
	0,99		0,98		0,95		0,90	
	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2	γ_1	γ_2
4	0,48	6,47	0,51	5,11	0,57	3,73	0,62	2,92
5	0,52	4,39	0,55	3,67	0,60	2,87	0,65	2,37
6	0,55	3,48	0,58	3,00	0,62	2,45	0,67	2,09
7	0,57	2,98	0,60	2,62	0,64	2,20	0,69	1,92
8	0,59	2,66	0,62	2,38	0,66	2,04	0,71	1,80
9	0,60	2,44	0,63	2,21	0,68	1,92	0,72	1,71
10	0,62	2,28	0,64	2,08	0,69	1,83	0,73	1,65
11	0,63	2,15	0,66	1,98	0,70	1,76	0,74	1,59
12	0,64	2,06	0,67	1,90	0,71	1,70	0,75	1,55
13	0,65	1,98	0,68	1,83	0,72	1,65	0,76	1,52
14	0,66	1,91	0,69	1,78	0,73	1,61	0,76	1,49
15	0,67	1,85	0,69	1,73	0,73	1,58	0,77	1,46
16	0,68	1,81	0,70	1,69	0,74	1,55	0,78	1,44
17	0,68	1,76	0,71	1,66	0,75	1,52	0,78	1,42
18	0.69	1,73	0,71	1,63	0,75	1,50	0,79	1,40
19	0,70	1,69	0,72	1,60	0,76	1,48	0,79	1,39
20	0,70	1,67	0,72	1,58	0,76	1,46	0,79	1,37
21	0,71	1,64	0,73	1,56	0,77	1,44	0,80	1,36
22	0,71	1,62	0,73	1,54	0,77	1,43	0,80	1,35
23	0,72	1,59	0,74	1,52	0,77	1,42	0,81	1,34
24	0,72	1,58	0,74	1,50	0,78	1,40	0,81	1,33
25	0,73	1.56	0,75	1,49	0,78	1,39	0,81	1,32
26	0,73	1,54	0,75	1,47	0,78	1,38	0,82	1,31
27	0,73	1,53	0,76	1,46	0,79	1,37	0,82	1,30
28	0,74	1,51	0,76	1,45	0,79	1,36	0,82	1,29
29	0,74	1,50	0,76	1,44	0,79	1,35	0,82	1,29
30	0,74	1,49	0,77	1,43	0,80	1,34	0,83	1,28
31	0,75	1,48	0,77	1,42	0,80	1,34	0,83	1,27
40	0,77	1,39	0,79	1,34	0,82	1,28	0,85	1,23
50	0,79	1,34	0,81	1,30	0,84	1,24	0,86	1,19
60	0,81	1,30	0,82	1,27	0,85	1,22	0,87	1,18
70	0,82	1,27	0,84	1,24	0,86	1,20	0,88	1,16
80	0,83	1,25	0,84	1,22	0,87	1,18	0,89	1,15
90	0,84	1,23	0,85	1,21	0,87	1,17	0,89	1,14
100	0,85	1,22	0,86	1,20	0,88	1,16	0,90	1,13
200	0,89	1,15	0,90	1,13	0,91	1,11	0,93	1,09

Таблица П. 1.4

Значения коэффициентов W_T в зависимости от числа измерений *n* и доверительной вероятности *P* (табличный метод выявления промахов)

n	Доверительная вероятность *P*			
	0,90	**0,95**	**0,975**	**0,99**
4	1,65	1,69	1,71	1,72
5	1,79	1,87	1,92	1,96
6	1,89	2,00	2,07	2,13
7	1,97	2,09	2,18	2,27
8	2,04	2,17	2,27	2,37
9	2,10	2,24	2,35	2,46
10	2,15	2,29	2,41	2,54
12	2,23	2,39	2,52	2,66
14	2,30	2,46	2,60	2,76
16	2,35	2,52	2,67	2,84
18	2,40	2,58	2,73	2,90
20	2,45	2,62	2,78	2,96
22	2,49	2,66	2,82	3,01
24	2,52	2,70	2,86	3,05
50	–	–	–	3,35
75	–	–	–	3,52
100	–	–	–	3,60

Таблица П. 1.5

Значение квантилей нормального распределения *K* в зависимости от доверительной вероятности *P*

P	**K**	**P**	**K**	**P**	**K**	**P**	**K**
0,68	1,00	0,85	1,44	0,91	1,69	0,97	2,16
0,80	1,28	0,86	1,47	0,92	1,75	0,98	2,32
0,81	1,31	0,87	1,51	0,93	1,81	0,99	2,58
0,82	1,34	0,88	1,55	0,94	1,88	0,997	3,00
0,83	1,37	0,891	1,60	0,95	1,96	0,999	3,29
0,84	1,40	0,90	1,64	0,96	2,05	–	–

Таблица П. 1.6

Необходимое число измерений для получения отношения $\frac{\Delta\bar{x}}{\sigma}$

с доверительной вероятностью *P*

$\frac{\Delta\bar{x}}{\sigma}$	**Доверительная вероятность *P***					
	0,5	**0,7**	**0,9**	**0,95**	**0,99**	**0,999**
1,0	2	3	5	7	11	17
0,50	3	6	13	18	31	50
0,40	4	8	19	27	46	74
0,30	6	13	32	46	78	127
0,20	13	29	70	99	171	277
0,10	47	169	273	387	668	1089
0,05	183	431	1084	1540	2659	4338
0,01	4543	10732	27161	38416	66358	108307

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Критерий согласия по ГОСТ 8.508 – 84

П. 2.1. Общие положения

При обработке результатов измерений существенное значение имеет вопрос о том, подчиняется или нет результат нормальному закону распределения. Эта задача решается с помощью критериев согласия. Известно несколько критериев согласия: χ^2 (критерий Пирсона) [12; 14; 21], критерий Романовского, критерий А.Н. Колмогорова, составной критерий [21; 46], критерий на основе коэффициентов асимметрии и эксцесса [47] и др.

Критерий Пирсона применяется при большом числе измерений (n>50); при числе измерений от 16 до 50 может быть использован составной критерий, а при числе измерений от 10 до 200 используется критерий на основе коэффициентов асимметрии и эксцесса. Именно последний из указанных критериев, как пригодный при малом числе измерений и практически удобный, описывается в данном параграфе учебного пособия [47].

П. 2.2. Проверка нормальности распределения результатов измерений по значению коэффициентов асимметрии и эксцесса

П. 2.2.1. Коэффициент асимметрии оценивается по формуле

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{\sigma^3(x)}, \qquad (П.2.1)$$

где

$$\mu_3 = \frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}(x_i - \overline{x})^3, \qquad (П.2.2)$$

$$\sigma^3(x) = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2\right]^{\frac{3}{2}}, \qquad (П.2.3)$$

x_i – результат i-го измерения;

$\overline{x}$ – среднее арифметическое значение результатов измерений;

n – число измерений.

П.2.2.2. Точность оценки коэффициента асимметрии определяют из выражения

$$\sigma_{\gamma 1} = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} \qquad (П.2.4)$$

или находят из табл. П.2.1.

Таблица П.2.1

n	10	20	30	40	50	60	100	200
$\sigma_{\gamma 1}$	0,62	0,49	0,42	0,37	0,33	0,30	0,24	0,17

П.2.2.3. Распределение результатов измерений в первом приближении подчиняется нормальному распределению, если выполняется первое условие:

$$\gamma_1 < 3\sigma_{\gamma 1}\,. \qquad (П.2.5)$$

П.2.2.4. Распределение результатов измерений не подчиняется нормальному распределению, если условие (П2.5) не выполняется, т. е.

$$\gamma_1 \geq 3\sigma_{\gamma 1}\ . \qquad (П.2.6)$$

П.2.2.5. Коэффициент эксцесса оценивается по формуле

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4(x)} - 3\,, \qquad (П.2.7)$$

где μ_4 – четвертый центральный момент, определяемый по формулам

$$\mu_4 = \frac{n(n^4 - 2n + 3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot m_4 - \frac{3n(2n-3)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \cdot m_2^2\,, \qquad (П.2.8)$$

$$m_4 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4\ , \qquad (П.2.9)$$

$$m_2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\ , \qquad (П.2.10)$$

$$\sigma^4(x) = \left[\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2\right]^2. \qquad (П.2.11)$$

П.2.2.6. Точность оценки коэффициента эксцесса определяют из выражения

$$\sigma_{\gamma 2} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n-1)^2 \cdot (n+3)(n+5)}} \qquad \text{(П.2.12)}$$

или находят из табл. П.2.2.

Таблица П.2.2

n	10	30	60	100	200
$\sigma_{\gamma 2}$	0,92	0,75	0,63	0,48	0,34

П.2.2.7. Распределение предварительно считается нормальным, если выполняется второе условие:

$$\gamma_2 < 3\sigma_{\gamma 2} . \qquad \text{(П.2.13)}$$

П.2.2.8. Распределение считается отличным от нормального, если условие (П.2.12) не выполняется, т. е.

$$\gamma_2 \geq 3\sigma_{\gamma 2} . \qquad \text{(П.2.14)}$$

П.2.2.9. Распределение считается нормальным, если выполняются одновременно оба условия: ((П.2.5) и (П.2.13)), и распределение считается отличным от нормального, если не выполняется хотя бы одно из условий (или (П.2.5), или (П.2.13)).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Характеристики датчиков

Таблица П.3.1

Реостатные датчики угла поворота [37]

Технические данные	Тип датчика			
	МУ-62	**МУ-63**	**МУ-65**	**МУ-66**
Диапазон изменения рабочего угла поворота, град	±10; ±15	±12	±12	±12
Полный угол поворота ползунка, град	60	±35	±64	±32
Сопротивление реостата, Ом	250	—	1200	1200
Габаритные размеры, мм	33×77×53	33×77×53	45×35×31	45×35×31
Вес, г	450	450	50	50
Основная погрешность, град	±0,3; ±0,9	±0,15	±0,7	±0,7
Статическая характеристика преобразования	Линейная	Линейная	Линейная	Линейная

Таблица П.3.2

Датчики контактного сопротивления с угольными дисками [37]

Технические данные	**Тип датчика**	
	УММ-1	**УММ-3**
Верхний предел диапазона измерения сил, т	0,2; 0,3; 0,6; 1,0	2; 3; 5; 10; 20; 50
Нижний предел диапазона измерения сил, % от верхнего	15	15
Собственная частота датчика, Гц	10 000	10 000
Рабочий диапазон изменения сопротивления столбика, %	30	30
Величина предварительного сжатия столбика, кГс	15–20	15–20
Число дисков n, диаметр d и толщина S дисков, мм	$n = 7$; $d = 8$; $S = 1$	$n = 7$; $d = 8$; $S = 1$
Допустимая нагрузка, % от номинальной	200	100
Допустимая температура датчика, ^{0}C	+120	+120
Основная погрешность, %	±7	±10

Таблица П.3.3

Тензометрические датчики деформаций [38]

Тип тензорезистора	**Вид измерений**	**Предел измерения деформации, %**	**Диапазон рабочих температур, ^{0}C**	**Коэффициент тензочувствительности**	**Срок службы, лет**
ЛХ-364		±0,3	–253…+50	3,9–4,5	12
ЛХ-352	Статодинамический	±1,0	–196…+50	1,8–2,2	8
ВТ-356		±3,5	±50	1,8–2,2	7
ВТ-358		±1,0	–253…+50	1,8–2,2	12
ЕТ-286		±0,3	+3…+290	1,8–2,2	12

Таблица П.3.4

Терморезисторные датчики (термопреобразователи сопротивления, ТС) [59]

Тип датчика	Пределы измерения, ^{0}C	Номинальная статическая характерис-тика преобразо-вания	Условное давление среды, МПа	Показатель тепловой инерции, с, не более	Материал защитной арматуры	Примечание
ТСП-0281	–50…+120	50П	0,4	10	Медь М1	Для измерения температуры твердых тел. Герметичный
ТСП-365-01	–2…+32	Индивидуальная	60	0,5	12Х18Н10Т	Для измерения температуры морской воды
ТСП-5081-01	–50…+200	100П	32	9	08Х13	Для измерения температуры агрессивных сред
ТСМ-275-01	–50…+150	100М	6,4	60	08Х13	Для измерения температуры природного газа
ТСМ-0979	–40…+120	50М	–	9	Латунь Л63 или Л96	Для измерения температуры малогабаритных подшипников

Продолжение таблицы П.3.4

ТСМ-0879	+50…+200	50М	–	40	Х23Ю5	Для измерения температуры жидких и газообразных сред
ТСМ-8052	+200…+600	100П	0,16	10	08Х18Н10Т	Для измерения температуры в испытательных камерах

Таблица П.3.5

Индуктивные датчики давления [38]

Тип датчика	**Предел измерения, 10^5 Па**	**Допустимое рабочее давление, 10^5 Па**	**Основная погрешность, %**	**Температурный диапазон, ^{0}С**	**Выходной сигнал, В**
ДРИ-088	1,25 2,5 5,0 10,0	60	0,5 … 1,0	± 50	0 … 6,0
С-041	0,3 0,6 1,25 2,5 5,0	10	0,5 … 1,5	± 100	0 … 6,0
ДРИ-086	1,25	10	2,0	–	0 … 6,0
С-050	1,25	30	3,0	0 … +35	0 … 6,0

Таблица П.3.6

Емкостные датчики индикаторов уровня типа ЭИУ-2 [59]

Конструкция емкостного датчика	**Верхние пределы измерения, м**	**Покрытие электродов датчика**	**Характеристики измеряемой среды**			
			Давление, МПа	**Температура, ^{0}С**	**Физическое состояние**	**Электрическая проводимость**
Стержневая	1; 1,6; 2; 2,5	Резина	2,5	0 … +50	Жидкость	Электропроводная
Пластинчатая	1; 1,6; 2,5	Фторопласт	2,5	–40…+200	Жидкость	Электропроводная
Кабельная	3; 4; 6; 10	Полиэтилен	1,0	–40…+80	Жидкость	Электропроводная
Тросовая	4; 6; 10; 16; 20	Без покрытия	2,5	–40…+200	Жидкость или сыпучий материал	Неэлектропроводная ($\varepsilon \le 5$)

Таблица П.3.7

Термоэлектрические датчики (термопары (ТП)) [59]

Тип термопреобразователя	**Номинальная статическая характеристика преобразования**	**Диапазон измеряемых температур, ^{0}C**	**Показатель тепловой инерции, с**	**Длина погружаемой части, м**	**Материал защитной арматуры**	**Примечание**
ТВР-0877	ВР (А) – 1	300–1800	10	от 0,16 до 0,5	Молибден	Для измерения температуры в водородных электропечах
ТПР-0573	ПР (В)	300–1500	60	от 1,25 до 2,5	Карбид кремния	Для измерения температуры горячего дутья доменных печей
ТПП-0679	ПП (S)	0–1300	90	от 0,32 до 2	Корунд или Al_2O_3 +1 % TiO_2	Для измерения температуры в окислительных и нейтральных средах
ТХК-0279	ХК (L)	–50…+600	180	от 0,16 до 3,15	08Х13 12Х18Н10Т	Для измерения температуры газообразных и жидких сред, не разрушающих защитную арматуру

Продолжение таблицы П.3.7

ТХА-410	ХА (К)	0–800	60	от 0,08 до 0,16	10Х17Н13М	Для измерения температуры выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания
ТХКП-18	ХК (L)	0–400	40	2,0	08Х13	Для измерения температуры поверхностей твердых тел в промышленных условиях

Таблица П.3.8

Трансформаторные датчики линейных перемещений [38]

Параметр	**Типы датчиков**			
	ПДИ-045	**ПДИ-052**	**ПЛИ-057**	**ПЛИ-079**
Диапазон измерений, мм	0,1–2,8	0–2,8 0–4,0	0–60 0–90 0–300	0–1,4 0–2,8 0–5,6 0–8,0
Частотный диапазон измерений, Гц	0–500	0–750	0–20	0–30
Основная погрешность, %	2,0	1,5	2,0	1,0
Габаритные размеры, мм	∅ 20×20	∅ 12×77 ∅ 20×80	∅ 25×170 ∅ 25×200 ∅ 25×465	∅ 10×38 ∅ 10×55
Диапазон рабочих температур, ^{0}C	от –100 до +50	от –196 до +50	от –60 до +345	от –50 до +50
Срок службы, лет	12	12	12	11

Таблица П.3.9

Индукционные датчики частоты вращения [38]

Параметр	**Типы датчиков**			
	ВТ-1850	**ВТ-1855**	**ОГ-018**	**ОЭ-019**
Диапазон измерения, об./мин	3000–65000	60–40000	860–49000	60–120000
Частотный диапазон измерений, Гц	100–13000	8–8000	113–6530	1–2000
Минимальный выходной сигнал, мВ	100	100	150	1000
Рабочий зазор, мм	3	3	1,5	1–15
Напряжение питания, В	–	27	–	27
Ток потребления, мА	–	3	–	50
Диапазон рабочих температур, ^{0}C	–60…+100	–212…+50	–253…+100	–5…+35

Фотоэлектрический датчик частоты вращения [37]

Действие датчика основано на преобразовании момента вращения в изменение освещенности фотоэлементов. Момент вращения воспринимается упругим валом, по концам которого расположены растровые диски с радиальными прорезями. При закручивании вала изменяется площадь взаимного перекрытия прорезей дисков и освещенность фотоэлементов.

Таблица П.3.10

Технические данные

Диапазон изменения момента вращения, кГс.м	6–280
Диапазон изменения фототока, мА	0–2,0
Максимальный угол закручивания измерительного вала, мин	45
База измерения, мм	180–400
Допустимая частота, Гц	
для селеновых фотоэлементов	5
для сернистосвинцовых фотоэлементов	250
Количество фотоэлементов, шт.	8
Основная погрешность, %	3–4

Магнитоупругий датчик момента вращения [37]

Действие датчика основано на изменении магнитных свойств материала вала в зависимости от приложенного вращающего момента. Изменения магнитных свойств закрученного вала приводят к нарушению симметрии распределения магнитного поля, что наводит в измерительной обмотке напряжение, пропорциональное измеряемому моменту.

Таблица П.3.11

Технические данные

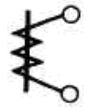
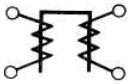
Диапазон изменения момента вращения, кГс · м	0–30
Намагничивающий 1 ток, мА	750
Скорость вращения вала, об./мин	300
Воздушный зазор между измерительным сердечником и валом, мм	2,5
Число витков обмотки возбуждения	2×110
Число витков измерительной обмотки	2×5100

Датчик работает в комплекте с измерительной схемой и предназначен для измерения вращающего момента электродвигателей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Условные обозначения на шкалах и корпусах приборов

Условные обозначения на шкалах приборов

Тип системы	Условные обозначения
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор электромагнитный	
Логометр электромагнитный	
Прибор электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Логометр ферродинамический	
Прибор индукционный	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем (выпрямительный прибор)	
Прибор магнитоэлектрический с электронным преобразователем в измерительной цепи (электронный прибор)	

Продолжение таблицы

Прибор магнитоэлектрический с неизолированным термопреобразователем (термоэлектрический прибор)		
Ток постоянный		—
Ток переменный (однофазный)		~
Ток постоянный и переменный		≂
Ток трехфазный переменный (общее обозначение)		≋
Прибор применять при вертикальном положении шкалы		⊥
Прибор применять при горизонтальном положении шкалы		⌐¬
Класс точности прибора		1,5 1,5 (1,5)
Напряжение испытательное, например 2 кВ		
Условия эксплуатации	Лабораторные условия (от +10 до +35 ^{0}C)	**А**
	Неотапливаемое помещение (от –30 до +50 ^{0}C)	**Б**
	Полевые и морские условия (от –40 до +50 ^{0}C)	$\mathbf{B_1}$
	Полевые и морские условия (от –50 до +60 ^{0}C)	$\mathbf{B_2}$
Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации		

Обозначения на корпусах электроизмерительных приборов

Наименование	**Условное обозначение**
Отрицательный зажим	
Положительный зажим	
Общий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов)	
Зажим переменного тока (в комбинированных приборах)	
Зажим, соединенный с корпусом	
Зажим (винт, шпилька) для заземления	
Корректор	

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Характеристики электроизмерительных приборов

Таблица П.5.1

Основные технические характеристики универсальных вольтметров

№ п/п	Тип, наимено-	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Основная погрешность	Автоматизация
1	2	3	4	5	6
1	В7-34, В7-34/1, В7-34/А Вольтметр универсальный цифровой системный	$U_{=}$ $U_{\sim}$ $R_{=}$ Отношение $U_{1=}/U_{2=}$ Отношение $U_{\sim}/U_{=}$ Измерение в режиме выборка / запоминание	(10^{-6}–1000) В (10^{-5}–500) В (20 Гц–500 кГц) (10^{-3}–10^{7}) Ом (10^{-6}–10) В (10^{-6}–10) В (10^{-6}–500) В (10^{-6}–10) В (10^{-4}–1000) В	$\pm\left[0{,}015+0{,}002\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}15+0{,}05\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}02+0{,}002\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left(A+B\frac{U_{K1}}{U_1}+C\frac{S_X U_{K2}}{U_2}\right)\%$ $\pm$Д$_{\sim}$ $\pm\left[0{,}04\pm0{,}02\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$	В7-34 и В7-34/1 имеют выход на КОП. Самопроверка работы основных узлов (семь тестов с индикацией результатов). Автоматическая установка нуля. АВП измерения $U_{=}$, $U_{\sim}$, $R_{=}$; автоматически определяется индикация полярности
2	В7-40, В7-40/1 Вольтметр универсальный цифровой	$U_{=}$ $I_{=}$ $U_{\sim}$ $I_{\sim}$	(10^{-5}–1000) В; 30 кВ с делителем (10^{-8}–2) А; 10 А с шунтом (2×10^{-3}–1000) В 20 Гц–100 кГц (2×10^{6}–2×10^{1}) А с шунтом до 2 А	$\pm\left[0{,}05+0{,}02\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}02+0{,}2\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}6+0{,}1\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[1{,}0+0{,}1\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}15+0{,}05\left(\frac{R_K}{R}-1\right)\right]\%$ $\pm\left[0{,}5+0{,}1\left(\frac{R_K}{R}-1\right)\right]\%$	Выход на КОП. Ручной и автоматический выбор пределов измерений. Автоматическая установка нуля. Автоматическое определение и индексация полярности

Продолжение таблицы П.5.1

	В7-41 Вольтметр универ-сальный цифровой малогаба-ритный	$U_{=}$	$(10^{-4}–1000)$ В	$\pm\left[0{,}2+0{,}1\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$	
		$I_{=}$	$(10^{-7}–10)$ А	$\pm\left[0{,}4+0{,}1\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$	
		$U_{\sim}$	$(10^{-4}–750)$ В 20 Гц–100 кГц	$\pm\left[0{,}8+0{,}2\left(\frac{U_K}{U}-1\right)\right]\%$ 40 Гц–5 кГц	
		$I_{\sim}$	$(10^{-7}–10)$ А 20 Гц–10 кГЦ	$\pm\left[1{,}2+0{,}2\left(\frac{I_K}{I}-1\right)\right]\%$ в диапазоне частот 40Гц-5кГЦ	
		$R_{=}$	$(0{,}1–2\times10^{7})$ Ом	$\pm\left[0{,}2+0{,}1\left(\frac{R_K}{R}-1\right)\right]\%$	

Примечание. В таблице приведен наилучший для данного типа прибора предел основной погрешности измерений.

U_K, I_K, R_K – наибольшее значение поддиапазона измерения;

U, I, R – показания прибора;

U_1 – напряжение на входе прибора 1;

U_{K1}, U_{K2} – значение поддиапазонов измерений по входам 1 и 2;

A, B, C – постоянные коэффициенты (для В7-34 A = 0,01; B = 0,005 или 0,002; C = 0,002);

д – предел допускаемой основной погрешности при измерении переменного напряжения.

Для прибора В7-41 предусмотрено питание от батареи типа «Крона ВЦ» или «Корунд» либо от сети 220 В, 50 Гц; масса прибора В7-41 составляет 0,5 кг.

Таблица П.5.2

Основные технические характеристики вольтметров переменного напряжения

№ п/п	Тип прибора, наименование	Диапазон измерений	Основная погрешность	Диапазон частот	Примечание
1	В3-59 Милливольт-метр цифровой широкополос-ный	(265×10^{-4}–300) В Поддиапазоны: 1, 3, 10, 30, 100, 300 мВ; 1, 3, 10, 30, 100, 300 В; с делителем до 1 кВ	±(0,4–10)%U_K	10 Гц – 100 МГц	Измеряет среднеквадратическое значение напряжения произвольной формы
2	В7К3-61 Вольтметр цифровой широкополосный	$U_=$ (10^{-2}–1000) В Поддиапазоны: 100 мВ, 1, 10, 100, 1000 В	+[0,4+0,2(U_K/U–1)]%	–	Выход на КОП. Ручной и автоматический выбор пределов измерения
		$U_\sim$ (1,7×10^{-3}–1000) В Поддиапазоны: 100 мВ, 1, 10, 100, 1000 В	±[0,6+0,4(U_K/U–1)]% на поддиапазоне 100 мВ при f = 60 Гц–100 кГц	10 Гц – 100 МГц	Измеряет напряжение произвольной формы с $K_A \leq 7U_K/U$. Индикация результатов измерения на цифровом табло 3; 3,5; 4 или 4,5
		Суммы $U_=+U_\sim$ (17×10^{-3}–1000) В Поддиапазоны 10 мВ, 1, 10, 100, 1000 В	–	2 Гц – 100 МГц	

Таблица П.5.3

Основные технические характеристики приборов для измерения параметров электрических цепей

№ п/п	Тип прибора	Рабочая частота, Гц	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность измерений	Габариты, мм Масса, кг
1	Е6-18	78	R	$(10^{-4}–10^{2})$ Ом	±1,5% от $R_к$	243×206×208; 5
2	Е6-16	Постоянный ток	R	$(2–2\times10^{8})$ Ом	±1,5 % длины рабочей части шкалы	120×205×90; 1,9
3	Е7-9	$7\times10^{5}–3\times10^{5}$	C	$(1–5\times10^{3})$ пФ	± (0,05×C+0,1) пФ от 1 до 2,5 пФ; ±(0,05×C+0,05) пФ от 2,5 до 10 пФ	385х185х335; 9
		$11\times10^{3}–1,55\times10^{6}$	H	$(10^{-7}–10^{1})$ Гн	±(0,015 h+2 к) мкГн от 1 до 10 мкГн; ±(0,012h+1,2$к$) мкГн от 10 мкГн и более, где K = 0,01; 0,1; 1; 10; 100 для соответствующего диапазона	
4	Е8-4	10^{3}	C	$(3\times10^{-2}–15,99\times10^{6})$ пФ	±(0,001 C+0,02) пФ	490×210×475; 26
			tg δ	$5\times10^{-4}–999\times10^{-4}$	±(0,02tgд+5×10^{-4})	

Продолжение таблицы П.5.3.

5	Е7-11	Постоянный ток	R	$(10^1–10)$ Ом	$\pm(0{,}02R+0{,}05)$ Ом	342×173×332; 9
		10^2; 10^3	R	$(10–10^6)$ Ом	$\pm(0{,}01R+0{,}05)$ Ом	
				$(10^6–10^7)$ Ом	$\pm(0{,}02R)$ Ом	
		10^2; 10^3	С при $\operatorname{tg}\delta \le 1$	$(0{,}5–10^7)$ пФ	$\pm(0{,}01C+0{,}2)$ пФ	
				$(10^7–10^{10})$ пФ	$\pm 0{,}02C$ пФ	
			при $\operatorname{tg}\delta > 1$	$(0{,}5–10^7)$ пФ	±[0,01С(1+tgд)+0,2]пФ	
				$(10^7–10^{10})$ пФ	±0,01С(2+tgд)пФ	
		10^2; 10^3	L при $Q \ge 1$	$(3\text{x}10^{-7}\text{-}10^{-4})$Гн	±(0,02L+0,1) мкГн	
				$(10^{-4}\text{-}10)$Гн	$\pm 0{,}01L$	
				$(10\text{-}10^3)$Гн	$\pm 0{,}02L$	
			L при $Q<1H$			
				$(3\times10^{-7}–10^{-4})$Гн	±[0,01(2+1/Q)L+0,1] мкГн	
				$(10^{-4}–10)$ Гн	$\pm 0{,}01(1+1/Q)L$ мкГн	
		10^2; 10^3		$(10–10^3)$ Гн	$\pm 0{,}01(2+1/Q)L$ мкГн	
				$10^{-1}–30$	$\pm(10+0{,}5Q)\%$	
				$5\times10^{-3}–10^{-1}$	$\pm(0{,}1\times1/Q+5\times10^{-3})\%$	

Таблица П.5.4

Основные технические характеристики измерителей разности фаз

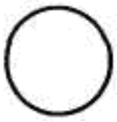
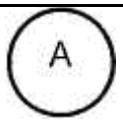
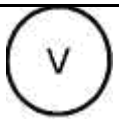
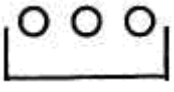
Параметр	**Значение параметра приборов**		
	Ф2-16	**ФК2-12**	**ФК2-29**
Диапазон частот	20 Гц – 20 Мгц	(1–1000) МГц	(1–1000) МГц
Предел измерения, град	0–360	0±180	0±180
Погрешность измерения, град	±(0,2–0,004)	±2,5	±0,5
Входное напряжение	(0,001–100) В	15 мВ – 1 В	$(3\times10^{-5}–1)$ В
Входное сопротивление	1 МОм	80 кОм	–
Входная емкость	30 пФ	3,5 пФ	–
Габаритные размеры, мм	490×175×475	490×175×475	488×475×173
Масса, кг	15	17,5	20

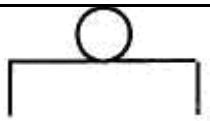
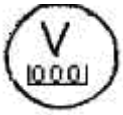
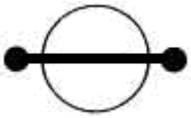
Прибор типа Ф2-16 предназначен для измерения разности фаз между двумя непрерывными синусоидальными сигналами одной частоты.

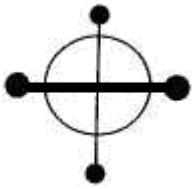
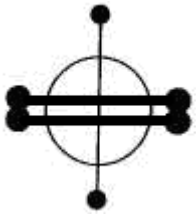
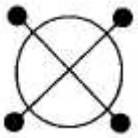
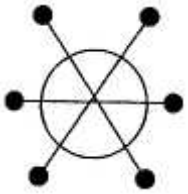
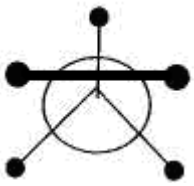
Приборы типа ФК-12 и ФК2-29 являются комбинированными приборами и предназначены для измерения не только разности фаз, но и отношения уровней входных синусоидальных сигналов, а также комплексных коэффициентов передачи четырехполюсников, параметров транзисторов и кварцевых фильтров.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Условные графические обозначения в схемах

Наименование	Обозначение
1. Прибор показывающий	
Например:	
а) амперметр показывающий	
б) вольтметр показывающий	
2. Прибор регистрирующий	
Например:	
а) амперметр регистрирующий	
б) вольтметр регистрирующий	
3. Если необходимо указать характеристику отсчетного устройства прибора, то в его обозначения вписывают следующие квалификационные символы:	
3.1. Прибор, подвижная часть которого может отклоняться в одну сторону от нулевой отметки:	
•вправо	
•влево	
3.2. Прибор, подвижная часть которого может отклоняться в обе стороны от нулевой отметки	
3.3. Допускается применять обозначение	
3.4. Прибор с цифровым отсчетом	

3.5. Прибор с непрерывной регистрацией (записывающий)	
3.6. Прибор с точечной регистрацией (записывающий)	
3.7. Прибор печатающий с цифровой регистрацией	
3.8. Амперметр, подвижная часть которого отклоняется в обе стороны от нулевой отметки	
3.9. Гальванометр	
3.10. Вольтметр с цифровым отсчетом	
3.11. Вольтметр с непрерывной регистрацией	
3.12. Вольтметр с цифровой регистрацией	
4. Обмотки в схемах измерительных приборов, отражающих их взаимное расположение в измерительном механизме, изображают следующим образом:	
4.1. Обмотка токовая	
4.2. Обмотка напряжения	
4.3. Обмотки токовые для сложения или вычитания	
4.4. Обмотки напряжения для сложения или вычитания	
Например, механизм измерительный:	
а) амперметра однообмоточного	

б) вольтметра однообмоточного	
в) ваттметра однофазного	
г) ваттметра трехфазного одноэлементного с двумя токовыми обмотками	
д) логометра магнитоэлектрического (например, омметра-логометра)	
е) логометра электродинамического (например, фазометра однофазного)	
ж) логометра четырехобмоточного (например, фазометра трехфазного с одной токовой обмоткой)	
5. Выводные контакты обмоток допускается не изображать, если это не приведет к недоразумению и не затруднит чтение схемы (например, допускается обозначение фазометра трехфазного с одной токовой обмоткой)	

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Обозначение единиц измерения, их кратных и дольных значений

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Килоампер	kA	Киловольт	kV
Ампер	A	Вольт	V
Миллиампер	mA	Милливольт	mV
Микроампер	μA	Микровольт	μV
Наноампер	nA	Нановольт	nV
Мегаватт	MW	Мегаом	MΩ
Киловатт	kW	Килоом	kΩ
Ватт	W	Ом	Ω
Мегавар	Mvar	Миллиом	mΩ
Киловар	kvar	Микроом	μΩ
Мегагерц	MHz	Милливебер	mWb
Килогерц	kHz	Микрофарада	μF
Герц	Hz	Пикофарада	pF
Градусы угла сдвига фаз	φ	Генри	H
Коэффициент мощности	cosφ	Миллигенри	mH
Коэффициент реактивной мощности	sinφ	Микрогенри	μH
Тераом	TΩ	Наногенри	nH
Гигаом	GΩ	Градус стоградусной температурной шкалы	^{0}C

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Классификация электронных электроизмерительных приборов и система их обозначения

Электронные средства измерений подразделяют по характеру измерений и виду измеряемых величин на подгруппы, обозначаемые прописными буквами русского алфавита. Например, «В» – приборы для измерения напряжения.

Приборы, входящие в подгруппу, делятся на виды соответственно основной выполняемой функции. Видам присваивается буквенно-цифровое обозначение, состоящее из буквы подгруппы и номера вида. Например, «В2» – приборы для измерения постоянного напряжения.

По совокупности технических характеристик и очередности разработок приборы каждого вида разделяют на типы, которым соответствует порядковый номер модели (например, «В2-38»).

Наименование прибора определяется видом, к которому он относится.

Прописная буква русского алфавита, стоящая после модели, указывает на то, что прибор модернизирован (например, «В2-38А»). При этом буква «А» означает первую модернизацию, буква «Б» – вторую и т. д.

При конструктивной модификации приборов этот факт отмечается цифрой, которая ставится через дробь после номера модели. При этом цифра «1» означает первую конструктивную модификацию, цифра «2» – вторую, цифра «3» – третью и т. д. Например, «В2-38А/1».

Добавление к буквенному обозначению вида буквы «К» обозначает, что данный прибор многофункциональный (комбинированный). Например, «ВК 3-61Б/1» – вольтметр («В») комбинированный («К») для измерения переменного напряжения («3»), модель «61», вторая модернизация («Б»), первая конструктивная модификация («1»).

Следует отметить, что некоторые приборостроительные заводы используют другую (ведомственную) систему обозначений. Для электронных приборов используются буквы «Щ», Ф», «Р», которые не связаны с видом измеряе-

мых величин. Например, Щ68003; Ф-3О и Р386 – универсальные вольтметры; Ф5126 – цифровой фазометр; Щ400 – омметр; Р-33 – магазин сопротивлений.

Ниже приведены наиболее распространенные подгруппы и виды приборов.

Подгруппа	**Вид**	**Наименование**	**Пример обозначения**
В – приборы для измерения напряжения	В1	Поверочные приборы или установки	В1-18
	В2	Вольтметры постоянного напряжения	В2-32А/3
	В3	Вольтметры переменного напряжения	В3-55Б
	В4	Импульсные вольтметры	В4-8А/1
	В6	Селективные вольтметры	В6-9
	В7	Универсальные вольтметры	В7-34/1
	В8	Измерители отношений	В8-6
	В9	Преобразователи напряжений	В9-13/2
Ч – приборы для измерения частоты и времени	Ч1	Стандарты частоты и времени	Ч1-1
	Ч3	Частотомеры электронно-счетные	Ч3-32А
	Ч4	Частотомеры гетеродинные, емкостные, мостовые	Ч4-12Б
	Ч9	Преобразователи частоты	Ч9-5/1
Ф – приборы для измерения разности фаз и группового времени запаздывания	Ф1	Установка для поверки измерителей разности фаз и группового времени запаздывания	Ф1-4
	Ф2	Измерители разности фаз (фазометры)	Ф2-13
	Ф3	Фазовращатели измерительные	Ф3-6А
	Ф4	Измерители группового времени запаздывания	Ф4-18
С – приборы для наблюдения, измерения и исследования формы сигнала и спектра	С1	Осциллографы универсальные	С1-144/1
	С2	Измерители коэффициента амплитудной модуляции	С2-15
	С3	Измерители девиации частоты	С3-12
	С4	Анализаторы спектра	С4-77
	С6	Измерители нелинейных искажений	С6-11
	С7	Осциллографы скоростные, стробоскопические	С7-19
	С8	Осциллографы запоминающие	С8-20
	С9	Осциллографы специальные	С9-23

Продолжение таблицы

Г – генераторы измерительные	Г2	Генераторы шумовые	Г2-59
	Г3	Генераторы низкочастотные	Г3-33
	Г4	Генераторы высокочастотные	Г4-158
	Г6	Генераторы универсальные	Г6-36
Е – измерители компонентов цепей	Е3	Измерители индуктивностей	Е3-7
	Е6	Измерители сопротивлений	Е6-18
	Е7	Измерители универсальные	Е7-11
	Е8	Измерители емкости	Е8-4
У – усилители измерительные	У2	Усилители селективные	У2-8
	У3	Усилители высокочастотные	У3-28
	У4	Усилители низкочастотные	У4-6
	У5	Усилители постоянного тока	У5-9
	У7	Усилители универсальные	У7-2
Б – источники питания	Б2	Источники переменного тока	Б2-3
	Б4	Источники калиброванные	Б4-16
	Б5	Источники постоянного тока	Б5-71/4
	Б6	Источники регулируемые	Б6-24
	Б7	Источники универсальные	Б7-12

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Технические характеристики стандартных измерительных шунтов

Тип	$I_{ном}$, А	$U_{ном}$, мВ	$R_ш$, мкОм	Размеры, см	Масса, кг	Класс точности
75 Ш	75	75	1000	12×6×6	0,240	0,2
	150	75	500	12×6×6	0,265	0,2
100 ШС	2000	100	50,00	30×10×10	8,0	0,5
	4000	100	25,00	30×21×10	18,0	0,5
	6000	100	16,67	30×30×10	24,3	0,5
75 ШСМ	7500	75	10,0	25×22×7	14,0	0,5

Примечания:

75 ШП – взаимозаменяемый переносный измерительный шунт с номинальным напряжением 75 мВ;

100 ШС – взаимозаменяемый стационарный измерительный шунт с номинальным напряжением 100 мВ;

75 ШСМ – взаимозаменяемый стационарный модернизированный измерительный шунт с номинальным напряжением 75 мВ;

$I_{ном}$ – номинальный (измеряемый) ток;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение на шунте при протекании по нему номинального тока;

$R_ш$ – номинальное сопротивление шунта.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Технические характеристики устройства типа И58М

Устройство предназначено для измерений постоянного тока в диапазоне от 4 до 70 кА в цепях с номинальным напряжением до 1 кВ и частоте вспомогательного напряжения (50 ± 0,5) Гц.

Устройство состоит из трансформатора постоянного тока (ТПТ) и вспомогательного устройства (ВУИ).

Устройство изготавливается в восьми модификациях. В качестве примера ниже (в таблице) приведены основные технические характеристики пяти модификаций устройства.

Модификация устройства	**Номинальный первичный измеряемый ток, кА**	**Пределы измерения, кА**	**Обозначение ТПТ, входящего в комплект**	**Размеры окна ТПТ, мм**
И-58М-1	15	от 7,5 до 15	И-58М/1	152×152
И-58М-2	25	от 12,5 до 25	И-58М/2	252×236
И-58М-3	35	от 24,5 до 35	И-58М/3	252×300
И-58М-4	50	от 25 до 50	И-58М/2×2	252×263
И-58М-5	70	от 49 до 70	И-58М/3×2	252×300

Во всех модификациях устройства в комплект входит один ТПТ, кроме модификаций 4 и 5, имеющих по два трансформатора типа И58М/2 и И58М/3 соответственно.

Номинальная нагрузка для модификаций 1–5 составляет 1,2 Ом.

Погрешность коэффициента трансформации в пределах измерений, указанных в приведенной таблице, не превышает ± 0,5 %.

Питание осуществляется от сети переменного тока напряжением 22 В и частотой 50 Гц. Потребляемая мощность не превышает 45 кг для модификации 1 и 200 кг для модификаций 2 и 3.

Масса вспомогательного измерительного устройства (ВУИ) не превышает 25 кг.

С устройствами типа И58М/2 – И 58М/5 поставляются токовое и промежуточное реле для защиты устройств при внезапном отключении измеряемого тока.

Наработка на отказ не менее 2500 ч. Срок службы не менее 6 лет.

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Технические характеристики добавочного сопротивления типа Р-109

Номинальное значение сопротивления, кОм	Номинальный электрический ток, мА	Номинальное электрическое напряжение, В	Примечание
300	5,0	1,5	Предназначено для расширения пределов измерения вольтметров М-151 и М1501 Класс точности 0,5 Норм. усл. эксп. (20 ± 10) °С Масса 1,5 кг
400	5,0	2,0	
600	5,0	3,0	
1333	3,0	4,0	

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Технические характеристики жидкостных термометров

Термометр	Тип	Предел измерения, °С	Цена деления, °С	Предел допускаемой основной погрешности, °С	Размеры термометра, мм			Примечание
					Общая длина	Погружаемая длина	Диаметр	
Промышленный для судовых двигателей	ТП 14–1	0–150	2	± 2 (0–100) ± 4 (101–150)	235	115	7±1	Палочный (тип А)
	ТП 14–2				270	150		
	ТП 17–1	100–650	5	±5 (100–300) ±7 (301–500) ±10 (501–650)	410	200	6±1	Палочный, ртутный (тип А)
	ТП 17–2				485	275		
Промышленный виброустойчивый	ТП 21–1	0–100	1	±1	275; 295; 315; 335; 465; 614	60; 80; 120; 160; 400	–	Ртутный, с вложенной шкалой (тип Б)
	ТП 21–2	0–150	2	±2				
	ТП 21–3	0–200						
Лабораторный химический	ТЛ 4–1	от –3 до +20	0,1	± 0,3 ± 0,2	530_{-30}	–	11±1	Тип Б Для измерения температуры в лаборатор-ных условиях (тип Б)
	ТЛ 4–2	0–55						
	ТЛ 4–8	190–260	0,2	±0,4(101–200) ±0,8(201–300) ±1 (301–360)				
	ТЛ 4–9	240–310						

Продолжение таблицы

Лабораторный химический	ТЛ 2–1	от –30 до +70	1	± 1 (–30…+100) ± 2 (101–200)	250_{-20}	–	8±1	Для лабораторных измерений (тип Б)
	ТЛ 2–2	0–100						
	ТЛ 2–3	0–150			280_{-20}	–		
Образцовый	ТО–1	Основная шкала 0–5	0,01	± 0,015	560±10	–	16–1	Высокоточные измерения (не более 5 °С)
		Вспомогательная шкала от –20 до +150	5	–	–	–	–	

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

Технические характеристики манометрических термометров

Тип	Характеристика	Диапазон измерений, °С		Класс точности	Термобаллон		Длина капилляра, м
		Нижний	Верхний		Диаметр, мм	Длина, мм	
ТПГ – 4	Термометр показывающий газовый	+50	600	1,0	20	до 630	до 2,5
ТПЖ – 4	Термометр показывающий жидкостный	+50	300	1,5	12	до 400	до 10
ТЖС – 711	Термометр показывающий самопищущий	+50	300	2,5	12	до 400	до 10
ТПП – 4Ш	Термометр показывающий конденсационный	0	300	1,5	16	до 250	до 16
ТПП-СК	Термометр показывающий конденсационный с электроконтактным устройством	0	300	2,5	16	до 250	до 16

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Визуальный оптический пирометр «Проминь»

Визуальный оптический пирометр «Проминь» предназначен для измерения яркостной температуры раскаленных твердых или жидких тел в металлической, машиностроительной, химической и других отраслях промышленности.

Пирометр выполнен в виде малогабаритного переносного прибора. Корпус состоит из камеры и рукоятки. В верхней части корпуса помещены объективная труба с однолинзовым объективом, перемещающимся при наводке вдоль оптической оси, и окулярная труба. В рукоятке находится блок питания пирометра.

Принцип действия пирометра основан на уравнивании яркости изображения объекта с яркостью эталонного источника – специальной пирометрической лампы.

Основные данные

Диапазон измеряемых температур, °С	800–4000
Поддиапазоны, °С	800–1400
	1200–2000
	1800–4000
Эффективная длина волны пиромета во всем диапазоне измеряемых температур, мкм	0,656±0,005
Основная допустимая погрешность, °С:	
– в пределах измерения температур 800–1400 °С	±12
– в пределах измерения температур 1800–3200 °С	±50
– в пределах измерения температур 3200–4000 °С	±90
Масса, кг	1,6
Вероятность безотказной работы пирометра за 500 часов	0,85
Срок службы пирометра, лет	≥ 6

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Телескоп пирометра суммарного излучения типа ПИРС-019 с усилителем

Телескоп пирометра типа ПИРС-019 предназначен для бесконтактного измерения радиационной температуры поверхностей нагретых тел. Рассчитан на эксплуатацию при температуре окружающего воздуха от 5 до 50 °С и относительной влажности от 30 до 80 %. Усилитель рассчитан на эксплуатацию при температуре окружающей среды от 10 до 35 °С и относительной влажности до 80 %.

Технические данные

Диапазон измерений, °С	20–300
Основная допускаемая погрешность в диапазоне измерения, °С	
20–100	± 2,0
40–150	± 2,5
50–200	± 3,0
100–300	± 4,5
Инерционность, С	не более 2,0
Потребляемая мощность, В•А	не более 6,0
Вероятность безотказной работы прибора за 500 часов	0,85
Габаритные размеры (мм) и масса (кг) комплектующих единиц:	
– телескопа	160×105×120; 10
– охладителя	115×125×150; 0,7
– усилителя	150×140×400; 8,0

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Б1.В.09 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры			Рассмотрен методической комиссией факультета
Информатики			Горно-механического
(название кафедры)			*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____		Председатель	Председатель _____
(подпись)			*(подпись)*
Дружинин А.В.			Осипов П.А..
(Фамилия И.О.)			*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 19.09.2024			Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)			*(Дата)*

Екатеринбург

Введение

Цель данных лабораторных работ состоит в закреплении теоретических основ курса «Интеллектуальные системы» для студентов специальности «Прикладная математика», включающего изучение семейства методов оптимизации, известных как генетические алгоритмы.

Все работы проводятся в лаборатории, оборудованной персональными компьютерами под управлением *Microsoft Windows XP* или выше. Рекомендуемой средой для решения задач является *MATLAB*. Студенты, впервые приступившие к работе, обязаны пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в соответствующем журнале. К выполнению лабораторных работ допускаются только студенты, получившие допуск преподавателя после собеседования о теоретической части и основах работы в среде *MATLAB*.

Порядок выполнения лабораторных работ

1. Загрузить систему *MATLAB* и изучить справочные материалы по функциям системы, необходимым для решения задачи.
2. Составить алгоритм и написать программу на языке *MATLAB* для решения задачи.
3. Оформить отчет по лабораторной работе. Каждый отчет должен содержать следующие элементы.
   3.1. Формулировку задачи и числовые данные конкретных примеров.
   3.2. Текст программы.
   3.3. Результаты работы программы.

Лабораторная работа №1. Оптимизация функций вещественных переменных

Цель работы

Приобретение навыков работы со стандартным модулем *MATLAB*, предоставляющим возможность решения различных оптимизационных задач с помощью генетических алгоритмов.

Методические указания

Генетические алгоритмы (ГА) относятся к семейству алгоритмов глобальной оптимизации. Первоначальная форма ГА, введенная Дж. Холландом, является алгоритмом перехода от рассматриваемой по-

пуляции хромосом[1], под которыми понимались последовательности бит фиксированной длины, к новой популяции с помощью своего рода естественного отбора, сопровождаемого применением так называемых операторов *скрещивания, мутации и инверсии.* Оператор селекции выбирает хромосомы, которым будет позволено воспроизводиться, так чтобы хромосомы с лучшими значениями целевой функции в среднем имели большее потомство. Оператор скрещивания меняет местами соответствующие отрезки двух хромосом, имитируя биологическую рекомбинацию; оператор мутации инвертирует значения случайным образом выбранных бит хромосомы; оператор инверсии переворачивает непрерывный отрезок хромосомы.

Впоследствии интенсивное взаимодействие между исследователями, изучающими различные эволюционные методы, привело к тому, что границы между ГА, эволюционными стратегиями, эволюционным программированием и другими подходами такого рода стали несколько размыты. Вследствие этого термин «генетический алгоритм» нередко обозначает нечто весьма отличное от оригинальной формулировки, данной Холландом. Таким образом, под генетическим алгоритмом понимается не столько конкретный алгоритм, сколько целое семейство методов, объединенных общей концепцией.

В целом, ГА описывает способ эволюционирования популяции, состоящей из множества индивидуумов, по определенным правилам таким образом, чтобы собрать как можно больше индивидуумов в области с как можно лучшими значениями целевой функции. Общая структура ГА включает следующие шаги.

1. Создается исходная популяция, обычно случайная.
2. Для каждого индивидуума вычисляется значение целевой функции.
3. К популяции применяются операторы селекции, скрещивания и мутации. В результате получается новая популяция такого же размера.
   3.1. Оператор селекции выбирает индивидуумов, которые будут участвовать в процессе репродукции. При этом вероятность выбора каждого конкретного индивидуума тем выше, чем лучше его значение целевой функции. Индивидуум может как быть выбран несколько раз, так и не быть выбран вовсе.

[1] Правильнее было бы *популяции особей,* но в ГА не делается различия между особями и их хромосомами.

3.2. Оператор скрещивания формирует одного или большее количество потомков, комбинируя хромосомы двух родителей (в некоторых случаях может использоваться большее количество родительских индивидуумов).
3.3. Оператор мутации модифицирует хромосому индивидуума случайным образом. Он может использоваться после оператора скрещивания, или же вместо него для генерации потомков с использованием хромосомы единственного родителя.
4. Текущая популяция заменяется новой.
5. Процесс повторяется с шага 2, пока не будет выполнен оговоренный заранее критерий останова.

В качестве хромосом/индивидуумов могут применяться объекты самого разного типа: битовые, целочисленные, вещественные или комплексные векторы, конечные автоматы, деревья выражений и пр.

В состав системы *MATLAB*[2] включен модуль «*Genetic Algorithm and Direct Search*» (*GADS*). Помимо ГА, в него также входят так называемые алгоритмы прямого поиска (*Direct/Pattern Search*) и имитации отжига (*Simulated Annealing and Threshold Acceptance*). Для работы с ГА предназначены следующие функции: `ga`, `gaoptimget` и `gaoptimset`, `gatool`. Первая является собственно реализацией ГА, две следующие предназначены для манипулирования ее параметрами, а последняя вызывает графический интерфейс, имеющий идентичную функциональность, но большую наглядность. Приведем несколько примеров использования данных функций.

Простейший пример: поиск минимумов функций одной переменной x^2 и $\sin x$ (поскольку ГА имеет стохастическую природу, при каждом его вызове ответы получаются различные).

```
>> ga(@(x)x^2,1)
ans =
    0.0048
>> ga(@sin,1)
ans =
   -1.5650
```

Не очень высокая точность результатов является следствием щадящих значений параметров ГА, выставляемых по умолчанию. Интересной особенностью второго примера является то, то минимум найден вне

[2] Приведенные здесь сведения относятся к *GADS* версии 2.1 в составе *MATLAB* 7.4 (R2007a).

начального диапазона поиска (по умолчанию отрезок $[0;1]$: в общем случае, в зависимости от параметров алгоритма, популяция в поисках экстремума может уйти довольно далеко от своего изначального месторасположения. Тем не менее, с точки зрения вычислительной эффективности выгоднее сразу нацеливать ГА на область, в которой, предположительно, находится решение.

Аналогично производится поиск минимума функции большего количества переменных (здесь $f(x) = (\sin x_1)(\sin x_2)$).

```
>> ga(@(x)sin(x(1))*sin(x(2)),2)
ans =
   -1.5663    1.5724
```

Чтобы получить более адекватный ответ, воспользуемся возможностью уточнения результатов с помощью традиционных алгоритмов минимизации (в данном случае стандартной функции `fminsearch`).

```
>> opt=gaoptimset('HybridFcn',@fminsearch);
>> ga(@(x)sin(x(1))*sin(x(2)),2,...
   [],[],[],[],[],[],[],opt)
ans =
   -1.5708    1.5708
```

Здесь `HybridFcn` — один из множества параметров, с помощью которых универсальный алгоритм, представленный функцией `ga`, адаптируется под конкретные задачи.

Общий синтаксис `ga` выглядит следующим образом:

```
x = ga(fitnessfcn,nvars,A,b,...
       Aeq,beq,LB,UB,nonlcon,options)
x = ga(problem)
[x,fval,exitflag,output,population,scores] = ga(...)
```

Здесь `fitnessfcn` — целевая функция с одним (векторным) аргументом; `nvars` — количество неизвестных. Параметры `A` и `b` описывают линейные ограничения в виде неравенств: $Ax \leq b$; `Aeq` и `beq` — линейные ограничения в виде равенств: $A_{eq}x = b_{eq}$. Параметры `LB` и `UB` представляют собой нижние и верхние границы значений неизвестных (*Lower Bounds* и *Upper Bounds* соответственно): $x_i \in [LB_i, UB_i]$. Параметр `nonlcon` — функция, описывающая нелинейные ограничения задачи. Эта функция принимает в качестве аргумента x и возвращает два вектора `C` и `Ceq`; ГА, в свою очередь, ищет такое решение задачи, чтобы вы-

полнялись условия $C \leq 0$ и $C_{eq} = 0$. Последний аргумент — структура, формируемая с помощью функции `gaoptimset`. Все аргументы, отвечающие за ограничения, имеют смысл только для индивидуумов типа `doubleVector`. Обязательными в первой форме вызова являются лишь первые два аргумента; остальные можно опустить или указать как `[]`. Во второй форме вызова единственный аргумент является структурой, формируемой при экспорте задачи из интерфейса `gatool`.

На выходе функции имеем вектор `x`, дающий искомую точку минимума; значение целевой функции в этой точке `fval`; числовой код `exitflag`, указывающий причину прекращения работы ГА (коды см. в справке); структуру `output`, содержащую вспомогательную информацию, которая, в частности, может применяться для воспроизведения работы алгоритма с сохранением идентичных результатов; финальную популяцию `population` и значения целевой функции на ней `scores`. Все выходные параметры (кроме `x`) опциональны.

Варианты задания

Построить графики (поверхности и линии уровня) следующих тестовых функций для размерности пространства поиска $n = 2$. Используя командный (`ga`) и графический интерфейсы (`gatool`) модуля *GADS*, продемонстрировать нахождение их минимумов для $n = 2, 5, 10, 100$ (где это применимо).

Вар.	**Функция**
1.	Сферическая функция, или функция Де Джонга 1 (*sphere model, De Jong's function 1*) — гладкая выпуклая унимодальная функция, мечта любого алгоритма оптимизации. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} x_i^2, \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
2.	Гиперэллипсоидная функция (*axis parallel hyper-ellipsoid function*). $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} i x_i^2, \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
3.	Повернутая гиперэллипсоидная функция (*rotated hyper-ellipsoid function*).

	$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{i} x_j \right)^2, \qquad x_i \in [-65{,}536; 65{,}536].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
4.	Ступенчатая функция, или функция Де Джонга 3 (*step function, De Jong's function 3*) состоит из множества плоских горизонтальных поверхностей. Подобные функции создают проблемы многим алгоритмам оптимизации, поскольку такие плоскости не дают информации о предпочтительном направлении поиска. $$f(x) = 6n + \sum_{i=1}^{n} \lvert [x_i] \rvert, \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$
5.	Функция (она же банановая функция, она же долина) Розенброка, или функция Де Джонга 2, (*Rosenbrock's function (banana function, valley), De Jong's function 2*). Классическая задача о поиске экстремума, находящегося в узкой изогнутой долине. Найти последнюю легко, но спуск по ней к минимуму — задача нетривиальная. Функция является мультимодальной при $n > 3$. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(100\left(x_{i+1} - x_i^2\right)^2 + (x_i - 1)^2 \right), \qquad x \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 1$.)
6.	Функция Де Джонга с гауссовыми возмущениями (*gaussian quartic, De Jong's function 4*) позволяет оценить надежность алгоритма оптимизации при работе с зашумленными данными. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(i x_i^4 + gauss(0{,}1) \right), \qquad x_i \in [-1{,}28; 1{,}28],$$ где $gauss(m, d)$ — функция, возвращающая нормально распределенные случайные величины с математическим ожиданием m и дисперсией d.
7.	Функция Растригина (*Rastrigin's function*): аналог функции №1 с многочисленными регулярно распределенными минимумами. $$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^{n} \left(x_i^2 - 10 \cos 2\pi x_i \right), \qquad x_i \in [-5{,}12; 5{,}12].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
8.	Функция Швефеля (*Schwefel's sine root function*) имеет обманчивый рельеф: глобальный минимум находится вдалеке от локального ми-

	нимума, наиболее схожего с ним по величине функции. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(-x_i \sin\sqrt{|x_i|}\right), \qquad x_i \in [-500; 500].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 420{,}9687$.)
9.	Функция Грайвенка (*Griewangk's function*). Мультимодальная функция с регулярно распределенными минимумами; аналог функции Растригина. $$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^{n} \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right), \qquad x_i \in [-600; 600].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
10.	Функция Эккли (*Ackley's path function*): часто используемая мультимодальная тестовая функция. $$f(x) = 20 + e - 20\exp\left(-0{,}2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\cos(2\pi x_i)\right),$$ $x_i \in [-30; 30]$. (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
11.	Сумма различных степеней (*Sum of different powers*): часто используемая унимодальная тестовая функция. $$f(x) = \sum_{i=1}^{n} |x_i|^{i+1}, \qquad x_i \in [-1; 1].$$ (Глобальный минимум: $x_i = 0$.)
12.	Функция Михалевича (*Michalewicz's function*): мультимодальная функция с $n!$ локальными экстремумами, рельеф которой состоит из почти плоских участков с глубокими прямыми расщелинами. При больших m последние становятся уже, их склоны — вертикальнее, а задача оптимизации превращается в своего рода поиск иголки в стоге сена. $$f(x) = -\sum_{i=1}^{n} \left(\sin(x_i)\sin^{2m}\left(\frac{ix_i^2}{\pi}\right)\right), \qquad m = 10, x_i \in [0; \pi].$$
13.	Функция Бранинса (*Branins's rcos function*): тестовая функция с тремя глобальными минимумами. $$f(x_1, x_2) = \left(x_2 - \frac{5{,}1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 +$$

	$$+10\left(1-\frac{1}{8\pi}\right)\cos(x_1)+10, \qquad x_1 \in [-5;10], x_2 \in [0;15].$$ (Глобальные минимумы: $(-\pi; 12{,}275)$, $(\pi; 2{,}275)$, $(9{,}425; 2{,}475)$.)
14.	Функция Изома (*Easom's function*): унимодальная тестовая функция, в которой глобальный минимум и окружающий его нетривиальный рельеф занимают лишь небольшую часть пространства поиска. $$f(\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2) = -\cos(\mathrm{x}_1)\cos(\mathrm{x}_2)\exp(-(\mathrm{x}_1-\pi)^2-(\mathrm{x}_2-\pi)^2),$$ $$\mathrm{x}_{1,2} \in [-100; 100].$$ (Глобальный минимум: $(\pi; \pi)$.)
15.	Функция Голдстейна (*Goldstein-Price function*): $$f(x_1, x_2) =$$ $$= [1+(1+x_1+x_2)^2(19-14x_1+3x_1^2-14x_2+6x_1x_2+3x_2^2)] \times$$ $$\times [30+(2x_1-3x_2)^2(18-32x_1+12x_1^2+48x_2-36x_1x_2+27x_2^2)];$$ $$x_{1,2} \in [-2; 2].$$ (Глобальный минимум: $(0; -1)$.)
16.	Шестигорбая функция (*Six-hump camel back function*) имеет в области поиска шесть локальных минимумов, два из которых являются глобальными. $$f(x_1, x_2) = \left(4-2{,}1x_1^2+\frac{x_1^4}{3}\right)x_1^2+x_1x_2+(-4+4x_2^2)x_2^2;$$ $$x_1 \in [-3; 3], x_2 \in [-2; 2].$$ (Глобальные минимумы: $(-0{,}0898; 0{,}7126)$, $(0{,}0898; -0{,}7126)$.)

Вопросы для собеседования

1. Что такое генетический алгоритм?
2. Какова общая схема работы ГА?
3. Как производится решение задач с помощью ГА в *MATLAB*?
4. Чем отличается реализация ГА в *MATLAB* от канонического алгоритма?

Лабораторная работа №2. Оптимизация функций вещественных переменных, часть 2

Цель работы

Приобретение навыков реализации и применения генетических алгоритмов в задачах оптимизации функций нескольких вещественных переменных.

Методические указания

Существует большое количество разновидностей операторов, соответствующих шагу 3 общего ГА. Выбор тех или иных вариантов определяется в первую очередь типом хромосом. Приведем варианты операторов, применимых в задачах оптимизации функций вещественных переменных.

1. Селекция (для поиска минимума).
   1.1. Популяция упорядочивается по значениям целевой функции, после чего ее вторая половина отбрасывается, а первая дублируется.
   1.2. Популяция упорядочивается по значениям целевой функции. Каждому индивидууму назначается вес, равный $1/\sqrt{n}$, где n — номер его позиции. Производится случайный выбор индивидуума, причем вероятность выбора каждого из индивидуумов пропорциональна его весу. Процесс повторяется столько раз, сколько особей должно быть в популяции.
   1.3. Выбираются несколько случайных индивидуумов. Лучший из них помещается в новую популяцию. Процесс повторяется столько раз, сколько особей нужно выбрать.
2. Скрещивание. Популяция перемешивается случайным образом, после чего к первым $[nr_c/2]$ парам индивидуумов x_{2i-1} и x_{2i}, $i = 1, \dots, [nr_c/2]$, где n — размер популяции, а r_c — вероятность скрещивания, применяется один из следующих вариантов действий.
   2.1. Производится одноточечный или двухточечный кроссовер векторов-хромосом.
   2.2. Составляются (масштабированные) выпуклые линейные комбинации родительских хромосом.
   2.3. Симулированное бинарное скрещивание:

$$x'_{1,2} = \big((1 \pm \beta)x_1 + (1 \mp \beta)x_2\big)/2\,,$$
$$\beta = \begin{cases}(2u)^{1/(\eta+1)}, & u \le 1/2,\\ (2(1-u))^{-1/(\eta+1)}, & u > 1/2,\end{cases}$$

где $x_{1,2}$ — родительские хромосомы, $x'_{1,2}$ — потомки, u — случайная величина, равномерно распределенная на $[0;1]$, а η — выбираемый пользователем параметр, определяющий форму функции распределения коэффициента β.

3. Мутация. К $[nr_m]$ случайно выбранным индивидуумам, где n — размер популяции, а r_m — вероятность мутации, применяется один из следующих вариантов действий.
   3.1. К выбранным векторам прибавляются нормально распределенные смещения с нулевым математическим ожиданием и выбранной заранее дисперсией.
   3.2. Каждая координата выбранных векторов с некоторой вероятностью заменяется на случайное число из диапазона, соответствующего области поиска.

Варианты задания

Написать программу, реализующую генетический алгоритм, и решить с ее помощью задачу на нахождение минимума функции с одним экстремумом, с несколькими локальными экстремумами, а также минимума линейной функции на выпуклом множестве:

- $f(x,y) = (x-0{,}4)^2 + (y-0{,}6)^4 \to \min$;
- $g(x,y) = f(x,y) + (\sin 10x)(\sin 10y) \to \min$;
- $\begin{cases}x + y \to \min,\\ f(x,y) \le 1.\end{cases}$

На каждой итерации ГА показывать текущую популяцию в виде облака точек. Программы для каждого из трех пунктов должны отличаться *только* видом целевой функции.

Сравнить результаты с (более) точными, найденными аналитически или с помощью функций, реализующих традиционные алгоритмы оптимизации.

Решить те же задачи с помощью стандартного модуля *MATLAB GADS*. Сравнить количество итераций и время, необходимое для достижения аналогичной точности результата.

Ввиду особенностей языка *MATLAB* программа должна использовать технику векторизации вычислений везде, где это возможно, для достижения высокого быстродействия.

Операторы селекции, скрещивания и мутации выбираются из приведенного выше списка в соответствии со своим вариантом (параметры операторов оставлены на усмотрение разработчика).

Вариант	**Селекция**	**Скрещивание**	**Мутация**
1	1.1.	2.1.	3.1.
2	1.1.	2.1.	3.2.
3	1.1.	2.2.	3.1.
4	1.1.	2.2.	3.2.
5	1.1.	2.3.	3.1.
6	1.1.	2.3.	3.2.
7	1.2.	2.1.	3.1.
8	1.2.	2.1.	3.2.
9	1.2.	2.2.	3.1.
10	1.2.	2.2.	3.2.
11	1.2.	2.3.	3.1.
12	1.2.	2.3.	3.2.
13	1.3.	2.1.	3.1.
14	1.3.	2.1.	3.2.
15	1.3.	2.2.	3.1.
16	1.3.	2.2.	3.2.
17	1.3.	2.3.	3.1.
18	1.3.	2.3.	3.2.

Вопросы для собеседования

1. Приведите примеры операторов селекции.
2. Приведите примеры операторов скрещивания и мутации, используемых в дискретных ГА.
3. Приведите примеры операторов скрещивания и мутации, используемых в непрерывных ГА.

4. Почему недостаточно одной лишь классической (бинарной) версии ГА?

Лабораторная работа №3. Эволюционный процесс

Цель работы

Применение генетических алгоритмов к оптимизационным задачам нестандартного вида.

Методические указания

ГА обладают рядом преимуществ перед традиционными методами оптимизации, в частности:

- переменные целевой функции могут быть как непрерывными, так и дискретными;
- отсутствует необходимость в вычислении производных;
- производится одновременный поиск в широком диапазоне значений переменных;
- возможна эффективная работа с функциями большого числа переменных;
- возможно эффективное распараллеливание алгоритмов;
- ГА применимы к целевым функциям со сложным рельефом, с большим количеством локальных экстремумов;
- результат может представлять собой перечень возможных оптимальных решений, а не просто одну точку в пространстве поиска;
- могут применяться различные формы представления (кодирования) переменных;
- целевые функции могут иметь самую разную природу: замкнутые формулы, вычисления на основе сложных алгоритмов, экспериментальные данные и пр.

Данные свойства позволяют ГА решать задачи, не поддающиеся традиционным методам. Более того, существуют вариации[3], в рамках которых индивидуумы не просто указывают на некоторую точку пространства поиска, а, в некотором смысле, «ведут активный образ жизни». Это эволюционное и генетическое программирование. Роль хромосом играют в первом случае конечные автоматы, а во втором — программы. В то время как в ГА целевая *функция* фиксирована, а индивидуумы представля-

[3] Их не относят напрямую к ГА, но считают родственными алгоритмами.

ют собой *данные,* здесь ситуация обратная: исходные *данные* выбираются заранее, а популяция состоит из *функций,* представленных в специфическом виде. Общая схема алгоритма мало чем отличается от ГА. Наиболее существенная разница связана с вычислением целевой функции и операторами скрещивания и мутации.

Задача, поставленная в данной лабораторной работе, не сводится к оптимизации какой-либо конкретной функции вещественных переменных. Тем не менее, она естественным образом решается с помощью ГА, если позволить целевой функции ранжировать индивидуумов на основании не только их собственных характеристик, но также и характеристик остальных индивидуумов в популяции.

Таким образом, если в предыдущей работе целевая функция *могла* быть сконструирована так, чтобы применяться ко всей популяции сразу, здесь она *должна* быть написана именно таким образом. В качестве аргумента ей передается весь имеющийся набор хромосом, а значения функции формируются на основе сравнения нескольких (в данном случае двух) хромосом. При этом целевая функция фактически частично берет на себя роль оператора селекции.

Варианты задания

Смоделировать эволюционный процесс, определить его сходимость, локализовать устойчивое значение генотипа в $(0{,}05; 0{,}95)^2$ для целевой функции, назначающей каждой особи ранг путем случайного разбиения популяции на пары с последующим проведением поединков в каждой из них.

Две координаты в составе хромосом задают, соответственно, выносливость (x_i) и силу (y_i) особи. Кроме того, для каждой особи формулой $p_i = 1 - (x_i + y_i)/2$ задана вероятность попадания по противнику. В начале поединка каждая особь получает запас энергии, равный ее выносливости. В ходе поединка особи по очереди пытаются нанести друг другу удары (попадая со своей вероятностью p_i); в случае успеха энергия атакуемого уменьшается на величину, равную силе атакующего (p_i не изменяется). Как только энергия одной из особей становится неположительной, ее противник выигрывает поединок.

По итогам турниров ранги назначаются таким образом, чтобы проигравшие отсеивались, а победители оценивались по трем следующим вариантам критерия.

Вариант	Цель ранжирования победителей
1.	Без предпочтений.
2.	Минимизация количества раундов поединка.
3.	Максимизация количества раундов поединка.

Вопросы для собеседования

1. Какие понятия заимствует ГА из биологии?
2. Что такое векторизация целевой функции, для чего она применяется?
3. Каковы преимущества и недостатки ГА по сравнению с традиционными методами оптимизации?
4. Какие существуют разновидности ГА?
5. В каких еще, кроме ГА, задачах и методах оптимизации используются эволюционные аналогии?

Лабораторная работа №4. Рефлексивная метаоптимизация

Цель работы

Поиск параметров генетического алгоритма, обеспечивающих наилучшую его сходимость.

Методические указания

Генетические алгоритмы представляют собой не классические целостные последовательности действий, но системы взаимодействующих друг с другом компонент (популяция и модифицирующие ее операторы). Каждая из этих компонент может иметь различные качественные и количественные характеристики. Например, популяция может характеризоваться типом индивидуумов, их областью значений и количеством. Каждый оператор характеризуется своим алгоритмом и его числовыми параметрами, а скрещивание и мутация, кроме того, вероятностью применения.

В зависимости от перечисленных характеристик эффективность генетического алгоритма может существенно различаться. С самого начала развития технологии ГА предпринимались попытки поиска оптимальных параметров. В данной лабораторной работе предлагается один из возможных подходов к этой задаче, основанный на технике рефлексивной метаоптимизации.

При предложенном ниже выборе параметров, подвергаемых оптимизации, данная лабораторная работа может служить иллюстрацией к вопросу о целесообразности совместного применения операторов скрещивания и мутации. Поскольку они решают одну и ту же задачу (создание индивидуумов для нового поколения), может возникнуть желание исключить один из них, чтобы избавиться от дублирования функциональности.

Рассматривая данные операторы по отдельности, исследователи пришли к следующим выводам. Если целевая функция имеет высокую степень регулярности и четко выраженный глобальный минимум, использование оператора скрещивания позволяет существенно ускорить поиск последнего. При увеличении числа локальных минимумов эффективность оператора скрещивания существенно снижается. Аналогичный эффект имеет место, если значения целевой функции в точках локальных минимумов приближаются к величине глобального минимума. С другой стороны, при использовании исключительно оператора мутации на работу ГА практически не влияют ни количество локальных экстремумов, ни их величины.

Таким образом, взаимные преимущества двух данных видов операторов проявляются в различных классах задач. В целом, использование скрещивания позволяет ускорить сходимость ГА, в то время как мутация, внося в популяцию помехи, замедляет стягивание ее к искомой точке, одновременно защищая от вырождения (преждевременного схождения к ложным экстремумам).

Варианты задания

Взять решения трех подзадач лабораторной работы №2, соответствующие своему варианту. Выбрать 2–3 параметра ГА, подлежащие оптимизации (например, вероятность скрещивания, вероятность и силу мутации). Выбрать для них адекватные области поиска, а для остальных параметров — подходящие фиксированные значения. Сформировать целевую функцию верхнего уровня, которая принимает значения выбранных параметров в качестве аргументов, производит поиск решения соответствующим алгоритмом и возвращает некоторый показатель качества результата (на выбор разработчика), т.е. меру его близости к истинному положению минимума. Для каждой подзадачи определить положение минимума этой целевой функции с помощью ГА, сравнить и объяснить результаты.

Вопросы для собеседования

1. Какова функция оператора селекции?
2. Какова функция оператора скрещивания?
3. Какова функция оператора мутации?
4. Чем отличаются роли операторов скрещивания и мутации?
5. Что такое гибридный ГА?

Библиографический список

1. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы: Учебник. — М.: Финансы и статистика, 2004.
2. Афонин В. Л., Макушкин В. А. Интеллектуальные робототехнические системы: курс лекций: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям в области информ. технологий. — М.: Интернет-Ун-т Информ. Технологий, 2005.
3. Букатова И. Л. и др. Эвоинформатика. Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Наука, 1991.
4. Поздяев В. В. Интеллектуальные системы. Уч. пособие. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2008.

Содержание

Введение....3

Порядок выполнения лабораторных работ....3

Лабораторная работа №1. Оптимизация функций вещественных переменных....3

Лабораторная работа №2. Оптимизация функций вещественных переменных, часть 2....11

Лабораторная работа №3. Эволюционный процесс....14

Лабораторная работа №4. Рефлексивная метаоптимизация....16

Библиографический список....18

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.09 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрен методической комиссией факультета
Информатики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Дружинин А.В.	Осипов П.А..
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 19.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные информационные системы проникают во все сферы нашей жизни, поэтому становятся неотъемлемым элементом при решении задач автоматизации и управления сложными объектами и процессами.

Современное понятие интеллектуальных систем (ИС) сформировалось в процессе развития теоретических основ кибернетики, современной теории управления, теории алгоритмов, развития современных информационных технологий и обобщения накопленных научных знаний, методов и средств в области искусственного интеллекта (ИИ).

Целью текста лекций является обзорное ознакомление студентов, обучающихся по направлению «Информатика и вычислительная техника» и другим родственным направлениям, с проблематикой и областями использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах обработки информации и управления, освещение теоретических и организационно-методических вопросов построения и функционирования систем, основанных на знаниях, привитие навыков практических работ по проектированию баз знаний. В результате изучения лекционного материала студенты получат знания по архитектуре и классификации ИС, методам представления знаний, областям применения, а также научатся выбирать адекватные проблемной области методы проектировании базы знаний.

Поэтому в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования для формирования у студентов общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций в модуль «Профессиональные дисциплины» учебного плана подготовки магистров по направлению 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника» введена учебная дисциплина «Интеллектуальные системы».

Изучение студентами дисциплины «Интеллектуальные системы» должно ознакомить с основными понятиями и концепциями теории интеллектуальных систем, а также осветить вопросы построения и функционирования ИС, основанных на знаниях, с целью вооружить будущих магистров теоретическими знаниями и практическими навыками, необходимыми для решения задач создания и использования современных интеллектуальных информационных технологий и систем в области информационно-аналитического обеспечения подготовки и принятия управленческих решений по всем аспектам экономических, социальных и технических проблем.

Предполагается, что студенты уже прослушали курсы по информатике, программированию и основам алгоритмизации, базам данных в информационно-управляющих системах, математическим основам кибернетики, теории систем и управления, моделированию систем, системам автоматизации и управления.

В связи с большим объемом информации при ограниченном количестве аудиторных часов в одном семестре (18 часов лекционных и 18 часов практических занятий) в определенной мере связаны ограниченный объем учебного по-

собия и краткость изложения материала, что во многом и предопределило его обзорный характер. Поэтому основная часть материала дана в виде краткой справочной информации со ссылками на более полные источники. В соответствии с этим в список рекомендуемой литературы включены источники, необходимые для углубленного изучения рассматриваемых вопросов. К настоящему времени издано множество научно-технической литературы по указанной проблематике, включая и учебно-методические издания из различных вузов. При формировании списка литературы учитывалась реальная возможность доступа студентов к рекомендуемым материалам, поэтому представленный список не претендует на полноту и не является исчерпывающим перечнем. В связи с этим ограничены ссылки на известные, но трудно доступные классические основополагающие работы, а в первую очередь указаны ссылки на более доступные современные книги, а также различные методические и справочные материалы в Интернете, отдельные фрагменты из которых частично использованы в данном пособии.

По причине ограниченности часов дисциплины внимание в тексте лекций уделено такому актуальному направлению ИИ как интеллектуальный анализ данных (ИАД). Приводится классификация методов и программных средств реализации ИАД, которые будут более подробно изучаться на практических занятиях.

Курс лекций включает 18 часов лекций, которые в соответствии с рабочей программой дисциплины сгруппированы в 3 раздела:

1. Введение в интеллектуальные системы.

2. Модели представления знаний. Способы формализации интеллектуальных задач с помощью методов искусственного интеллекта.

3. Интеллектуальный анализ данных. Методы ИАД и их программная реализация.

В конце каждого раздела помещены контрольные вопросы, которые служат для проверки качества усвоения и понимания материала и могут быть включены в экзаменационные билеты.

Фактическое содержание данного текста лекций является введением в научные и методические основы создания и применения современных интеллектуальных систем и технологий применительно к решению различных сложных задач управления в компаниях. Приведенный в тексте лекций материал интегрирует информацию из наиболее актуальных и значимых источников, что позволяет в лаконичной форме дать магистрантам результаты, достигнутые в теории и практике ИС.

Глава 1. ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

1.1. История исследований и основные понятия в области искусственного интеллекта

Возникновение понятия интеллектуальных систем тесно связано с понятием искусственного интеллекта (ИИ) и современной теории управления [1-14]. Исследования в области ИИ стали развиваться наиболее активно с 50-х годов прошлого века в связи с развитием средств вычислительной техники, информатики и кибернетики.

На разных этапах развития ИИ исследователями различных направлений ИИ предлагались свои определения ИИ. Так в математическом энциклопедическом словаре приводилось следующее определение: «Искусственный интеллект (от латинского intellectus – познание, понимание, рассудок) это раздел информатики, изучающий методы, способы и приемы моделирования и воспроизведения с помощью ЭВМ разумной деятельности человека, связанной с решением задач». Академик Г.С. Поспелов в книге «Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии» писал: «под искусственным интеллектом понимается наука о том, как заставить машину делать то, что умеет делать умный человек». В зарубежной литературе применяют определение термина «искусственный интеллект» как «Artificial Intelligence» (AI). В отличие от философии и психологии, искусственный интеллект в области исследований и разработок технических систем ориентирован не столько на понимание, сколько на построение интеллектуальных систем.

На первоначальном этапе развития были выделены и на данный момент остались актуальными следующие **основные проблемы искусственного интеллекта и направления его развития**:

1. Представление знаний.
2. Решение неформализованных задач.
3. Создание комплексных экспертных систем.
4. Интеллектуальный анализ данных.
5. Общение с ЭВМ на естественном языке.
6. Обучение.
7. Когнитивное моделирование (cognos – знание) и моделирование разума.
8. Обработка визуальной информации и робототехника.

Исторически существует 2 направления исследований в области искусственного интеллекта:

1. Моделирование результатов интеллектуальной деятельности или так называемый машинный интеллект.
2. Моделирование биологических систем или так называемый искусственный разум.

Первое направление рассматривает продукт интеллектуальной деятельности человека, изучает его структуру и стремится воспроизвести этот продукт сред-

ствами компьютерной техники. Успехи этого направления тесно связаны с развитием вычислительной техники и программирования.

Второе направление ИИ рассматривает данные о нейрофизиологической деятельности человека. Разработчики стремятся воспроизвести структуры и процессы в нервной системе с помощью технических устройств так, чтобы их поведение хорошо совпадало с поведением человека в заданных ситуациях. Развитие этого направления тесно связано с успехами наук о человеке. В свою очередь работы по искусственному разуму ведутся по следующим направлениям:

1. Моделирование механизмов умственной деятельности, связанное с созданием нейроподобных сетей (нейрокибернетика). В первую очередь изучаются нервные клетки – нейроны и структуры из взаимосвязанных клеток – нейронные сети. Механизмы таких разработок воплощены в нейрокомпьютеры.

2. Моделирование информационных процессов или так называемое эвристическое программирование, при котором моделируется не нейронные клетки, а мыслительные операции, выполнение которых приводит к успешному решению задачи. Успехи теоретического и прикладного характера достигнуты за счет разработки общего решателя задач – GPS (General Problem Solver).

3. Комплексный подход или так называемое эвристическое моделирование.

Необходимо отметить, что современная теория ИИ и созданные на ее основе интеллектуальные системы (ИС) и технологии были подготовлены трудами многих исследователей на протяжении многих лет.

В 40-50-х годах прошлого века началось бурное развитие информационных технологий и автоматизации: были созданы первые ЭВМ, а Норберт Винер создал свои основополагающие работы по кибернетике, и произошло окончательное оформление искусственного интеллекта как научного направления.

В конце 50-х годов XX в. родилась модель лабиринтного поиска. В этом подходе задача представляется как некоторое пространство состояний в форме графа, и в этом графе проводится поиск оптимального пути от входных данных к результирующим.

Начало 60-х годов – это эпоха эвристического программирования. Эвристика – правило, теоретически не обоснованное, но позволяющее сократить количество переборов в пространстве поиска. Эвристическое программирование – разработка стратегии действий на основе известных, заранее заданных, эвристик.

В 1963-1970 гг. к решению задач ИИ стали подключать методы математической логики. На основе метода резолюций француз Альбер Кольмероэ в 1973 г. создает язык логического программирования Пролог. Однако большинство реальных задач не сводится к набору аксиом. Человек, решая производственные задачи, не использует классическую логику, и поэтому применение логических моделей при всех своих преимуществах имеют существенные ограничения по классам решаемых задач.

В середине 1970-х годов в США вместо поисков универсальных алгоритма мышления стала развиваться идея моделирования конкретных знаний специа-

листов экспертов. В США появились первые коммерческие системы, основанные на знаниях, или экспертные системы (ЭС). Возник новый подход к решению задач искусственного интеллекта – представление знаний. В это время были созданы две первые классические экспертные системы для медицины (MYCIN) и для химии (DENDRAL).

В конце 70-х годов в Японии было объявлено о начале разработки проекта машин V поколения, основанных на знаниях.

В середине 1980-х годов был разработан в Центре космических исследований NASA язык CLIPS, обеспечивающий поддержку программирования на основе правил объектно-ориентированного и процедурного программирования. Название языка CLIPS – аббревиатура от C Language Integrated Production System.

Начиная с середины 80-х годов, повсеместно происходит коммерциализация искусственного интеллекта. Растут ежегодные капиталовложения, создаются промышленные экспертные системы. Растет интерес к самообучающимся системам, издаются десятки научных журналов, ежегодно собираются международные и национальные конференции по различным направлениям ИИ.

В Советском Союзе работы по искусственному интеллекту начались даже раньше, чем на западе [1-3, 5]. В 1954 г. в МГУ начал свою работу семинар «Автоматы и мышление» под руководством академика А.А. Ляпунова В этом семинаре принимали участие физиологи, лингвисты, психологи, математики. Принято считать, что именно в это время родился искусственный интеллект в России.

Среди наиболее значимых результатов, полученных отечественными учеными в 60-е годы, отмечают алгоритм «Кора» М.М. Бонгарда, моделировавший деятельность человеческого мозга при распознавании образов.

В 1965-1980 гг. происходит рождение нового направления – cитуационного управления. Основателем этой научной школы стал проф. Д.А. Поспелов, разработавший специальные модели представления ситуаций.

В 1974 г. при Комитете по системному анализу при президиуме АН СССР начал работу Научный совет по проблеме «Искусственный интеллект». В 1988 г. создается Ассоциация Искусственного Интеллекта (АИИ). Ее членами стали более 300 исследователей, а президентом избирается Д. А. Поспелов.

В 1980-1990 гг. проводятся активные исследования в области представления знаний, разрабатываются языки представления знаний, экспертные системы (более 300). В МГУ им. М. В. Ломоносова создается язык РЕФАЛ.

В конце 90-х годов начинают более активно использоваться идеи и методы искусственного интеллекта в теории и практике управления, появляются отдельные разработки на базе ИИ, включаемые в состав систем управления (СУ). Такие разработки стали называть интеллектными компонентами (ИК) систем управления.

В качестве наиболее используемого типа ИК для СУ становятся искусственные нейронные сети. В системах управления применяется несколько типов ИНС: многослойный персептрон, сеть Кохонена (как однослойная самооргани-

зующаяся карта – Kohonen's Self-Organizing Map), сеть Хопфилда, машина Больцмана и другие [5-8].

В качестве второго типа интеллектных компонент систем управления рассматриваются эволюционные (генетические) алгоритмы, которые тоже являются инструментом поиска рациональных решений. Эволюционные алгоритмы (ЭА) понимаются как алгоритмы со специальными структурами данных, оперирующие с популяциями индивидов.

Для реализации высокоинтеллектуальных функций систем управления используются интеллектные компоненты третьего типа – системы, основанные на «знаниях» (СОЗ, Knowledge-Based Systems). Например, знания могут быть представлены в некотором логическом языке. Обработка знаний с помощью логических средств позволяет получать некоторые предпочтения на множестве допустимых управлений с целью выбора одного из них. В общем случае СОЗ оперируют с более широкой информацией логическими, объектно-ориентированными и другими моделями, основанными на знаниях экспертов. Вместе с тем СОЗ могут использовать и традиционные алгоритмы, базирующиеся на уравнениях динамики.

1.2. Основные направления исследований в области интеллектуальных систем

Рассмотрим краткие характеристики основных направлений исследований в области искусственного интеллекта, описанные в [1-3, 5-11].

Разработка интеллектуальных систем, основанных на знаниях. Это одно из главных направлений ИИ. Основной целью построения таких систем являются выявление, исследование и применение знаний высококвалифицированных экспертов для решения сложных задач, возникающих на практике. При построении систем, основанных на знаниях (СОЗ), используются знания, накопленные экспертами в виде конкретных правил решения тех или иных задач. Это направление преследует цель имитации человеческого искусства анализа неструктурированных и слабоструктурированных проблем. В данной области исследований осуществляется разработка моделей представления, извлечения и структурирования знаний, а также изучаются проблемы создания баз знаний (БЗ), образующих ядро СОЗ. Частным случаем СОЗ являются экспертные системы (ЭС), подробное описание которых можно найти в [1, 5, 9, 17].

Разработка естественно-языковых интерфейсов и машинный перевод. Проблемы компьютерной лингвистики и машинного перевода разрабатываются в ИИ с 1950-х гг. Системы машинного перевода с одного естественного языка на другой обеспечивают быстроту и систематичность доступа к информации, оперативность и единообразие перевода больших потоков. Системы машинного перевода строятся как интеллектуальные системы, поскольку в их основе лежат БЗ в определённой предметной области и сложные модели, обеспечивающие дополнительную трансляцию «исходный язык оригинала – язык смысла – язык перевода». Они базируются на структурно-логическом подходе, включающем последовательный анализ и синтез естественно-языковых сообщений. Кроме

того, в них осуществляется ассоциативный поиск аналогичных фрагментов текста и их переводов в специальных базах данных (БД). Данное направление охватывает также исследования методов и разработку систем, обеспечивающих реализацию процесса общения человека с компьютером на естественном языке (так называемые системы ЕЯ-общения). Кроме того, создаются системы речевого общения в целях повышения скорости ввода информации в ЭВМ, разгрузки зрения и рук, а также для реализации речевого общения на значительном расстоянии. В таких системах под текстом понимают фонемный текст (как слышится).

Обработка визуальной информации. В этом научном направлении решаются задачи обработки, анализа и синтеза изображений. Задача обработки изображений связана с трансформированием графических образов, результатом которого являются новые изображения. В задаче анализа исходные изображения преобразуются в данные другого типа, например в текстовые описания. При синтезе изображений на вход системы поступает алгоритм построения изображения, а выходными данными являются графические объекты (системы машинной графики).

Обучение и самообучение. Эта актуальная область ИИ включает модели, методы и алгоритмы, ориентированные на автоматическое накопление и формирование знаний с использованием процедур анализа и обобщения данных [19-21]. К данному направлению относятся появившиеся в 90-х годах системы добычи данных (Data Mining) и системы поиска закономерностей в компьютерных базах данных (Knowledge Discovery).

Игры и машинное творчество. Машинное творчество охватывает сочинение компьютерной музыки, стихов, интеллектуальные системы для изобретения новых объектов. Создание интеллектуальных компьютерных игр является одним из самых развитых коммерческих направлений в сфере разработки программного обеспечения. Кроме того, компьютерные игры предоставляют мощный арсенал разнообразных средств, используемых для обучения.

Программное обеспечение систем ИИ. Инструментальные средства для разработки интеллектуальных систем включают специальные языки программирования, ориентированные на обработку символьной информации (LISP, SMALLTALK, РЕФАЛ), языки логического программирования (PROLOG), языки представления знаний (OPS5, KRL, FRL), интегрированные программные среды, содержащие арсенал инструментальных средств для создания систем ИИ (КЕ, ARTS, GURU, G2), а также оболочки экспертных систем (BUILD, EMYCIN, EXSYS Professional, ЭКСПЕРТ), которые позволяют создавать прикладные ЭС, не прибегая к программированию [7, 15-17].

Новые архитектуры компьютеров. Это направление связано с созданием компьютеров не фон-неймановской архитектуры, ориентированных на обработку символьной информации. Известны удачные промышленные решения параллельных и векторных компьютеров, однако в настоящее время они имеют весьма высокую стоимость, а также недостаточную совместимость с существующими вычислительными средствами.

Интеллектуальные роботы. Создание интеллектуальных роботов составляет конечную цель робототехники. В настоящее время в основном используются программируемые манипуляторы с жёсткой схемой управления, названные роботами первого поколения. Несмотря на очевидные успехи отдельных разработок, эра интеллектуальных автономных роботов пока не наступила. Основными сдерживающими факторами в разработке автономных роботов являются нерешённые проблемы в области интерпретации знаний, машинного зрения, адекватного хранения и обработки трёхмерной визуальной информации.

1.3. Основные признаки и отличия интеллектуальных систем

Для интеллектуальных систем характерны следующие признаки [6-7, 10-11]:

1. Развитые коммуникативные способности: возможность обработки произвольных запросов в диалоге на языке максимально приближенном к естественному (система естественно-языкового интерфейса – СЕЯИ).

2. Направленность на решение слабоструктурированных, плохо формализуемых задач (реализация мягких моделей).

3. Способность работать с неопределенными и динамичными данными.

4. Способность к развитию системы и извлечению знаний из накопленного опыта конкретных ситуаций.

5. Возможность получения и использования информации, которая явно не хранится, а выводится из имеющихся в базе данных.

6. Система имеет не только модель предметной области, но и модель самой себя, что позволяет ей определять границы своей компетентности.

7. Способность к выводам по аналогии.

8. Способность объяснять свои действия, неудачи пользователя, предупреждать пользователя о некоторых ситуациях, приводящих к нарушению целостности данных.

В отличие от обычных аналитических и статистических моделей, ИС позволяют получить решение трудно формализуемых слабо структурированных задач.

Возможность ИС работать со слабоструктурированными данными подразумевает наличие следующих качеств:

− решать задачи, описанные только в терминах «мягких» моделей, когда зависимости между основными показателями являются не вполне определенными или даже неизвестными в пределах некоторого класса;

− способность к работе с неопределенными или динамичными данными, изменяющимися в процессе обработки, позволяет использовать ИС в условиях, когда методы обработки данных могут изменяться и уточняться по мере поступления новых данных;

− способность к развитию системы и извлечению знаний из накопленного опыта конкретных ситуаций увеличивает мобильность и гибкость системы, позволяя ей быстро осваивать новые области применения.

Отличия программирования систем искусственного интеллекта от обычных программных систем представлены в таблице.

Таблица

Отличия интеллектуальных систем от обычных программных систем

Характеристика	Программирование в интеллектуальных системах	Традиционное программирование
Тип обработки	Символьный	Числовой
Метод	Эвристический поиск	Точный алгоритм
Задание шагов решения	Неявное	Явное
Искомое решение	Удовлетворительное	Оптимальное
Управление и данные	Смешаны	Разделены
Знания	Неточные	Точные
Модификации	Частые	Редкие

Для интеллектуальных информационных систем, ориентированных на генерацию алгоритмов решения задач, характерны следующие признаки:

– развитые коммуникативные способности;
– умение решать сложные плохо формализуемые задачи;
– способность к самообучению.

Коммуникативные способности ИС характеризуют способ взаимодействия (интерфейса) конечного пользователя с системой, в частности, возможность формулирования произвольного запроса в диалоге с ИС на языке, максимально приближенном к естественному.

Сложные плохо формализуемые задачи – это задачи, которые требуют построения оригинального алгоритма решения в зависимости от конкретной ситуации, для которой могут быть характерны неопределенность и динамичность исходных данных и знаний.

Способность к самообучению – это возможность автоматического извлечения знаний для решения задач из накопленного опыта конкретных ситуаций.

В различных ИС перечисленные признаки интеллектуальности развиты в неодинаковой степени и редко, когда все четыре признака реализуются одновременно. Условно каждому из признаков интеллектуальности соответствует свой класс ИС:

– системы с интеллектуальным интерфейсом;
– экспертные системы;
– самообучающиеся системы.

Анализ интеллектуальности систем, разработанный профессором Логиновским О.В., основан на следующих базовых интеллектуальных структурах, которые приводятся ниже в соответствии с работой [10]. Такие структуры, как идентификаторы, исполнители, накопители, модификаторы являются базовыми элементами более сложных интеллектуальных систем (экспертных, систем автоматизации управления, в частности, автоматизированных систем проектирования и управления). При этом системы становятся многоуровневыми, иерархическими, на нижнем уровне которых обязательно присутствуют интеллектуальные идентификаторы, исполнители и накопители. В конкретной предметной

области управления (планирования, проектирования) объект управления выделяется в системе идентификаторами и накопителями по принципу обратной связи.

Перечисленные виды интеллектуальных систем:

1. Интеллектуальный идентификатор (ИДЕН)

$$<\text{ИДЕН}> = \{ A, p, w, a, \text{Ш} \},$$

где A – множество объектов предметной области (опорное множество); p – подмножество A, являющееся классом эквивалентности по какому-либо признаку; w – семантическая достоверность сведения об объекте; a – семантический указатель объекта из опорного множества A; Ш – шкала понятий для множества A.

Интеллектуальный идентификатор выполняет в системе функции идентификации данных об объектах предметной области по существующим семантическим указателям, решая задачу интеллектуального распознавания объектов.

2. Интеллектуальный исполнитель (ИСП) представляет собой интеллектуальную структуру, позволяющую по данным об объекте a из опорного множества A отыскать конкретный объект и (при необходимости) осуществить операции по его воплощению в предметной области.

3. Интеллектуальный накопитель (НАК) также выполняет функции интеллектуальной системы, состоящие в пополнении данных об объекте от различных источников из множества A, формируя соответствующие базы и банки данных территориального и муниципального управления.

Формульные соотношения интеллектуальных накопителя и исполнителя аналогичны интеллектуальному идентификатору.

4. Интеллектуальный модификатор (МОД) осуществляет функции преобразования данных из одного множества A в данные об объектах другого множества A' со шкалой понятий (перечнем свойств) Ш':

$$\{ A, p, w, a, \text{Ш} \} \Rightarrow \{ A', p, w, a', \text{Ш}' \}.$$

При совпадении опорных множеств A и A', данные об объекте $a \in A$ преобразуются модификатором в данные о том же объекте (сингулярные модификаторы). Свойство сингулярности весьма характерно для автоматизированных систем проектирования и управления.

5. Интеллектуальный анализатор (АНАЛ), выполняющий функции анализа и оценки эффективности системы с учетом интеллектуальности и других основополагающих характеристик.

6. Интеллектуальный синтезатор (СИН), осуществляющий синтез новых характеристик, свойств и возможностей системы на основе сформированных баз знаний о предметной области в целом и самой системе в частности с помощью искусственного или естественного интеллекта.

На основе представленного набора интеллектуальных структур можно анализировать или формировать на множестве компонент предметной области топологию интеллектуальности посредством понятия интеллектуальной системы:

$$SI_i = \{ R_i, t_i \},$$

где R_i – множество компонент предметной области для i-той системы; t_i – топология i-той системы, включающую базу топологий в виде набора базовых интеллектуальных структур.

При $t_i = 0$, любая из рассматриваемых систем не является интеллектуальной.

Формализация процедур оценки интеллектуальности систем должна осуществляться совместно с оценкой их эффективности и конкурентоспособности:

$$SE_i = \{R_i, F_i, C_i, P_i, I_i, E_i \},$$

где F_i – множество компонент функциональной модели i-той системы; C_i – множество компонент структурной модели i-той системы; P_i – множество компонент программного обеспечения i-той системы; I_i – множество компонент информационного обеспечения i-той системы; E_i - множество характеристик эффективности i-той системы.

Все указанные компоненты и характеристики для конкретных систем всегда больше нуля. Более сильная топология соответствует более высокому уровню эффективности и конкурентоспособности системы.

1.4. Основные типы интеллектуальных систем

В данном учебном пособии, как и в [11] мы будем рассматривать следующие классы систем искусственного интеллекта:

1. Системы с интеллектуальной обратной связью и интеллектуальными интерфейсами.
2. Автоматизированные системы распознавания образов.
3. Автоматизированные системы поддержки принятия решений.
4. Экспертные системы.
5. Нейронные сети.
6. Когнитивное моделирование.
7. Генетические алгоритмы и моделирование эволюции.
8. Выявление знаний из опыта (эмпирических фактов) и интеллектуальный анализ данных (Data Mining).

Этими классами системы ИС не исчерпываются, но мы вынуждены ограничится ими, как основными, в связи с ограниченностью объема учебного пособия.

Системы с интеллектуальным интерфейсом. Применение ИИ для усиления коммуникативных способностей информационных систем привело к появлению систем с интеллектуальным интерфейсом, среди которых можно выделить следующие типы [6-7]:

1. Интеллектуальные базы данных. Они позволяют в отличие от традиционных БД обеспечивать выборку необходимой информации, не присутствующей в явном виде, а выводимой из совокупности хранимых данных.

2. Естественно-языковой интерфейс. Он применяется для доступа к интеллектуальным базам данных, контекстного поиска документальной текстовой информации, голосового ввода команд в системах управления, машинного перевода с иностранных языков. Для реализации ЕЯ-интерфейса необходимо решить проблемы морфологического, синтаксического и семантического анализа, а также задачу синтеза высказываний на естественном языке. При морфологическом анализе осуществляются распознавание и проверка правильности написания слов в словаре.

3. Гипертекстовые системы предназначены для реализации поиска по ключевым словам в базах текстовой информации. Интеллектуальные гипертекстовые системы отличаются возможностью более сложной семантической организации ключевых слов, которая отражает различные смысловые отношения терминов. Таким образом, механизм поиска работает прежде всего с базой знаний ключевых слов, а уже затем непосредственно с текстом. В более широком плане сказанное распространяется и на поиск мультимедийной информации, включающей помимо текстовой и цифровой информации графические, аудио и видео-образы.

4. Системы контекстной помощи можно рассматривать, как частный случай интеллектуальных гипертекстовых и естественно-языковых систем. В отличие от обычных систем помощи, навязывающих пользователю схему поиска требуемой информации, в системах контекстной помощи пользователь описывает проблему (ситуацию), а система с помощью дополнительного диалога ее конкретизирует и сама выполняет поиск относящихся к ситуации рекомендаций. Такие системы относятся к классу систем распространения знаний (Knowledge Publishing) и создаются как приложение к системам документации (например, технической документации по эксплуатации товаров).

5. Системы когнитивной графики позволяют осуществлять интерфейс пользователя с ИС с помощью графических образов, которые генерируются в соответствии с происходящими событиями. Такие системы используются в мониторинге и управлении оперативными процессами. Графические образы в наглядном и интегрированном виде описывают множество параметров изучаемой ситуации. Например, состояние сложного управляемого объекта отображается в виде человеческого лица, на котором каждая черта отвечает за какой-либо параметр, а общее выражение лица дает интегрированную характеристику ситуации.

Экспертные системы. Назначение экспертных систем (ЭС) заключается в решении достаточно трудных для экспертов задач на основе накапливаемой базы знаний, отражающей опыт работы экспертов в рассматриваемой проблемной области. Достоинство применения экспертных систем заключается в возможности принятия решений в уникальных ситуациях, для которых алгоритм заранее не известен и формируется по исходным данным в виде цепочки рассуждений

(правил принятия решений) из базы знаний. Причем решение задач предполагается осуществлять в условиях неполноты, недостоверности, многозначности исходной информации и качественных оценок процессов.

Экспертная система является инструментом, усиливающим интеллектуальные способности эксперта, и может выполнять следующие роли:

– консультанта для неопытных или непрофессиональных пользователей;
– ассистента в связи с необходимостью анализа экспертом различных вариантов принятия решений;
– партнера эксперта по вопросам, относящимся к источникам знаний из смежных областей деятельности.

Область исследования экспертных систем называют «инженерией знаний». ЭС применяются для решения неформализованных проблем, к которым относят задачи, обладающие одной (или несколькими) из следующих характеристик:

– задачи не могут быть представлены в числовой форме;
– неоднозначностью, неточностью, противоречивостью;
– цели нельзя выразить с помощью чётко определённой целевой функции;
– не существует однозначного алгоритмического решения задачи;
– алгоритмическое решение существует, но его нельзя использовать по причине большой размерности пространства решений и ограничений на ресурсы (времени, памяти).

Главное отличие ЭС на рис. 1 и систем искусственного интеллекта от систем обработки данных состоит в том, что в них используется символьный, а не числовой способ представления данных, а в качестве методов обработки информации применяются процедуры логического вывода и эвристического поиска решений.

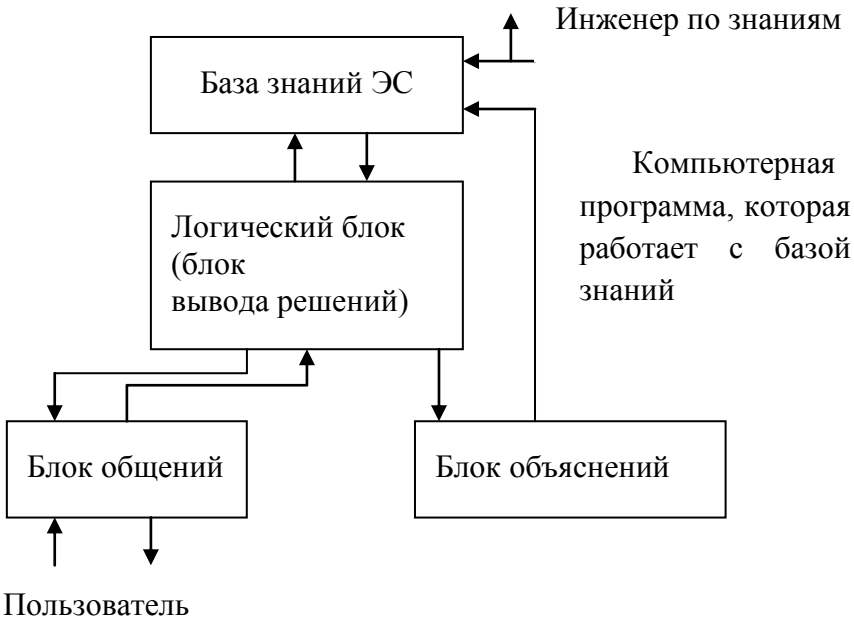


Рис. 1. Общая структура экспертной системы

Отличительным блоком структуры ЭС является логический блок (решатель), в котором вырабатывается экспертное заключение.

Структура классификации экспертных систем представлена на рис.2.



Рис. 2. Классификация экспертных систем

Классификация по решаемой задаче имеет вид:

1. Экспертные системы, обладающие средствами для интеллектуального анализа данных. Для интерпретации данных используются технологии Data Mining.
2. Диагностические экспертные системы. Они применяется при диагнозе технической системы, при диагностике в сфере медицины и в сфере финансов, банковского дела.
3. Экспертные системы мониторинга. Они способны дать объяснение данных в реальном масштабе времени, либо сигнализировать выход параметров за допустимые значения (границы) (например, в подразделениях министерства чрезвычайных ситуаций).
4. Экспертные системы прогнозирования. Системы, которые прогнозируют состояние финансового рынка, курс валют. ЭС прогнозирования являются первыми моделями аналитического плана, т. е. использующими элемент вероятности.
5. Экспертные системы планирования. С помощью таких систем составляется, например, бюджетное планирование, финансирование.
6. Экспертные системы для управления. Это системы, которые подготавливают варианты возможных решений для управления: например, системы-подсказчики для руководителей.

Классификация ЭС по связи с реальным временем:

1. Статические экспертные системы. К статическим относят такие системы, в которых базы данных и данные не меняются с течением времени (по меньшей мере, во время проведения экспертизы). Примером статической системы может служить ЭС диагностики технического состояния какого-либо устройства.
2. Динамические экспертные системы. Динамические системы применимы для задачи анализа, когда резко меняется ситуация или база знаний. Для работы такой системы должна существовать обратная связь и быстрые машины.
3. Квазидинамические экспертные системы. К квазидинамическим относятся ЭС, в которых если даже за время осуществления экспертизы параметры меняются, то при повторной экспертизе параметры остаются неизменными.

Классификация экспертных систем по типам применяемой архитектуры ЭВМ:

1. Экспертные системы с обычной архитектурой ЭВМ.
2. Экспертные системы со специальными нейрокомпьютерами – многопроцессорными вычислительными системами.

Классификация ЭС по степени интеграции с другими программами:

1. Автономные экспертные системы. К автономным ЭС относят системы, которые не требуют дополнительных программ для обработки данных.
2. Гибридные экспертные системы. К гибридным ЭС относят системы, которые работают с привлечением дополнительных программных средств.

Экспертные системы охватывают самые разные предметные области, среди которых лидируют бизнес, производство, медицина, проектирование и системы управления [1, 5-7, 15, 17, 18].

Нейронные сети. Искусственная нейронная сеть (ИНС) – это кибернетическая модель нервной системы, которая представляет собой совокупность большого числа сравнительно простых элементов – нейронов, топология соединения которых зависит от типа сети. Чтобы создать нейронную сеть для решения какой-либо конкретной задачи, следует выбрать способ соединения нейронов друг с другом и подобрать значения параметров межнейронных соединений.

Нейронные сети – обобщённое название группы математических алгоритмов, обладающих способностью обучаться на примерах, «узнавая» впоследствии черты встреченных образцов и ситуаций. Благодаря этой способности нейронные сети используются при решении задач обработки сигналов и изображений, распознавания образов, а также для прогнозирования [7].

ИНС представляет собой совокупность простых вычислительных элементов – искусственных нейронов, каждый из которых обладает определённым количеством входов (дендритов) и единственным выходом (аксоном), разветвления которого подходят к синапсам, связывающим его с другими нейронами. На входы нейрона поступает информация извне или от других нейронов. Каждый нейрон характеризуется функцией преобразования входных сигналов в выходной (функция возбуждения нейрона). Нейроны в сети могут иметь одинаковые или разные функции возбуждения. Сигналы, поступающие на вход нейрона, неравнозначны в том смысле, что информация из одного источника может быть более важной, чем из другого. Приоритеты входов задаются с помощью вектора весовых коэффициентов, моделирующих синаптическую силу биологических нейронов.

Модель искусственного нейрона представляет собой дискретно-непрерывный преобразователь информации. Информация, поступающая на вход нейрона, суммируется с учётом весовых коэффициентов w_i, сигналов x_i, $i = 1, .., n$, где n – размерность пространства входных сигналов. Потенциал нейрона определяется по формуле:

$$P = \sum_{i=0}^{n} x_i w_i.$$

Взвешенная сумма поступивших сигналов (потенциал) преобразуется с помощью передаточной функции $f(P)$ в выходной сигнал нейрона Y, который передается другим нейронам сети, т. е. $Y = f(P)$. Вид передаточной (активационной) функции является важнейшей характеристикой нейрона. В общем случае эта функция может быть ступенчатой (пороговой), линейной или нелинейной). Тип функции переноса выбирается с учётом конкретной задачи, решаемой с применением нейронных сетей. Например, в задачах аппроксимации и классификации предпочтение отдают логистической (сигмоидальной) кривой.

Нейронная сеть представляет собой совокупность искусственных нейронов, организованных слоями. При этом выходы нейронов одного слоя соединяются с входами нейронов другого.

В зависимости от топологии соединений нейронов ИНС подразделяются на одноуровневые и многоуровневые, с обратными связями и без них. Связи между слоями могут иметь различную структуру.

В однолинейных сетях каждый нейрон (узел) нижнего слоя связан с одним нейроном верхнего слоя. Если каждый нейрон нижнего слоя соединён с несколькими нейронами следующего слоя, то получается пирамидальная сеть. Воронкообразная схема соединений предполагает связь каждого узла верхнего слоя со всеми узлами нижнего уровня. Существуют также древовидные и рекуррентные сети, содержащие обратные связи с произвольной структурой межнейронных соединений.

Чтобы построить ИНС для решения конкретной задачи, нужно выбрать тип соединения нейронов, определить вид передаточных функций элементов и подобрать весовые коэффициенты межнейронных связей.

При всём многообразии возможных конфигураций ИНС на практике получили распространение лишь некоторые из них. Классические модели нейронных сетей:

- многослойные сети;
- сети Хопфилда;
- сети Хемминга;
- сети обратного распространения;
- сети встречного распространения;
- РБФ-сети;
- сети Кохонена и др.

С помощью нейронных сетей, которые относят к методам эволюционного моделирования, решается широкий класс задач: классификация образов, кластеризация, аппроксимация, прогноз данных, оптимизация, ассоциативная память, управление динамическими объектами. Причем в силу всего вышесказанного, нейронные сети в сравнении с методами математической статистики справляются с перечисленными задачами тем успешнее, чем хуже формализуема задача.

Нейросетевые технологии нашли широкое применение в таких направлениях, как распознавание печатного текста, контроль качества продукции на производстве, идентификация событий в ускорителях частиц, разведка нефти,

борьба с наркотиками, медицинские и военные приложения, управление и оптимизация, финансовый анализ, прогнозирование и др.

В сфере экономики нейросетевые технологии могут использоваться для классификации и анализа временных рядов путём аппроксимации сложных нелинейных функций.

Экспериментально установлено, что модели нейронных сетей обеспечивают большую точность при выявлении нелинейных закономерностей на фондовом рынке по сравнению с регрессионными моделями [7].

Когнитивное моделирование – это способ анализа, обеспечивающий определение силы и направления влияния факторов на перевод объекта управления в целевое состояние с учетом сходства и различия в влиянии различных факторов на объект управления.

Ведущей научной организацией России, занимающейся разработкой и применением технологии когнитивного анализа, является Институт проблем управления РАН. На их научных трудах в области когнитивного анализа и основывается данная лекция [11].

В основе технологии когнитивного анализа и моделирования (рис. 3) лежит когнитивная (познавательно-целевая) структуризация знаний об объекте и внешней для него среды.

Когнитивная структуризация предметной области – это выявление будущих целевых и нежелательных состояний объекта управления и наиболее существенных (базисных) факторов управления и внешней среды, влияющих на переход объекта в эти состояния, а также установление на качественном уровне причинно-следственных связей между ними, с учетом взаимовлияния факторов друг на друга.

Результаты когнитивной структуризации отображаются с помощью когнитивной карты (модели).

Отбор базисных факторов проводится путем применения ***PEST-анализа,*** выделяющего четыре основные группы факторов (аспекта), определяющих поведение исследуемого объекта:

- **P**olicy – политика;
- **E**conomy – экономика;
- **S**ociety – общество (социокультурный аспект);
- **T**echnology – технология.

PEST-анализ можно рассматривать как вариант системного анализа, так как факторы, относящиеся к перечисленным четырем аспектам, в общем случае тесно взаимосвязаны и характеризуют различные иерархические уровни общества, как системы.

В этой системе есть детерминирующие связи, направленные с нижних уровней иерархии системы к верхним (наука и технология влияет на экономику, экономика влияет на политику), а также обратные и межуровневые связи. Изменение любого из факторов через эту систему связей может влиять на все остальные.

Эти изменения могут представлять угрозу развитию объекта, или, наоборот, предоставлять новые возможности для его успешного развития.

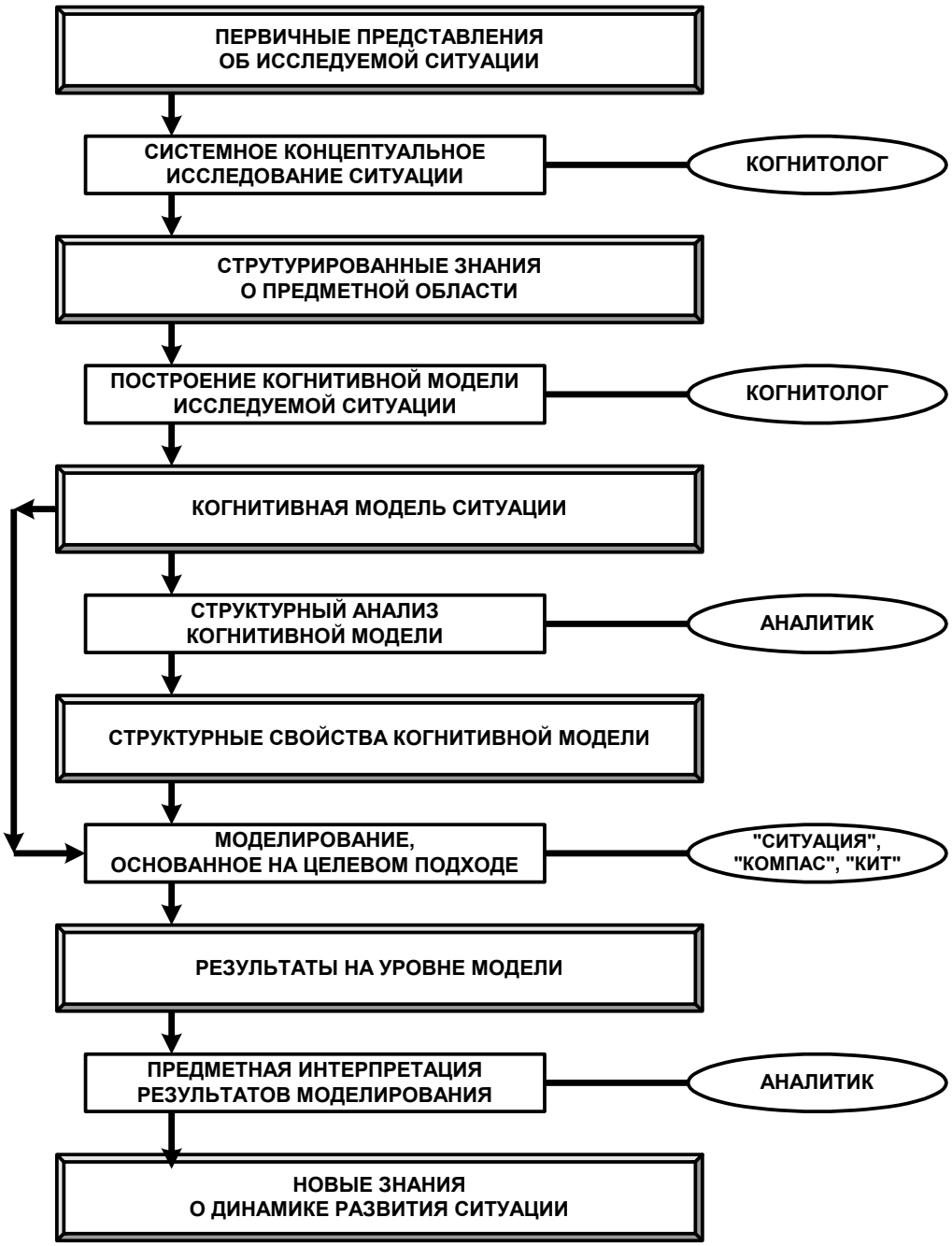


Рис. 3. Технология когнитивного анализа и моделирования

Следующий шаг – ситуационный анализ проблем, так называемый ***SWOT-анализ***:

- **S**trengths – сильные стороны;
- **W**eaknesses – недостатки, слабые стороны;
- **O**pportunities – возможности;
- **T**hreats – угрозы.

SWOT-анализ включает анализ сильных и слабых сторон развития исследуемого объекта в их взаимодействии с угрозами и возможностями и позволяет определить актуальные проблемные области, узкие места, шансы и опасности, с учетом факторов внешней среды.

Технология когнитивного анализа и моделирования поддерживается программными комплексами «Ситуация», «Компас», «КИТ» (см. рис. 3), созданными в ИПУ РАН, которые позволяют в сложных и неопределенных ситуациях быстро, комплексно и системно охарактеризовать и обосновать сложившуюся ситуацию и на качественном уровне предложить пути решения проблемы в этой ситуации с учетом факторов внешней среды.

Применение когнитивных технологий открывает новые возможности прогнозирования и управления в различных областях:

– в экономической сфере – позволяет в сжатые сроки разработать и обосновать стратегию экономического развития предприятия, банка, региона или даже целого государства с учетом влияния изменений во внешней среде;

– в сфере финансов и фондового рынка – учесть ожидания участников рынка;

– в военной области и области информационной безопасности – противостоять стратегическому информационному оружию, заблаговременно распознавая конфликтные структуры и вырабатывая адекватные меры реагирования на угрозы.

Когнитивные технологии автоматизируют часть функций процессов познания, поэтому они с успехом могут применяться во всех областях, в которых востребовано само познание. Вот лишь некоторые из этих областей:

1. Модели и методы интеллектуальных информационных технологий и систем для создания геополитических, национальных и региональных стратегий социально-экономического развития.

2. Модели выживания «мягких» систем в изменяющихся средах при дефиците ресурсов.

3. Ситуационный анализ и управление развитием событий в кризисных средах и ситуациях.

4. Информационный мониторинг социально-политических, социально-экономических и военно-политических ситуаций.

5. Разработка принципов и методологии проведения компьютерного анализа проблемных ситуаций.

6. Выработка аналитических сценариев развития проблемных ситуаций и управления ими.

7. Подготовка рекомендаций по решению первоочередных стратегических проблем на основе компьютерной системы анализа проблемных ситуаций.

8. Мониторинг проблем в социально-экономическом развитии корпорации, региона, города, государства.

9. Технология когнитивного моделирования целенаправленного развития региона РФ.

10. Анализ развития региона и мониторинг проблемных ситуаций при целенаправленном развитии региона.

Интеллектуальный анализ данных. Данная лекция основана на работах [8, 19-21]. К числу интеллектуальных технологий анализа данных относят технологии ***Data Mining*** (разведка, добыча данных), которые реализуют:

– поиск ранее неизвестных функциональных и логических закономерностей накопленной информации (интеллектуальная деятельность);

– построение моделей и правил с целью объяснения этих найденных закономерностей или найденных аномалий;

– прогнозирование развития изучаемых процессов.

Специфика современных требований к переработке данных:

– данные имеют практически неограниченный объем;

– данные являются разнородными (количественными, качественными, тестовыми и т.д.);

– результаты должны быть конкретны и понятны;

– инструменты для обработки «сырых», т. е. непроверенных, неверифицированных данных должны быть просты в использовании.

Процесс обнаружения в «сырых» данных включает в себя поиск:

– ранее неизвестных знаний;

– нетривиальных выводов;

– практически полезных выводов;

– доступных для интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности.

Место технологий ***Data Mining*** среди других технологий обработки данных по уровню знаний, извлекаемых из данных, приведено на рис 4.

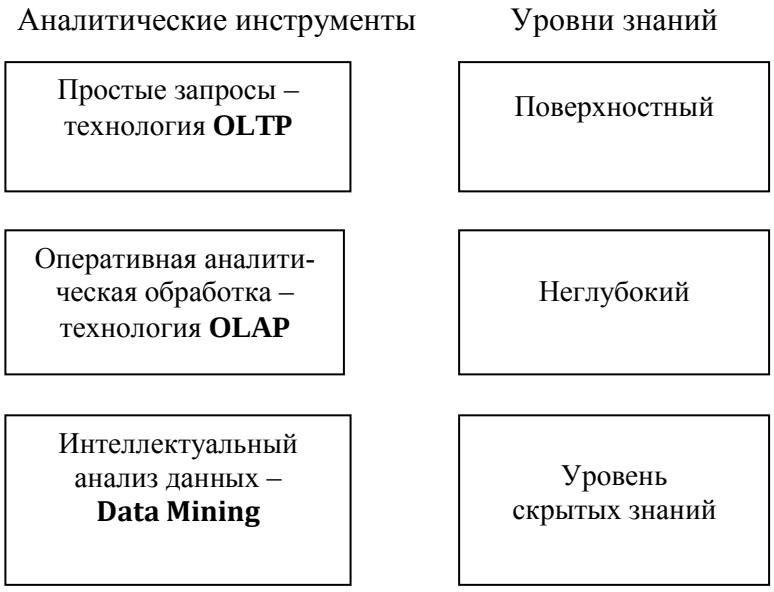


Рис. 4. Схема уровней знаний, извлекаемых из данных

Data Mining применяется в следующих отраслях:

– торговля, в том числе и розничная (анализ покупательской корзины, анализ временных шаблонов, создание прогнозируемых моделей);

– страхование;

– банковское дело (выявление мошенников с кредитными карточками, сегментация клиентов (разбиение на группы – каким клиентам какие услуги предлагать), прогнозирование изменения клиентуры);

– в сфере коммуникаций (здесь ставятся следующие задачи: анализ записей по характеристикам вызовов – какой круг клиентов, какими видами услуг пользуется; выявление лояльности клиентов);

– химия;

– промышленность;

– медицина и т. д.

Успех применения систем Data Mining основан на том, что эти технологии обеспечивают исследование эмпирических данных и выявление в них скрытых закономерностей различных видов, т. е. обеспечивают решение следующих задач:

1. Классификация – задача выявления признаков однотипных объектов для того, чтобы отнести новый объект к тому или иному классу.

2. Кластеризация – развитие идеи классификации на более сложный случай, когда сами классы объектов не предопределены, но стоит задача определить однородные группы данных.

3. Выявление ассоциаций – установление правил, указывающих на то, что при наступлении одного события с определенной вероятностью наступает другое.

4. Выявление последовательностей – установление связи между событиями, наступающими не одновременно, а с некоторым временным шагом.

5. Задача прогнозирования – оценка будущих значений, определяемых показателей на основе их текущих и ретроспективных данных. Это наиболее сложная из перечисленных задач.

Процесс информационной деятельности может быть представлен рядом временных стадий, которые изображены на рис.5.

Свободный поиск – это процесс исследования накопленных данных на предмет поиска скрытых закономерностей без предварительного выявления гипотез относительно этих закономерностей (если гипотеза скрытая, то поиск свободный).

В процессе свободного поиска используется математический аппарат условной логики, с помощью правил которой могут быть описаны группы примеров в задачах классификации и кластеризации.

На основе использования правил ассоциативной логики можно решать задачи выявления ассоциаций и последовательностей.

Выявление трендов (наличие какой-то устойчивой закономерности в том объеме данных, которые используются) и колебаний является первым этапом программирования.

<table>
<tr><td colspan="6">Стадии</td></tr>
<tr><td colspan="3">Свободный поиск</td><td colspan="2">Прогностическое моделирование</td><td>Анализ исключений</td></tr>
<tr><td>Выявление закономерностей условной логики</td><td>Выявление закономерностей ассоциативной логики</td><td>Выявление трендов и колебаний</td><td>Предсказание неизвестных значений</td><td>Предсказание развития процессов</td><td>Выявление и объяснение отклонений</td></tr>
<tr><td colspan="6">Действия</td></tr>
</table>

Рис. 5. Стадии информационной деятельности

Вторая стадия информационной деятельности – прогностическое моделирование. Осуществление действий на этой стадии становится возможным после выполнения действий на стадии свободного поиска.

Третья стадия – анализ исключения из правил. Данная стадия занимается тем, чем обусловлено выпадение какого-то параметра от ранее установленной закономерности, выявляются отклонения и даются им объяснения.

Математической основой систем Data Mining является следующие методы поиска различных закономерностей в данных: деревья решений; алгоритмы кластеризации; регрессионный анализ; нейронные сети; временные ряды и др. Указанные методы и программные продукты Data Mining подробнее описаны в главе 3.

Генетические Алгоритмы (ГА) – это адаптивные методы функциональной оптимизации, основанные на компьютерном имитационном моделировании биологической эволюции. Основные принципы ГА были сформулированы Голландом в 1975 году и хорошо описаны во многих работах и на ряде сайтов в Internet [7-8].

В генетических алгоритмах используются специфические термины, взятые из генетики, которые трактуются следующим образом. Исходные логические закономерности в базе данных именуют хромосомами, а весь набор закономерностей называют популяцией хромосом. Популяция обрабатывается с помощью процедур репродукции, изменчивости (мутаций), генетической композиции. В ходе работы процедур на каждой стадии эволюции получают популяции со все более совершенными индивидуумами.

Генетические алгоритмы сконструированы таким образом, что при генерации каждой новой популяции используются фрагменты исходных решений, к которым добавляются новые элементы, обеспечивающие улучшение решений относительно сформулированного критерия отбора. Другими словами, генети-

ческие алгоритмы используют информацию, накопленную в процессе эволюции.

В генетических алгоритмах и эволюционном программировании используют два основных механизма воспроизводства хромосом:

– воспроизводство без мутаций, соответствующее митозу, результатом которого являются потомки – копии родителей;

– воспроизводство потомков, имеющих большие отличия от родителей. Этот механизм соответствует половому размножению.

В генетических алгоритмах в основном используется механизм родительского воспроизводства с рекомбинацией и мутацией, а в эволюционном программировании – механизм на основе мутации без рекомбинации.

Таким образом, по сути дела каждый конкретный генетический алгоритм представляют имитационную модель некоторой определенной теории биологической эволюции или ее варианта. Материальное воплощение сконструированных таким образом систем до сих пор была невозможна без участия человека. Однако интенсивно ведутся работы, результатом которых является уменьшение зависимости машинной эволюции от человека. Эти работы ведутся по двум основным направлениям:

1. Естественный отбор, моделируемый ГА, переносится из виртуального мира в реальный, например, проводятся эксперименты по реальным битвам роботов на выживание.

2. Интеллектуальные системы, основанные на ГА, конструируют роботов, которые в принципе могут быть изготовлены на автоматизированных заводах без участия человека.

Генетические алгоритмы используют в теории нечётких систем для настройки параметров функций принадлежности. Интеграция чётких и нечётких нейронных сетей и генетических алгоритмов обеспечивает реализацию оптимизационной задачи. Средства fuzzy–neuro–genetic используются в интеллектуальных системах и содержат следующие процедуры:

– преобразование входных примеров в нечёткое представление;

– извлечение знаний, представленных в виде продукций ЕСЛИ–ТО из нечёткой обучающей выборки с помощью нейронной сети;

– оптимизацию структуры продукционных правил с помощью генетического алгоритма.

Активно развивается направление, ориентированное на использование генетических алгоритмов для обучения нейронных сетей и корректировки структуры уже обученной сети. В отличие от метода обратного распространения ошибки генетические алгоритмы мало чувствительны к архитектуре сети. Генетические алгоритмы чаще всего применяются для улучшения характеристик ИНС, уже созданных и обученных с применением других методов

На основе генетических алгоритмов предложены классифицирующие системы, которые можно использовать для целей управления. Классифицирующая система состоит из трёх вложенных друг в друга подсистем: классификатора, системы обучения и генетического алгоритма. В классификатор поступают

внешние сообщения и положительные оценки (поощрения) его действий. Классификатор содержит правила вида «ЕСЛИ<условие>, ТО<сообщение>», с помощью которых формируются выходные сообщения. Обучающая система выполняет оценку используемых правил. Генетический алгоритм предназначен для случайно направленной модификации правил.

В настоящее время активно развиваются методы, основанные на объединении технологий инженерии знаний и генетических алгоритмов. В области ГА разрабатываются операторы, ориентированные на обработку знаний.

Генетические алгоритмы нашли широкое практическое применение в менеджменте и управлении для решения задач поиска оптимальных решений, формирования моделей и прогнозирования значений различных показателей. Они осуществляют поиск лучших решений на основе заданной целевой функции. Значение целевой функции для многих задач весьма непросто вычислить, поэтому в ряде случаев при исследовании плохо обусловленных проблем с этой целью применяются нейронные сети, позволяющие найти решение при отсутствии явной модели. Кроме того, для вычисления целевых функций в условиях неопределённости применяются статистические методы и методы логического вывода в чёткой или нечёткой среде.

Формирование системы прогнозирующих правил. Генетические алгоритмы могут использоваться для нахождения оптимального набора правил, позволяющих прогнозировать страховые риски с учётом ряда определяющих его факторов. Для решения этой задачи необходимо иметь базу данных, содержащую фактические значения переменных, влияющих на страховой риск.

Выводы

Современное состояние разработок в области интеллектуальных систем в России можно охарактеризовать как стадию все возрастающего интереса среди широких слоев специалистов – менеджеров, инженеров, программистов и других. Наибольшие трудности в разработке интеллектуальных систем, основанных на знаниях, вызывает не сколько процесс машинной реализации систем, а этап анализа знаний и проектирования базы знаний.

Создание интеллектуальных систем должно включать три этапа:

– создание материальной системы поддержки (эта проблема в основном решена, так как ИС могут создаваться даже на базе современных персональных компьютеров);

– создание системы потенциального искусственного интеллекта, то есть программной оболочки, инструментальной системы (таких систем в настоящее время существует пока еще очень мало);

– обучение и самообучение системы искусственного интеллекта и преобразование ее в реальную ИС.

Интеллектуальные системы применяются для решения сложных задач, связанных с использованием слабо формализованных знаний специалистов-практиков, а также с логической обработкой информации. Например, поддерж-

ка принятия решения в сложных ситуациях, анализ визуальной информации, управление в социально-экономической сфере.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные проблемы искусственного интеллекта и направления его развития.
2. Назовите основные направления исследований в области искусственного интеллекта.
3. Какова история исследований в области искусственного интеллекта в нашей стране и за рубежом?
4. Перечислите признаки интеллектуальных информационных систем.
5. Сформулируйте характеристики базовых интеллектуальных структур для анализа интеллектуальности систем.
6. Дайте определение понятия «интеллектуальная система», ее место в классификации информационных систем.
7. Сформулируйте основные отличия интеллектуальных систем от обычных программных систем.
8. Приведите классификацию интеллектуальных систем, цели и пути их создания.
9. Перечислите основные типы систем с интеллектуальным интерфейсом и дайте им краткую характеристику.
10. Перечислите основные типы экспертных систем и дайте им краткую характеристику.
11. Перечислите и охарактеризуйте основные компоненты экспертных систем.
12. Каков вид передаточной (активационной) функции нейрона?
13. Назовите классические модели нейронных сетей.
14. Назовите и дайте краткую характеристику базовым архитектурам нейронных сетей.
15. Охарактеризуйте место технологий интеллектуального анализа данных (Data Mining) среди других технологий обработки данных.
16. Сформулируйте задачи и стадии интеллектуального анализа данных и типы определяемых закономерностей.
17. Перечислите основные направления эволюционного моделирования и приведите основные факторы, определяющие неизбежность эволюции.
18. Какие алгоритмы называют генетическими? Сформулируйте основные особенности генетических алгоритмов.
19. Как проводится отбор базисных факторов управления и внешней среды, влияющих на переход объекта в будущие целевые и нежелательные состояния при когнитивной структуризации предметной области?
20. Назовите области применения когнитивных технологий для решения задач прогнозирования и управления.

Глава 2. МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

2.1. Представление знаний, рассуждений и задач

Систему знаний (СЗ) можно определить как некую математическую модель определенной области прикладного неформализованного знания. Система понятий и отношений этой математической модели должны отображать систему понятий и отношений прикладного знания, а зависимости, существующие в этой модели, аппроксимируют соответствующие зависимости прикладного знания [5, 8, 12, 25].

Разработанные модели должны быть зафиксированы в памяти ЭВМ и использоваться для решения с помощью прикладных программ.

Создание интеллектуальных систем, основанных на знаниях, связано с решением следующих взаимосвязанных проблем:

1. Проблема формализации знаний. Эта задача решается с помощью специалистов-прикладников и математиков. Результатом ее будет разработка концептуальной схемы модели.
2. Проблема представления знаний. Ее решение состоит в разработке формального аппарата для фиксации знаний в памяти ЭВМ.
3. Проблема использование знаний. Суть ее заключается в необходимости разработки теории вычислений и преобразований в построенных ранее моделях.
4. Проблема создания баз знаний и систем управления ими. Эта задача для системных программистов по разработке средств программной поддержки моделей знаний.

Знания о предметной области и способах решения в ней задач весьма разнообразны. Возможны различные классификации этих знаний, которые подробно описаны в литературе по управлению знаниями, в частности в [12, 25].

Требования к системам знаний. Выделяют следующие особенности, которыми должна обладать система знаний:

– Терпимость к противоречиям, которая вытекает из открытости внешнего мира и соответственно неполноты знаний о нем.

– Обеспечение вывода, т.е. система знаний должна быть способна к логическому выводу как из уже имеющейся информации, так и из вновь поступающих сведений. Различают два типа вывода**:**

  – свободный (вывод осуществляется при поступлении новой информации в СЗ);

  – направленный (вывод запускается при поступлении в СЗ конкретного запроса).

– Критичность к новой информации. Это способность проверить достоверность новой информации и согласовать её с имеющимися знаниями.

– Дробность системы знаний – знания в системе должны быть разбиты на фрагменты, каждый из которых может быть эффективно использован.

– Обучаемость и способность к переструктуированию знаний, т. е. в ходе функционирования должна обеспечиваться перестройка структуры СЗ, повышающая ее эффективность.

Особенности знаний для их представления в ЭВМ. Для представления СЗ в компьютере она должна обладать следующими особенностями:

1. Внутренняя интерпретируемость – каждая информационная единица должна иметь уникальное имя, по которой бы информационная система находила ее, а также отвечала бы на запросы, в которой это имя упомянуто.

2. Структурированность знаний, т. е. информационные единицы должны обладать определенной структурой, это означает, что должны быть возможности для установления отношений типа: часть – целое или род – вид, или элемент – класс.

3. Связность – в информационной базе между информационными единицами должна быть возможность установления связей различного типа, характеризующих отношения между ними. Семантика отношений может носить декларативный или процедурный характер.

Различают отношения структуризации, функциональные отношения типа аргумент – функция, казуальные отношения (причинно – следственные связи) и семантические отношения (объединяют и представляют все ранее перечисленные связи).

Перечисленные особенности позволяют создавать общую модель знаний, которую называют «семантическая сеть». Она представляет модель знаний, в вершинах которой находятся информационные единицы, а дуги характеризуют виды связей между информационными единицами. Если связи иерархичны, то они определяют отношение структуризации, а неиерархические связи будут определять отношения иных типов.

4. Семантическая метрика – отношение, которое характеризует ситуационную близость информационных единиц, т.е. силу ассоциативных связей между ними.

5. Активность. Появление новых данных должны стать источником активности интеллектуальной системы, т.е. выполнение программ в ИС должно инициироваться текущим состоянием информационной базы.

Перечисленные пять особенностей информационных единиц определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, базы данных перерастают в базы знаний (БЗ), а совокупность средств, обеспечивающих работу со знаниями, образуют систему управления базой знаний (СУБЗ).

Таким образом, база знаний (англ. Knowledge Base, KB) – это особого рода база данных, разработанная для управления знаниями (метаданными), то есть сбором, хранением, поиском и выдачей знаний. Раздел искусственного интеллекта, изучающий базы знаний и методы работы со знаниями, называется инженерией знаний. Под базами знаний понимают совокупность фактов и правил вывода, допускающих логический вывод и осмысленную обработку информации.

База знаний – важный компонент интеллектуальной системы. Наиболее известный класс таких программ – экспертные системы. Они предназначены для построения способа решения специализированных проблем, основываясь на записях БЗ и на пользовательском описании ситуации.

Создание и использование систем искусственного интеллекта потребует огромных баз знаний.

2.2. Модели представления знаний

В интеллектуальных системах в соответствии с [2, 5, 8] наиболее распространенными являются следующие способы представления знаний:

1. Логические модели.
2. Сетевые модели.
3. Фреймовые модели.
4. Продукционные модели.
5. Другие методы представления знаний.

Логические модели. В основе модели лежит формальная система, которая на языке теории множеств описывается следующей четверкой множеств:

$$M = <T, P, A, B>,$$

где T – это множество базовых элементов различной природы, представляющих тезаурус, например: термины из какого либо словаря, набор деталей из конструкции; P – это множество синтаксических правил, с помощью которых из элементов множества T образуют синтаксически правильные совокупности; A – элементы этого множества образуют аксиомы, определенные на множестве P; B – множество правил вывода, которые применяются к элементам множества A.

Для множества T существует некоторый способ П(T) определения принадлежности к этому множеству, а для определения принадлежности к множеству A вводится процедура П(A).

Во множество A входят информационные единицы, которые введены в базу извне, а с помощью правил вывода из них получают новые производные знания. Таким образом, описанная система представляет собой генератор порождения новых знаний в данной предметной области.

Логические модели представления знаний реализуются с помощью логики предикатов. Предикатом называют функцию, принимающую только два значения: истина и ложь и предназначенную для выражения свойств объектов или связей между ними. Кроме того, могут использоваться логические знаки конъюнкции (∨), импликации (∧), логического следования (=>), кванторы ∀,∃ и другие.

Рассмотрим в качестве примера знание: «Когда температура в печи достигает 120˚ и прошло менее 30 мин с момента включения печи, то давление не превосходить критического. Если с момента включения прошло более 30 мин, то необходимо включить вентиль N2».

В этой записи первая строка представляет собой описание декларативного знания, а вторая строка описывает процедурные знания.

С помощью логики предикатов, указанное утверждение выглядит следующим образом:

$$P(p = 120)\ T(t < 30) \rightarrow (D < D\text{кр.});$$
$$P(p = 120)T(t > 30) \Rightarrow F(N2),$$

где $P(p = 120)$ создает предикат, который становится истинным, когда температура достигается 120˚; $T(t < 30)$ – предикат, остающийся истинным в течение 30 мин с начала процесса; $T(t > 30)$ – предикат, становящийся истинным по истечении 30 мин; $(D < D\text{кр.})$ – это утверждение о том, что давление ниже критического; $F(N2)$ – команда открыть вентиль $N2$.

Разработанные системы логического программирования Пролог, в ответах на простейшие запросы к базам знаний, выдают значения «истина» и «ложь» в зависимости от наличия соответствующих фактов [15, 16]. Преимущества логической модели представления знаний заключается в возможности непосредственно запрограммировать механизм вывода правильных высказываний.

Подобные языки логического типа использовались на ранних стадиях развития интеллектуальных систем, однако впоследствии большее внимание стали уделять другим моделям, что связано с такими недостатками логической модели, как отсутствие наглядности и удобочитаемости, а также громоздкость записи, которая приводит к трудности нахождения ошибок. Еще один недостаток состоит в том, что большинство интеллектуальных задач характеризуется недостаточной полнотой, неточностью и некорректностью. Это важно, например, в медицине и биологических науках, так как они слабо формализованные. Поэтому в данных областях науки чаще используют методы аналогий и ассоциаций.

Сетевые модели. В основе этой модели лежит конструкция, которая называется семантической сетью, которая может быть описана на языке теории множеств:

$$H = < I, C1, C2, \ldots., Cn , G >,$$

где I – множество информационных единиц; $C1, C2, \ldots., Cn$ – множество типов связей между информационными единицами; G – множество отображений между информационными единицами.

В зависимости от типов связей между информационными единицами, которые используются в данной модели, различают следующие типы сетей:

– Классифицирующие сети – применяют отношение структуризации.

– Функциональные сети – функциональные отношения между информационными единицами. Примером могут выступать вычислительные модели.

– Сценарии.

В сценариях часто используются казуальные отношения (причинно-следственные отношения) между информационными единицами. Кроме того, могут встречаться отношения следующих типов «средство – результат», «орудие – действие» и т. п.

Так семантическая сеть, представляющая знания об автомобиле гр. Васильева, показана на рис. 6.

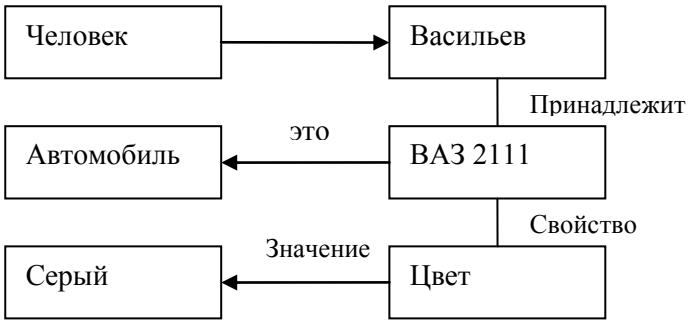


Рис. 6. Пример семантической сети

Преимущества модели представления знаний на основе семантических сетей: с помощью этой модели могут быть представлены родовидовые отношения; простота и наглядность описания предметной области.

Недостатки модели представления знаний на основе семантических сетей: снижение скорости работы механизма вывода, а также понижение быстродействия.

Фреймовые модели. Фреймы часто используют как структуру для представления стереотипных ситуаций. Фрейм – единица представления знаний, детали которой могут изменяться в соответствии с текущей ситуацией.

Структура фрейма такова, что он состоит из характеристик описанных ситуаций и их значений, которые называются соотносительно слотом и заполнителем слота.

Имя фрейма:

Имя слота 1 (Значение слота 1);

Имя слота 2 (Значение слота 2);

……

Имя слота *k* (Значение слота *k*).

Эта структура, пока она не заполнена какими-то значениями, называется протофреймом. Значением слота может быть число, математическое выражение, текст на естественном языке, программа для ЭВМ, правила вывода, ссылки на другие слоты данного фрейма или других фреймов.

При заполнении фрейма, имени слота и значения слотов из протофрейма получают фрейм-экземпляр (экзофрейм).

Пример:

Список работников: Фамилия (значение слота 1);
Год рождения (значение слота 2);
……
Стаж работы (значение слота k).

Список работников: Фамилия (Попов – Сидоров – Иванов);
Год рождения (1965 – 1946 – 1925);
…….
Стаж работы (5 – 20 – 30).

Преимущество фреймовой модели заключается в том, что значения слотов представляются в такой системе в единственном экземпляре, поскольку включается только в один фрейм. Таким образом, обеспечивается экономное размещение баз знаний в памяти компьютера.

Недостатком фреймовой модели является снижение скорости работы механизма вывода, т. е. системы должны «просканировать» всю структуру на предмет ненужной информации.

Продукционные модели. Психологические исследования процессов принятия человеком решений показали, что, рассуждая и принимая решения человек, использует правила, аналогичные продукциям. Продукционная модель, основанная на правилах, позволяет представить знания в виде предложений типа «если (условие), то (действие)».

В общем случае продукцию можно представить в виде следующего выражения:

$$(i);\ Q;\ P;\ A => B;\ N,$$

где (i) – имя продукции, с помощью которой данная продукция выделяется из всего множества (порядковый номер, некоторая совокупность слов или цифр).

Элемент Q характеризует сферу применения продукции.

Основным элементом продукции является ее ядро $A => B$. Оно может быть прочитано: если выполняется A, то следует B. Ядро продукции описывает преобразования, которые представляют суть продукционного правила.

Элемент P есть условие применимости ядра продукции. Обычно P представляет собой логическое выражение типа предиката. Если P принимает значение «истина», то ядро продукции активируется, если P ложно, то ядро продукции не может быть использовано.

Элемент N описывает постусловие продукции. Оно активируется, когда ядро продукции реализовано. N – это действия и условия процедуры, которые могут быть выполнены после P.

Таким образом, продукционная модель хорошо применима для представления процедурных знаний.

Имя продукции i – интерпретация результатов психологического тестирования.

Предусловие Q – использовать в первую очередь.

Условие P – шкала лжи $L < 70$.

Ядро $A => B$ – если (шкала ошибок – шкала коррекции) < - 11, то сообщение: «Результаты недостоверны».

Постусловие N – закончить интерпретацию результатов.

Все ядра можно разделить на 2 большие группы:

1. Детерминированные ($A=>B$ наступит с вероятностью 1).
2. Недетерминированные (если A выполняется, то возможно B).

Возможны различные оценки реализации ядра:

1. Вероятностная (если выполняется A, то с вероятностью P реализуется B).

2. Лингвистическая (малая, меньшая). Если выполняется *A*, то с большой долей уверенности наступит *B*.

Детерминированные продукции могут быть:

1. Однозначными (если выполняется *A*, то наступит *B*).

2. Альтернативные (если *A* выполняется, то чаще наступит *B*1, реже *B*2).

Продукции могут быть прогнозирующего типа (если наступит *A*, то с вероятностью *P* можно ожидать *B*).

Продукционной называется система знаний, которая использует понятие продукции в качестве основного элемента.

В общем случае продукционная система знаний (см. рис. 1) включает следующие компоненты:

1. Базу данных, содержащую множество фактов;

2. Базу правил, содержащую набор продукций;

3. Механизм логического вывода или решатель;

4. ЭВМ;

5. Система общения с внешней средой.

Продукционные системы делят на 2 типа*:*

1. С прямым выводом, т. е. рассуждения, идут от данных к гипотезе.

2. С обратным выводом, когда вначале выдвигается гипотеза, а потом для нее ищутся доказательства.

Достоинства продукционных систем:

– модульность;

– единообразие структуры (позволяет применять оболочку продукционных систем в различных проблемных областях);

– естественность вывода знаний;

– гибкость родовидовой иерархии понятий (изменение правил влечет изменения в иерархии).

Недостатки продукционных систем:

– процесс вывода может быть менее эффективен, чем в других системах.

– процесс вывода новых знаний трудно поддается управлению.

– линейный рост объема базы знаний по мере включения новых фрагментов знаний. Если используются деревья решений, то изменения происходят по логарифмическому закону.

Другие методы представления знаний. В качестве других методов представления знаний можно указать представление знаний по примерам. При использовании такого метода база знаний заполняется следующим образом: инженер по знаниям берет задачу и заполняет матрица из совокупности задач и правильных решений. Можно построить программу с поиском аналогичной задачи (метод на основе примеров).

Такой метод применяется, например, в области медицины и в юридической практике.

Достоинством метода представления знаний по примерам является простота данного способа, т. е. для данной задачи находится метод и вносится в память.

К недостатку можно отнести отсутствие интеллектуальной гибкости.

Выводы

Центральная парадигма интеллектуальных технологий – это обработка знаний. Системы, ядром которых является база знаний или модель предметной области, описанная на языке сверхвысокого уровня, приближенном к естественному языку, называют интеллектуальными.

В связи с организацией базы знаний в информационной системе, возникли задачи по поиску оптимального и верного решения на поставленную задачу перед информационной системой. Таким образом, неструктурированную массу знаний нужно было представить в такой форме, которая позволяла бы найти оптимальное решение с наименьшими затратами, например, временными. И начиная со второй половины 20-го века в области искусственного интеллекта стали появляться различные методы представления знаний.

Рассмотренные модели представления знаний широко используются в современных интеллектуальных системах и прежде всего в экспертных системах. Каждая из форм представлений знаний может служить основой для создания языка программирования, ориентированного на работу со знаниями. В конце 80-х годов наметилась тенденция создавать комбинированные языки представления знаний. Чаще всего комбинируются фреймовые и продукционные модели.

Контрольные вопросы

1. Определение системы знаний для задач создания интеллектуальных систем.
2. Требования к системам знаний в задачах создания интеллектуальных систем.
3. Особенности знаний для их представления в компьютере.
4. Понятие инженерии знаний и баз знаний.
5. Понятие и сравнительные характеристики основных моделей представления знаний.
6. Модели представления знаний, основанные на логике предикатов, их преимущества и недостатки, области применения.
7. Семантические сети: понятие и их роль для формализации знаний.
8. Фрейм как жесткая структура информационных единиц для представления стереотипных ситуаций, достоинства и недостатки фреймовых систем.
9. Сценарии – описание стандартной последовательности фактов, определяющих типичную ситуацию предметной области.
10. Определение продукции, классификация ядер продукции, типовая схема продукционной системы (база данных, база правил, интерпретатор). Преимущества и недостатки продукционной системы.

Глава. 3. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗНАНИЙ ИЗ ДАННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

3.1. Особенности и классификация методов интеллектуального анализа данных

Потоки текстовой и числовой информации ежедневно порождаются и оседают в хранилищах данных. Закономерности, которые скрываются в этих массивах данных, могут представлять большую ценность.

С другой стороны в связи с высокой трудоемкостью извлечения знаний по обычной технологии инженерии знаний, в последнее время интенсивно разрабатывались методы автоматического извлечения знаний из накопленных фактов. В основе этих методов лежат известные из логики методы индуктивного вывода и ряд методов распознавания образов. В западной литературе эти методы получили название ***«раскопка данных и открытие знаний» – Data Mining (DM)*** и ***Knowledge Discovery in Databases (KDD)***. В отечественной литературе привился термин «Интеллектуальный анализ данных» (ИАД) [8, 19-21].

Процесс Knowledge Discovery in Databases, состоит из следующих шагов:

1. **Подготовка исходного набора данных.** Этот этап заключается в создании набора данных, в том числе из различных источников, выбора обучающей выборки и т. д. Для этого должны существовать развитые инструменты доступа к различным источникам данных. Желательно иметь поддержку работы с хранилищами данных и наличие семантического слоя, позволяющего использовать для подготовки исходных данных не технические термины, а бизнес понятия.

2. **Предобработка данных.** Для того чтобы эффективно применять методы Data Mining, следует обратить внимание на вопросы предобработки данных. Данные могут содержать пропуски, шумы, аномальные значения и т. д. Кроме того, данные могут быть избыточны, недостаточны и т. д. В некоторых задачах требуется дополнить данные некоторой априорной информацией. Наивно предполагать, что если подать данные на вход системы в существующем виде, то на выходе получим полезные знания. Данные должны быть качественны и корректны с точки зрения используемого метода DM. Поэтому первый этап KDD заключается в предобработке данных. Более того, иногда размерность исходного пространства может быть очень большой, и тогда желательно применять специальные алгоритмы понижения размерности. Это как отбор значимых признаков, так и отображение данных в пространство меньшей размерности.

3. **Трансформация, нормализация данных.** Этот шаг необходим для приведения информации к пригодному для последующего анализа виду. Для чего нужно проделать такие операции, как приведение типов, квантование, приведение к «скользящему окну» и прочее. Кроме того, некоторые методы анализа, которые требуют, чтобы исходные данные были в каком-то определенном виде. Нейронные сети, скажем, работают только с числовыми данными, причем они должны быть нормализованы.

4. **Data Mining.** На этом шаге применяются различные алгоритмы для нахождения знаний. Это нейронные сети, деревья решений, алгоритмы кластеризации, установления ассоциаций и т. д.

5. **Постобработка данных.** Интерпретация результатов и применение полученных знаний в бизнес приложениях.

Безусловно, сердцем всего этого процесса KDD являются методы DM, позволяющие обнаруживать знания.

Классической основой извлечения знаний из накопленных данных является математическая статистика. Методы математической статистики оказались полезными, главным образом, для проверки заранее сформулированных гипотез и для «грубого» разведочного анализа, составляющего основу оперативной аналитической обработки данных.

Интеллектуальный анализ данных *— это процесс поддержки принятия решений, основанный на поиске в данных скрытых закономерностей, то есть извлечения информации, которая может быть охарактеризована как* ***знания.***

Интеллектуальный анализ данных является кратким обозначением довольно широкого спектра процедур автоматического анализа данных высокоинтеллектуальными технологиями. Эти методы позволяют извлекать из «сырых» данных ранее неизвестные зависимости между параметрами объектов и закономерности поведения классов объектов. Подобные программные продукты позволяют как бы «осмыслить» данные, оценивая их как с количественной, так и с качественной точки зрения.

Сферы применения систем Data Mining, задачи и стадии ИАД приведены в параграфе 1.4 данного пособия. Далее предлагается изложение основных методов ИАД, примеры их программной реализации для различных предметных областей в соответствии с [8, 19-21, 27].

В последнее время наряду с использованием арсенала классической статистики активно развиваются новые методы анализа данных и извлечения знаний, базирующиеся на иных, нежели традиционная интегро–дифференциальная парадигма, подходах и представленные на рис. 7:

- методы эволюционного моделирования,
- методы машинного обучения.

Термин «эволюционное моделирование» в настоящее время является достаточно устоявшимся, и общепринято под этим термином подразумевать генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети.

Термин «машинное обучение» оставляет больше возможностей для дискуссий о том, какие методы имеются в виду, в частности, сюда относятся деревья решений.

Сформированы методологии анализа и основных принципов работы с данными в процессе анализа данных, поиска закономерностей и извлечения знаний не зависит от конкретной предметной области, поэтому может с успехом применяться для решения самого широкого спектра задач.

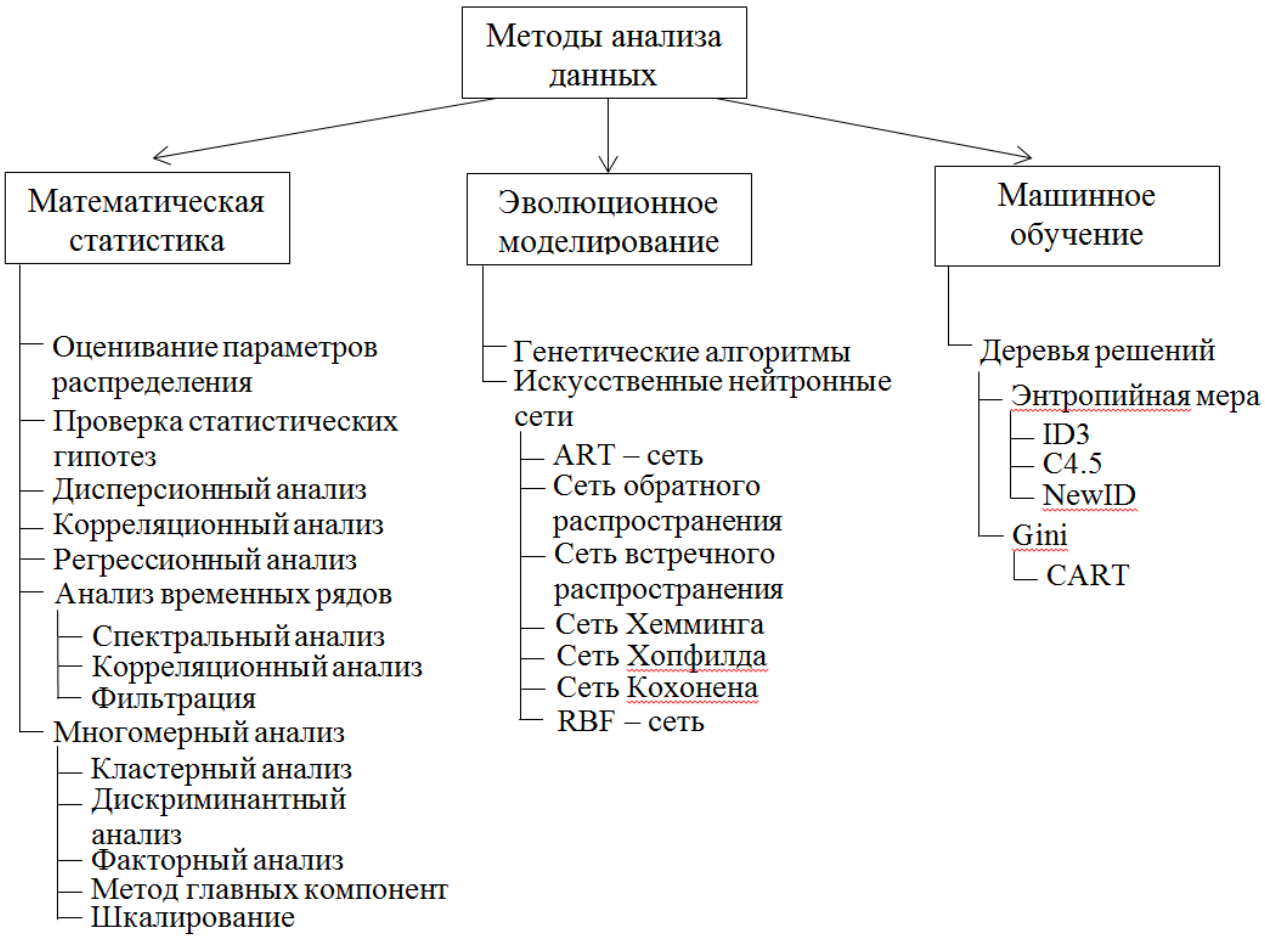


Рис.7. Классификация методов анализа данных

Алгоритмы, используемые в Data Mining, требуют большого количества вычислений. Раньше это являлось сдерживающим фактором широкого практического применения DM, однако сегодняшний рост производительности современных процессоров снял остроту этой проблемы. Теперь за приемлемое время можно провести качественный анализ сотен тысяч и миллионов записей.

Далее будут рассмотрены ряд методов интеллектуального анализа данных из числа приведенных на рис. 7. Приводится краткое изложение основных положений из статей Н.Б. Паклина и др., изложенных на сайте компании Base Group Labs – профессионального поставщика программных продуктов и решений в области анализа данных [27].

3.2. Логистическая регрессия и ROC-анализ данных

Логистическая регрессия – полезный классический инструмент для решения задачи регрессии и классификации. Без логистической регрессии и ROC-анализа, как аппарата для анализа качества моделей, немыслимо построение моделей в медицине и проведение клинических исследований. В последние годы логистическая регрессия получила распространение в скоринге для расчета рейтинга заемщиков и управления кредитными рисками. Поэтому, несмотря на

свое происхождение из статистики, логистическую регрессию и ROC-анализ почти всегда можно увидеть в наборе Data Mining алгоритмов.

Логистическая регрессия – это разновидность множественной регрессии, общее назначение которой состоит в анализе связи между несколькими независимыми переменными (называемыми также регрессорами или предикторами) и зависимой переменной. Бинарная логистическая регрессия, как следует из названия, применяется в случае, когда зависимая переменная является бинарной (т. е. может принимать только два значения). Иными словами, с помощью логистической регрессии можно оценивать вероятность того, что событие наступит для конкретного испытуемого (больной/здоровый, возврат кредита/дефолт и т. д.).

В множественной линейной регрессии предполагается, что зависимая переменная y является линейной функцией независимых переменных x_i, $i = 1, \ldots n$, т. е.:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots b_nx_n.$$

Однако множественная регрессия просто игнорирует ограничения на диапазон значений для y. Поэтому для решения проблемы задача регрессии может быть сформулирована иначе: вместо предсказания бинарной переменной, мы предсказываем непрерывную переменную P со значениями на отрезке [0,1] при любых значениях независимых переменных. Это достигается применением следующего регрессионного уравнения (логит-преобразование):

$$P = 1/(1 + e^{-y}),$$

где P – вероятность того, что произойдет интересующее событие.

Поскольку логистическое преобразование решает проблему об ограничении на 0-1 границы для первоначальной зависимой переменной (вероятности), то эти преобразованные значения можно использовать в обычном линейном регрессионном уравнении. А именно, если произвести логистическое преобразование обеих частей описанного выше уравнения, мы получим стандартную модель линейной регрессии.

Существует несколько способов нахождения коэффициентов логистической регрессии. На практике часто используют метод максимального правдоподобия. Он применяется в статистике для получения оценок параметров генеральной совокупности по данным выборки. Основу метода составляет функция правдоподобия (likehood function), выражающая плотность вероятности (вероятность) совместного появления результатов выборки y.

Кроме того известно, что логистическую регрессию можно представить в виде однослойной нейронной сети с сигмоидальной функцией активации, веса которой есть коэффициенты логистической регрессии, а вес поляризации – константа регрессионного уравнения. Как известно, однослойная нейронная сеть может успешно решить лишь задачу линейной сепарации. Поэтому возможности по моделированию нелинейных зависимостей у логистической регрессии отсутствуют. Однако для оценки качества модели логистической регрессии су-

ществует эффективный инструмент ROC-анализа, что является несомненным ее преимуществом.

Для расчета коэффициентов логистической регрессии можно применять любые градиентные методы: метод сопряженных градиентов, методы переменной метрики и другие.

ROC-кривая (Receiver Operator Characteristic) – кривая, которая наиболее часто используется для представления результатов бинарной классификации в машинном обучении. Название пришло из систем обработки сигналов. Поскольку классов два, один из них называется классом с положительными исходами, второй – с отрицательными исходами. ROC-кривая показывает зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров. В терминологии ROC-анализа первые называются истинно положительным, вторые – ложно отрицательным множеством. При этом предполагается, что у классификатора имеется некоторый параметр, варьируя который, мы будем получать то или иное разбиение на два класса. Этот параметр часто называют порогом, или точкой отсечения (cut-off value). В зависимости от него будут получаться различные величины *ошибок I и II рода*.

В логистической регрессии порог отсечения изменяется от 0 до 1 – это и есть расчетное значение уравнения регрессии. Будем называть его рейтингом.

Для понимания сути ошибок I и II рода рассмотрим четырехпольную таблицу сопряженности (confusion matrix), которая строится на основе результатов классификации моделью и фактической (объективной) принадлежностью примеров к классам. Таблица содержит следующие данные:

- *TP* (*True Positives*) – верно классифицированные положительные примеры (так называемые истинно положительные случаи);
- *TN* (*True Negatives*) – верно классифицированные отрицательные примеры (истинно отрицательные случаи);
- *FN* (*False Negatives*) – положительные примеры, классифицированные как отрицательные (ошибка I рода). Это так называемый ложный пропуск – когда интересующее нас событие ошибочно не обнаруживается (ложно отрицательные примеры);
- *FP* (*False Positives*) – отрицательные примеры, классифицированные как положительные (ошибка II рода). Это ложное обнаружение, т. к. при отсутствии события ошибочно выносится решение о его присутствии (ложно положительные случаи).

Что является положительным событием, а что – отрицательным, зависит от конкретной задачи.

Вводят два определения: чувствительность и специфичность модели. Ими определяется объективная ценность любого бинарного классификатора.

Чувствительность *Se* (Sensitivity) – это и есть доля истинно положительных случаев:

$$Se = TP / (TP + TN).$$

Специфичность *Sp* (Specificity) – доля истинно отрицательных случаев, которые были правильно идентифицированы моделью:

$$Sp = TN / (TN + FP).$$

ROC-кривая получается следующим образом:

1. Для каждого значения порога отсечения, которое меняется от 0 до 1 с шагом *dx* (например, 0.01) рассчитываются значения чувствительности *Se* и специфичности *Sp*. В качестве альтернативы порогом может являться каждое последующее значение примера в выборке.

2. Строится график зависимости: по оси *Y* откладывается чувствительность *Se* в процентах, по оси *X* откладывают (100% - *Sp*) (сто процентов минус специфичность), или, что тоже самое, *FPR* – доля ложно положительных случаев. Пример графиков приведен на рис.8.

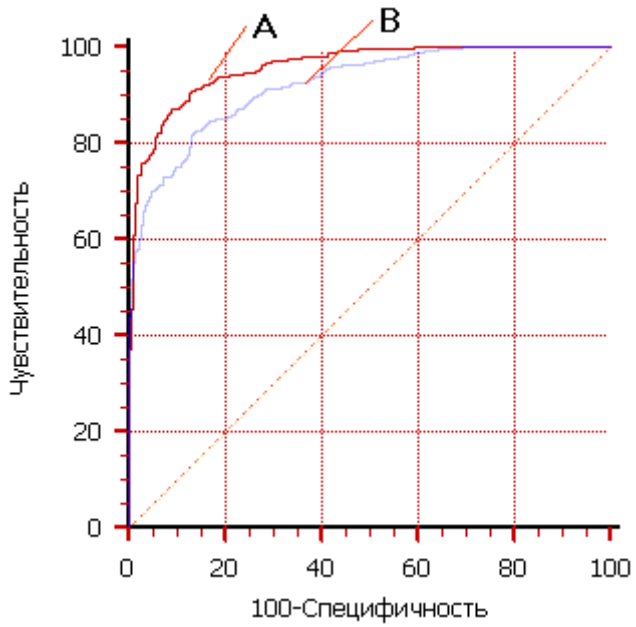


Рис. 8. – Сравнение ROC-кривых

Для идеального классификатора график ROC-кривой проходит через верхний левый угол, где доля истинно положительных случаев составляет 100% или 1.0 (идеальная чувствительность), а доля ложно положительных примеров равна нулю. Поэтому чем ближе кривая к верхнему левому углу, тем выше предсказательная способность модели. Наоборот, чем меньше изгиб кривой и чем ближе она расположена к диагональной прямой, тем менее эффективна модель. Диагональная линия соответствует бесполезному классификатору, т. е. полной неразличимости двух классов.

При визуальной оценке ROC-кривых расположение их относительно друг друга указывает на их сравнительную эффективность. Кривая, расположенная выше и левее, свидетельствует о большей предсказательной способности модели. Так, на рис. 8 две ROC-кривые совмещены на одном графике. Видно, что модель А лучше.

Идеальная модель обладает 100% чувствительностью и специфичностью. Однако на практике добиться этого невозможно, более того, невозможно одновременно повысить и чувствительность, и специфичность модели. Компромисс находится с помощью порога отсечения, так как пороговое значение влияет на соотношение *Se* и *Sp*. Можно говорить о задаче нахождения *оптимального порога отсечения* (optimal cut-off value).

Порог отсечения нужен для того, чтобы применять модель на практике: относить новые примеры к одному из двух классов. Для определения оптимального порога нужно задать критерий его определения, так как в разных задачах присутствует своя оптимальная стратегия.

3.3. Алгоритмы кластеризации на службе Data Mining

Кластеризация как объединение в группы схожих объектов является одной из фундаментальных задач в области анализа данных и Data Mining. Список прикладных областей, где она применяется, широк: сегментация изображений, маркетинг, борьба с мошенничеством, прогнозирование, анализ текстов и многие другие. Отсюда многообразие синонимов понятию кластер – класс, таксон, сгущение.

На современном этапе кластеризация часто выступает первым шагом при анализе данных.

Очень часто данные, с которыми сталкивается технология Data Mining, имеют следующие важные особенности:

- высокая размерность (тысячи полей) и большой объем (сотни тысяч и миллионы записей) таблиц баз данных и хранилищ данных (сверхбольшие базы данных);
- наборы данных содержат большое количество *числовых* и *категорийных* атрибутов.

Все атрибуты, или признаки объектов делятся на ***числовые*** (numerical) и ***категорийные*** (categorical).

Числовые атрибуты – это такие, которые могут быть упорядочены в пространстве, соответственно категорийные – которое не могут быть упорядочены. Например, атрибут «возраст» – числовой, а «цвет» – категорийный.

Большинство алгоритмов кластеризации предполагают сравнение объектов между собой на основе некоторой ***меры близости*** (сходства). В качестве меры близости для числовых атрибутов очень часто используется *евклидово расстояние***.**

Для категорийных атрибутов распространена мера сходства Чекановского-Серенсена и Жаккара.

Можно классифицировать кластерные алгоритмы на ***масштабируемые*** **и** ***немасштабируемые***.

Алгоритм называют масштабируемым (scalable), если при неизменной емкости оперативной памяти с увеличением числа записей в базе данных время его работы растет линейно.

По способу разбиения на кластеры алгоритмы бывают двух типов: ***иерархические и неиерархические***.

Классические **иерархические** алгоритмы работают только с категорийными атрибутами, когда строится полное дерево вложенных кластеров. Здесь распространены агломеративные методы построения иерархий кластеров – в них производится последовательное объединение исходных объектов и соответствующее уменьшение числа кластеров. Иерархические алгоритмы обеспечивают сравнительно высокое качество кластеризации и не требуют предварительного задания количества кластеров.

Неиерархические алгоритмы основаны на оптимизации некоторой целевой функции, определяющей оптимальное в определенном смысле разбиение множества объектов на кластеры. В этой группе популярны алгоритмы семейства k-средних (k-means, fuzzy c-means, Густафсон-Кесселя), которые в качестве целевой функции используют сумму квадратов взвешенных отклонений координат объектов от центров искомых кластеров.

Одним из эффективных считается алгоритм алгоритм обработки транзакционных данных CLOPE, который быстрее и проще в программной реализации.

Под термином *транзакция* здесь понимается некоторый произвольный набор объектов, будь это список ключевых слов статьи, товары, купленные в супермаркете, множество симптомов пациента, характерные фрагменты изображения и так далее.

Задача кластеризации транзакционных данных состоит в получении такого разбиения всего множества транзакций, чтобы похожие транзакции оказались в одном кластере, а отличающиеся друг от друга – в разных кластерах.

В основе **алгоритма кластеризации CLOPE** (англ.: Clustering with sLOPE) лежит идея максимизации глобальной функции стоимости, которая повышает близость транзакций в кластерах при помощи увеличения параметра *кластерной гистограммы*.

Пусть имеется база транзакций D, состоящая из множества транзакций $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$. Каждая транзакция есть набор объектов $\{i_1, ..., i_m\}$. Множество кластеров $\{C_1, ..., C_k\}$ есть разбиение множества $\{t_1, t_2, ..., t_n\}$, такое, что $C1 \dots C_k = \{t_1, t_2, ..., t_n\}$ и $C_i <> \wedge C_i\ C_j = 1 <= i, j <= k$. Каждый элемент C_i называется *кластером*, n, m, k – количество транзакций, количество объектов в базе транзакций и число кластеров соответственно.

Каждый кластер C имеет следующие характеристики:

$D(C)$ – множество уникальных объектов; $Occ(i,C)$ – количество вхождений (частота) объекта i в кластер C; $W(C) = |D(C)|$ – ширина кластера; $H(C) = S(C)/W(C)$ – высота кластера, а площадь кластера определяется в виде $S(C) = \sum_{i \in D(C)} Occ(i, C) = \sum_{ti \in C} | ti |$.

Гистограммой кластера C называется графическое изображение его расчетных характеристик: по оси OX откладываются объекты кластера в порядке убывания величины $Occ(i,C)$, а сама величина $Occ(i,C)$ – по оси OY (рис. 9). На рис. 9 $S(C)$, равное 8, соответствует площади прямоугольника, ограниченного

осями координат и пунктирной линией. Очевидно, что чем больше значение *H*, тем более «похожи» две транзакции. Поэтому алгоритм должен выбирать такие разбиения, которые максимизируют *H*.

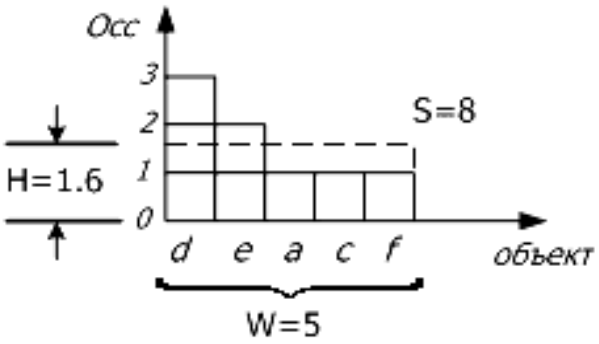


Рис.9. Пример гистограммы кластера

При совпадении значений высот применяют другие более сложные критерии: значение градиента, либо функцию стоимости.

Кластеризация транзакционных данных имеет много общего с анализом ассоциаций. Обе эти технологии Data Mining выявляют скрытые зависимости в наборах данных. Но есть и отличия.

С одной стороны, кластеризация дает общий взгляд на совокупность данных, тогда как ассоциативный анализ находит конкретные зависимости между атрибутами.

С другой стороны, ассоциативные правила сразу пригодны для использования, тогда как кластеризация чаще всего используется как первая стадия анализа.

Преимущества алгоритма CLOPE:

1. Высокие масштабируемость и скорость работы, а также качество кластеризации, что достигается использованием глобального критерия оптимизации на основе максимизации градиента высоты гистограммы кластера. Он легко рассчитывается и интерпретируется. Во время работы алгоритм хранит в RAM небольшое количество информации по каждому кластеру и требует минимальное число сканирований набора данных. Это позволяет применять его для кластеризации огромных объемов категорийных данных.

2. CLOPE автоматически подбирает количество кластеров, причем это регулируется одним единственным параметром – коэффициентом отталкивания в функции стоимости.

3.4. Деревья решений

Деревья решения являются одним из наиболее популярных подходов к решению задач Data Mining. Они создают иерархическую структуру классифицирующих правил типа «ЕСЛИ ..., ТО...», имеющую вид дерева.

Для того чтобы решить, к какому классу отнести некоторый объект или ситуацию, требуется ответить на вопросы, стоящие в узлах этого дерева, начиная с его корня, как показано на рис.10.

Вопросы имеют вид «значение параметра *A* больше *x*». Если ответ положительный, осуществляется переход к правому узлу следующего уровня, если отрицательный – то к левому узлу; затем снова следует вопрос, связанный с соответствующим узлом.

Введем основные понятия из теории деревьев решений, которые будут употребляться далее:

– объект – пример, шаблон, наблюдение;
– атрибут – признак, независимая переменная, свойство;
– метка класса – зависимая переменная, целевая переменная, признак определяющий класс объекта;
– узел – внутренний узел дерева, узел проверки;
– лист – конечный узел дерева, узел решения;
– проверка (test) – условие в узле.

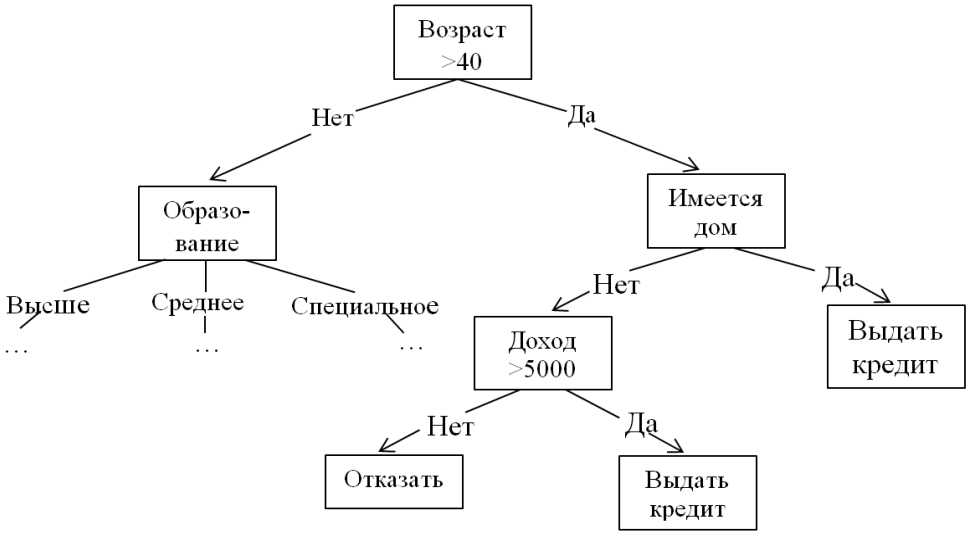


Рис.10. Пример дерева решений

Область применения деревья решений в настоящее время широка, но все задачи, решаемые этим аппаратом могут быть объединены в следующие три класса:

– **Описание данных:** Деревья решений позволяют хранить информацию о данных в компактной форме, вместо них мы можем хранить дерево решений, которое содержит точное описание объектов.
– **Классификация:** Деревья решений отлично справляются с задачами классификации, т. е. отнесения объектов к одному из заранее известных классов. Целевая переменная должна иметь дискретные значения.
– **Регрессия:** Если целевая переменная имеет непрерывные значения, деревья решений позволяют установить зависимость целевой переменной от независимых (входных) переменных. Например, к этому классу относятся задачи численного прогнозирования (предсказания значений целевой переменной).

Пусть нам задано некоторое обучающее множество T, содержащее объекты (примеры), каждый из которых характеризуется m атрибутами (атрибутами), причем один из них указывает на принадлежность объекта к определенному классу.

Пусть через $\{C_1, C_2, ... C_k\}$ обозначены классы(значения метки класса), тогда существуют 3 ситуации:

1. Множество T содержит один или более примеров, относящихся к одному классу C_k. Тогда дерево решений для T – это лист, определяющий класс C_k.
2. Множество T не содержит ни одного примера, т. е. пустое множество. Тогда это снова лист, и класс, ассоциированный с листом, выбирается из другого множества отличного от T, скажем, из множества, ассоциированного с родителем.
3. Множество T содержит примеры, относящиеся к разным классам. В этом случае следует разбить множество T на некоторые подмножества. Для этого выбирается один из признаков, имеющий два и более отличных друг от друга значений $O_1, O_2, ... O_n$. Множество T разбивается на подмножества $T_1, T_2, ... T_n$, где каждое подмножество T_i содержит все примеры, имеющие значение O_i для выбранного признака. Это процедура будет рекурсивно продолжаться до тех пор, пока конечное множество не будет состоять из примеров, относящихся к одному и тому же классу.

Вышеописанная процедура лежит в основе многих современных алгоритмов построения деревьев решений, этот метод известен еще под названием разделения и захвата (divide and conquer). Очевидно, что при использовании данной методики, построение дерева решений будет происходит сверху вниз.

Поскольку все объекты были заранее отнесены к известным нам классам, такой процесс построения дерева решений называется обучением с учителем (supervised learning). Процесс обучения также называют индуктивным обучением или индукцией деревьев (tree induction).

На сегодняшний день существует значительное число алгоритмов, реализующих деревья решений CART, C4.5, NewId, ITrule, CHAID, CN2 и т. д. Но наибольшее распространение и популярность получили следующие два:

- **CART (Classification and Regression Tree)** – это алгоритм построения бинарного дерева решений – дихотомической классификационной модели. Каждый узел дерева при разбиении имеет только двух потомков. Как видно из названия алгоритма, решает задачи классификации и регрессии.
- **C4.5** – алгоритм построения дерева решений, количество потомков у узла не ограничено. Не умеет работать с непрерывным целевым полем, поэтому решает только задачи классификации.

Большинство из известных алгоритмов являются жадными алгоритмами. Если один раз был выбран атрибут, и по нему было произведено разбиение на подмножества, то алгоритм не может вернуться назад и выбрать другой атрибут, который дал бы лучшее разбиение. И поэтому на этапе построения нельзя сказать даст ли выбранный атрибут, в конечном итоге, оптимальное разбиение.

При построении деревьев решений особое внимание уделяется следующим вопросам: выбору критерия атрибута, по которому пойдет разбиение, остановки обучения и отсечения ветвей. Рассмотрим все эти вопросы по порядку.

Правило разбиения. Для построения дерева на каждом внутреннем узле необходимо найти такое условие (проверку), которое бы разбивало множество, ассоциированное с этим узлом на подмножества. В качестве такой проверки должен быть выбран один из атрибутов.

Общее правило для выбора атрибута можно сформулировать следующим образом: выбранный атрибут должен разбить множество так, чтобы получаемые в итоге подмножества состояли из объектов, принадлежащих к одному классу, или были максимально приближены к этому, т. е. количество объектов из других классов (примесей) в каждом из этих множеств было как можно меньше.

Алгоритм C4.5, усовершенствованная версия алгоритма ID3 (Iterative Dichotomizer), использует теоретико-информационный подход.

Алгоритм CART использует так называемый индекс Gini (в честь итальянского экономиста Corrado Gini), который оценивает «расстояние» между распределениями классов.

Правило остановки. В дополнение к основному методу построения деревьев решений были предложены следующие правила:

- Использование статистических методов для оценки целесообразности дальнейшего разбиения, так называемая ранняя остановка (prepruning). В конечном счете ранняя остановка процесса построения привлекательна в плане экономии времени обучения.
- Ограничить глубину дерева. Остановить дальнейшее построение, если разбиение ведет к дереву с глубиной превышающей заданное значение.
- Разбиение должно быть нетривиальным, т. е. получившиеся в результате узлы должны содержать не менее заданного количества примеров.

Правило отсечения. Очень часто алгоритмы построения деревьев решений дают сложные деревья, которые переполнены данными, имеют много узлов и ветвей. Такие ветвистые деревья очень трудно понять. К тому же ветвистое дерево, имеющее много узлов, разбивает обучающее множество на все большее количество подмножеств, состоящих из все меньшего количества объектов. Ценность правила, справедливого скажем для 2-3 объектов, крайне низка, и в целях анализа данных такое правило практически непригодно. Гораздо предпочтительнее иметь дерево, состоящее из малого количества узлов, которым бы соответствовало большое количество объектов из обучающей выборки.

Для решения вышеописанной проблемы часто применяется так называемое отсечение ветвей (prepruning).

Пусть под точностью (распознавания) дерева решений понимается отношение правильно классифицированных объектов при обучении к общему количеству объектов из обучающего множества, а под ошибкой – количество неправильно классифицированных. Предположим, что нам известен способ оценки

ошибки дерева, ветвей и листьев. Тогда, возможно использовать следующее простое правило:

- построить дерево;
- отсечь или заменить поддеревом те ветви, которые не приведут к возрастанию ошибки. Отсечение ветвей происходит снизу вверх, двигаясь с листьев дерева, отмечая узлы как листья, либо заменяя их поддеревом.

Преимущества использования деревьев решений:

- быстрый процесс обучения;
- извлечение правил на естественном языке;
- генерация правил в областях, где эксперту трудно формализовать свои знания;
- интуитивно понятная классификационная модель;
- высокая точность прогноза, сопоставимая с другими методами (статистика, нейронные сети);
- построение непараметрических моделей.

В силу этих и многих других причин, методология деревьев решений является важным инструментом в работе каждого специалиста, занимающегося анализом данных, вне зависимости от того практик он или теоретик.

Деревья решений являются прекрасным инструментом в системах поддержки принятия решений, интеллектуального анализа данных. В состав многих пакетов, предназначенных для интеллектуального анализа данных, уже включены методы построения деревьев решений. В областях, где высока цена ошибки, они послужат отличным подспорьем аналитика или руководителя

Деревья решений успешно применяются для решения практических задач в следующих областях:

- Банковское дело. Оценка кредитоспособности клиентов банка при выдаче кредитов.
- Промышленность. Контроль за качеством продукции (выявление дефектов), испытания без разрушений (например, проверка качества сварки) и т.д.
- Медицина. Диагностика различных заболеваний.
- Молекулярная биология. Анализ строения аминокислот.

Это далеко не полный список областей, где можно использовать деревья решений.

3.5. Классификация программных реализаций систем Data Mining

1. Предметно-ориентированные аналитические пакеты (например, в финансовой области предназначены для предсказания курса валют). Часто основой для таких технологий является несложный статистический аппарат (аппарат прикладной статистики), в наибольшей мере учитывающий специфику рассматриваемой области. Цена таких продуктов меньше $1000, т. е. они недорогие и их много.

2. Статистические пакеты, включающие наряду с традиционными методами математической статистики также элементы Data Mining. Круг задач, ре-

шаемых с помощью статистических пакетов: создание корреляционных моделей; факторный анализ, регрессионный анализ и др.

Достоинства данных методов состоит в том, что они основываются на строгом математическом аппарате.

Недостатки: для их использования требуется специальная математическая подготовка пользователя, а также, принципиальный недостаток пакетов состоит в том, что они опираются на статистическую парадигму и поэтому дают математически усредненный вывод.

Наиболее распространены такие мощные статистические пакеты, как SAS (компания SAS Institute), SPSS (SPSS), Statistica и др. Эти системы достаточно дороги – от $1000 до $15000.

3. Нейросетевые системы. Принцип работы нейронных сетей заключается в следующем: имитируется работа нейронов в составе иерархической сети. При этом сигналы передаются от нижних слоев к верхним, а сила сигнала зависит от сложности связи.

Недостатки:

– необходимо иметь большой объем обучающей выборки;
– результаты работы такого пакета трудно объяснить.

Нейронные сети могут быть реализованы программным или аппаратным способом.

Вариантами аппаратной реализации являются нейрокомпьютеры, нейроплаты и нейроБИС (большие интегральные схемы). Одна из самых простых и дешёвых нейроБИС – модель MD 1220 фирмы Micro Devices, которая реализует сеть с 8 нейронами и 120 синапсами.

Большинство современных нейрокомпьютеров представляют собой персональный компьютер или рабочую станцию, в состав которых входит дополнительная нейроплата. К их числу относятся, например, компьютеры серии FMR фирмы Fujitsu.

К программам, реализующим технологии нейронных сетей относятся: пакет Brain Maker (CSS), NeuroShell (Ward Systems Group) и др. Стоимость таких систем очень высока (более $1000). Пакет Brain Maker используется несколькими тысячами финансовых и промышленных компаний, а также оборонными ведомствами США для решения задач прогнозирования, оптимизации и моделирования ситуаций. К таким задачам относятся прогнозирование курсов валют и акций на биржах, моделирование кризисных ситуаций, распознавание образов и многие другие на основе использования сети Хопфилда с обучением по методу обратного распространения ошибки.

4. Системы рассуждений на основе аналогичных случаев (Case Based Reasoning – CBR) основаны на поиске аналога наличной ситуации. Назначение таких систем: среди БД множества случаев найти тот, который наиболее близок к рассматриваемому.

Недостатки:

– не создается никакой модели (ищем аналогию, но не ищем модель, правило);

– результат зависит от меры близости, которую можно выбрать и достаточно неправильной. Для эффективного решения задач классификации или прогноза необходимо, чтобы был накоплен большой объем данных.

Пример системы, использующей CBR, – Pattern Recognition Workbench (Unica, США).

5. Деревья решений (Decision Tree). Указанная технология используется в том случае, если применимо правило типа «If …,Then …» и она представляет собой процесс мышления, при котором идет логический вывод от корня к ветвям и листьям. Такие переходы понятны и видны графически, т. е. пользователь получает модель, по которой он может сделать выводы о результатах.

Недостаток технологии деревьев решений заключается в том, что трудно найти оптимальное решение, такая система не дает ответа, какое решение следует считать оптимальным.

На использовании технологии деревьев решений работают продукты See5 / C5.0 (компания RuleQuest), KnowledgeSeeker (ANGOSS) и др. Стоимость таких пакетов от $1000.

6. Пакеты на основе алгоритмов ограниченного перебора. Суть работы таких технологий заключается в следующем: алгоритм вычисляет частоты комбинаций простых логических событий в подгруппах данных и на основании вычисленных частот делается вывод о полезности той или иной комбинации. Они определяют логические «If …,Then …» правила и выдают результат. Технология ограниченного перебора используется там, где трудно найти функциональную связь.

Известным представителем этого подхода является продукт WizWhy (фирма WizSoft). Стоимость таких пакетов – около $4000.

7. Генетические алгоритмы. Данная технология представляет собой попытку найти решение путем обращения к генетике. Генетический алгоритм (ГА) – это поисковый алгоритм, основанный на природных механизмах селекции и генетики. Эти алгоритмы обеспечивают выживание сильнейших решений из множества сгенерированных, формируя и изменяя процесс поиска на основе моделирования эволюции исходной популяции решений.

Коммерческое программное обеспечение, реализующее ГА, можно разделить на программные средства общего назначения, прикладные и алгоритмические программные продукты.

Программное обеспечение общего назначения включает разнообразные наборы инструментальных средств для построения конкретных программ, которые содержат библиотеки алгоритмов, программы моделирования, средства визуализации и другие инструменты. Пакеты подобного типа рассчитаны на опытных программистов, требуют знания основ теории эволюционных вычислений и характеризуются высокой трудоёмкостью освоения, которая в значительной мере зависит от квалификации пользователя.

Прикладные программные продукты ориентированы на решение проблем определённого класса в конкретных предметных областях (реинжиниринг, маркетинг, стратегическое планирование и др.). Такие средства не требуют от

пользователя теоретических знаний в области методологии создания интеллектуальных систем. Достаточно, чтобы он был специалистом в своей предметной области.

Алгоритмическое программное обеспечение поддерживает один (или несколько) генетический алгоритм. Преимущества таких программных продуктов – их гибкость и простота использования. При этом пользователям необходимо иметь представление об основах теории ГА.

Система PC/Beagle представляет собой программу поиска решающих правил, классифицирующих примеры из базы данных. Она превращает данные в знания за счёт использования машинного обучения. Один из модулей системы путём репродукции и селекции порождает правила, представленные в виде логических выражений.

Система Evolver реализует шесть методов генетической оптимизации и выполнена в виде расширения MS Excel. Основные области применения пакета – оптимизация доходности с учётом уровня риска и максимизация прибыли с учётом возможных издержек.

Genesis – известный алгоритмический программный продукт, который используется в качестве инструмента тестирования генетических алгоритмов. Он позволяет создать модифицированную программную среду и обеспечивает пользователя статистической информацией на выходе.

Программный продукт общего назначения EnGENEer помогает адаптировать генетические алгоритмы к новым проблемным областям.

Известен пакет GeneHunter фирмы Ward Systems Group, который может использоваться как приложение MS Excel и допускает составление собственных программ на языках C и Visual Basic. Его стоимость – около $1000.

8. Эволюционное программирование. Процесс построения программ строится как эволюции в мире программ. Когда система находит программу, более или менее выражающую искомую зависимость, она начинает вносить в нее небольшие модификации и отбирает среди построенных дочерних программ те, которые повышают точность. Так работает отечественная программная система PolyAnalyst.

Другое направление эволюционного программирования связано с поиском зависимости целевых переменных от остальных в форме функций какого-то определенного вида, например, в форме полиномов. Указанное направление реализовано в системе NeuroShell компании Ward System Group. Стоимость систем до $4000.

9. Аналитические платформы. Аналитические программные комплексы имеют тенденцию совершенствоваться в направлении увеличения количества параметров многомерного анализа и уровня адекватности математического аппарата реальным, многосторонним бизнес-процессам для повышения точности и долгосрочности прогнозирования развития процессов и ситуаций, и их оптимизации в интересах предприятий и организаций. Аналитические программные комплексы должны создаваться с расчетом на слияние с другими интеллектуальными средствами, имитационными математическими моделями, многокри-

териальными системами поддержки принятия решений, системами искусственного интеллекта и др. Только в этом случае возможно образование интегрированных комплексов поддержки принятия оптимальных решений, причем как в интересах достижения стратегических целей, так и в интересах своевременного, достаточно быстрого и адекватного реагирования на изменения внешних условий в процессе управления деятельностью предприятий и организаций.

Разработанный в России компанией BaseGroup Labs программный продукт Deductor является аналитической платформой, т. е. основой для создания законченных прикладных решений на основе решения задач анализа данных. Реализованные в Deductor технологии предоставляет полный набор инструментов и позволяют на базе единой архитектуры пройти все этапы построения аналитической системы: от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов [21, 27].

Deductor предоставляет аналитикам инструментальные средства, необходимые для решения самых разнообразных аналитических задач: корпоративная отчетность, прогнозирование, сегментация, поиск закономерностей – эти и другие задачи, где применяются такие методики анализа, как OLAP, Knowledge Discovery in Databases и Data Mining. Deductor является идеальной платформой для создания систем поддержки принятия решений.

3.6. Краткое описание применения аналитической платформы Deductor для решения задач интеллектуального анализа данных

Состав платформы Deductor. Система состоит из пяти частей:

– **Studio** – программа, реализующая функции импорта, обработки, визуализации и экспорта данных. Deductor Studio может функционировать и без хранилища данных, получая информацию из любых других источников, но наиболее оптимальным является их совместное использование. В Deductor Studio включен полный набор механизмов, позволяющий получить информацию из произвольного источника данных, провести весь цикл обработки (очистку, трансформацию данных, построение моделей), отобразить полученные результаты наиболее удобным образом (OLAP, диаграммы, деревья и др.) и экспортировать результаты на сторону.

– **Viewer** – рабочее место конечного пользователя. Позволяет отделить процесс построения сценариев от использования уже готовых моделей. Все сложные операции по подготовке сценариев обработки выполняются аналитиками-экспертами при помощи Deductor Studio, а Deductor Viewer обеспечивает пользователям простой способ работы с готовыми результатами, скрывает от них все сложности построения моделей и не предъявляет высоких требований к квалификации сотрудников.

– **Warehouse** – многомерное хранилище данных, аккумулирующее всю необходимую для анализа предметной области информацию. Использование единого хранилища позволяет обеспечить непротиворечивость данных, их централизованное хранение и автоматически обеспечивает всю необходимую поддержку процесса анализа данных.

– **Server** – служба, обеспечивающая удаленную аналитическую обработку данных. Позволяет автоматически обрабатывать данные и переобучать модели на сервере, оптимизирует выполнение сценариев за счет кэширования проектов и использования многопоточной обработки.

– **Client** – клиент доступа к Deductor Server. Обеспечивает доступ к серверу из сторонних приложений и управление его работой.

Реализованная в Deductor архитектура позволяет добиться максимальной гибкости при создании законченного решения. Благодаря данной архитектуре можно собрать в одном аналитическом приложении все необходимые инструменты анализа и реализовать автоматическое выполнение подготовленного сценария. Создание законченного решения занимает очень мало времени. Достаточно получить данные, определить сценарий обработки и задать место для экспорта полученных результатов. Наличие мощного набора механизмов обработки и визуализации позволяет двигаться по шагам, от наиболее простых способов анализа к более мощным. Таким образом, первые результаты пользователь получает практически сразу, но при этом можно легко наращивать мощность решения.

Хранилище данных. Deductor включает в себя кросс-платформенное хранилище Deductor Warehouse – специализированную базу, в которую загружается информация из существующих учетных систем. Оно спроектировано специально для обработки аналитических запросов и включает удобный семантический слой, благодаря которому пользователи в состоянии извлечь любые интересующие их сведения без написания сложных запросов, только оперируя понятными бизнес-терминами.

Deductor поддерживает работу практически с любыми источниками данных: офисные приложения, 1С:Предприятие, популярные СУБД, ERP-, CRM-, BI-системы, текстовые файлы, XML-источники и десятки других. Где бы ни хранилась информация, ее можно будет извлечь, трансформировать к нужному виду и загрузить в хранилище данных.

Интеграция. Для получения аналитической отчетности при помощи Deductor может использоваться информация из десятков источников: хранилища данных, учетные системы, СУБД, файлы и многое другое. Полученные результаты можно просмотреть на экране, передать в офисные приложения (MS Excel, Word, Access), разместить на веб-сайте, загрузить в базу данных.

Простота применения. Для построения аналитического решения на базе платформы Deductor не требуется написания сложного кода. Практически все операции производятся в режиме визуального проектирования, при помощи специальных мастеров, облегчающих работу аналитика, которая отделена от работы конечного пользователя. Аналитик строит при помощи мастеров сценарии, в которых реализована произвольная логика обработки, а конечный пользователь просто выбирает нужный отчет и автоматически получает интересующие данные.

Прогнозирование – одна из самых востребованных, но при этом и самых сложных задач анализа. Качественный прогноз является ключом к решению та-

ких актуальных бизнес-задач, как оптимизация складских запасов и финансовых потоков, бюджетирование, оценка инвестиционной привлекательности и многие другие. Обработчики в Deductor обеспечивают возможность построения прогностических моделей с использованием как простых моделей (по среднему, на основе предыдущих периодов, по жестким правилам), так и мощных самообучающихся алгоритмов (регрессионные модели, нейронные сети, анализ временных рядов).

OLAP-визуализатор. Результаты планирования, моделирования, различные варианты сценарных прогнозов можно просмотреть при помощи множества удобных визуализаторов, в частности с использованием встроенного OLAP-модуля. Он поддерживает весь необходимый для бюджетирования функционал: просмотр в любых срезах, детализация (drill down), сортировки, группировки, множество способов фильтрации.

Анализ отклонений. Одним из важнейших этапов работы системы бюджетирования является выявление отклонений и анализ причин их возникновения. Deductor включает мощные Data Mining алгоритмы, позволяющие не только найти аномалии, отклонения, противоречия, но и проанализировать что привело к такому результату, выявить влияние на аномалии множества факторов, найти причинно-следственные связи.

Версии платформы. Существует три версии этой платформы. Версия *Enterprise* предназначена для корпоративного использования. В ней присутствуют:

– серверные компоненты Deductor Server и Deductor Client;
– интерфейс доступа к Deductor через механизм OLE Automation;
– традиционное хранилище данных Deductor Warehouse на трех СУБД: Firebird, MS SQL, Oracle;
– виртуальное хранилище данных Deductor Virtual Warehouse.

Версия *Professional* предназначена для небольших компаний и однопользовательской работы. В ней отсутствуют серверные компоненты, поддержка OLE, виртуальное хранилище, а традиционное хранилище данных можно создавать только на СУБД Firebird.

Версия *Academic* предназначена для образовательных и обучающих целей. Ее функционал аналогичен версии Professional за исключением того, что отсутствуют пакетный запуск сценариев, т. е. работа в программе может вестись только в интерактивном режиме, а также нет импорта из промышленных источников данных: 1С, СУБД, файлы MS Excel, Deductor Data File.

Реализованные технологии Data Mining:

– задача ассоциации на основе алгоритма Apriori;
– задача кластеризации на основе сетей и карт Кохонена, а также алгоритмов k-means и G-means;
– задача классификации и регрессии на основе линейной и логистической регрессии, деревьев решений (алгоритм C 4.5), многослойного персептрона (алгоритмы BProp, RProp);

– анализ и прогнозирование временных рядов на основе регрессионных и нейросетевых моделей;

– сравнение моделей на основе ROC-анализа.

В Deductor Studio вся работа ведется с использованием пяти мастеров.

Для создания сценариев обработки данных используются *мастера импорта*, *обработки* и *экспорта*. Для настройки подключений к источникам данных используется *мастер подключений*. *Мастер визуализации* настраивает визуализаторы для конкретного узла.

Подробное изложение системы Deductor изложено в работах Н.Б. Паклина и других разработчиков и исследователей в [21, 27]. Учебные примеры применения платформы содержатся также в пособиях [22, 23].

Сопоставление Deductor со известными специализированными продуктами других производителей. По производительности работа Warehouse на Oracle, SQL и Firebird при более-менее активном лазании в Хранилище (закачка транзакций и какой-то дополнительной информации, а также постоянное ее использование для прогнозирования порядка 30000-40000 временных рядов в месяц и сохранение прогнозов) отличается существенно, при больших объемах раз в 10-20. При грамотной оптимизации можно добиться еще большей разницы в скорости. Это связано с тем, что тяжелые базы сами по себе работают быстрее (точнее могут больше выжать из оборудования), но не только. Дело в том, что у Oracle и MS SQL есть нестандартные опции, позволяющие загружать данные пачками, извлекать большими кусками и прочее. Кроме того, поддерживается размещение в различные табличные пространства и прочее. При небольших объемах (база до гигабайта) разницы в производительности у указанных баз данных и Deductor 5 почти нет [27]. В Deductor 5 есть алгоритмы для построение прогнозных моделей. Так что теоретических проблем нет, а вот насчет качества – это уже вопрос обучения, данных и прочее. Для работы нужен Deductor Studio. Даже бесплатная версия Deductor Academic может обрабатывать выборки объемом в несколько миллионов записей без особых проблем.

Выводы

Технологии извлечения знаний из хранилищ данных основаны на методах статистического анализа и моделирования, ориентированных на поиск моделей и отношений, скрытых в совокупности данных. Эти модели могут в дальнейшем использоваться для оптимизации деятельности предприятия или фирмы.

Для извлечения значимой информации из хранилищ данных имеются специальные методы (OLAP-анализа, Data Mining или Knowledge Discovery), основанные на применении методов математической статистики, нейронных сетей, индуктивных методов построения деревьев решений и др.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные шаги процедур Knowledge Discovery in Databases при работе с данными в процессе анализа данных?

2. Перечислите основные методы из арсенала математической статистики, применяемые при анализе данных.

3. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные методы из арсенала эволюционного моделирования, применяемые для интеллектуального анализе данных.

4. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные методы из арсенала машинного обучения, применяемые для интеллектуального анализе данных.

5. Дайте определение бинарной логистической регрессии, логит-преобразования, определение ROC-кривой для представления результатов бинарной классификации в машинном обучении.

6. Какова процедура построения и визуальной оценки ROC-кривых для представления результатов бинарной классификации и прогноза?

7. Каковы особенности алгоритмов кластеризации наборов данных, содержащих большое количество числовых и категорийных атрибутов?

8. В чем смысл задачи кластеризации транзакционных данных?

9. Какие процедуры содержит алгоритм кластеризации транзакционных данных CLOPE?

10. Каковы преимущества алгоритма кластеризации транзакционных данных CLOPE?

11. Каковы основные понятия из теории деревьев решений используются при решении задач Data Mining?

12. Каковы области применения деревья решений при решении задач Data Mining?

13. Какие процедуры лежит в основе многих современных алгоритмов построения деревьев решений?

14. Каковы особенности алгоритмов CART и C4.5, реализующих деревья решений?

15. Выбор критерия атрибута, по которому пойдет разбиение, остановка обучения и отсечение ветвей деревьев решений.

16. Перечислите и кратко охарактеризуйте виды программных реализаций систем Data Mining.

17. Каковы параметры алгоритма конструирования классификатора в программе See5?

18. Как преобразовать полученное дерево решений в набор правил If….Then?

19. Как можно уменьшить ошибки классификации в программе See5?

20. Какой алгоритм положен в основу работы программы WizWhy для поиска логических правил в данных?

21. Какие параметры следует задать для работы процедуры поиска правил и какие отчеты готовит система WizWhy?

22. Каков перечень решаемых задач и состав аналитической платформы Deductor 5?

23. В чем заключена новизна взгляда на данные при применении аналитической платформы Deductor?

24. Какой объем выборки данных может обрабатывать и какие задачи может решать демоверсия Deductor 5?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сферу приложений искусственного интеллекта в настоящее время вошли практически все направления современной информатики. Многие из этих направлений, таких как вопросы создания экспертных систем, искусственных нейросетей и др., в достаточной мере освещены в учебной и методической литературе. Поэтому я не ставил перед собой цель «объять необъятное», а включил в текст лекций как разделы, содержащие описание традиционных моделей знаний, понятий, определений и типов интеллектуальных систем, так и новый перспективный подход к решению проблем интеллектуальной обработки накопленных массивов данных.

При написании пособия автор видел свою цель в том, чтобы познакомить студентов с принципами создания и функционирования интеллектуальных информационных систем. Практический опыт показывает, что люди, не знакомые с этими принципами, испытывают большие трудности, выступая в роли пользователей интеллектуального программного обеспечения.

С учетом динамичного развития современной области ИИ текст лекций является лишь введением в огромную и интересную область знаний. Слушатели, заинтересовавшиеся работами в этом перспективном научном направлении и вопросами практического применения методов ИИ в решении сложных задач управления, имеют прекрасную возможность самостоятельно продолжить изучение этой тематики. Огромный мир Интернета позволяет получить быстрый доступ к самой различной информации по тематике создания и применения интеллектуальных систем и технологий, к имеющейся обширной библиографии, углубленным теоретическим и практическим курсам по систематическому освещению многих вопросов, относящихся к области ИИ и ИС. Многие перспективные направления ИИ, ИС в работе лишь упомянуты, или приведены в качестве примеров развития возможных теоретических направлений и практических применений.

Автор надеется, что знания, полученные при изучении данной книги, помогут читателю решать практические примеры при самостоятельном освоении технологии и продуктов Data Mining, а также позволят расширить кругозор в области интеллектуальных информационных систем и технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 1: Системы общения и экспертные системы / под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990. – 461 с.
2. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 2: Модели и методы / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – 304 с.
3. Искусственный интеллект: справочник. В 3 кн. Кн. 3: Программные и аппаратные средства / под ред. В.Н. Захарова и В.Ф. Хорошевского. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
4. Коршунов, Ю.М. Математические основы кибернетики: учебное пособие для вузов / Ю.М. Коршунов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 496 с.
5. Острейковский, В.А. Информатика: учебник для вузов / В.А. Острейковский. – М.: Высшая школа, 2009. – 510 с.
6. Тельнов, Ю.Ф. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / Ю.Ф. Тельнов. – М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2002. – 118 с.
7. Интеллектуальные информационные системы и технологии: учебное пособие / Ю.Ю. Громов, О.Г. Иванова, В.В. Алексеев и др. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2013. – 244 с.
8. Дюк, В. Data Mining: учебный курс / В. Дюк, А. Самойленко. – СПб.: Питер, 2001. – 366 с.
9. Попов, Э.В Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель и др. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 310 с.
10. Логиновский, О.В. Управление и стратегии: учебное пособие / О.В. Логиновский. – Оренбург: Изд-во ОГУ; Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 704 с.
11. Луценко, Е.В. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие для студентов специальности 230400 «Информационные системы и технологии» / Е.В. Луценко. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 645 с.
12. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем: учебное пособие для вузов / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 382 с.
13. Романов, В.П. Интеллектуальные информационные системы в экономике: учебное пособие для вузов по специальности «Прикладная информатика» и другим междисциплинарным специальностям / под общ. ред. Н.П. Тихомирова. – М.: Экзамен, 2003. – 494 с.
14. Макаренко, С.И. Интеллектуальные информационные системы: учебное пособие / С.И. Макаренко. – Ставрополь: СФ МГГУ, 2009. – 206 с.
15. Таунсенд, К. Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таунсенд, Д. Фохт; пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 356 с.
16. Программные средства интеллектуальных систем / А.Е. Городецкий. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 2000. – 316 с.

17. Бессмертный, И.А. Искусственный интеллект: учебное пособие / И.А. Бессмертный.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 132 с.
18. Барыкин, С.Г. Системы искусственного интеллекта: учебное пособие / С.Г. Барыкин, Н.В. Плотникова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004 – 85 с.
19. Барсегян, А.А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: учебное пособие для специальности «Информационные системы» / А.А. Барсегян. – СПб.: БХВ Петербург, 2007. – 376 с.
20. Кацко, И.А. Практикум по анализу данных на компьютере: учебное пособие / И.А. Кацко, Н.Б. Паклин. – М.: КолосС, 2009.– 278 с.
21. Паклин, Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: учебное пособие / Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.
22. Поллак, Г.А. Современные технологии анализа информации: учебное пособие / Г.А. Поллак. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 115 с.
23. Поллак, Г.А. Современные технологии анализа информации: учебное пособие к практическим работам / Г.А. Поллак. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013 – 99 с.
24. Чинакал, В.О. Интеллектуальные системы и технологии: учебное пособие / В.О. Чинакал. – М.: РУДН, 2008. – 303 с.
25. Коровин, А.М. Управление знаниями на основе ИТ-технологий: текст лекций / А.М. Коровин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 48 с.
26. http://www.ipu.ru/labs/lab51/projects.html.
27. http://www.basegroup.ru/deductor/
28. http://www.rulequest.com/
29. http://www.interface.ru/sysmod/
30. http://www.bipartner.ru/services/dm.html.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……...…… 3
Глава 1. ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ
1.1. История исследований и основные понятия в области искусственного интеллекта..... 5
1.2. Основные направления исследований в области интеллектуальных систем …….. 8
1.3. Основные признаки и отличия интеллектуальных систем……. 10
1.4. Основные типы интеллектуальных систем…….…. 13
Глава 2. МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
2.1. Представление знаний, рассуждений и задач…….…….. 28
2.2. Модели представления знаний……... 30
Глава 3. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗНАНИЙ ИЗ ДАННЫХ МЕТОДАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ
3.1. Особенности и классификация методов интеллектуального анализа данных …….. 36
3.2. Логистическая регрессия и ROC-анализ данных…… 38
3.3. Алгоритмы кластеризации на службе Data Mining ……. 42
3.4. Деревья решений…….. 44
3.5. Классификация программных реализаций систем Data Mining……. 48
3.6. Краткое описание применения аналитической платформы Deductor для решения задач интеллектуального анализа данных……... 52
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….……..... 57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК……..... 58

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Б1.В.10 ПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрен на заседании кафедры	Рассмотрен методической комиссией факультета
Технической механики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Волков Е. Б.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

Лабораторная работа №1

Изучение режимов работы робота–штабелера

Цель работы:

Ознакомиться с типами управления и изучить режимы работы робота–штабелера используя «сокращенный» и «расширенный» функционал управления роботом.

Теоретическая часть:

Интерфейс управления роботом–штабелером может отображаться в двух различных видах: «сокращенный» и «расширенный». Вне зависимости от режима отображения робот–штабелер может управляться в тремя способами:

1. Ручное управление, которое осуществляется путем перемещения оператором «ползунков», задающих значения координат, и нажатия кнопки перемещений (рисунок 1.1).

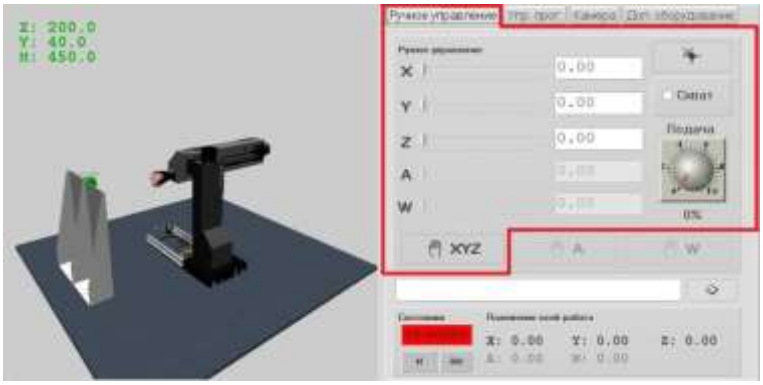


Рисунок 1.1 – Интерфейс ручного управления роботом–штабелером

2. Управление при помощи командной строки, в которой оператор прописывает текст команды, выполняемой роботом после нажатия клавиши «Enter» (рисунок 1.2).

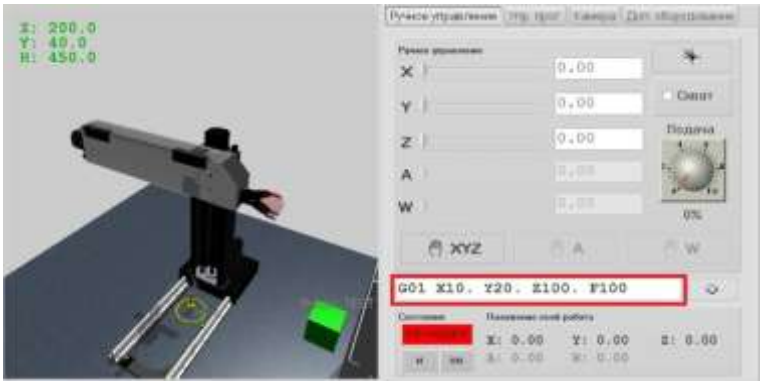


Рисунок 1.2 – Интерфейс управления при помощи командной строки

3. Управление роботом–штабелером при помощи управляющей программы, созданной в текстовом файле и загруженной оператором.



Рисунок 1.3 – Интерфейс управления роботом–штабелером при помощи управляющей программы

На рисунках 1.1 – 1.3 представлен «сокращенный» вид управления роботом–штабелером. В «расширенном» виде в интерфейсе управления роботом–штабелером отсутствует графическое представление положения робота в пространстве. Интерфейс управления роботом в «расширенном» виде представлен на рисунке 1.4.

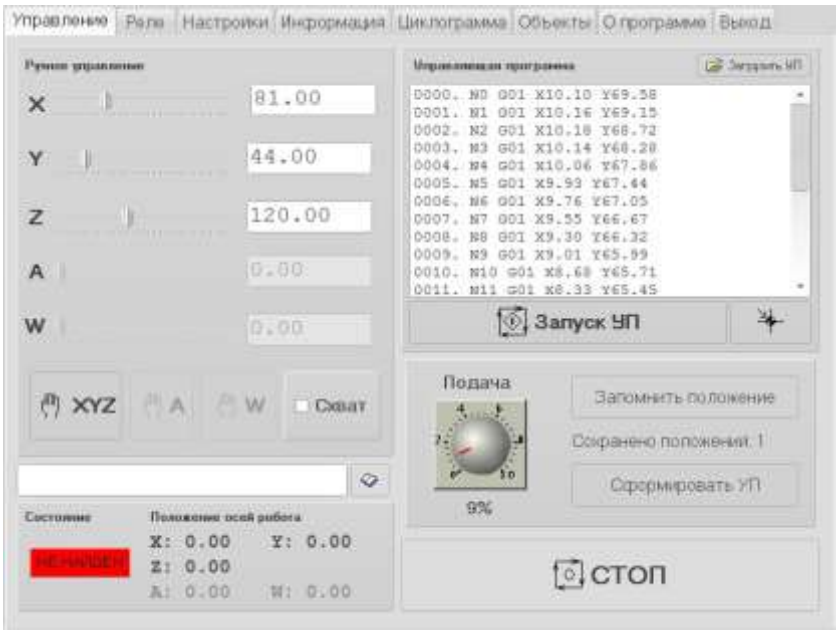


Рисунок 1.4 – Интерфейс управления роботом в «расширенном» виде

Для ручного управления роботом оператор должен переместить «ползунок» выбранной координаты (или нескольких координат для одновременного перемещения) в положение, соответствующее заданному положению робота. Значение координаты можно увидеть в белом поле рядом с выбранным «ползунком».

Для того, чтобы робот переместился в заданные координаты, необходимо после их назначения нажать кнопку XYZ. Для выхода звеньев робота в нулевое положение необходимо нажать на кнопку . Далее выбрать из списка, по какой координате следует произвести выход в нулевое положение. Для управления схватом необходимо поставить либо убрать галочку в поле рядом со словом СХВАТ.

Для управления роботом–манипулятором при помощи командной строки необходимо написать текст команды в поле командной строки (см. рисунок 1.2).

Основной командой для управления звеньями робота является команда линейного перемещения G01. Пример текста команды выглядит следующим образом:

G01 X50. Y100. Z30. F100,

где G01 – команда линейного перемещения в заданные координаты;

X50. Y100. Z30. – координаты конечных положений звеньев робота;

F100 – обозначение скорости перемещения, цифры после буквы указывают на процент от максимального перемещения.

Перемещение можно произвести по одной, двум или трем координатам одновременно. Координаты X, Y и Z задаются в миллиметрах.

Для управления схватом используются команды LOCKERON и LOCKEROFF.

Команда LOCKERON сжимает губки схвата, команда LOCKEROFF – разжимает.

Для выхода звеньев робота в нулевое положение используется команда RHOME. При этом необходимо указать координату, для которой указывается команда, например:

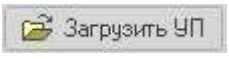
RHOMEX – выход в нулевое положение по оси X;

RHOMEY – выход в нулевое положение по оси Y;

RHOMEZ – выход в нулевое положение по оси Z.

Все команды управления роботом-манипулятором записываются ПРОПИСНЫМИ буквами.

Более подробно о программировании можно узнать из прилагаемого пособия по программированию.

Для управления роботом–штабелером при помощи управляющей программы (УП), ее нужно загрузить нажатием на кнопку 

.

Перед загрузкой УП необходимо предварительно составить текст программы в текстовом редакторе «Блокнот», в формате «имя программы.txt». Каждая команда с параметрами перемещения записывается с новой строки. Текст после знака « ; » не считывается и является комментарием.

Также составление УП возможно перемещением робота в нужные положения и запоминанием полученных координат с помощью кнопки «Запомнить положение».

После завершения необходимых перемещений робота нужно нажать кнопку «Сформировать УП», и управляющая программа будет создана автоматически. При этом нужно указать путь сохранения и дать ей имя. Эту программу можно открыть текстовым редактором и отредактировать.

Ход работы

1) Включить блоки управления стендом.

2) Нарисовать схему подключения элементов стенда.

3) Запустить программу управления штабелером. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись «Найден».

4) При помощи вкладки «объекты» в расширенном интерфейсе управления роботом создать минимум пять объектов, имитирующих ячейки для заготовок на складе.

5) В сокращенном режиме работы, оставаясь в режиме имитатора, произвести перемещения робота таким образом, чтобы схват робота поочередно оказывался там, где расположены созданные объекты. Перемещения необходимо осуществлять по одной оси, двум осям и трем осям одновременно, задавая при этом различные скорости перемещения звеньев робота–манипулятора по осям. Последовательность перемещения необходимо записать в таблицу 1.

Таблица 1 – Последовательность перемещения робота–манипулятора

№ перемещения	Координата X	Координата Y	Координата Z	Скорость перемещения F
1				
2				
3				
4				
5				

Вывести робот–манипулятор в нулевое положение по всем осям.

Составить для каждого перемещения команду. Записать текст команды в таблицу 2.

Таблица 2 – Команды перемещения робота–манипулятора

№ перемещения	Текст команды
1	
2	
3	
4	
5	

6) Путем последовательного ввода команд в командную строку произвести перемещения звеньев робота по осям. Обращать внимание на правильность написания команд. Отслеживать текущие координаты осей робота по значениям в поле «Положение осей робота». После окончания каждого перемещения нужно запоминать положение робота–манипулятора в программе нажатием кнопки «Запомнить положение» на вкладке «Управляющая программа». После запоминания всех перемещений по этим опорным точкам сформировать управляющую программу нажатием кнопки « Сформировать УП».

7) Открыть сформированную УП, добавить в конце программы команды выхода в нулевое положение по всем осям. Сохранить файл и запустить управляющую программу в имитаторе.

8) После правильного выполнения этой программы открыть её текст. Для имитации переноса заготовки из одной позиции в другую, перед перемещением робота в первую позицию вставить команду на разжим схвата, при достижении роботом первой позиции вставить команду на зажим схвата, имитируя зажим детали. Затем после перемещения робота во вторую позицию вставить команду на разжим схвата, имитируя укладку детали в ячейку.

9) По той же схеме произвести имитацию перемещения заготовки по трем ячейкам, при этом во второй ячейке происходит сначала разжим схвата и укладывание заготовки в ячейку, затем снова следует зажим этой заготовки и перенос в последнюю ячейку.

9) Записать управляющие программы. Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №2

Изучение интерпретатора языка программирования робота

Цель работы:

Изучить понятие интерпретатора. Понять процесс работы интерпретатора. Определить работу интерпретатора при написании управляющей программы робота.

Теоретическая часть:

Программирование систем с числовым программным управлением (ЧПУ) производится посредством G – кода. G – код –это общее название языка программирования систем с ЧПУ, так как он имеет множество реализаций и дополнений у разных производителей и для разных устройств.Программа, написанная с использованием G-кода, состоит из кадров, каждый кадр содержит набор команд управления.Интерпретатор анализирует и тут же выполняет (собственно интерпретация) программу покомандно (или построчно), по мере поступления её исходного кода на вход интерпретатора.

Алгоритм работы простого интерпретатора включает в себя:

1) Прочитать инструкцию.

2) Проанализировать инструкцию и определить соответствующие действия.

3) Выполнить соответствующие действия.

4) Если не достигнуто условие завершения программы, прочитать следующую инструкцию и перейти к пункту 2.

По сути робот–манипулятор – это перепрограммируемый автоматический манипулятор промышленного применения. Под перепрограммируемостью, в соответствии со стандартом, понимается свойство промышленного робота заменять управляющую программу автоматически или при помощи человека-оператора.

К перепрограммированию относится изменение последовательности и(или) величин перемещений по степени подвижности и управляющих функций с помощью средств управления на пульте устройства управления.

Работа интерпретатора заключается в сопоставлении команд G – кода с командами, подаваемыми на микроконтроллер драйвера управления звеньями робота–манипулятора. При этом, если команды управления записаны неверно, интерпретатор не может сопоставить их с командами для микроконтроллера и действия не происходит.

Интерпретатор языка программирования встроен в программу для управления роботом, поэтому правильность работы интерпретатора определяется правильностью исполнения команд управляющей программы роботом–манипулятором.

Ход работы:

1) Включить блоки управления стендом, запустить программу управления стендом;
2) Выйти из режима «имитатора», убрав галочку в поле рядом с соответствующей надписью;
3) Вывести оси робота в нулевые положения;
4) Используя данные таблицы 2 из лабораторной работы №1 выполнить команды на скорости перемещения 20%, путем последовательного ввода команд в командную строку произвести перемещения звеньев робота–манипулятора по осям. Обращать внимание на правильность написания команд. Отслеживать текущие координаты осей робота по значениям в поле «Положение осей робота». После окончания каждого перемещения нужно запоминать положение робота–манипулятора в программе нажатием кнопки «Запомнить положение» на вкладке «Управляющая программа». После запоминания всех перемещений по этим опорным точкам сформировать управляющую программу нажатием кнопки « Сформировать УП». При этом обращать внимание, чтобы звенья робота при перемещении не наезжали на элементы стенда;
5) Открыть сформированную УП, добавить в конце программы команды выхода в нулевое положение по всем осям. Сохранить файл и запустить управляющую программу;
6) Описать действия робота–манипулятора для выполнения данной управляющей программы используя алгоритм работы простого интерпретатора;
7) Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №3.

Изучение команд перемещения робота–манипулятора. Изучение работы робота–штабелера в декартовой системе координат

Цель работы

Изучение команд перемещения звеньев робота в декартовой системе координат.

Теоретическая часть

Перемещение звеньев робота задается тремя составляющими:

– координата X робота, передвижение горизонтального звена робота со схватом вперед–назад;

– координата Y робота, изменение высоты горизонтального звена робота вдоль вертикального звена вверх–вниз;

– координата Z робота, передвижение робота вправо–влево.

Данные координаты имеют только положительные значения, отсчитываемые от датчиков нулевого положения. На рисунке 3.1 звенья робота располагаются в нулевых координатах.

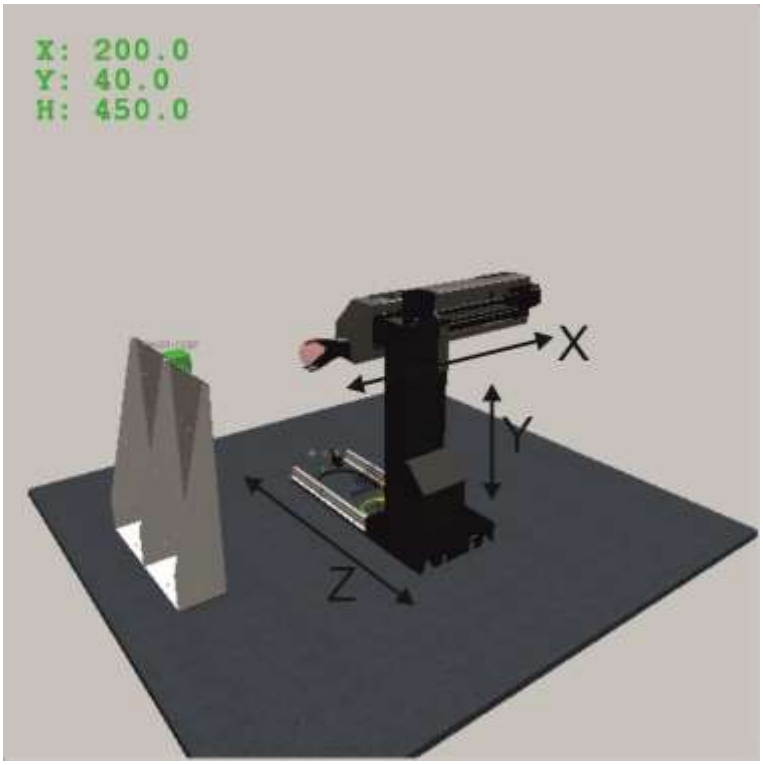


Рисунок 3.1 – Координаты перемещений звеньев робота

Декартова система координат показана на рисунке 3.2. В этой системе координат определяется положение центра схвата робота–штабелера. Декартовы координаты имеют только положительные значения по осям X и Z. По оси Y координаты имеют положительные и отрицательные значения. Положение центра схвата в декартовой системе отображается координатами в верхнем левом углу графического окна.

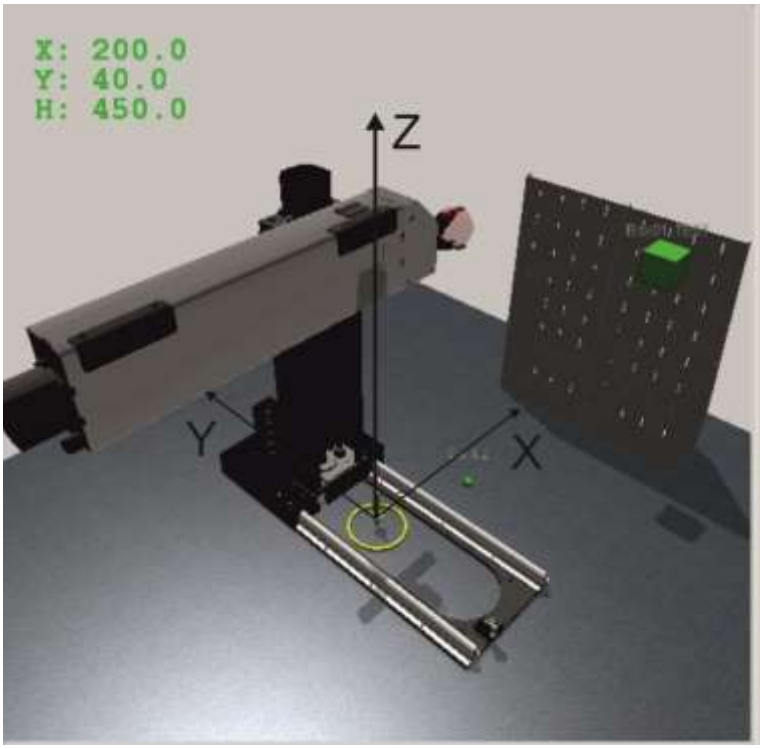


Рисунок 3.2 – Декартова система координат робота – штабелера

Более подробно с командами, используемыми в стенде можно ознакомиться в пособии по программированию.

Ход работы:

1) Включить блок управления стендом.

2) Запустить программу управления. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись: «Найден».

3) Задавая различные величины перемещений звеньев робота определить зону работы робота в декартовых координатах и крайние точки его перемещения. Записать их в значениях (X, Y, Z) и для каждой точки написать соответствие в собственных перемещениях звеньев. Оформить в виде таблицы.

4) Установить кронштейны в произвольные ячейки склада. Зажать в схвате робота заготовку. Переместить поочередно схват робота в ячейки. Записать декартовы координаты ячеек. В графической части создать объекты, имитирующие зону расположения установленных ячеек. Записать полученные координаты объектов.

5) Определить, совпадают ли координаты перемещений робота и расположения ячеек.

6) Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №4

Синтез программы сортировки объектов

Цель работы

Управление роботом–штабелером при создании управляющей программы сортировки объектов.

Теоретическая часть:

Для сортировки объектов по стенду представлена программа:

;По программе робот берет заготовку диаметром 35 миллиметров из 9 ячейки и ставит заготовку в 16 ячейку. Заготовки на длинном кронштейне.

```
RHOMEX
; Выход в нулевое положение по координате X
RHOMEY
; Выход в нулевое положение по координате Y
RHOMEZ
; Выход в нулевое положение по координате Z
LOCKEROFF
; Разжим схвата
G01 Z9. F150
; Позиционирование по координате Z для захвата заготовки из 9 ячейки
G01 Y18.
; Позиционирование по координате Y для захвата заготовки из 9 ячейки
G01 X196.
; Позиционирование по координате X для захвата заготовки из 9 ячейки
LOCKERON P2600
; Захват заготовки из 9 ячейки
G01 Y5.
;  Движение вверх по координате Y для безопасного выхода из позиции захвата заготовки
G01 Z275.
;  Позиционирование по координате Z для установки заготовки в 16 ячейку
G01 Y70.
;  Позиционирование по координате Y для установки заготовки в 16 ячейку
LOCKEROFF P2000
; Разжим схвата на 2000 импульсов
G01 X150. F150
; Безопасный отход по координате X из 16 ячейки
RHOMEX
;  Выход в нулевое положение по координате X
RHOMEY
```

; Выход в нулевое положение по координате Y
RHOMEZ
; Выход в нулевое положение по координате Z

Ход работы

1) Включить блок управления стендом;

2) Запустить программу управления стендом. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись: «Найден». Установить кронштейны в ячейки 9 и 16.

3) Разобрать представленную выше управляющую программу по сортировке объектов.

4) Создать текстовый документ формата «имя_программы.txt». Записать в документ строки представленной управляющей программы, которые содержат исполнительные команды. Сохранить текстовый документ.

5) Выйти из режима «имитатор», переместить робот–штабелер в ячейки 9 и 16, при этом проверить, чтобы схват робота располагался точно в ячейках. Сравнить полученные координаты с координатами в управляющей программе. При необходимости ввести коррективы в программу.

6) В командную строку поочередно в порядке расположения в тексте вставлять строки с командами управляющей программы, выполняя каждую команду отдельно. Визуально следить за правильностью выполнения команды. Не допускать аварийных ситуаций.

7) Импортировать отработанную управляющую программу в программу управления стендом.

8) Запустить управляющую программу, контролируя визуально перемещения робота. Не допускать аварийных ситуаций.

9) После успешного завершения программы составить аналогичную для перемещения заготовки по трем ячейкам.

10) Составить отчет о выполненной работе.

Лабораторная работа №5

Синтез программы оптимизированного складирования объектов

Цель работы: произвести оптимизацию управляющей программы из лабораторной работы №4.

Теоретическая часть:

Оптимизация процесса складирования объектов подразумевает сокращение времени на выполнение автоматизированной системой своей управляющей программы. Одним из способов, позволяющих оптимизировать производственный процесс, является моделирование (имитация) выполнения программы. Данный вид оптимизации можно применить, используя перед выполнением управляющей программы среду «имитатор» для отработки управляющей программы. После оптимизации в «имитаторе» отработанную программу можно запустить для исполнения автоматизированной системой.

Для оптимизации также имеет место замена поочередного перемещения по нескольким осям одним совместным перемещением осей (интерполяция). Например, использовать одну команду G01 X46. Y120. F100 вместо двух последовательных команд G01 X46. F100 и G01 Y120. F100.

Еще одним примером оптимизации является использование меток для перехода, если нужно сделать программу повторяющейся, то есть запустить цикл.

Пример программы:

```
RHOME X
RHOME Y
RHOMR Z
1000:
G01 X100. Y100. F100
G01 Z150. F150
G01 X50. Y150. F100
G01 Z250. F150
RHOME X
RHOME Y
RHOMR Z
SHIFTTO P1000
```

В данной программе использована метка перехода 1000 в четвертой строке и обращение к ней в конце программы командой SHIFTTO P1000 в конце программы. То есть программа первый раз пройдет все строки и выполнит переход к четвертой

строке и в дальнейшем не будет выполнять первые три строчки. После числового обозначения метки ставится знак «:».

Ход работы:

1) Включить блок управления стендом.
2) Запустить программу управления штабелером. В открывшемся окне проверить, что строка «состояние» горит зеленым цветом и есть надпись «Найден».
3) В режиме «имитатор» запустить управляющую программу, полученную в лабораторной работе №4. Произвести оптимизацию данной программы.
4) Выполнить зацикливание данной программы.
5) Запустить получившуюся программу складирования объектов. При этом следует подавать заготовки в первоначальную ячейку.
6) Составить отчет о выполненной работе.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-
методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

Направление -

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Технической механики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Волков Е.Б.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ 6
1.1. Состав и характеристики мехатронных модулей и робототехнических систем 7
1.2. Устройство мехатронных модулей движения 26
1.3. Информационная система и датчики мехатронных и робототехнических систем 41
1.4. Системы управления и приводы мехатронных и робототехнических устройств 58
1.5. Структура и состав роботизированных технологических комплексов 70
Вопросы для самопроверки 79

Глава 2. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ МОНТАЖНЫХ РАБОТ ОБОРУДОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 80
2.1. Технологическая подготовка роботизированного производства и проведение монтажных работ 80
2.2. Монтаж механических систем роботов и станков 86
2.3. Монтаж пневмогидрооборудования 95
2.4. Монтаж устройств управления и электрооборудования роботов и мехатронных систем 108
2.5. Монтаж роботизированных технологических комплексов 116
Вопросы для самопроверки 120

Глава 3. НАЛАДКА И НАСТРОЙКА РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ 121
3.1. Наладка механических устройств ПР и мехатронных систем 122
3.2. Наладка пневмогидрооборудования ПР 130
3.3. Наладка электрооборудования и устройств управления ... 135

3.4. Настройка параметров регуляторов в электроприводах роботов и мехатронных систем 144
3.4.1. Настройка по компьютерной и математической моделям 144
3.4.2. Практическая настройка электропривода CSD-DH мехатронной системы металлорежущего станка 150
3.4.3. Настройка регулятора положения при работе от ЧПУ ... 186
3.5. Наладка мехатронной системы металлорежущих станков 194
3.6. Наладка мехатронной системы лазерного технологического комплекса 203
Вопросы для самопроверки 215

Глава 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ И ДИАГНОСТИКИ РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ 218
4.1. Виды и общие требования к испытаниям промышленных и мобильных роботов 218
4.2. Определение технических характеристик ПР при испытаниях 226
4.3. Особенности испытаний мехатронных систем 236
4.4. Методы и средства диагностирования роботов и мехатронных систем 240
4.5. Испытания мехатронной системы металлорежущего станка 253
Вопросы для самопроверки 267

Глава 5. ЭКСПЛУАТАЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ 269
5.1. Эксплуатация роботов в производственных системах ... 269
5.2. Эксплуатация роботов в транспортно-накопительных системах автоматизированных производств 278
5.3. Техническое обслуживание мехатронных и робототехнических систем 286
5.4. Эксплуатация мехатронных и робототехнических систем 290
Вопросы для самопроверки 300

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 301

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 302

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности производственных процессов достигается использованием комплексной автоматизации на базе высокопроизводительного оборудования, станков с числовым программным управлением, микропроцессорной техники, промышленных роботов и гибких автоматизированных производств, построенных на базе мехатронных модулей. Эффективность работы рассматриваемых технических систем определяется их техническими характеристиками, конструкцией и надежностью работы, а также в значительной мере зависит от качества выполненных работ по монтажу, наладке и своевременного технического обслуживания в процессе эксплуатации. Для обслуживания промышленных роботов и мехатронных систем технологического оборудования, оснащаемого ими, необходимы знания их конструкций, методов и правил монтажа, наладки, испытаний и эксплуатации. Значительное место в современных системах настройки приводов и подготовки управляющих программ занимает компьютерная симуляция технических систем с использованием моделей. В современные мехатронные и робототехнические системы встраиваются высокоразвитые информационные системы и системы диагностики.

Учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Испытания, наладка и эксплуатация мехатронных и робототехнических систем» для студентов, обучающихся по специальности «Мехатроника и робототехника». Материал базируется на отечественном опыте монтажа и наладки систем автоматизации, роботов и станков с ЧПУ, а также на личном опыте авторов по внедрению в производство промышленных роботов и роботизированных комплексов.

В учебном пособии приведены общие положения по устройству, наладке и испытаниям мехатронных модулей и промышленных роботов с электро-, пневмо- и гидроприводом.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Мехатроника – область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями. Основной целью мехатроники, как научно-технической дисциплины, является разработка принципиально новых функциональных узлов, блоков и модулей, реализующих двигательные функции, которые используются как основа для подвижных интеллектуальных машин и систем. В связи с этим, предметом мехатроники становятся технологические процессы проектирования и выпуска систем и машин, способных реализовать требуемый двигательный функционал. Методология, используемая в рамках мехатроники, опирается на взаимную интеграцию технологий, структурных элементов, информационных и энергетических процессов из целого перечня естественно-научных и инженерных направлений (информатики, точной механики, микроэлектроники, автоматического управления и т. п.). Обычно мехатронная система является объединением собственно электромеханических компонентов с силовой электроникой, которые управляются с помощью различных микроконтроллеров, персональных компьютеров или других вычислительных устройств. При этом система в истинно мехатронном подходе, несмотря на использование стандартных компонентов, строится как можно более монолитно, конструкторы стараются объединить все части системы воедино без использования лишних интерфейсов между модулями. В частности, применяя встроенные непосредственно в микроконтроллеры аналого-цифровые преобразователи, интеллектуальные силовые преобразователи и т. п. Это уменьшает массу и размеры системы, повышает её надёжность и дает некоторые другие преимущества. Любая система, управляющая группой приводов, может считаться мехатронной. Наиболее яркими представителями мехатронных систем являются роботы и станки с ЧПУ.

Обобщенная схема мехатронной системы представлена на рис. 1.1.

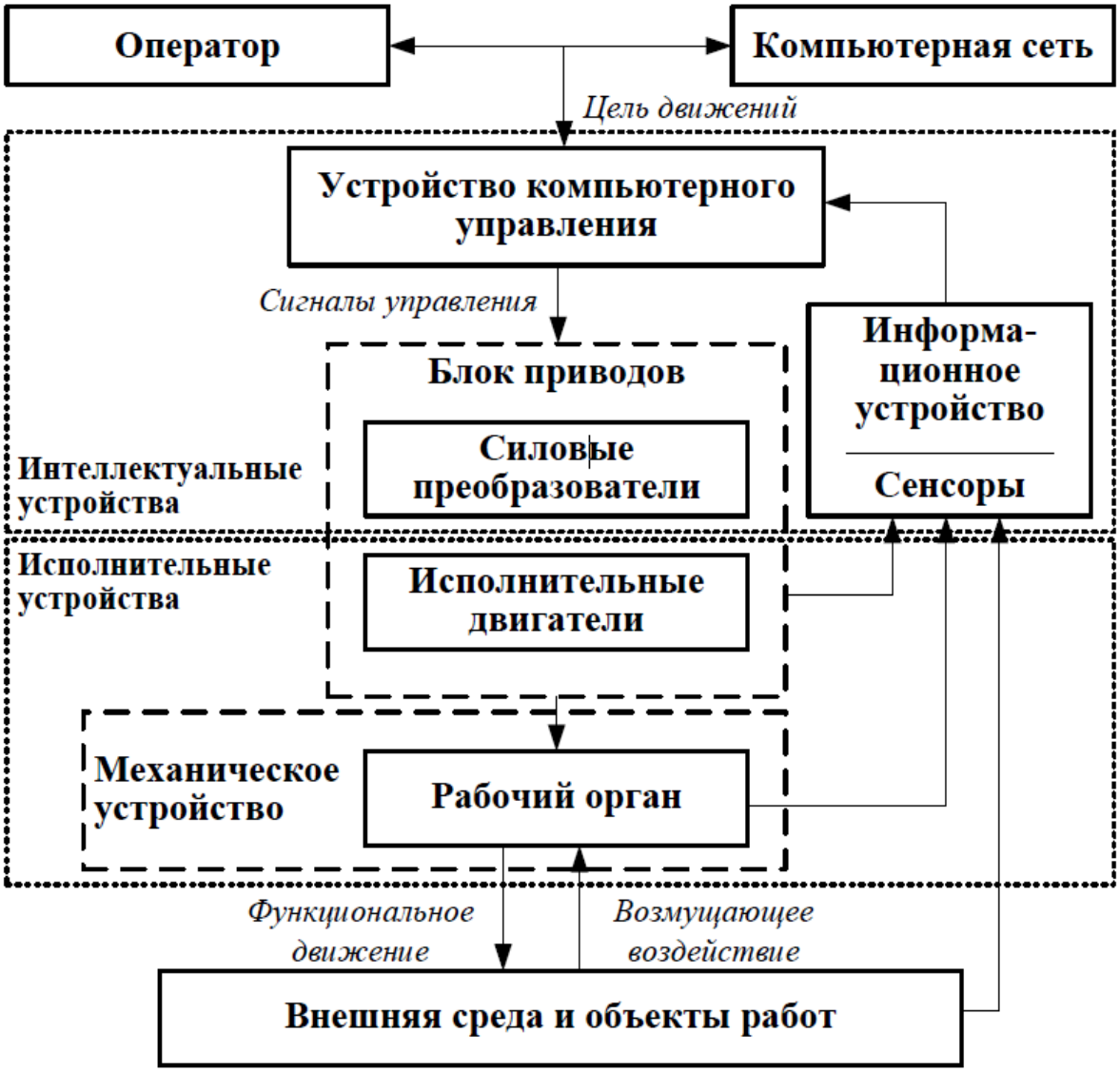


Рис. 1.1. Обобщенная схема мехатронной системы

1.1. Состав и характеристики мехатронных модулей и робототехнических систем

Основой любой мехатронной системы являются мехатронные модули. Мехатронный модуль (ММ) – унифицированный мехатронный объект, имеющий автономную документацию и предназначенный, как правило, для реализации движений по одной координате. Примерами мехатронных модулей служат части станков - шпиндельная бабка, поворотный стол. В качестве модулей могут выступать двигатели, редукторы и т.п. Более сложные модули (автономные приводы) - мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель, мотор-барабан и поворотный стол.

По физической природе составляющих элементов ММ подразделяются на электроприводные, гидроприводные, пневмоприводные и прочие. В состав электроприводных ММ входят электродвигатель и (как правило) преобразователь движения. Они распространены наиболее широко и обычно являются базой для сравнения вариантов на стадии проектирования. Гидроприводные ММ содержат гидродвигатели линейного или вращательного движения. По сравнению с электроприводными они обладают значительно меньшими размерами и массой, в частности, потому, что не требуют преобразователя движения; малой инерционностью; простотой регулирования и его широким диапазоном. К недостаткам их следует отнести сравнительно высокую стоимость; необходимость в насосной установке; чувствительность к качеству рабочей жидкости. Пневмоприводные ММ по принципу действия подобны гидроприводным, а различия между ними определяются особенностями рабочей среды – сжатого воздуха. ММ с пневмоприводом конструктивно проще гидроприводных, дешевле, менее требовательны в эксплуатации, способны реализовать более высокие скорости движения. В то же время их нагрузочная способность при равных размерах на два порядка меньше, существенно ниже КПД, они не в состоянии обеспечивать точные перемещения. В число прочих ММ входят модули как с комбинированным приводом, например, электрогидравлическим, так и с устройствами для преобразования энергии, не относящимися к электро-, гидро и пневмоприводу.

Классификация ММ по конструктивным признакам представлена на рис. 1.2. В полной мере фундаментальному определению мехатроники соответствуют только интеллектуальные мехатронные модули, которые содержат приводную часть (двигатель), информационную часть (датчики) и аппаратно-встроенную компьютерную часть.

Анализ развития мирового рынка продукции машиностроения свидетельствует о появлении нового класса технологического и измерительного оборудования, транспортных средств на базе мехатронных модулей движения (ММД). Причем объемы производства ММД в развитых странах мира с каждым годом увеличиваются. Миллионы ММД находят применение в авиации, космосе, приборостроении, электротехнике, станкостроении, робототехнике, автомобилестроении и других важнейших отраслях промышленности.

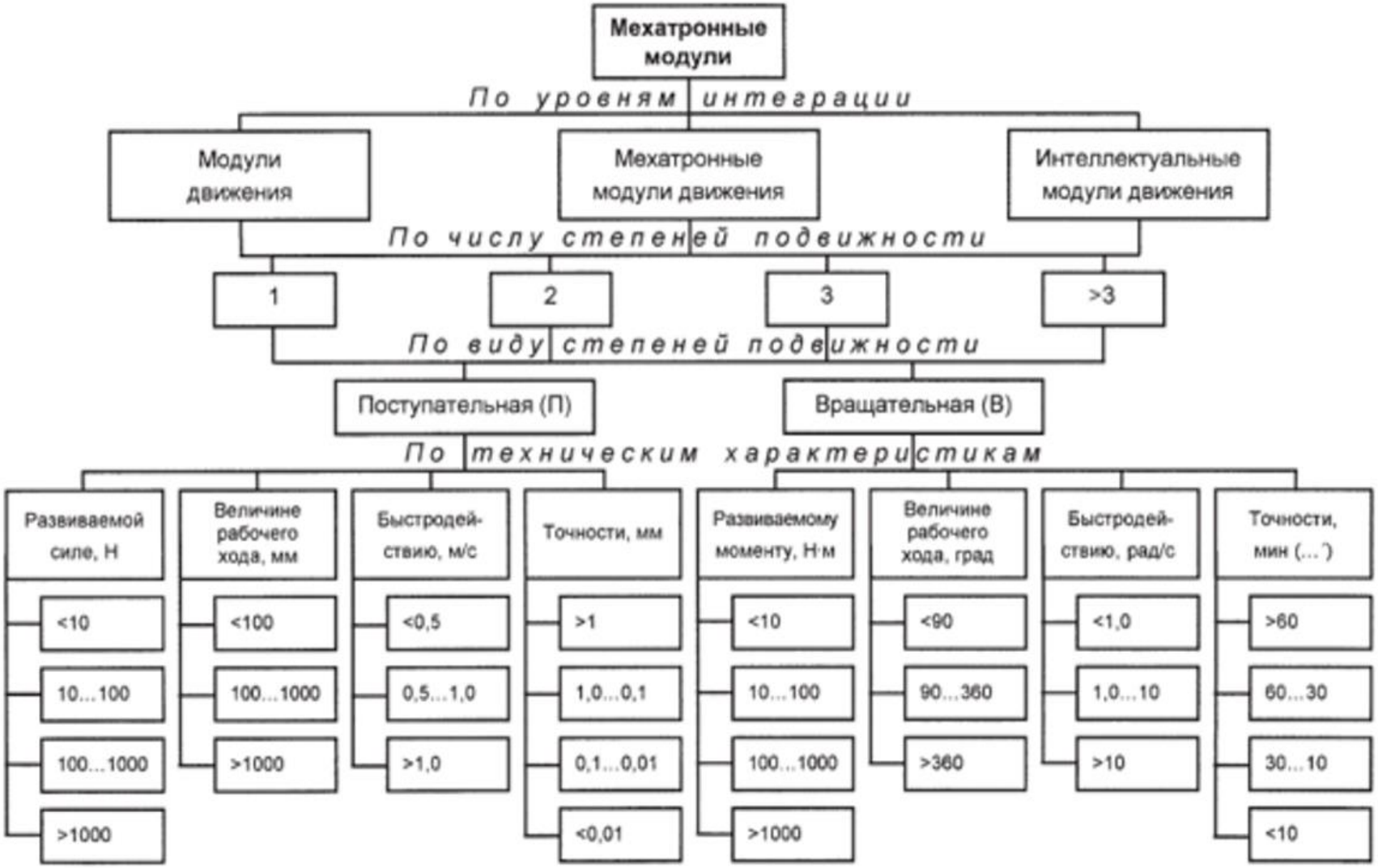


Рис.1.2. Классификация мехатронных модулей

На базе ММД уже сегодня создаются экологически чистые наземные, подземные и водные транспортные средства, а также технологии высокоскоростного резания легких сплавов для авиационных металлоконструкций, высокопроизводительного, "сухого" шлифования прецизионных деталей для автомобильной и подшипниковой промышленности, субмикронных измерений деталей и прецизионной высокопроизводительной обработки штампов и пресс-форм графитовых электродов и пластмассовых изделий. При этом главным признаком, отличающим ММД от общепромышленного электропривода, является введение электродвигателя в узел машины: электрошпиндель, мотор-шпиндель, электромеханизм линейного перемещения инструментов головки, поворотный глобусный или координатный стол, мотор-колесо и т.п. Основную номенклатуру ММД, на основе которых в настоящее время создаются производственные машины и транспортные средства нового поколения, можно подразделить на четыре группы.

1. Высокооборотные модули с максимальной частотой вращения от 9 000 до 250 000 мин-1 и мощностью от 0,1 до 30 кВт для металлорежущих станков, деревообрабатывающих машин, станков для сверления печатных плат, компрессоров и т.д.

В этих модулях используются воздушные и электромагнитные подшипники. Основные преимущества выпускаемых электрошпинделей на магнитных подшипниках:

- отсутствие механических контактов и, как следствие, износа; - возможность использования более высоких (по сравнению с традиционными конструкциями) скоростей; - небольшая вибрация, отсутствие трения и снижение тепловых потерь;

- возможность изменения жесткости и демпфирующих характеристик системы;

- возможность работы в вакууме и вредных средах; - экологическая чистота.

2. Низкооборотные модули с максимальной частотой вращения от 4 до 300 мин-1, моментом от 10 до 2500 Н·м и точностью позиционирования до 3" для поворотных столов станков, измерительных машин, оборудования для электронного машиностроения, узлов роботов и многоцелевых инструментальных головок. Модули подобного типа могут с успехом применяться в электровелосипедах, инвалидных колясках, электромотоциклах, скутерах и других легких транспортных средствах. Технические характеристики некоторых транспортных ММД, например, электровелосипедов и инвалидных колясок существенно превышают характеристики лучших мировых производителей. Так, масса инвалидной коляски меньше на 30 %, а пробег без подзарядки батареи больше на 50 %, чем у импортных аналогов.

3. Модули линейного движения с усилием от 10 до 5000 Н и скоростью до 32 м/с для приводов металлорежущих станков, промышленных роботов и измерительных машин, а также для запирающих устройств газо- и нефтепроводов.

4. Цифровые электроприводы с бесколлекторными синхронным и асинхронным двигателями мощностью до 10 кВт с моментом от 1 до 40 Н·м и высоким отношением момента к массе для приводов подачи высокопроизводительных станков и роботов, текстильных и деревообрабатывающих машин, приводов вентиляторов, насосов и т.д. Блок управления такими приводами создается на базе силовых интеллектуальных схем и встраивается в корпус или клеммную коробку электродвигателя.

В связи с расширением рынка высокопроизводительных машин и оборудования традиционной и нетрадиционной компоновок и освоением производства указанных ММД практически всеми ведущими электротехническими фирмами мира осуществляется постепенный перевод специальных ММД в модули движения общепромышленного применения. Так, встраиваемые электродвигатели для поворотных столов металлорежущих станков и мотор-колес для транспортных средств производятся по одной и той же технологии низкооборотных ММД на

основе современных магнитных систем. Рынок таких ММД стремительно развивается: спрос на эту продукцию в 1997 г. достигнет 100-120 тыс. штук.

Аналогичные примеры можно привести и по другим ММД, в том числе по линейным двигателям для станкостроения и робототехники, измерительных машин и транспортных средств.

Применение ММД в обрабатывающих центрах традиционной компоновки позволило повысить производительность фрезерования почти в 3 раза. Относительно высокая стоимость таких машин не останавливает ведущие авиационные концерны в мире от их закупок уже в настоящее время.

Еще большие возможности применения ММД имеют машины нетрадиционной компоновки: обрабатывающие и измерительные машины на основе так называемой платформы Стюарта и мехатронных поворотных столов. Сравнение экономических показателей такого блочно -модульного станка с аналогичными показателями обрабатывающего центра традиционного типа дает следующие результаты: - сокращение в 2-2,5 раза занимаемой производственной площади; -сокращение в 2-3 раза числа базовых деталей; - уменьшение в 1,5-2 раза металлоемкости (особенно при нетрадиционной компоновке).

Анализ технико-экономических показателей ММД и созданных на их базе машин нового поколения с учетом рынка продукции машиностроения позволяет выделить основные тенденции в области технического совершенствования компонентов общепромышленного применения:

- интенсивное развитие мехатронных модулей вращательного движения и линейного перемещения на базе электродвигателей переменного тока, встроенных в приводные узлы машин и оборудования, создаваемых специализированными фирмами и поставляемых машиностроительным предприятиям – лидерам машиностроительного инновационного рынка;

- развитие международной научно-технической и производственной кооперации в области комплектных систем управления машинами новых поколений на базе ММД для создания новых высококвалифицированных рабочих мест.

На основании прогноза и анализа развития станкостроения можно выделить следующие основные направления:

- качественное изменение конструкций металлорежущих станков (конструкции станков с параллельной кинематикой, гексаподные конструкции, конструкции типа «Box in a box» и др.);

- существенное повышение производительности станков, реализация технологий скоростной обработки; - широкая унификация станков, реализация принципов агрегатно-модульного конструирования. Для решения перечисленных задач наряду с совершенствованием технологии обработки, появлением новых режущих материалов, инструментов создаются принципиально новые мехатронные станочные узлы привода и автоматизации на базе интеграции средств прецизионной механики, электроники, электротехники. Конструктивное объединение исполнительного и приводного элементов механизмов линейных и вращательных перемещений станков, реализующих концепцию привода прямого действия «Direct Drive», позволяет исключить промежуточные механические преобразователи и передачи, повысить точность, быстродействие, снизить потери.

Наличие в этих конструкциях встроенных систем автоматического управления и датчиков контроля технологического процесса делает мехатронные узлы интеллектуальными автономными модулями, на базе которых могут создаваться конструкции перспективных металлообрабатывающих станков. Использование мехатронных модулей движения позволяет обеспечить высокий уровень автоматизации технологических процессов. На рис.1.3 приведен перечень мехатронных модулей движения и агрегатов на их основе, используемых в современных металлорежущих станках.

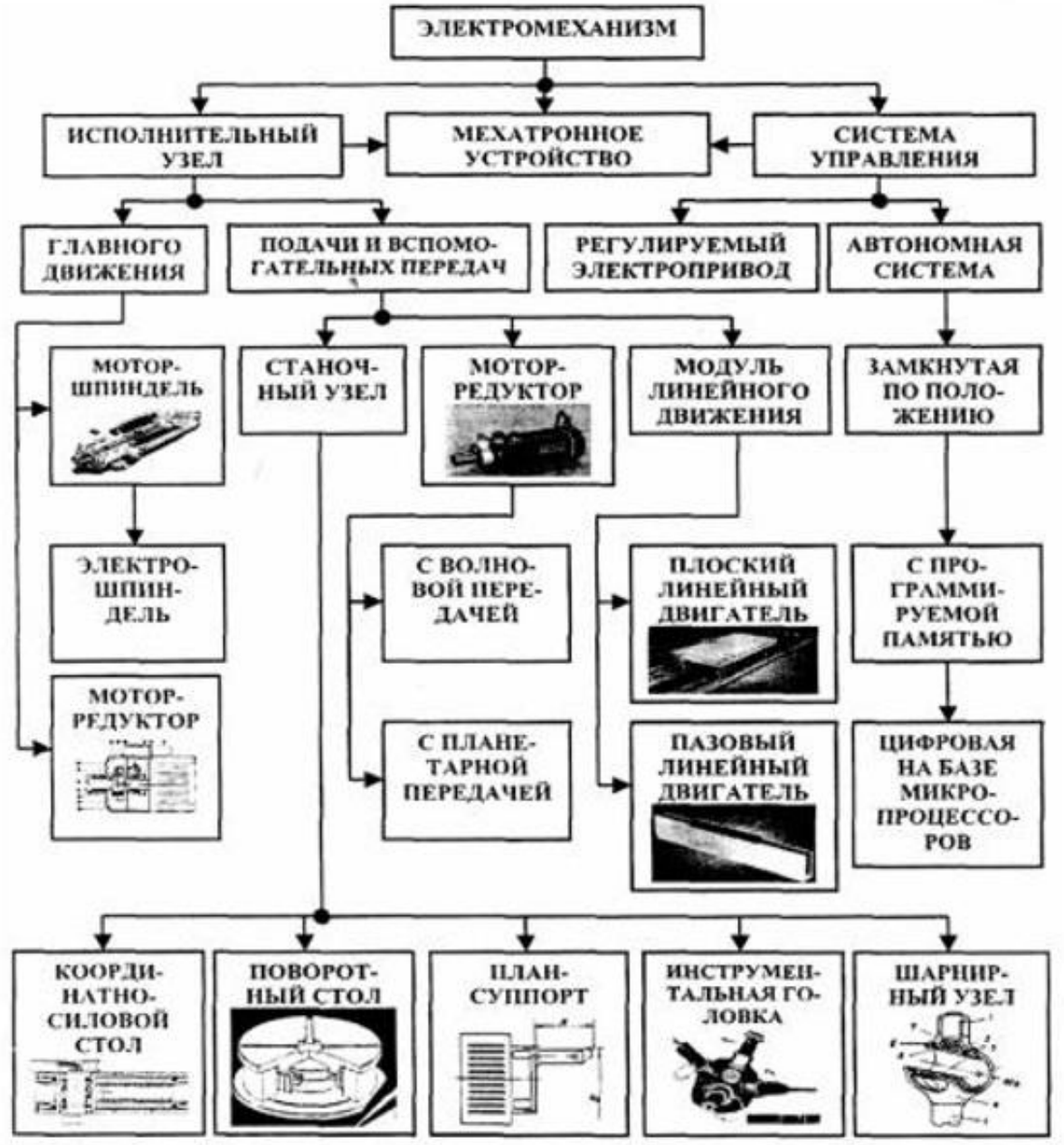


Рис. 1.3. Перечень мехатронных модулей движения и агрегатов на их основе, используемых в современных металлорежущих станках.

Робот как мехатронная система состоит из двух основных частей – исполнительных систем и устройства управления ими с сенсорной системой. В свою очередь исполнительные системы включают одну или несколько манипуляционных систем (обычно в виде механических манипуляторов) и системы передвижения, имеющейся только у подвижных (мобильных) роботов. Сегодня основным таким типом, по-прежнему, являются промышленные роботы (ПР), которые предназначены

для применения в промышленности и составляют до 80 % всего парка роботов в мире. В свою очередь промышленные роботы делятся на ряд типов более узкого назначения (например, робот окрасочный, сварочный, транспортный, для обслуживания станков, прессов, литейных машин и т. д.).

По ***типу выполняемых операций*** все промышленные роботы делятся на роботы технологические, которые выполняют основные технологические операции, и роботы вспомогательные, выполняющие вспомогательные технологические операции по обслуживанию технологического оборудования. Технологические роботы относятся к основному технологическому оборудованию, а вспомогательные можно отнести к средствам автоматизации. По широте перечня операций, для выполнения которых предназначен робот, различают роботы специальные, специализированные и универсальные. Специальные роботы предназначены для выполнения одной конкретной технологической операции (например, конкретную сборочную операцию, обслуживание определенной марки технологического оборудования).

Специализированные роботы могут выполнять различные однотипные операции (сборочный робот со сменными рабочими инструментами, робот для обслуживания определенного типа технологического оборудования и т.п.). Универсальные роботы предназначены для выполнения любых основных и вспомогательных операций в пределах их технических возможностей. Увеличение степени универсальности робота соответственно расширяет область его возможных применений, но одновременно неизбежно сопровождается недоиспользованием его возможностей на каждой конкретной операции. Наиболее оптимальными в этом отношении являются специальные роботы, но с другой стороны это предельно сужает их рынок, а, следовательно, и объем производства.

К ***конструктивным показателям*** роботов относят: тип приводов робота, его грузоподъемность, количество манипуляторов, тип и параметры их рабочей зоны, подвижность и способ размещения, исполнение по назначению. ***Приводы,*** которые используются в манипуляторах и системах передвижения роботов, делятся на электрические, гидравлические и пневматические. Часто их применяют в комбинации; например, в звеньях манипулятора большой грузоподъемности исполь-

зуют гидравлический привод, а в его захватном устройстве – более простой и маломощный пневматический привод. ***Грузоподъемность робота*** – это грузоподъемность его манипуляторов, а для транспортного робота еще и его шасси. Грузоподъемность манипулятора определяется массой перемещаемых им объектов и в зависимости от назначения робота может составлять от единиц грамм (сверхлегкие роботы, например, применяемые в микроэлектронике) до нескольких тысяч килограмм (сверхтяжелые, например, транспортные и космические роботы). ***Количество манипуляторов*** у роботов в большинстве случаев ограничено одним (одноманипуляторные или однорукие роботы). Однако в зависимости от назначения существуют конструкции роботов с двумя, тремя и четырьмя манипуляторами (соответственно двух-, трех- и четырехманипуляторные). Обычно манипуляторы робота выполняют одинаковыми, но имеются конструкции роботов и с разными манипуляторами. Например, существуют промышленные роботы для обслуживания прессов холодной штамповки с двумя разными манипуляторами: один основной для взятия заготовки и установки ее в пресс и другой упрощенной конструкции для выполнения более простой операции сталкивания готовой детали в бункер.

Тип и параметры рабочей зоны манипуляторов робота определяют область окружающего его пространства, в пределах которой робот может осуществлять манипуляции не передвигаясь, т.е. при неподвижном основании. Рабочая зона манипулятора – это пространство, в котором может находиться его рабочий орган при всех возможных положениях звеньев манипулятора. Форма рабочей зоны определяется системой координат, в которой осуществляется движение рабочего органа манипулятора, и числом степеней подвижности манипулятора.

Подвижность робота определяется наличием или отсутствием у него системы передвижения. В первом случае роботы называют мобильными, а во втором – стационарными. В соответствии с назначением роботов в них применяют системы передвижения практически всех известных на сегодня типов: от наземных колесных и гусеничных до предназначенных для передвижений в воде, глубинах земли, в воздухе и космосе. Специфическим для робототехники способом передвижения является шагание. ***По способу размещения*** стационарные и мобильные роботы бывают напольными, подвесными (мобильные роботы этого типа обычно перемещаются по поднятому рельсовому

пути), встраиваемыми в другое оборудование (например, в обслуживаемый станок) и т. д.

Исполнение робота по назначению зависит от внешних условий, в которых он должен функционировать. Различают исполнение нормальное, пылезащитное, теплозащитное, влагозащитное, взрывобезопасное и т.д.

По способу управления различают роботы с программным, адаптивным и интеллектуальным управлением. Управление движением по отдельным степеням подвижности может быть непрерывным (контурным) и дискретным позиционным. В последнем случае управление движением осуществляют, задавая конечную последовательность точек (позиций) и последующее перемещение по ним шагами от точки к точке без контроля траекторий между этими точками. Простейшим вариантом дискретного управления является цикловое, при котором количество точек позиционирования по каждой степени подвижности минимально, т.е. чаще всего ограничено двумя начальной и конечной. Быстродействие и точность роботов складываются из их значений для манипуляторов и систем передвижения.

Быстродействие манипулятора определяется скоростью перемещения его рабочего органа. Быстродействие манипуляторов у роботов общего применения можно разбить на следующие три диапазона:

малое – при линейных скоростях до 0,5 м/с;

среднее – при линейных скоростях от 0,5 до 1-3 м/с;

высокое – при больших скоростях.

Наибольшая скорость манипуляторов современных роботов достигает 10м/с и выше. Для значительной части областей применения роботов этот параметр очень важен, так как предопределяет их производительность. Основная трудность при повышении быстродействия связана с известным противоречием между быстродействием и другим не менее важным параметром – точностью. ***Точность манипулятора и системы передвижения робота*** характеризуется результирующей погрешностью позиционирования (при дискретном движении) или отработки заданной траектории (при непрерывном движении). Чаще всего точность роботов характеризуют абсолютной погрешностью.

Точность роботов общего применения можно разбить на следующие три диапазона:

малая – при линейной погрешности от 1мм и более;

средняя – при погрешности от 0,1 до 1 мм;

высокая – при меньшей линейной погрешности.

Наименьшую точность имеют роботы, предназначенные для выполнения наиболее грубых, например, транспортных движений, а наибольшую микронную – роботы, используемые в электронной промышленности. По сравнению с человеческой рукой существенным недостатком современных роботов пока является снижение точности с увеличением хода манипуляторов, в то время как у человека эти параметры в значительной степени развязаны благодаря разделению движений на грубые (быстрые) и точные.

Другими параметрами, характеризующими технический уровень роботов, являются надежность, число одновременно работающих степеней подвижности, время программирования, а также основанные на перечисленных выше параметрах различные относительные и комбинированные показатели. К ним относятся, в частности, удельная грузоподъемность, отнесенная к массе робота, выходная мощность манипулятора (произведение грузоподъемности на скорость перемещения), отнесенная к мощности его приводов, относительные оценки габаритных параметров, манипуляционных кинематических и динамических характеристик, возможностей программирования, экономической эффективности и т.п. Однако эти относительные показатели технического уровня уже не являются паспортными параметрами, используемыми для характеристики конкретных роботов, а служат критериями качества, предназначенными для их оптимизации при проектировании и сравнительной оценке.

Приведем несколько примеров роботов и обрабатывающего оборудования, построенного по мехатронному принципу.

На рис.1.4 представлен вид копирующего манипулятора Маскот фирмы «Телеробот» (Италия), предназначенного для работы с опасными химическими или биологическими препаратами.



Рис. 1.4. Копирующий манипулятор Маскот фирмы «Телеробот» (Италия).

Серия роботов FANUC M-710iC (Япония) предназначена для работы с грузами среднего веса от 20 до 70 кг (Рис. 1.5).

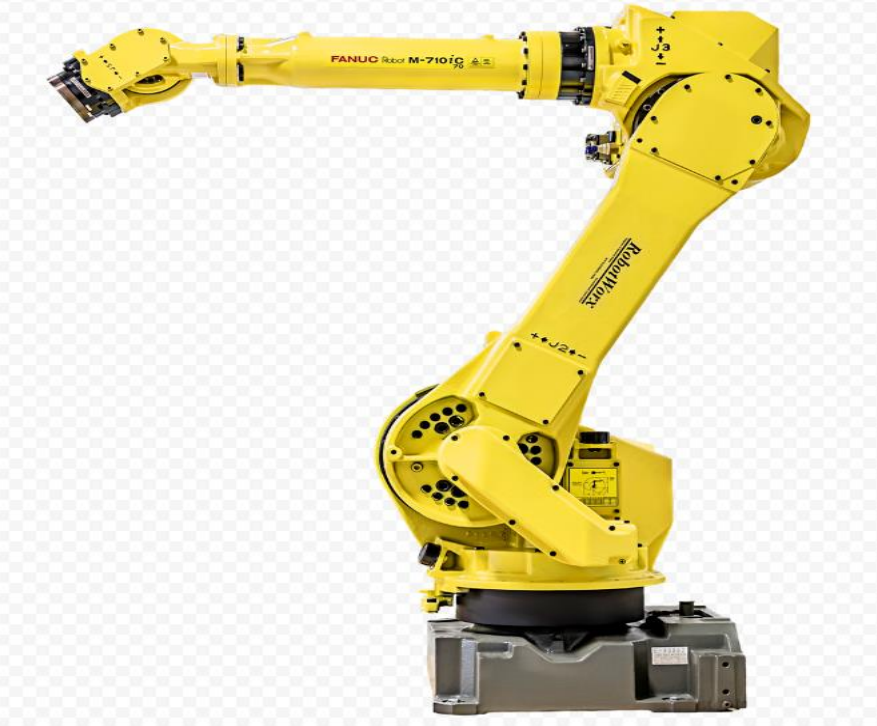


Рис. 1.5. Вид робота FANUC M-710iC

Компактное запястье, жесткая конструкция руки, узкая база и зона досягаемости до 3,1 м делают их незаменимыми при выполнении множества задач, а благодаря высоким угловым скоростям осей этих роботы являются очень быстрыми. Они также отличаются высокой грузоподъемностью и прекрасными инерционными показателями, благодаря чему любая модель может применяться для выполнения широкого спектра операций.

Робот KUKA KR QUANTEC PA – один из лучших роботов-палетоукладчиков на рынке. KUKA KR QUANTEC PA Arctic – его модификация, робот функционирующий при экстремально низких температурах. (Рис.1.6). Он создан для работы преимущественно в морозильных камерах, при температурах до -30 °С. Электронные и механические части аппарата не нуждаются в защите от мороза, снега, инея, а также не выделяют излишнего тепла. Радиус действия манипулятора модификации Арктик, как и у стандартного KUKA KR QUANTEC PA, составляет 3195 мм, а полезная нагрузка – до 240 кг. Аппарат идеален для применения в пищевой промышленности и в условиях крайнего севера. Кроме составления штабелей из паллетов, робот может выполнять и другие манипуляции, ведь точность его движений, а точнее говоря – стабильность повторяемости позиционирования, составляет 0,06 мм.



Рис. 1.6. Вид робота KUKA KR QUANTEC PA Arctic

Идеальным вариантом для промышленных предприятий, специализирующихся на выпуске небольших электронных устройств, является модель FANUC M-1iA, представленная на рис.1.7.



Рис. 1.7. Вид робота FANUC M-1iA

Она обладает гибким модулем, хорошо имитирующим человеческую руку. Для нее характерна высокая точность и повышенная производительность. При небольшой грузоподъемности она способна обеспечить различные технологические операции. Исполнительный орган имеет форму шарнирного параллелограмма, обеспечивающую высокоскоростную сборку деталей.

Робот BigDog – четырехногий робот с адаптивным управлением, созданный в 2005 году фирмой Boston Dynamics (Рис.1.8).



Рис. 1.8. Робот Big Dog

Робот сможет переносить снаряжение и помогать солдатам на территории, где не способен передвигаться обычный транспорт. Вместо колес и гусениц BigDog использует четыре ноги. В ногах находится большое количество разнообразных сенсоров. Также у BigDog имеется лазерный гироскоп и система бинокулярного зрения.

Длина робота Big Dog – 0,91 м, высота 0,76 м, вес 110 кг. В настоящее время он способен передвигаться по труднопроходимой местности со скоростью 6,4 км в час, перевозить 154 кг груза и подниматься на 35 градусную наклонную плоскость. Его передвижение контролирует компьютерная система, которая получает данные от различных сенсоров.

Универсальный фрезерный станок ФС-300 (Рис.1.9), изготавливаемый ВСЗ «Техника» г. Владимир, предназначен для обработки заготовок из черных и цветных металлов или их сплавов операциями фрезерования, сверления, развертывания, зенкерования под различными углами к плоскости стола.



Рис. 1.9. Вид станка ФС-300

На станке реализованы независимые привода подач по каждой координате. Фрезерный станок ФС-300 имеет возможность перемещения рабочих органов на роликовых направляющих по каждой координате с помощью передач винт-гайка или шариковинтовых пар. Зажим инструмента в шпинделях станка осуществляется пакетом тарельчатых пружин, разжим – гидравлический. Станок оснащается устройством цифровой индикации или УЧПУ.

Обрабатывающий центр OKUMA PM-600 (Япония), приведенный на рис.1.10, имеет параллельную кинематику исполнительного механизма на основе гексапода. Гексапод выполнен на базе шести механизмов поступательного перемещения, представляющих собой, например, шариковые винтовые передачи ШВП. Для изменения их длины служат регулируемые электроприводы. Контроль за величиной перемещения осуществляется датчиками положения. Одним концом штанга шарнирно соединена с основанием, а другим (также шарнирно) - с подвижной платформой, на которой установлен рабочий орган, например, мотор-шпиндель. Управляя вылетом штанг по программе, можно управлять положением шпинделя по шести координатам: *X*, *Y*, *Z* и тремя углами поворота.



Рис. 1.10. Обрабатывающий центр OKUMA PM-600

На рис. 1.11 представлен вид автоматизированного комплекса лазерного термоупрочнения ЛК-5В разработки ООО «ТермоЛазер», г. Владимир.

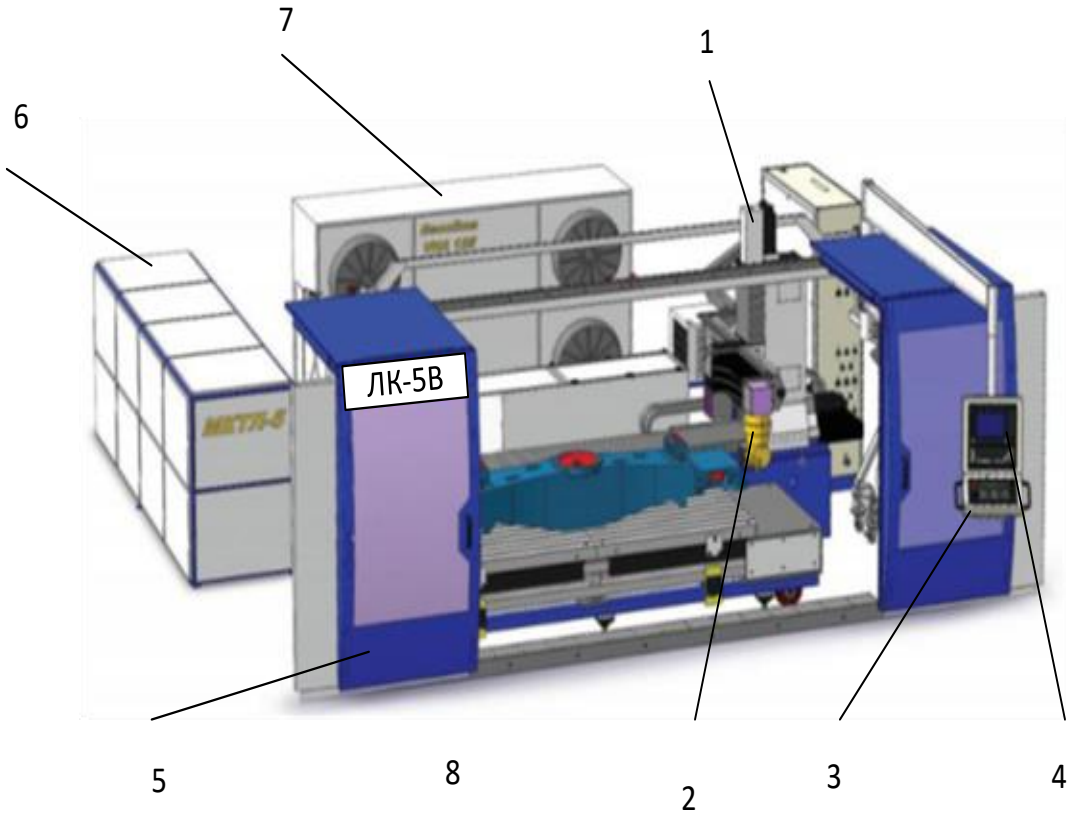


Рис. 1. 11. Вид автоматизированного комплекса лазерного термоупрочнения ЛК-5В

Здесь обозначено: 1- мехатронная исполнительная система с манипулятором оптики; 2- оптическая головка; 3- пульт оператора; 4- монитор; 5 – кабинет; 6 – лазер; 7 – чилер; 8 – стол.

Ниже представлены основные технические характеристики комплекса.

1 Тип лазера - многоканальный CO2-лазер

2 Мощность излучения, кВт - 5

3 Пределы регулирования мощности, кВт - 0,5-5,0

4 Режимы работы лазера - непрерывный, импульсно-периодический

5 Апертура выходного излучения, мм - 72,5

6 Диаметр пятна излучения в зоне обработки, мм - 8-10

7 Количество степеней подвижности манипулятора луча - 5

8 Манипулятор детали устанавливается по желанию заказчика

9 Зона обработки по X, У, Z, мм - 2500*1000*500

10 Линейная скорость обработки, мм/с - 10-20

11 Производительность обработки, $мм^2/с$ - 70-160

12 Потребляемая мощность, кВт - 80

13 Расход лазерной смеси (CO2: N2 : He), л/ч - 4

14 Количество обслуживающего персонала, чел./в смену - 2

15 Занимаемая площадь, $м^2$ - 37,5

Комплекс предназначен для локального лазерного упрочнения путем перемещения пятна лазерного излучения относительно обрабатываемой детали.

Значительные величины перемещений лазерного пятна позволяют производить поверхностное упрочнение быстроизнашивающихся поверхностей крупногабаритных дорогостоящих деталей.

Рабочий стол комплекса грузоподъёмностью до 2000 кг обеспечивает свободную установку и базирование спутников-паллет, а комплект системы ЧПУ Sinumerik 840Di позволяет производить управление пятью осями на станке. Конструкция рабочего стола обеспечивает свободную установку и четкое базирование спутников-паллет, приспособлений и устройств с обрабатываемыми деталями, исключая случайное смещение деталей по координатам X, Y и Z и от горизонтального положения.

1.2. Устройство мехатронных модулей движения

Главным отличительным признаком мехатронного модуля движения (ММД) от общепромышленного привода является использование вала двигателя в качестве одного из элементов механического преобразователя движения. Примеры ММД: мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-барабан, электрошпиндель.

Мотор-редуктор объединяет в один компактный конструктивный модуль электродвигатель и преобразователь движения. Эта конструкция получила в настоящее время широкое распространение. Выпускается целая гамма различных типов мотор-редукторов для различных условий применения, позволяющая найти оптимальное решение каждой конкретной задачи.

По сравнению с традиционным соединением двигателя и редуктора через муфту моторы- редукторы обладают целым рядом существенных преимуществ:

- сокращение габаритных размеров;

- снижение стоимости за счет сокращения количества присоединительных деталей, уменьшения затрат на установку, наладку и запуск изделия;

- улучшенные эксплуатационные свойства (пыле- и влагозащищенность, минимальный уровень вибраций, безопасность и надежность работы в неблагоприятных производственных условиях).

Конструктивное исполнение модуля определяется типами используемых редуктора и электродвигателя. В зависимости от технических требований задачи применяются цилиндрические, насадные, конические, червячные и другие виды редукторов. В качестве электродвигателей наиболее часто используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и регулируемыми преобразователями частоты вращения, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока. Многие зарубежные и отечественные фирмы производят электродвигатели, цилиндрические и планетарные редукторы и на их основе мотор-редукторы, которые при необходимости снабжают фотоимпульсными датчиками, резольверами и тормозами (переводя таким образом в класс ММД). Блочно-модульная система присоединения к двигателю различных типов планетарных и цилиндрических редукторов, а также магнитных и цифровых фотоимпульсных датчиков показана на рис. 1.12.

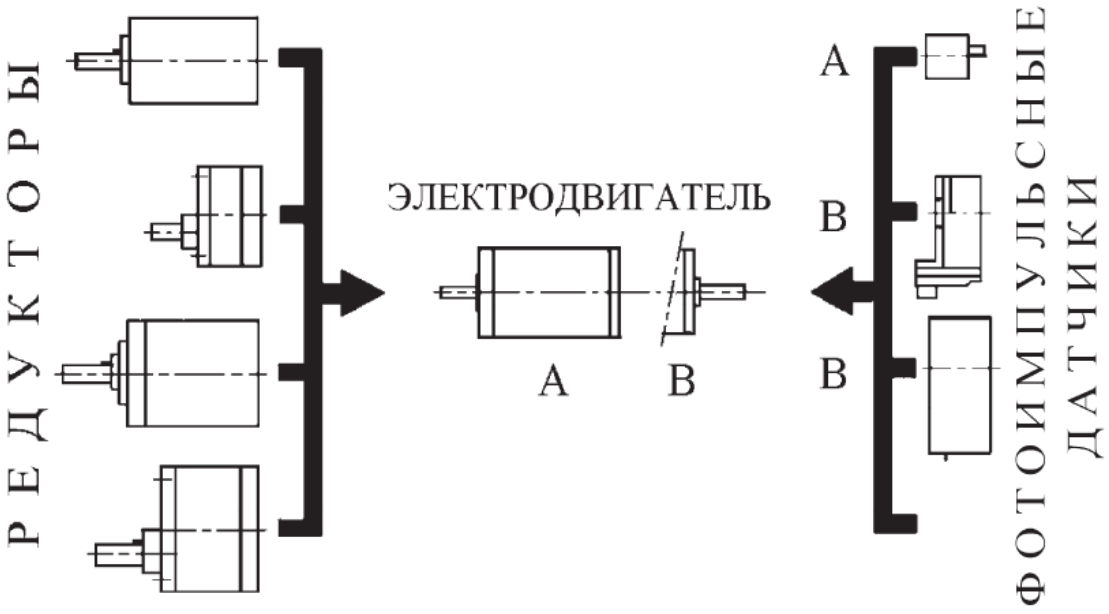


Рис. 1.12. Блочно-модульная система формирования мотор-редукторов: А, В – исполнения двигателя

Конструктивное объединение двигателя и преобразователя движения в мотор-редуктор имеет ряд преимуществ по сравнению с устаревшей системой соединения двигателя и преобразователя движения через муфту. Это и значительное сокращение габаритных размеров, и существенное уменьшение количества соединительных узлов и деталей, и снижение затрат на установку, отладку и запуск.

Благодаря своим достоинствам мотор-редуктор является в настоящее время одним из наиболее распространенных видов электропривода. Во всем мире выпускают ежегодно миллионы штук мотор- редукторов различных типов и исполнений, что позволяет удовлетворить все мыслимые потребности. Мотор-редуктор с преобразователем движения в виде соосного цилиндрического редуктора (рис. 1.13) состоит из двух основных элементов: двигателя *1* и редуктора *2*, имеющего стыковочную поверхность *3* с отверстиями для крепления к ней двигателя винтами или болтами *4*.

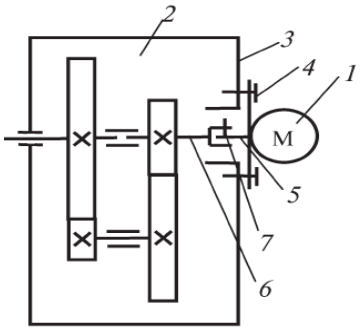


Рис. 1.13. Соосный двухступенчатый

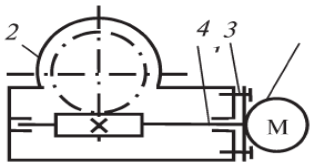


Рис. 1.14. Червячный мотор-редуктор редуктор

При объединении двигателя и редуктора в единый конструктивный модуль вал *5* двигателя вводят во входной полый вал *6* редуктора и закрепляют шпонкой *7*. Возможен вариант, когда двигатель и редуктор имеют общий вал. Схема одноступенчатого червячного мотор-редуктора представлена на рис. 1.14. Он состоит из двигателя *1* и червячного преобразователя движения *2*, соединенных в общий корпус винтами *3*. Вал *4* двигателя и преобразователя движения единый.

Внешний вид двухступенчатого червячного мотор-редуктора фирмы *MOTOVARIO* показан на рис. 1.15.

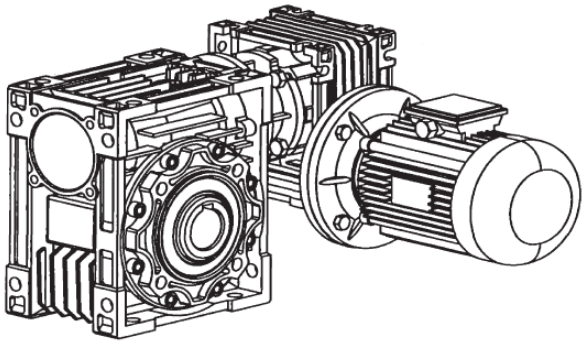


Рис. 1.15. Двухступенчатый червячный мотор-редуктор фирмы *MOTOVARIO*

В мотор-редукторах наиболее часто используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, регулируемые преобразователем частоты вращения вала, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока.

Планетарный зубчатый мотор-редуктор изображен на рис. 1.16.

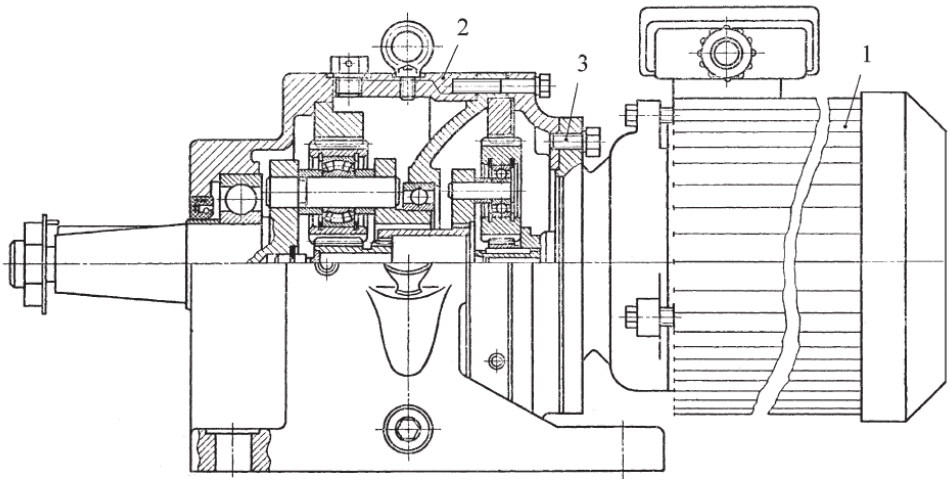


Рис. 1.16. Планетарный двухступенчатый мотор-редуктор

Он состоит из асинхронного двигателя *1* и двухступенчатого планетарного зубчатого преобразователя движения *2*, соединенных при помощи винтов *3* в единый корпус. В преобразователе движения плавающими элементами являются водило первой ступени и солнечная шестерня второй ступени, которые связаны между собой зубчатыми муфтами. Водило второй ступени выполнено заодно с выходным валом преобразователя движения. Сателлиты первой ступени установлены в водилах консольно.

Планетарно-цевочный одноступенчатый мотор-редуктор, состоящий из двигателя *1* и преобразователя движения *2*, соединенных в единый корпус винтами *3*, представлен на рис. 1.17.

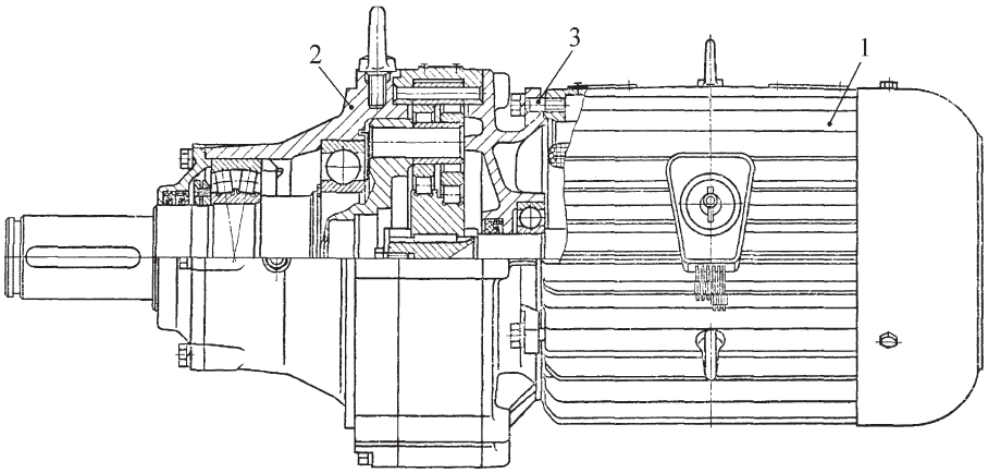


Рис. 1.17. Планетарно-цевочный мотор-редуктор

Мотор-редуктор на основе волнового механизма с лектромагнитным генератором волн изображен на рис. 1.18.

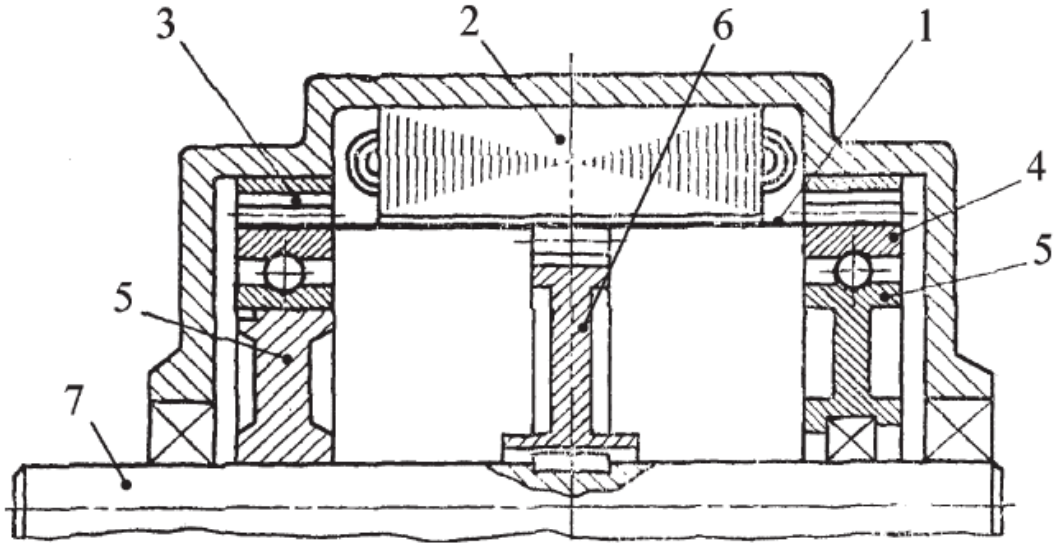


Рис. 1.18. Волновой мотор-редуктор

Он состоит из гибкого колеса *1*, электромагнитного генератора волн *2*, жестких колес *3*, гибких подшипников *4*, кулачков *5*, зубчатого колеса 6 и выходного вала *7*. При работе мотор-редуктора гибкое колесо под воздействием электромагнитного генератора волн входит в зацепление с жесткими колесами. При этом гибкое колесо деформируется синхронно с вращающимся электромагнитным полем и, взаимодействуя с жесткими колесами, вращается относительно корпуса, передавая через зубчатое колесо *6* вращение выходному валу. Кулачки с надетыми на них гибкими подшипниками приходят в движение вместе с гибким колесом.

Кулачки можно устанавливать на выходной вал непосредственно или при помощи подшипников качения. Во втором случае обеспечивается радиальная координация гибкого колеса относительно жесткого, увеличивается надежность, долговечность и повышается коэффициент полезного действия модуля движения.

Во многих случаях скорость вращения выходного вала мотор-редуктора должна быть изменяемой. Реализовать это требование возможно применением механических вариаторов, позволяющих регулировать скорость вращения, либо применением электронных устройств,

изменяющих скорость вращения двигателя. Каждый из указанных способов, имеющих свои преимущества и недостатки, применяют в зависимости от тех конструктивных и технологических задач, которые необходимо решить. Например, если требуется повысить передаваемый момент на выходном валу, то целесообразно применять конструкцию мотор-редуктора с механическим вариатором. Если же необходимо расширить диапазон регулирования скорости либо сохранить минимальные габариты и массу мотор-редуктора, то предпочтительны частотные преобразователи скорости. В мотор-редукторах могут быть использованы различные типы вариаторов. При этом изделие получает название «*мотор-вариатор- редуктор*». На рис. 1.19 представлена общая компоновочная схема мотор-вариатор-редукторов.

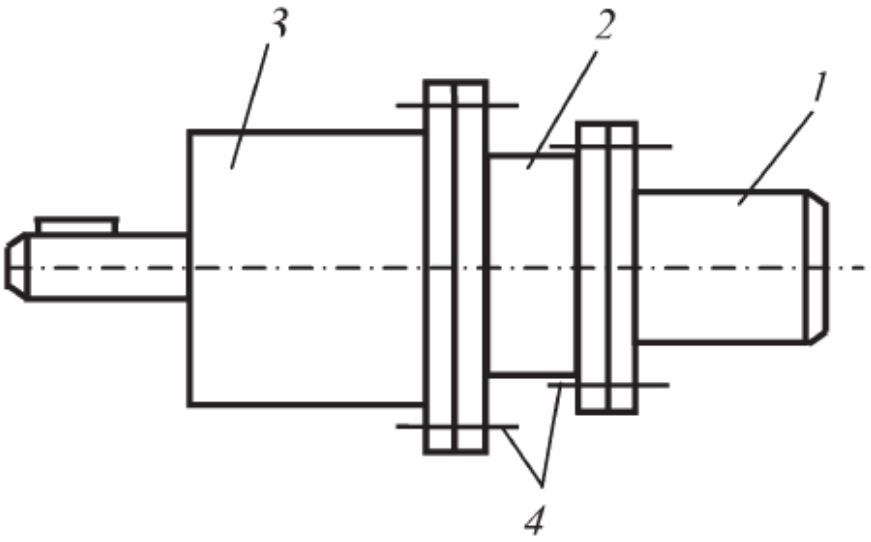


Рис. 1.19. Компоновка мотор-вариатор-редуктора

Двигатель *1*, вариатор 2 и редуктор *3* соединяют фланцами с помощью винтов (болтов) *4*. Применение мотор-редукторов в комплекте с частотными преобразователями скорости позволяет посредством изменения скорости вращения вала двигателя осуществлять плавное (бесступенчатое) регулирование скорости выходного вала с сохранением момента.

Конструкция мотор-колеса на основе планетарно-цевочного преобразователя движения типа *K-H-V* представлена на рис. 1.20.

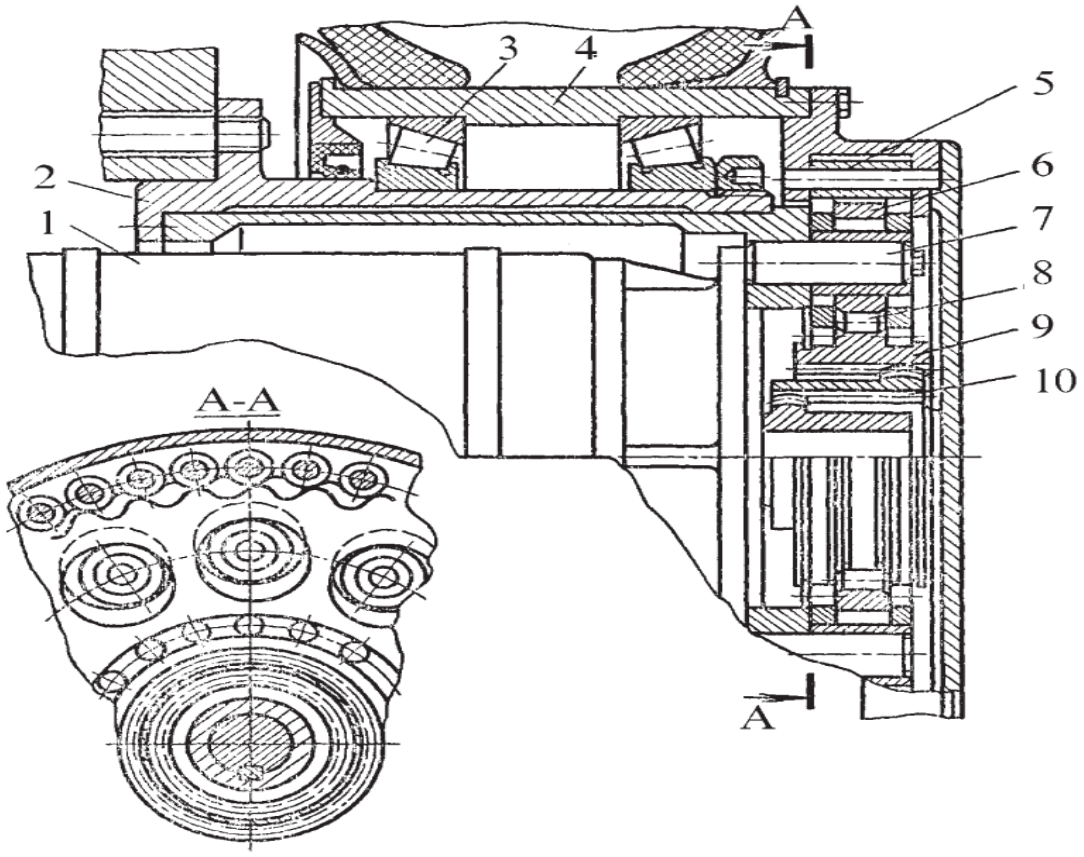


Рис. 1.20. Конструкция мотор-колеса на основе планетарно-цевочного редуктора

Эксцентрик *9* связан с валом электродвигателя *7* через двойную зубчатую муфту *10*. Для роликов *8* эксцентрик имеет три беговые дорожки. Через сателлит *6* вращение передается цевочному колесу *5* и дальше на ступицу колеса *4*, которая опирается на два конических радиально-упорных подшипника *3*. Механизм параллельных кривошипов *7* установлен в неподвижной ступице *2*. Передача является двухсателлитной, причем один из сателлитов раздвоен и расположен симметрично относительно другого, что исключает неравномерность распределения нагрузки по длине цевок колеса *5*. Эксцентрик *9* выполнен плавающим и не имеет радиальных опор. Конструкция компактна и достаточно проста в сборке и разборке.

Развитие новых электронных технологий привело к созданию миниатюрных датчиков и электронных блоков для обработки их сигналов. Это позволило ввести в ММД электронные и информационные устройства, наличие которых является главным отличительным признаком ММД от МД. Важным шагом в развитии приводной техники

стало появление высокомоментных двигателей вращательного движения, применение которых позволило вообще исключить механический редуктор из состава электроприводов постоянного тока, работающих на низких скоростях. Высокомоментными называются двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и электронной коммутацией обмоток, которые допускают многократную перегрузку по моменту. Для определения положения полюсов на роторе вентильного ВМД устанавливают дополнительные технические средства (например, датчики Холла, индуктивные и фотоэлектрические датчики). Обычно высокомоментные двигатели (ВМД) устойчиво работают на частотах вращения 0.1-1 1/мин, которые типичны для металлорежущих станов и промышленных роботов. Основные преимущества ВМД определяются отсутствием в приводе редуктора: - снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции; - повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров; - исключение трения в механической трансмиссии позволяет существенно уменьшить погрешности позиционирования и нелинейные динамические эффекты на ползучих скоростях; - повышение резонансной частоты. ВМД выпускаются в настоящее время коллекторного и вентильного (иногда используется термин «бесщеточного», либо «бесконтактного») типов. Основные преимущества вентильных двигателей по сравнению с коллекторными: - высокая надежность, большой срок службы, минимальные затраты на обслуживание (вследствие исключения искрения и износа щеток); - улучшенные тепловые характеристики (так как тепло рассеивается на обмотках статора, а на роторе тепловыделяющие элементы отсутствуют), отсюда возможность использования проводов малого сечения; - высокое быстродействие за счет высокого соотношения развиваемый момент/ момент инерции ротора;

- большая перегрузочная способность по моменту (типично Ммах/Мном = 8) в широком диапазоне регулирования скорости;

- близкие к линейным механические и регулировочные характеристики. По сравнению с синхронными двигателями вентильные ВМД позволяют регулировать скорость вращения с помощью обратной связи, частота вращения не зависит от напряжения питания, нет проблемы выпадения из синхронизма.

Основной недостаток вентильных двигателей - наличие дорогостоящих магнитов и блока управления коммутацией обмоток, отсюда пониженный показатель мощность/цена и повышенные габариты. В современных модификациях эта проблема решается путем построения этих блоков на базе относительно дешевых интегральных микросхем. В состав современных мехатронных модулей движения на основе ВМД обязательно входят также датчики обратной связи и иногда управляемые тормоза, что позволяет отнести такие ММД ко второму поколению. В качестве датчиков наиболее часто применяются фотоимпульсные датчики (энкодеры), тахогенераторы, резольверы и кодовые датчики положения. Принципиально важно, что модуль "двигатель-датчик" имеет единый вал, что позволяет сочетать высокие технические параметры и низкую стоимость.

Современное производство предъявляет к ММД целый ряд требований: высокая точность реализации исполнительных движений; надежность, долговечность; возможность работы при наличии различных видов возмущений и в широком диапазоне температур окружающей среды; значительно меньшие массогабаритные показатели по сравнению с обычным электроприводом. Требования к развиваемым усилиям, точности и скорости исполнительных движений диктуются особенностями автоматизируемых операций, а требование минимизации размеров – необходимостью встраивания модуля в ограниченное пространство. Попытка синтеза ММД из имеющихся в наличии серийно выпускаемых компонентов может привести к технически и экономически неэффективным решениям. Рациональным является проектирование специализированного ММД, наиболее полно отвечающего его служебному назначению. Сложность и противоречивость требований, предъявляемых к ММД, обусловливает целесообразность мехатронного подхода к их проектированию. В частности, следование принципу синергетической интеграции элементов системы приводит к обеспечению желаемого уровня качества модуля за счет конструктивного и функционального взаимопроникновения его компонентов, многие из которых являются специализированными и создаются в ходе параллельного системного проектирования с учетом их последующего объединения. Если преобладающим является требование обеспечения компактности, то оно может быть реализовано путем использования бесконтактных электрических машин и их интеграции с преобразова-

телями движения и информационно-измерительными элементами. При этом преобразователи движения и датчики не являются отдельными устройствами, а становятся неотъемлемыми элементами двигателя. Синергетический эффект достигается также за счет выполнения некоторыми компонентами ММД нескольких функций одновременно. Такие решения позволяют исключить многие механические интерфейсы, упростить и удешевить конструкцию, устранить необходимость механической подгонки и согласования датчика и двигателя. ММД являются функциональными «кубиками», из которых можно компоновать сложные мехатронные системы.

Примеры ММД: модули на основе электродвигателей углового линейного движения и различных преобразователей движения (винтовых, червячных, планетарных, волновых и т. п.), безредукторные ММД, безредукторные поворотные столы. ММ линейного движения выходного звена изображен на рис. 1.21.

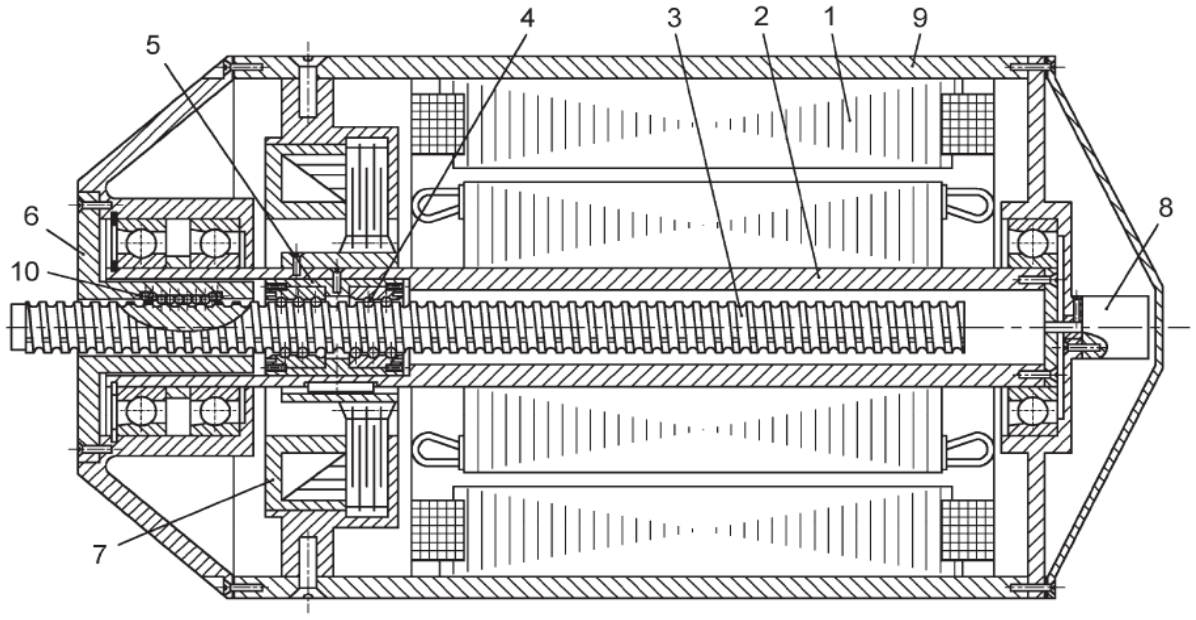


Рис. 1.21. Мехатронный модуль линейного движения

Он состоит из асинхронного двигателя *1* с полым валом *2*, шариковинтовой передачи, включающей в себя винт *3*, шарики *4*, составную гайку *5*, соединенную с валом *2*, направляющей *6*, нормально замкнутого электромагнитного тормоза *7*, фотоимпульсного датчика *8* и корпуса *9*. При вращении ротора двигателя *1* вал *2* вращает гайку *5*, которая через шарики *4* вызывает поступательное перемещение винта

3. Для предотвращения проворачивания и уменьшения трения при перемещении винта *3* в нем сделаны три продольных паза, в которые входят шарики *10* направляющей *6*. Величину перемещения винта *3* фиксирует фотоимпульсный датчик *8*. Электромагнитный тормоз *7*, закрепленный в корпусе *9*, в случае отключения электроэнергии срабатывает и останавливает винт.

Двухстепенной (двухкоординатный) ММД показан на рис. 1.22.

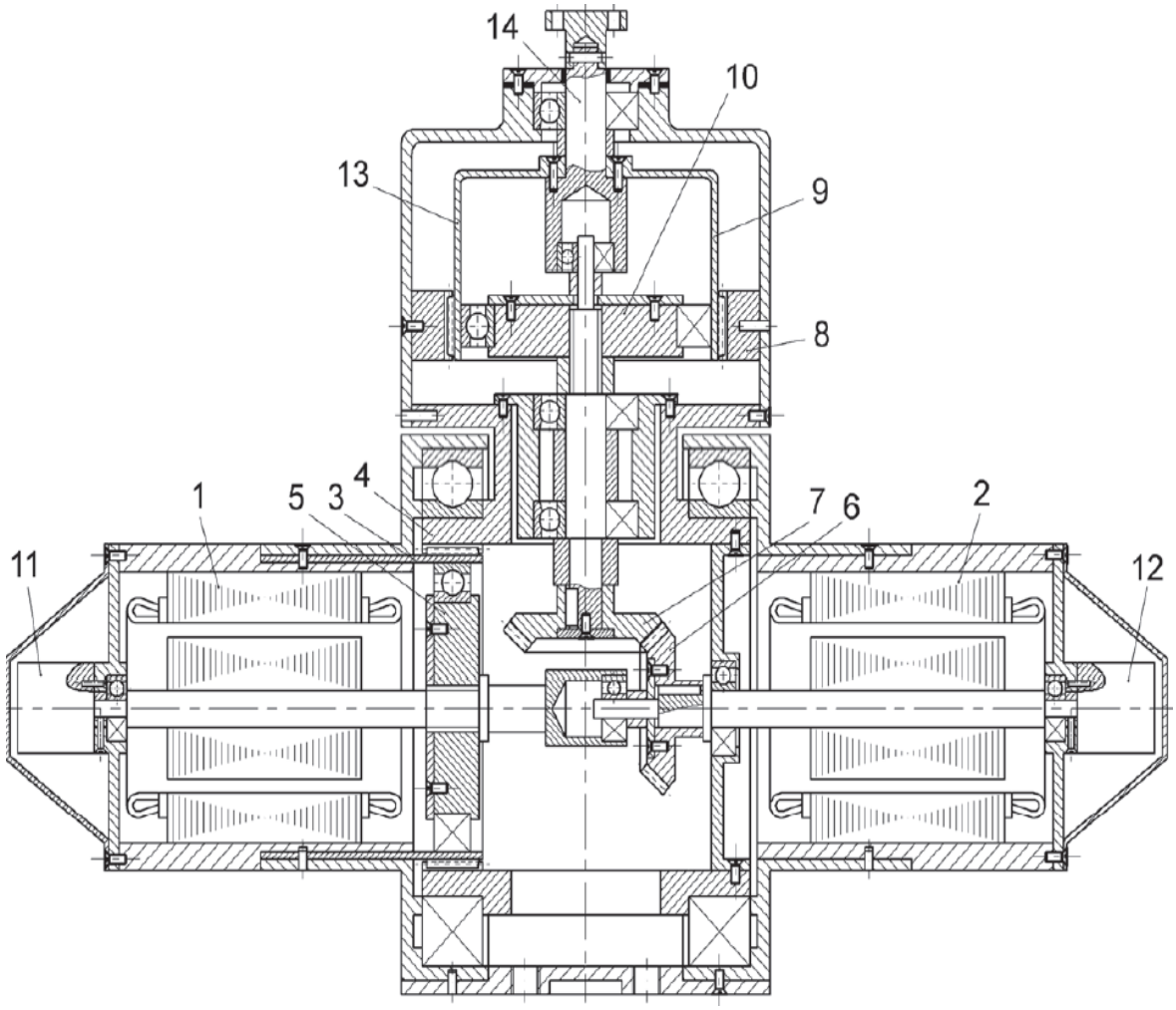


Рис. 1.22. Двухкоординатный мехатронный модуль движения

Модуль состоит из двух двигателей *1* и *2*, волнового преобразователя движения с неподвижным гибким колесом *3*, подвижным жестким колесом *4* и кулачковым генератором волн *5*, двухступенчатого преобразователя движения, состоящего из конической зубчатой передачи *6*–*7*, волнового преобразователя движения с неподвижным жест-

ким колесом *8*, подвижным гибким колесом *9* и кулачковым генератором волн *10*, двух фотоимпульсных датчиков *11* и *12*. При включении двигателя *1* генератор волн *5* начинает вращаться и жесткое колесо *4* вместе со связанным с ним корпусом *13* приходит в движение. При включении двигателя *2* вращение его вала через пару зубчатых колес *6–7* приводит во вращение генератор волн *10*, и гибкое колесо *9* вместе со связанным с ним выходным валом *14* приходит в движение. Фотоимпульсные датчики *11* и *12* предназначены для определения положения и перемещения корпуса *13* и выходного вала *14* соответственно.

На рис. 1.23 изображен ММД фирмы *MAXON*.

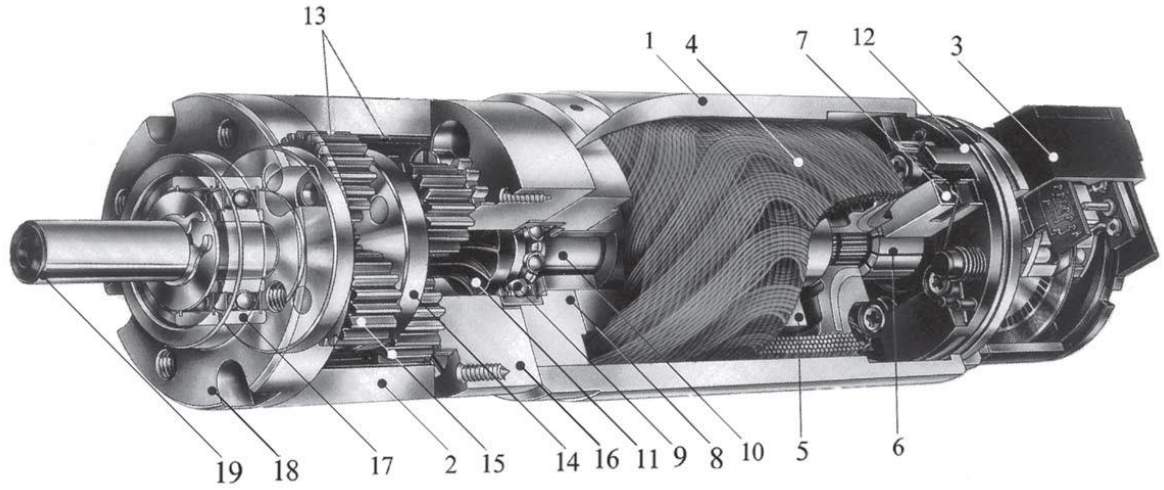


Рис. 1.23. Мехатронный модуль движения фирмы *MAXON*

Он состоит из коллекторного двигателя *1*, двухступенчатого планетарного редуктора *2* и фотоимпульсного датчика положения *3*.

Двигатель включает в себя обмотку *4*, магнит *5*, коллектор *6*, щетки *7*, фланец *8*, подшипник *9*, вал *10*, заканчивающийся вал-шестерней *11*, крышку *12*. Каждая ступень редуктора типа 2К-*H* с одним внешним и одним внутренним зацеплениями имеет два центральных колеса *11* и *13*(первая ступень), водило *14* и сателлиты *15*. Для установки подшипника *9* имеется специальная монтажная плита *16*. Подшипник *17* закреплен во фланце *18* преобразователя движения, через который проходит выходной вал *19*. Фотоимпульсный датчик предназначен для определения положения и перемещения выходного вала.

Важнейшим этапом развития ММД стали разработки модулей типа «*двигатель – рабочий орган*». Такие конструктивные модули

имеют особое значение для технологических мехатронных систем, целью движения которых является реализация целенаправленного воздействия рабочего органа на объект работ. ММД типа «*двигатель – рабочий орган*» широко применяют в шлифовальных и фрезерных станках под названием мотор-шпиндели.

В настоящее время выпускают широкую номенклатуру высокоскоростных прецизионных электро- и пневмошпинделей с частотой вращения 9000… 250000 об/мин, предназначенных для обработки различных металлов и неметаллических материалов шлифованием, фрезерованием, сверлением, а также специального назначения, в том числе для промышленных лазеров. Высокоскоростной шпиндель, используемый в составе металлорежущего станка, должен обеспечивать ряду технических требований, к которым в первую очередь относятся:

- высокая пиковая мощность и мощность постоянного действия;
- максимальная радиальная и аксиальная жёсткость;
- максимальная скорость вращения;
- соответствующая требованиям высокоскоростной обработки (ВСО) система крепления инструмента, часто с возможностью автоматической смены инструмента.

Для каждого конкретного практического приложения должен быть произведён выбор между шпинделем с ременной передачей и моторшпинделем. На рис.1.24 приведен электрошпиндель со встроенным двигателем датчиками и исполнительными элементами для контроля процесса высокоскоростной обработки.

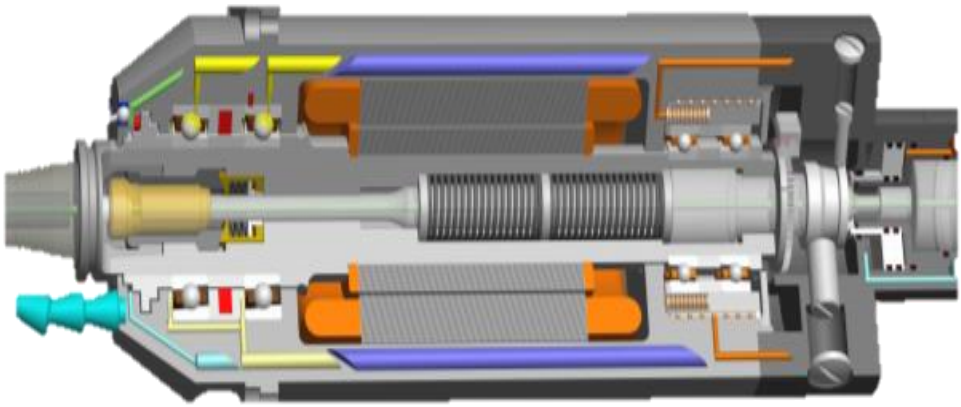


Рис. 1.24. Вид моторшпинделя

Двигатель интегрирован в корпус шпинделя и обеспечивает возможность высоких скоростей вращения без ограничений, обусловленных ременными и зубчатыми передачами. Моторшпиндель состоит из установленного на подшипниках шпиндельного вала, двигателя и системы зажима инструмента. Смазка подшипников перманентная на весь срок службы или воздушно-масляная. Воздушно-масляная смазка позволяет достичь более высокие – на 20% и выше скорости вращения. Мощность электрошпинделя определяется мощностью мотора. Выбор шпинделя для конкретного приложения определяется требованиями станка. В конечном итоге должен быть сделан выбор оптимальной комбинации скорости вращения, мощности, жёсткости и нагрузочной способности.

ММД в виде безредукторного поворотного стола (рис. 1.25) предназначен для обеспечения режимов позиционирования и контурной обработки на фрезерных, сверлильных и расточных станках.

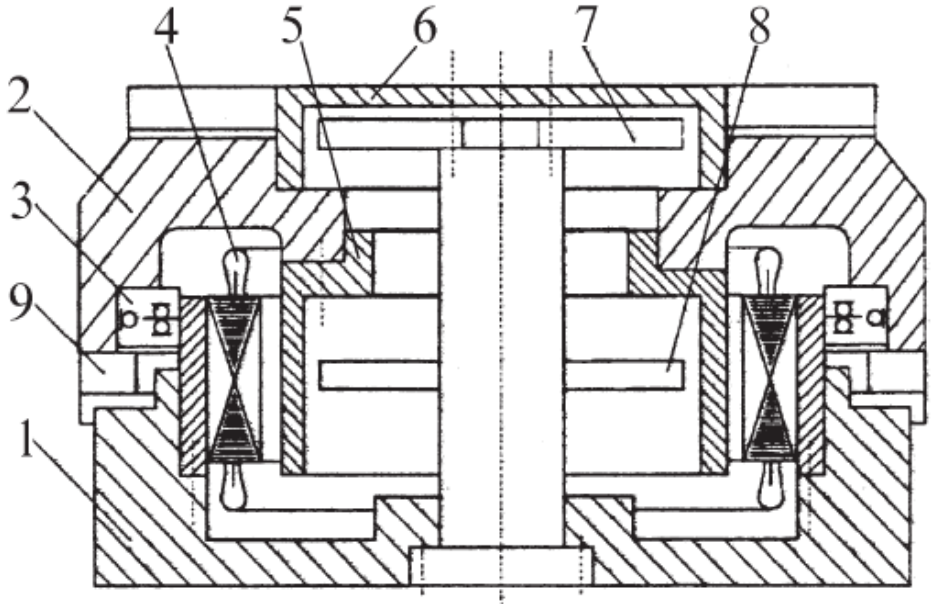


Рис. 1.25. Безредукторный поворотный стол

Стол состоит из основания *1* и собственно поворотного стола *2*, опирающегося на упорные подшипники *3*, встроенного двигателя *4*, ротор *5* которого соединен с планшайбой *6*, датчика *7* положения, датчика *8* скорости и гидротормоза *9*, обеспечивающего фиксацию планшайбы в нужном положении. Безредукторное соединение ротора двигателя с планшайбой позволяет увеличить точность позиционирования

стола и расширить его технологические возможности. Одновременно упрощается конструкция стола, уменьшается число деталей, повышается жесткость.

Мехатронный подход к построению модулей вращательного движения на базе высокомоментных двигателей получил в последние годы свое развитие и в модулях линейного перемещения. Цель проектирования аналогична - исключить механическую передачу из состава ММД. Мехатронные модули движения на основе линейных высокомоментных двигателей (ЛВМД) находят все большее применение в гексаподах, высокоскоростных станках (многоцелевых, фрезерных, шлифовальных), комплексах для лазерной и водоструйной резки, вспомогательном оборудовании (крестовых столах, транспортерах). Традиционные электроприводы линейных перемещений включают в себя двигатель вращательного движения и механическую передачу для преобразования вращения в поступательное движение (шарико-винтовую передачу (ШВП), зубчатую рейку, ленточную передачу и т.п.). С начала 80-х годов известны разработки собственно линейных двигателей, однако из-за низких удельных силовых показателей они имели ограниченную область применения (графопостроители, координатно-измерительные машины) и в автоматизированном оборудовании не могли быть использованы.

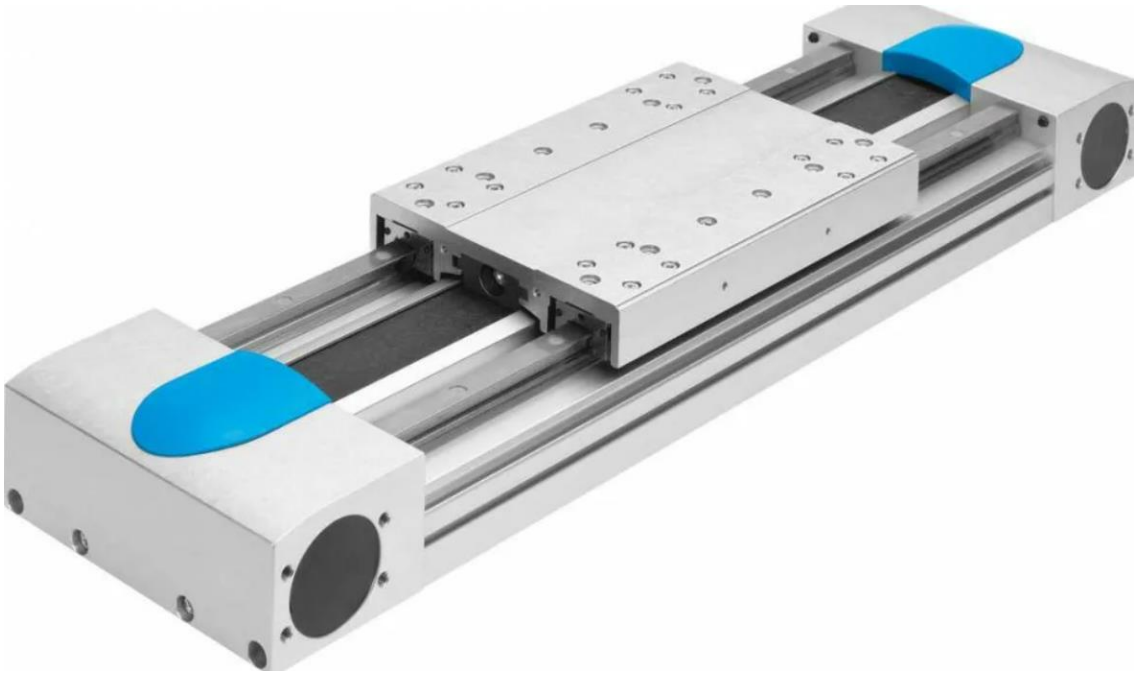


Рис. 1.26. Мехатронный модуль с линейным двигателем

Основные преимущества модулей на базе ЛВМД по сравнению с традиционными линейными приводами:

- повышение в несколько раз максимальной скорости движения (до 150-210 м/мин) и ускорения (в перспективе до 5g);
- высокая точность реализации движения;
- высокая статическая и динамическая жесткость.

Вместе с тем имеется ряд проблем при проектировании и внедрении ЛВМД: более высокая стоимость, необходимость использования систем охлаждения ММД (жидкостной или воздушной), относительно невысокий к.п.д. модуля.

1.3. Информационная система и датчики мехатронных и робототехнических систем

Информационная система (ИС) представляет собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств, предназначенных для получения измерительной и другой информации, необходимой для нормального функционирования мехатронного или робототехнического устройства, передачи, хранения и преобразования этой информации (в том числе осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации) в целях представления информации потребителю (системе управления или человеку-оператору) в виде, удобном для принятия решения. ИС являются важнейшей составной частью МС и занимают в них особое место: именно они обеспечивают координацию и синхронизацию работы всех других систем. Благодаря ИС объект приобретает новые системные свойства (целостности, организованности, иерархичности структуры), которые не являются простой суммой свойств составляющих систем.

Любая мехатронная или робототехническая система должна иметь возможность контролировать состояние своих подсистем, а также значимые для ее нормального функционирования параметры внешней среды. Такая информация позволяет, например, мобильному роботу следить за своим состоянием, правильно ориентироваться в

окружающем пространстве, выбирать оптимальный маршрут движения и рабочие объекты, своевременно избегать опасных ситуаций (перегрева, опрокидывания, причинения вреда человеку и т.п.). Робот, лишенный возможности получать информацию о состоянии своих подсистем и окружающем пространстве подобен человеку, лишенному не только пяти органов чувств, но информации от многочисленных биологических сенсоров, расположенных, например, в наших суставах (чтобы убедиться в их наличии, закройте глаза и вы без труда сможете описать положение любого сустава руки или ноги!). Чтобы подсистема управления робота смогла принимать адекватные решения, поступающая к ней из внешней среды (от датчиков очувствления) и от блоков самого робота (в том числе и хранящаяся в запоминающих устройствах) информация должна быть достаточно полной и достоверной. При этом, чем выше «интеллектуальный уровень» мехатронной системы, тем в большей степени работа ее подсистемы управления основана на текущей информации, поступающей от датчиков и обрабатываемой в реальном масштабе времени.

Основными процессами, позволяющими ИС получать необходимую информацию, являются обнаружение событий и объектов, измерение их параметров, обработка результатов измерения, в том числе контроль, диагностика, распознавание образов. В соответствии с этим можно классифицировать ИС по составу, выполняемым функциям и уровню интеллектуальности.

По мере развития ИС качество получаемой с их помощью информации и расширение функциональных возможностей все чаще связывается с их интеллектуализацией. При этом понятие интеллектуальности непосредственно связано с наличием процессора и программной части. Именно переход к созданию процессорных ИС явился главным шагом по формированию предпосылок для появления интеллектуальных ИС.

Однако само наличие процессора и программной части еще не определяет уровня интеллекта ИС. За основу определения этого уровня примем следующее положение: уровень интеллекта обусловливается

возможностями использования априорной (банк знаний и банк данных) и текущей информации для синтеза и выполнения алгоритмов, характеризующихся наилучшим для принятых условий и ограничений метрологическим качеством результатов измерений и синтезированной на их основе управляющей информации. В ИС низших уровней развития процессы измерения и обработка их результатов производится по заранее заданным алгоритмам. В высокоразвитых ИС в той или иной степени используется искусственный интеллект.

Информационные устройства и системы, как и органы чувств человека, предназначены для сбора информации о состоянии внешней среды и внутреннем состоянии робота. В качестве ее элементов используются телевизионные, светолокационные, ультразвуковые, тактильные и другие датчики. Функционально органы очувствления роботов (мехатронных систем) датчики – можно подразделить на два основных класса: датчики внутреннего состояния и датчики внешнего состояния (Рис.1.27). Основное назначение средств очувствления МС состоит в том, чтобы существенно снизить объем необходимой априорной информации. Кроме того, их включение в состав систем управления позволяет существенно упростить процедуру обучения МС, повысить динамическую точность и быстродействие исполнительных органов. Представим, что перед нами робот, перемещающий деталь из кассеты на сборочный стол и работающий по жесткой программе (без датчиков). Если детали не будет в том месте, откуда робот должен ее взять, он все равно сделает хватательное движение и будет перемещать пустой схват в место назначения на рабочем столе. Если на пути движения руки такого робота встретится препятствие, движение руки не будет остановлено (что может привести к поломке робота или повреждению препятствия). Робот, снабженный датчиками очувствления, сможет взять деталь, даже, если она находится не точно в заданном месте или иначе ориентирована, при движении рука робота остановится перед препятствием, т. е. очувствленный робот учитывает изменения внешней среды и корректирует свои действия в соответствии с этими изменениями.



Рис. 1.27. Классификация информационных устройств и систем используемых в мехатронике и промышленных роботах

В зависимости ***от принципа действия*** датчики с электрическим выходным сигналом можно разделить на две группы: ***генераторные*** или активные и ***параметрические*** или пассивные. В генераторных датчиках преобразование измеряемой величины осуществляется непосредственно в электрический сигнал (т.е. такие датчики генерируют электрическую энергию). К ним, например, относятся пьезоэлектрические, индукционные, фотоэлектрические (использующие появление

ЭДС в полупроводниковом pn-переходе при его освещении), термоэлектрические. В **параметрических** датчиках измеряемая величина преобразуется в параметр электрической цепи – сопротивление, индуктивность, емкость и т.п., причем для питания датчика необходим источник электрической энергии. К таким датчикам, например, относятся емкостные, индуктивные, электроконтактные, потенциометрические, тензорезисторные.

По используемым ***физическим явлениям и эффектам*** можно выделить следующие виды датчиков, получивших наибольшее распространение в ИС мехатронных устройств: тензорезисторные (для измерения усилий, давлений, моментов, малых перемещений, ускорений и пр.), реостатные (для измерения усилий, давлений, перемещений, линейных и угловых скоростей и ускорений), индуктивные и индуктивно-трансформаторные (для измерения усилий, давлений, линейных перемещений), индукционные (для измерения линейных и угловых скоростей), пьезоэлектрические (для измерения вибраций, динамических усилий, давлений), емкостные (для измерения линейных и угловых перемещений, давлений, состава вещества), магнитоупругие (для измерения усилий, давлений, моментов), фотоэлектрические (для измерения линейных и угловых перемещений, линейных и угловых скоростей, положения объектов, линейных размеров и пр.).

Для измерения угловых перемещений чаще всего применяются потенциометрические датчики, преобразующие угол поворота в напряжение. Точность прецизионных потенциометров может достигать 0,01-0,05 %, разрешающая способность – 0,05-0,01 %. С повышением разрешающей способности потенциометра, как правило увеличиваются его габариты, которые для большинства прецизионных потенциометров колеблются в следующих пределах: диаметр 60-150 мм, высота 50-90 мм. Малые габариты и очень высокую разрешающую способность имеют многооборотные спиральные потенциометры.

Основные недостатки потенциометрических датчиков заключаются в износе проволоки и щётки, ограниченной разрешающей способности и низкой чувствительности по напряжению. От этих недостатков свободны трансформаторные преобразователи угловых перемещений. Наибольшее распространение имеют вращающиеся трансформаторы и сельсины, позволяющие получать напряжения переменного тока, про-

порциональные тригонометрическим функциям угла поворота или самому углу. Следует отметить, что однозначная зависимость выходного напряжения у них в функции угла поворота ограничена интервалом 0-π. Недостатком трансформаторных преобразователей является сравнительно низкая точность воспроизведения функции угла поворота, не превышающая в большинстве случаев 0,1-0,2%.

Для измерения линейных перемещений можно использовать как потенциометрические, так и индуктивные датчики. Использование индуктивных датчиков для непосредственного измерения перемещения возможно только при движении подвижного звена в пределах 80-100мм. Для повышения точности измерения обычно применяют датчики дифференциального типа с двумя катушками. Основной недостаток этих датчиков заключается в нелинейности их характеристик, что и затрудняет их использование для измерения значительных перемещений. для измерения линейных и угловых перемещений можно использовать счётные датчики, т.е. датчики, у которых выходная величина представляется числом импульсов. В тех случаях, когда требуется различать направление измерения измеряемой величины, применяют двухфазную систему воспринимающих элементов. Наряду с измерением угловых и линейных перемещений часто необходимо иметь информацию, о различного рода деформациях и механических напряжениях. Для измерения относительных деформация в пределах 0,005-1,5 % обычно используются проволочные тензометры на бумажной основе, а также фольговые и плёночные тензосопротивлеия. Тензосопротивления практически безинерционны и могут применяться в диапазоне частот от 0 до 100 кГц. Рядом преимуществ перед подобными тензосопротивлениями обладают полупроводниковые тензодатчики: очень малые размеры (до 1 мм), высокая тензочувствительность (на 2 порядка выше, чем у проволочных тензометров), высокий уровень выходного сигнала. Полупроводниковые тензосопротивлеия могут иметь как положительный, так и отрицательный коэффициент тензочувствительности, т.е. при деформации из сопротивление может увеличиваться, и уменьшаться. К их недостаткам следует отнести изменение коэффициента тензочувствительности в зависимости от уровня деформации, температуры, удельного сопротивления материала.

Поскольку ИС мехатронного устройства предназначена для получения и обработки информации о состоянии **как самого мехатронного устройства**, так и **внешней среды**, в состав ИС входят датчики ***внутренней*** и ***внешней информации.***

Датчики внутренней информации служат для измерения величин, характеризующих внутреннее состояние МС, т.е. для определения положений и скоростей перемещения исполнительных органов, усилий в их звеньях, а также параметров внутренней среды, обеспечивающей нормальное функционирование устройства. Датчики внешней информации предназначены для контроля наличия, формы, положения и ориентации в пространстве объектов манипулирования, свойств внешней среды и параметров возмущений, влияющих на функционирование МС в этой среде.

По способности воспринимать информацию на различных расстояниях от ее источника средства очувствления могут быть условно разделены на **бесконтактные и контактные**

Бесконтактные средства очувствления, оперирующие с геометрическими характеристиками объектов внешней среды, включают два класса устройств: системы технического зрения и локационные системы очувствления.

Средства очувствления контактного действия, которые измеряют действующие на манипулятор силы и моменты, а также фиксируют координаты точек их приложения, представлены системами силомоментного и тактильного очувствления [6]. Создание силомоментных систем вызвано необходимостью измерения сил и моментов в процессе взаимодействия схвата или инструмента с объектом манипулирования при выполнении, например, механической обработки, абразивной зачистки и шлифовки изделий. Применение силомоментных систем очувствления позволяет автоматизировать указанные технологические операции при минимуме затрат на разработку и создание дополнительного оборудования, например, конвейеров и позиционеров, обеспечивающих высокую точность начальной установки собираемых деталей. Эти же системы очувствления могут быть с успехом использованы также и для решения многих манипуляционных задач, особенно при работе с жесткими деталями, когда незначительные погрешности позиционирования могут вызвать большие усилия, которые трудно проконтролировать другими средствами.

Силомоментные системы очувствления состоят из датчика и устройства предварительной обработки информации. В общем случае они обеспечивают измерение трех проекций силы и трех проекций векторов моментов, возникающих при взаимодействии схвата или инструмента с обрабатываемой деталью. Датчики силомоментного очувствления размещают либо непосредственно на губках схвата, либо между последним звеном манипулятора и схватом.

Бесконтактные средства очувствления. Системы технического зрения (СТЗ) представляющие собой бесконтактный тип систем очувствления, находят широкое применение в промышленном производстве на операциях распознавания и сортировки деталей, разборки деталей из навала, для измерения координат движущихся деталей, подлежащих захватыванию, определения положения характерных точек в ориентации деталей на сборочных участках, контроля качества обработки или покрытия поверхностей деталей и т. п. Локационные системы очувствления используют для измерения координат изделия в тех случаях, когда применение СТЗ нецелесообразно или невозможно. Посредством локационных датчиков обеспечивается измерение таких параметров, как расстояние до объектов, скорость движения, размеры объектов, обнаружение препятствий, а также исследование механических, электрофизических, акустических и других параметров объектов. В качестве дополнительных параметров измерения могут выступать зазоры, перекосы, проскальзывания наличие внутренних дефектов, толщина материала или покрытия, площадь, ориентация и другие. Локационные системы также применяют для простейшего распознавания деталей, имеющих различную отражательную способность, в качестве датчиков безопасности для предотвращения столкновения подвижных частей манипулятора с предметами и людьми, случайно оказавшимися в зоне обслуживания. Установка локационных датчиков на схвате манипулятора может обеспечить, например, возможность точного слежения сварочной головки за траекторией шва, а также позволяет захватывать и устанавливать изделия на подвесном или ленточном конвейерах.

Ультразвуковые локационные системы в основном они используются для определения местоположения мобильных роботов и обеспечения безопасности движения тележек внутрицехового транспорта. Работа таких систем основана на способности упругих волн высокой частоты (выше 20 кГц) распространяться в жидких, газообразных и твердых

средах и отражаться от неоднородностей или границ раздела этих сред. Наиболее часто используются эхометод и метод, использующий эффект Доплера.

Эхометод основан на излучении в среду коротких акустических импульсов и приеме эхосигналов от неоднородностей среды или находящихся в ней предметов. Этот метод используется для обнаружения предметов, измерения расстояний и перемещений, его также используют в ультразвуковых системах технического зрения (например, медицинская аппаратура для ультразвукового исследования, которая позволяет видеть на экране монитора состояние внутренних органов человека) [6]. Создаваемые излучателем короткие импульсы (длительностью около 1 мс), промодулированные ультразвуковой частотой (40 кГц), посылаются в направлении исследуемого объекта. Отраженные импульсы улавливаются приемником ультразвуковых сигналов, и после преобразования в электрический сигнал и усиления обрабатываются процессором. Процессор выделяет полезный сигнал среди помех и вычисляет расстояние L до исследуемого объекта в соответствии с формулой $L=(V\cdot t)/2$, где V – скорость распространения звуковой волны в данной среде; t – промежуток времени, прошедший между моментом появления переднего фронта излучаемого импульса и моментом прихода переднего фронта отраженного импульса на приемник.

В качестве излучателя и приемника обычно используется керамический пьезоэлектрический или магнитострикционный преобразователь. Чаще всего это один и тот же элемент (т. к. пьезоэлектрический и магнитострикционный эффекты являются обратимыми), поочередно подключаемый быстродействующим коммутатором в промежутках между импульсами то к каналу излучения, то к измерительному каналу. В качестве пьезоэлектрических ультразвуковых преобразователей часто используются пластины пьезокерамики ЦТС-19.

Локационные системы, использующие эффект Доплера, помимо расстояния позволяют определять также составляющую скорости V_O перемещения объекта, направленную вдоль оси излучатель-объект. Напомним, что эффект Доплера заключается в изменении частоты звуковых (или электромагнитных) волн, регистрируемых приемником, в зависимости и от направления и величины взаимного перемещения объекта и приемника. При их сближении наблюдается увеличение частоты, при удалении друг от друга – уменьшение.

Акустические локационные системы обеспечивают измерение расстояний и скоростей перемещения объектов в воздухе и в воде. Такие системы используются, например, автоинспекторами для фиксации превышения скорости автомобилей, рыбопромысловыми судами для нахождения косяков рыб, подводными лодками для определения удаления, скорости и направления движения подводных объектов.

Наряду с ультразвуковыми используются и оптические локационные системы, однако из-за высокой скорости распространения оптического излучения, описанные выше методы используются главным образом для определения расстояний, превышающих несколько метров.

Контактные средства очувствления. Для установления факта касания детали губками схвата или другими частями манипулятора служат контактные датчики тактильного типа. Они расположены на внутренних и внешних поверхностях схвата и в тех местах звеньев манипулятора, которые могут войти в соприкосновение с объектами окружающей среды. Кроме регистрации самого факта соприкосновения они могут измерять величину контактного давления и определять наличие проскальзывания между соприкасающимися частями схвата и объекта. Информация о проскальзывании необходима для управления силой сжатия схвата и поддержания ее на таком минимальном уровне, при котором объект еще надежно зажат и в то же время сила сжатия недостаточна для его разрушения. На рис. 1.28 представлен вихретоковый датчик проскальзывания. Здесь обозначено: 1 – палец схвата, 2 – металлический пустотелый обрезиненный валик, 3 – постоянный магнит, 4 – катушка с проводом. При проскальзывании зажатой пальцами схвата детали металлический цилиндр проворачивается. Наводимые в нем вихревые токи ослабляют магнитный поток, воздействующий на катушку с проводом, в результате чего в ней наводится ЭДС. Вихретоковый датчик может давать сигнал не только о проскальзывании, но также о приближении стальной детали к пальцам схвата и о касании детали пальцами. Такой датчик отличается простотой конструкции, безынерционностью, способностью работать в условиях цеховой загрязненности и агрессивных сред, высокой механической прочностью чувствительного элемента и возможностью использования длинных кабельных линий связи с вторичной аппаратурой.

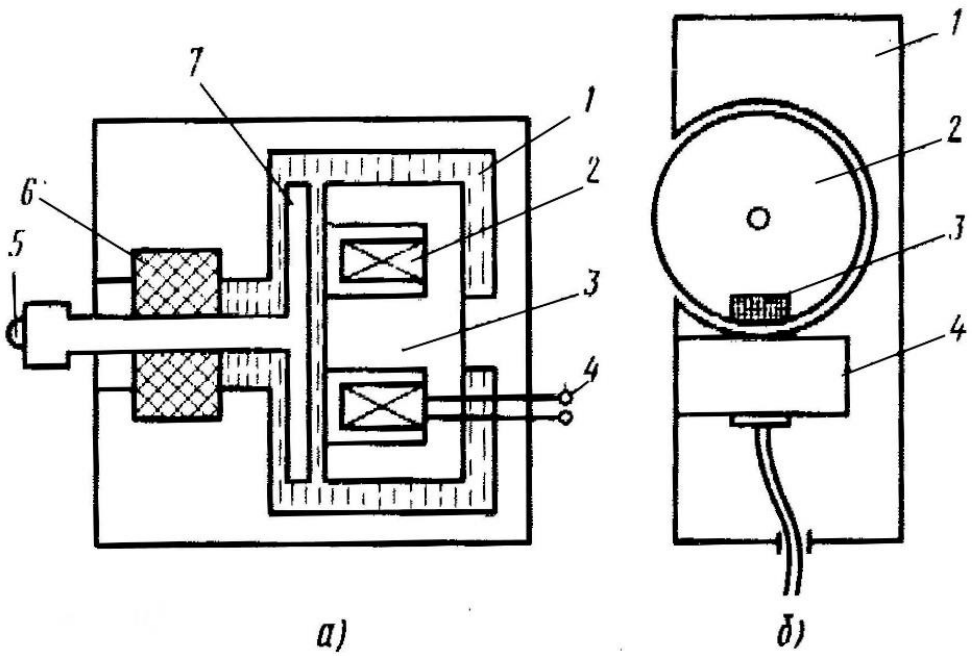


Рис. 1.28. Вихретоковый датчик проскальзывания

Преобразование сил, возникающих при физическом контакте схвата с объектом, в электрический сигнал может осуществляться силомоментными датчиками двумя путями. Первый из них заключается в **непосредственном измерении** упругих деформаций чувствительных элементов датчиков. Наиболее часто для этого применяют тензорезисторные, пьезоэлектрические и магнитоупругие датчики. Второй способ заключается в **измерении перемещений калиброванных пружин** датчика, деформируемых под действием измеряемой величины в процессе контакта схвата с объектом. При этом используют емкостные и электромагнитные (главным образом индуктивные) датчики**.** Измерение упругих деформаций с помощью **тензорезисторных** датчиков – наиболее распространенный метод. Полупроводниковые и металлические тензорезисторы имеют широкую номенклатуру, что позволяет использовать их в тактильных и силомоментных датчиках. В основе работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающееся в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. В известной формуле для величины сопротивления проводника $R=(\rho \cdot l)/S$, где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, S – площадь поперечного сечения при возникновении механических деформаций могут изменяться все три параметра (ρ, l и S).

Тензорезисторы представляют собой решетку из проволоки или фольги (рис. 1.29), наклеенную на специальную подложку, которая, в свою очередь наклеивается на упругий элемент, деформации в котором исследуются. Тензорезисторы имеют простую конструкцию, легко монтируются на упругих элементах тактильных или силомоментных датчиков.

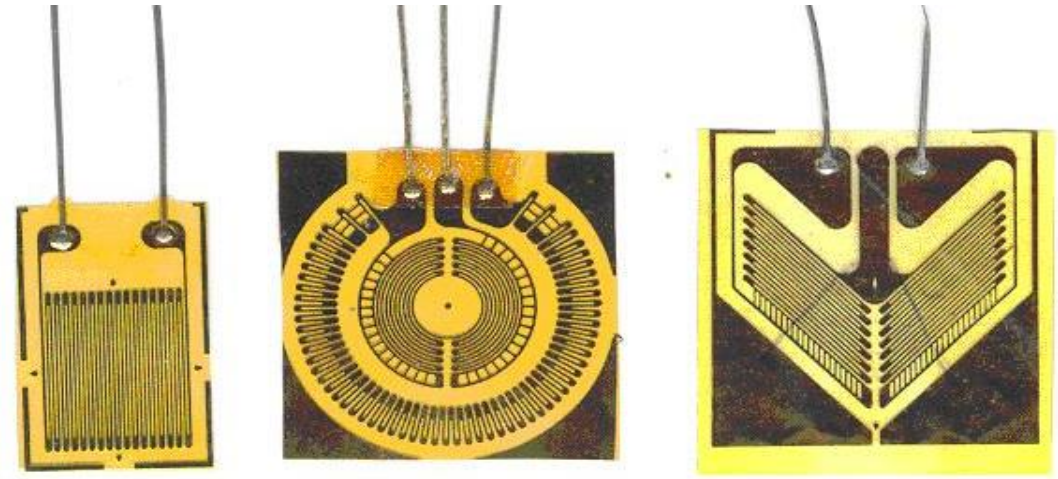


Рис. 1.29. Виды тензорезисторов

Одна из наиболее распространенных и давно применяемых конструкций упругого элемента трехкомпонентного тензорезистивного датчика – крестообразный упругий элемент (рис. 1. 30).

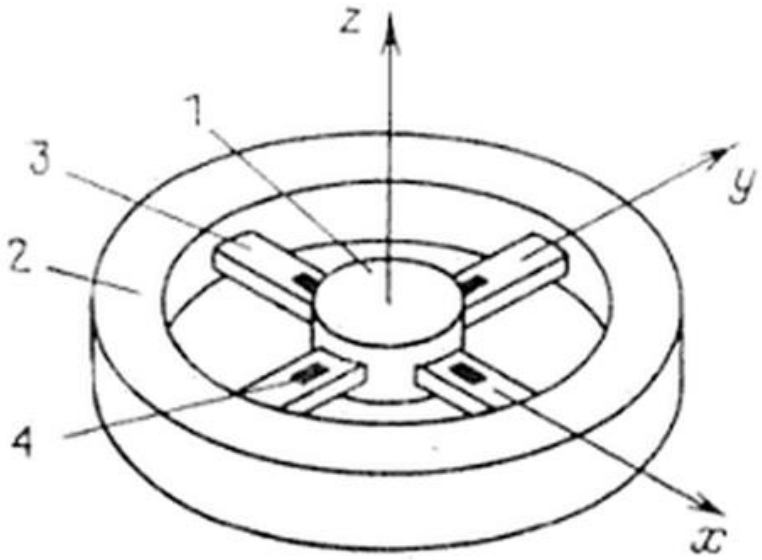


Рис. 1.30. Крестообразный упругий элемент

Два жестких фланца, внутренний 1 и внешний 2, соединены посредством четырех упругих балок 3. Четыре пары тензорезисторов 4, наклеенных на противоположные грани каждой балки, включены в четыре полумоста. Такой датчик чувствителен к осевому усилию F_z и двум боковым моментам M_x и M_y, действующим в плоскости датчика.

Внешний вид тензодатчика представлен на рис. 1.31.



Рис. 1.31. Внешний вид тензодатчика

Датчик оснащен 4 тензорезисторами, включенными по мостовой схеме. Максимальное измеряемое усилия 20 кН, класс точности 0,5, рабочая температура: -10... +70 °С, перегрузочная способность 1000%. Основным недостатком тензорезистивных датчиков является низкая чувствительность. Тензочувствительные элементы выполняются также на основе легированного кремния. Чувствительность полупроводниковых тензодатчиков гораздо выше, чем проволочных или фольговых, однако они обладают меньшей температурной стабильностью. Для непосредственного измерения упругих деформаций могут быть использованы также **пьезоэлектрические** датчики, действие которых основано на измерении заряда, пропорционального внутренним механическим напряжениям растяжения-сжатия или сдвига, вызванными измеряемым усилием. Типичные датчики усилия представляют собой кварцевые или пьезокерамические шайбы, установленные в цилиндрическом корпусе. Силораспределительный элемент обеспечивает равно-

мерное распределение измеряемой нагрузки по площади хрупких кварцевых или керамических шайб, что предохраняет их от возможного растрескивания и позволяет увеличить диапазон измеряемых усилий. При приложении (или снятии) механического усилия на плоских поверхностях шайб образуются электростатические заряды. Кварцевые датчики, хотя и менее чувствительны, чем пьезокерамические, обладают высокой стабильностью свойств.

Пьезоэлектрический акселерометр ВТК1 фирмы «Пьезо» (рис. 1.32) обладает следующими параметрами.

Таблица 1.1 - Основные параметры датчика ВТК 1

Диапазон измерения виброускорений, $мс^{-2}$	0.5 … 1400
Диапазон частот, Гц	5 … 30000
Максимальное значение неразрушающего удара, g	
Диапазон рабочих температур, °С	- 60+ 250
Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры окружающей среды %/°С, не более	0,1
Емкость датчика, пФ	
Сопротивление изоляции при 20°С, Ом	10^{13}
Габаритные размеры, мм	Ø22 x 27
Масса датчика (без кабеля), г	
Пьезоэлектрический материал	тип 850, APC



Рис. 1.32. Пьезоэлектрический акселерометр ВТК1

Достоинствами пъезодатчиков являются простота конструкции, малые размеры, надежность в работе, прекрасные динамические свойства, способность работать при высоких температурах (до 250°С). Погрешность пьезоэлектрических датчиков – до 1 %. К тому не нужно же пьезоэлектрические датчики являются генераторными, т. е. к ним подводить питающее напряжение. Однако заряды на чувствительных элементах пьезоэлектрического датчика образуются только при изменении измеряемого усилия. Если это усилие некоторое время остается постоянным, заряды достаточно быстро стекают даже через большое сопротивление изоляции. Это является основным недостатком пьезоэлектрических датчиков. Поэтому их целесообразно использовать в тактильных системах, которые регистрируют факт наличия касания и мгновенное значение контактной силы, а также для измерения динамических усилий и вибраций. Работа магнитоупругих датчиков основана на эффекте магнитоупругости, заключающемся в изменении магнитной проницаемости ферромагнитного материала под действием механических напряжений. На рис. 1.33 схематически показан наиболее распространенный вариант конструкции магнитоупругого датчика - магнитоанизотропный датчик.

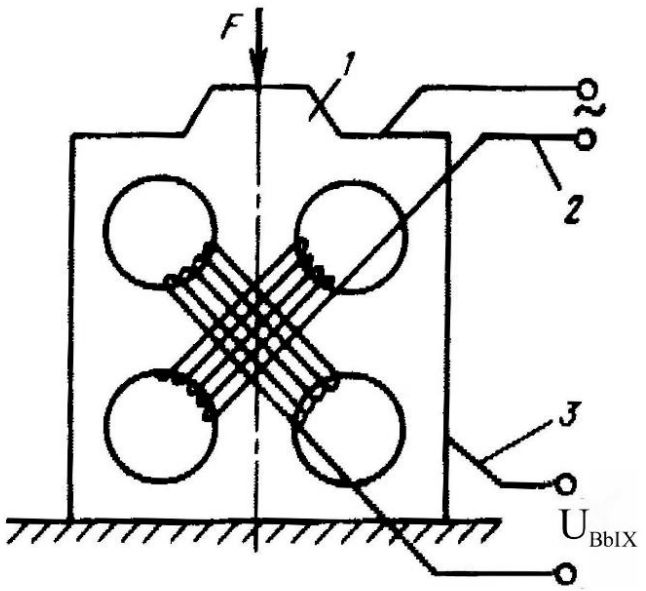


Рис. 1.33. Магнитоанизотропный датчик

В магнитопроводе из ферромагнитного материала, обладающего достаточной магнитоупругой чувствительностью, имеются 4 сквозных отверстия, через которые намотаны первичная обмотка 2, питаемая переменным током повышенной частоты, и вторичная (измерительная) обмотка 3. Плоскости обмоток образуют между собой угол 90°, а с направлением измеряемого усилия F – угол 45°. При отсутствии измеряемого усилия вектор магнитного потока, создаваемого первичной обмоткой, перпендикулярен плоскости витков вторичной обмотки, силовые линии этого потока не пересекают витков обмотки 3, поэтому наводимая в ней ЭДС равна нулю. При приложении измеряемого усилия F (показано стрелкой) в материале магнитопровода возникают механические напряжения, направленные вдоль вертикальной оси. Это вызывает появление магнитной анизотропии (т. е. различных магнитных свойств материала вдоль направления действия измеряемого усилия и поперек него: например, в вертикальном направлении магнитное сопротивление магнитопровода немного возрастает). Магнитный поток Ф стремиться замкнуться по пути с меньшим магнитным сопротивлением, благодаря чему вектор Ф слегка поворачивается по часовой стрелке, и часть силовых линий начинает пересекать витки вторичной обмотки. Это приводит к появлению в ней ЭДС e_2, пропорциональной измеряемому усилию.

В емкостных, электромагнитных (гл. образом индуктивных) и оптических датчиках часто используется предварительное преобразование измеряемой величины в перемещение калиброванной пружины. Емкостные датчики используют зависимость емкости конденсатора от изменения его параметров под действием измеряемой величины. В качестве емкостного преобразователя широко используют плоский конденсатор, емкость которого описывается известной формулой $C= \varepsilon_0 \varepsilon S/\delta$, где ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума ($8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора, S – площадь обкладки, δ – расстояние между обкладками. Измеряемая неэлектрическая величина может быть функционально связана с любым из этих параметров. Внешний вид емкостного датчика перемещения показан на рис. 1.34.



Рис. 1.34. Вид емкостного датчика перемещения

Потребность во все более легких и простых конструктивных решениях вызвала появление интегрированных узлов, например, подшипников со встроенными датчиками для регистрации количества оборотов, частоты вращения, направления вращения, относительного положения, величины ускорения. Такие подшипники (рис. 1.35) являются мехатронными компонентами машин, созданными на грани инженерных исследований в области датчиков и подшипников. Корпус датчика, сенсорное кольцо и подшипник механически соединены друг с другом и формируют единый, готовый к установке узел. Подшипники со встроенным датчиком SKF специально предназначены для работы в качестве шаговых шифраторов, дающих информацию для управления работой двигателей различных механизмов.

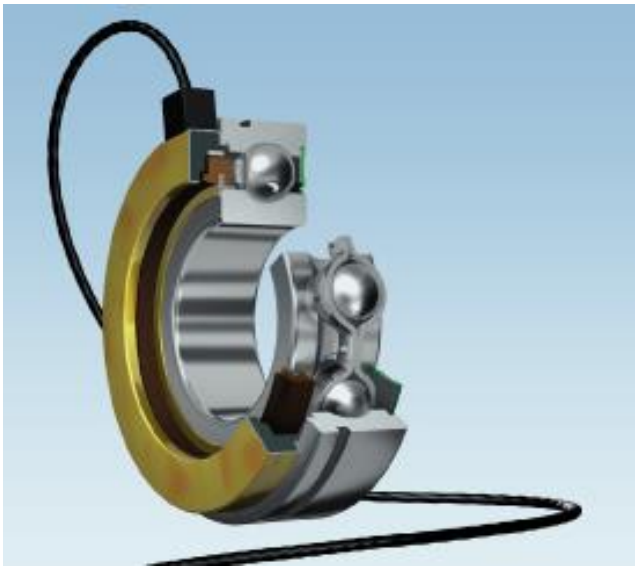


Рис. 1.35. Пример конструкции подшипника
со встроенными датчиками

1.4. Системы управления и приводы мехатронных и робототехнических устройств

Задача управления мехатронным и робототехническим устройством состоит в исполнении желаемого движения рабочего органа, который целенаправленно действует на объект работ, испытывая при этом со стороны внешней среды возмущающее воздействие. Следовательно, в общем случае объектом управления в мехатронике является сложная многосвязная система, в состав которой входят:

- комплекс исполнительных приводов;
- механическое устройство с рабочим органом;
- блок сенсоров;
- объект работ, с которым взаимодействует рабочий орган.

При этом отдельные блоки и устройства могут быть интегрированы в мехатронные модули. Включение в рассмотрение процесса взаимодействия рабочего органа и внешних объектов (например, для операций сборки, механообработки, водоструйной резки) позволяет организовать технологически ориентированный процесс управления, учитывающий характер и специфику данного взаимодействия в конкретно поставленной задаче. Указанная структура объекта управления определяет требования и постановку задачи управления мехатронными системами рассматриваемого класса. Очевидно, что воспроизведение заданных движений мехатронными модулями и роботами основывается на выполнении классических требований теории управления: устойчивости, точности и качества процесса управления. Однако дополнительно необходимо учитывать следующие специфические особенности мехатронных систем:

1. Движение рабочего органа как конечного управляемого звена обеспечивается взаимосвязанными (кинематически и динамически) перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства.

2. Задача управления мехатронной системой должна быть решена в пространстве (т. е. найдены оптимизированные траектории движения всех звеньев, включая рабочий орган) и во времени (т. е. определены и

реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех приводов системы).

3. Для многих технологических задач параметры внешних и возмущающих воздействий, приложенных к рабочему органу и отдельным мехатронным модулям, заранее не определены.

4. Сложность построения адекватных математических моделей мехатронных систем традиционными аналитическими методами (особенно прецизионных многосвязных систем, включающих динамическую модель технологического процесса).

Структурно мехатронные и робототехнические системы являются многомерными и многосвязными системами. Размерность задачи управления в мехатронике определяется числом независимо управляемых приводов системы. В случае общего механизма исходно задается желаемое движение рабочего органа, а реализуется оно совокупными перемещениями всех звеньев.

Отсюда возникают специальные математические, алгоритмические и технические задачи управления. Для планирования заданного движения мехатронной системы необходимо решить обратную задачу о положении механизма. Суть данной задачи состоит в определении требуемых перемещений звеньев системы по заданному закону движения рабочего органа. Проблемным является вопрос организации обратных связей при управлении многозвенными мехатронными системами. Технически наиболее просто устанавливать датчики положения и скорости в приводных модулях. Однако затем необходимо вычислить в реальном времени фактическое перемещение рабочего органа. Причем этот компьютерный расчет требует построения адекватной динамической модели системы с учетом весьма сложных для аналитической оценки факторов:

- всех действующих сил (управляющих моментов приводов, сил трения и диссипации, внешних сил и моментов, центробежных и кориолисовых сил);
- первичных погрешностей системы (упругих деформаций звеньев, люфтов в механических передачах, погрешностей изготовления

и сборки, узлов), которые определяют ее интегральные точностные характеристики в текущей конфигурации;

• переменных параметров объекта управления (приведенных моментов инерции и масс механизма и нагрузки).

Поэтому наилучшим вариантом с точки зрения достоверности получаемой информации о фактическом движении является установка датчиков непосредственно на рабочий орган. Примерами такого подхода могут служить:

• применение систем технического зрения для определения положения рабочего органа и объектов в рабочей зоне (например, на сборочных операциях);

• установка силомоментных датчиков в запястье манипулятора для измерения действующих сил на операциях механообработки;

• использование блоков акселерометров для определения линейных ускорений непосредственно рабочего органа при быстрых транспортных перемещениях.

• повышенные показатели гибкости, робастности и точности управления.

В современных мехатронных системах выделяются четыре уровня управления: интеллектуальный, стратегический, тактический и исполнительный (рис. 1.36). ***Интеллектуальный уровень*** – высший уровень управления в системе. Назначение этого уровня – принятие решений о движении механической системы в условиях неполной информации о внешней среде и объектах работ. Например, рассмотрим ситуацию, когда мобильный робот при движении в трубопроводе получает информацию от системы технического зрения о наличии препятствия. Возможные следующие постановки задачи движения:

• остановить движение и вернуться в исходную позицию;

• определить тип и характеристики препятствия и убрать обнаруженный объект;

• продолжить исполняемое движение, игнорируя наличие внешнего объекта.

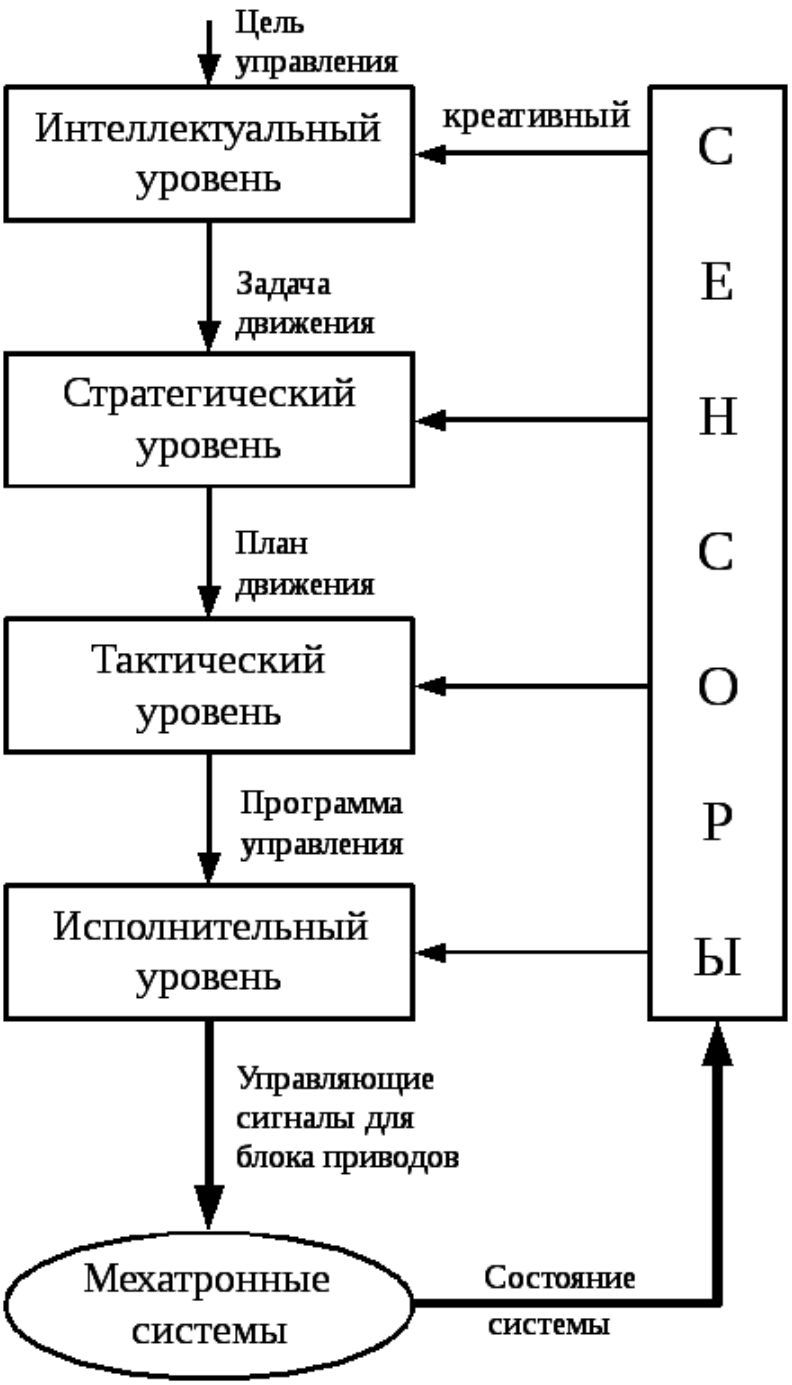


Рис. 1.36. Уровни управления в мехатронных системах

Функции интеллектуального уровня в современных мехатронных системах обычно выполняет человек – оператор либо мощный компьютер верхнего уровня управления. ***Стратегический уровень*** управления предназначен для планирования движений мехатронной системы. Планирование движений предполагает разбиение задачи движения, поставленной интеллектуальным уровнем, на последовательность согла-

сованных во времени элементарных действий и формализацию целей управления для каждого из этих действий. Примерами элементарных действий мобильного робота может служить:

- вывод рабочего органа в заданную позицию;
- захват предмета;
- тестовое движение для определения сил реакции со стороны объекта;
- транспортировка объекта и возвращение робота в исходную позицию.

Формализация целей управления означает, что для каждого из элементарных действий должны быть записаны математические соотношения, выполнение которых обеспечивает успешное выполнение действия. Для технологических роботов на стратегическом уровне решается задача геометрического планирования движения рабочего органа. Стратегический уровень выдает информацию о плане движения и целях управления в форме команд управления движением. Важно подчеркнуть, что структура и форматы языков управления движением существенно отличаются от универсальных языков программирования (типа C++, Паскаль и т. п.), хотя отдельные операторы могут совпадать (например, операторы задания цикла и логические функции). ***Тактический уровень*** выполняет преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня управления, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев механического устройства с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы).

На тактическом уровне необходимо определить обобщенные координаты манипулятора, которые соответствуют желаемым декартовым координатам характеристической точки схвата. Для этого должна быть решена обратная задача о положении манипулятора. Для управления скоростью движения программа управления строится как результат решения обратной задачи о скорости рабочего органа. Для реализации данных алгоритмов устройство компьютерного управления должно выполнять в реальном времени следующие основные функции:

- прием информации от стратегического уровня в форме команд управления движением;
- прием и обработку информации от датчиков положения манипулятора о текущей конфигурации для расчета элементов матрицы Якоби;

• обращение матрицы Якоби;

• умножение обратной матрицы Якоби на вектор-столбец программной скорости рабочего органа;

• выдачу программы управления на исполнительный уровень.

Исполнительный уровень управления предназначен для расчета и выдачи управляющих сигналов на блок приводов мехатронной системы в соответствии с программой управления с учетом технических характеристик силовых преобразователей. Для иерархических систем управления в мехатронике действует принцип, согласно которому по мере продвижения от высших к низшим уровням управления понижается интеллектуальность системы, но повышается ее точность. При этом под «интеллектуальностью» понимается способность системы приобретать специальные знания, позволяющие уточнить поставленную задачу и определить пути ее решения, а под «неточностью» – неопределенность в операциях по решению данной задачи.

Контроллеры движения являются устройствами управления исполнительного уровня согласно принятой иерархии управления движением мехатронных систем. Назначение устройства управления состоит в обеспечении заданных требований по устойчивости, точности и качеству переходных процессов в системе при достижении цели управления движением, которая поступает с тактического уровня управления. При этом необходимо учитывать специфику мехатронных объектов управления. Структурная схема системы управления движением, реализуемая типовым контроллером, представлена на рис. 1.37.

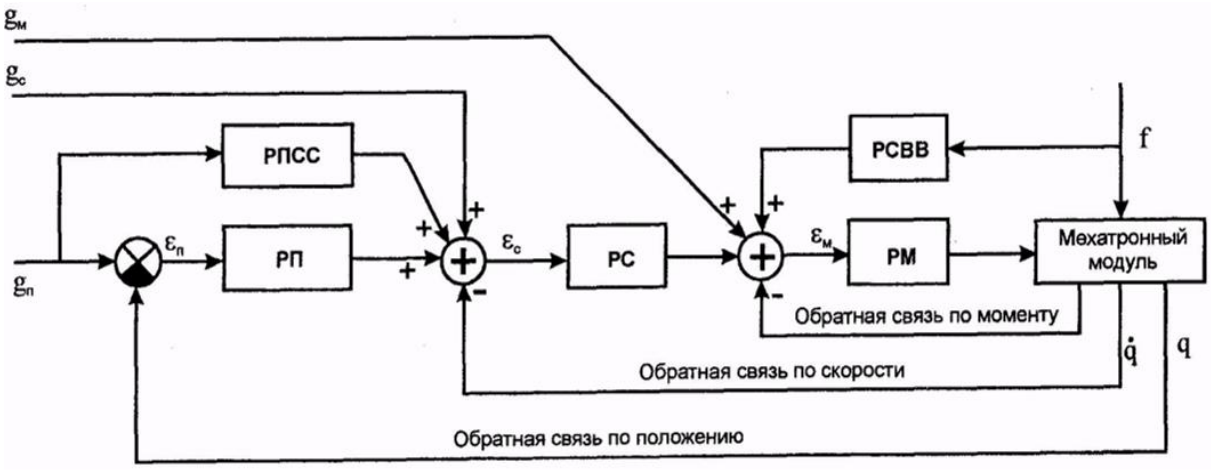


Рис. 1.37. Структурная схема системы управления движением

В состав системы входят пять основных регуляторов: регулятор положения (РП), регулятор скорости (РС), регулятор момента сил или силы (РМ), регулятор прямой связи по скорости изменения управляющего воздействия (РПСС) и регулятор корректирующей связи по возмущающему воздействию (РСВВ). Входными воздействиями для системы могут быть в зависимости от поставленной цели управления управляющие сигналы по положению $q_П$, скорости $q_С$, либо по развиваемому усилию $q_м$. В системе реализуется принцип замкнутого управления, что предусматривает наличие соответствующих обратных связей по фазовым координатам системы. Наиболее общим является алгоритм ПИД-регулирования. Традиционный подход предусматривает, что структура и коэффициенты всех корректирующих устройств определяются при проектировании системы и далее остаются фиксированными в процессе ее эксплуатации. В современных системах управления вид и параметры регуляторов автоматически модифицируются в зависимости от цели конкретного движения и условий, в которых оно фактически осуществляется. Это позволяет адаптировать (приспособить) движение мехатронной системы к начальной неопределенности и изменяющимся условиям работы. Адаптивная настройка регуляторов необходима, если введенные отрицательные обратные связи в исполнительных приводах не способны парировать влияние возмущающих воздействий и изменения параметров (и, возможно, структуры) объекта управления, которые вызывают недопустимое снижение показателей качества управляемого движения. Адаптивные регуляторы по сравнению с традиционными имеют существенно более сложную структуру и техническую реализацию, их проектирование требует решения целого ряда теоретических проблем управления. На рис. 1.38 показан один из часто используемых в исполнительных приводах вариантов адаптивного управления, где параметры регулятора настраиваются управляющим компьютером по эталонной модели. Эталонная модель показывает идеальную желаемую реакцию системы на задающий сигнал g(t). В качестве эталонной модели применяют типовые звенья систем автоматического управления (например, апериодическое звено). Параметры ПИД-регулятора настраиваются так, чтобы минимизировать рассогласование между выходом модели и реальной си-

стемы. Задача контура настройки состоит в том, чтобы свести это рассогласование к нулю за определенное время с гарантией устойчивости переходного процесса.

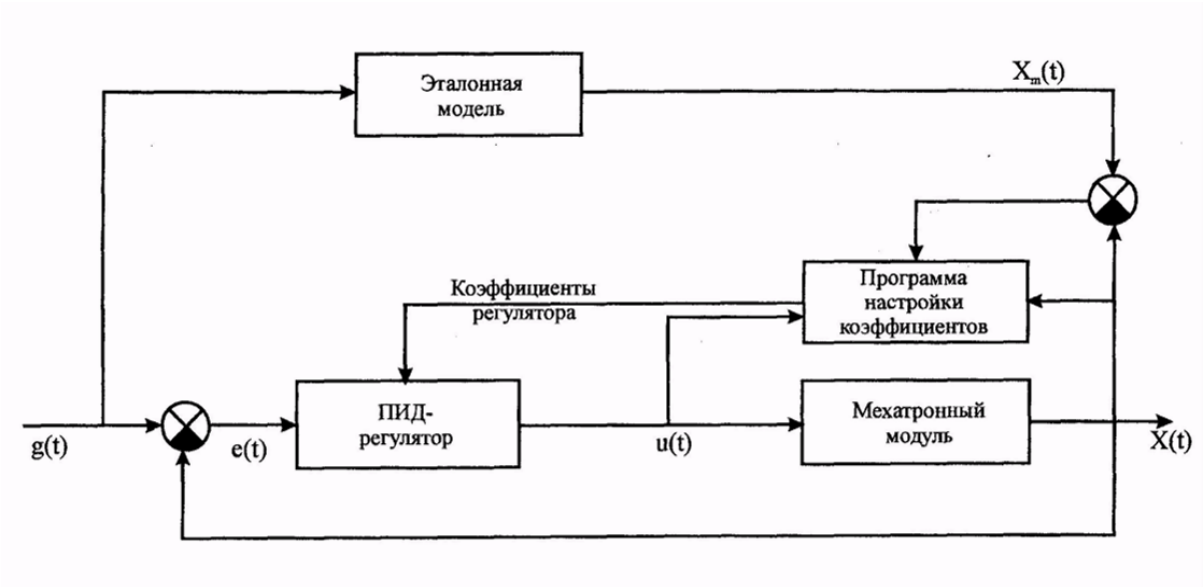


Рис. 1.38. Блок-схема адаптивной системы с эталонной моделью

Управляющий компьютер для реализации адаптивного управления по данной схеме должен в реальном времени решать следующие задачи:

- формировать задающий сигнал для управляемой системы;
- рассчитывать идеальную реакцию по эталонной модели;
- вычислять коэффициенты регулятора в соответствии с программой настройки, определять текущую ошибку и выдавать сигнал управления на вход мехатронного модуля.

Помимо рассмотренной блок-схемы с эталонной моделью известны и другие методы автоматической настройки параметров и структуры регуляторов, например, нечеткий регулятор. Методологической основой для проектирования нечетких регуляторов является концепция нечеткой логики. В основе стандартных современных компьютеров лежит логика «четкого мира». Они работают только с двумя базовыми логическими переменными «Да» и «Нет» и детерминированными числовыми данными, поэтому свойства этого мира описываются

совокупностями нулей и единиц. Однако на практике очень часто приходится иметь дело с неопределенными, нестрогими свойствами объектов и процессов, которые не могут быть формализованы в понятиях «четкого мира». Общий смысл этих понятий нам очевиден, но сделать однозначный вывод о принадлежности конкретного объекта к данному множеству только с помощью слов «Да» и «Нет» зачастую затруднительно, необходимо узнать мнение нескольких экспертов. Английское слово «fuzzy», буквально означающее «ворсистый», «пушистый» – специальный термин, определяющий свойство тканей. Рисунок ворсистой ткани кажется нам размытым, нечетким, неясно очерченным, что соответствует образам «нечеткого мира». Целесообразность применения методов нечеткой логики при управлении мехатронными системами обусловлена особенностями постановки задач управления, которые заключаются в априорной неопределенности возмущающих воздействий, переменности параметров мехатронных объектов управления и в сложности построения аналитических моделей систем. Характерно, что теория нечетких множеств была предложена проф. Л. Заде именно для решения проблем управления сложными техническими системами.

Структурная схема нечеткого регулятора с параметрической адаптацией приведена на рис.1.39. Нечеткий контроллер функционирует на основе экспертной базы знаний и выполняет следующие основные операции:

- преобразование данных о переменных состояния системы в нечеткую форму (операция фазификации), хранение и обработка нечеткой информации;
- выполнение нечетких выводов по лингвистическим правилам управления, заложенным в базу знаний;
- перевод нечетких переменных в четкое представление для управления системой (операция дефазификации).

Для математического представления нечеткой информации используются нечеткие множества, состав объектов которых зависит от мнения экспертов, цели и времени формирования множества. Состав

множества задается с помощью функций принадлежности, имеющих вероятностный характер. Так, выражение mA (X) = C означает, что элемент A принадлежит множеству X с вероятностью C.

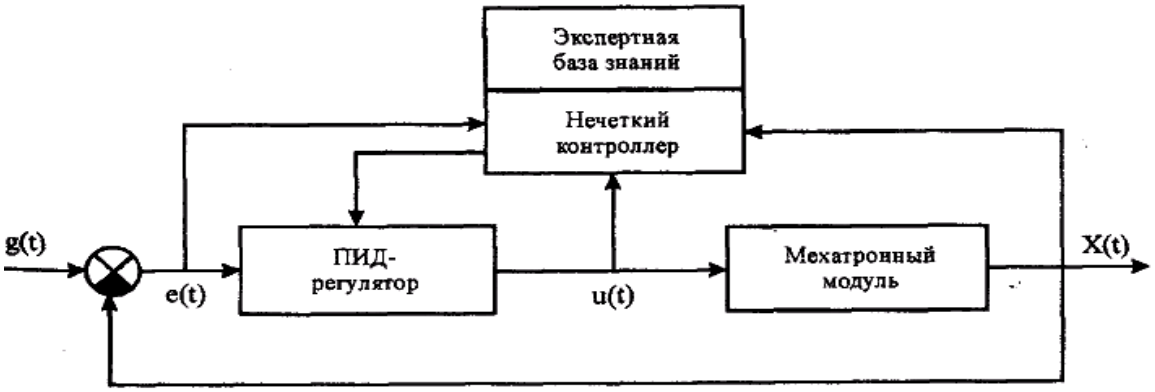


Рис. 1.39. Блок-схема нечеткого регулятора

Функции принадлежности допускают графическую интерпретацию, при этом по оси ординат может откладываться как числовая, так и лингвистическая переменная, причем возможно как непрерывное, так и дискретное представление функции.

В работах, посвященных синтезу систем управления, рассматривается влияние на процесс управления таких фундаментальных ограничений как насыщение, ограничение скорости нарастания входного сигнала, ограниченность полосы пропускания и других. Техника синтеза систем с подобными ограничениями хорошо известна и не является предметом рассмотрения в настоящей работе. В тоже время требование обеспечения высокой плавности и точности, то есть качества движения при выполнении лазерных операций резки или сварки накладывает технологические ограничения на величину скорости и ускорения движения рабочего инструмента в особенности при перемещении по криволинейным траекториям. Несмотря на то, что контурная скорость движения задается программно, целесообразно ввести в структуру привода жесткое ограничение её величины, настраиваемое для каждой операции, ввиду требования гарантированного качества вы-

полнения операции, а также величины ускорения при желательно монотонном характере переходных процессов в манипуляционной системе. Учитывая, что ограничение ускорения является (при постоянных инерционных параметрах) по существу ограничением динамической силы или момента, примем в качестве фундаментальных ограничений на механическую характеристику движения звеньев манипулятора, приведенные на рис. 1.40.

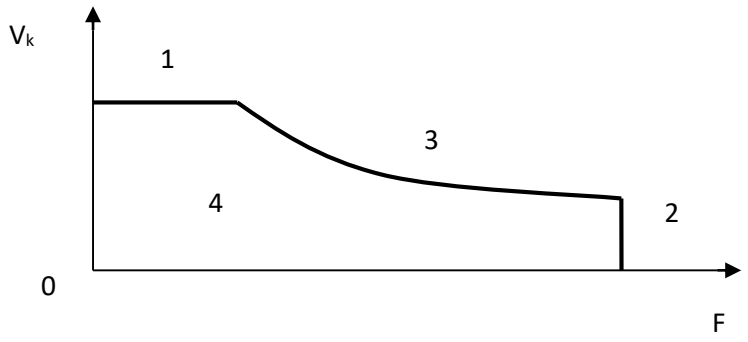


Рис 1.40. Фундаментальные технологические ограничения

На рис. 1.40 обозначено: 1 – ограничение максимальной контурной скорости; 2 – ограничение максимального усилия; 3 – кривая максимальной мощности; 4 – рабочая область; V_k и F – контурная скорость и усилие, развиваемое в приводе перемещения звена манипулятора.

Для обеспечения траекторного движения манипулятора требуется регулируемый электропривод, построенный на базе двигателя постоянного или переменного тока. Учитывая, что в современных технических системах отдается предпочтение переменному току, остановимся на приводе переменного тока, хотя в данном случае этот вопрос не носит принципиальный характер. Современные электроприводы переменного тока, построенные на базе асинхронных или синхронных двигателей и снабженные быстродействующими контроллерами, обладают высоким быстродействием, хорошими регулировочными свойствами и широкими возможностями настройки большого числа параметров. Для асинхронных и синхронных двигателей используют фазовое частотное или векторное (датчиковое или бездатчиковое) токовое

управление, при этом последнее обеспечивает постоянство потокосцепления и наилучшие технические характеристики привода. На рис. 1.41 приведена упрощенная функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением и датчиком скорости. Здесь обозначено: РС - регулятор скорости; $РТ_{max}$ - регулятор максимального тока; РТ – регулятор тока; И – инвертор; АД – асинхронный двигатель; ДТ – датчик фазных токов; ДС – датчик скорости, сигнал о которой часто формируется как производная сигнала энкодера; МД – модем двигателя, служащая для компенсации изменения потокосцепления в функции угла поворота вала двигателя и насыщения магнитной системы.

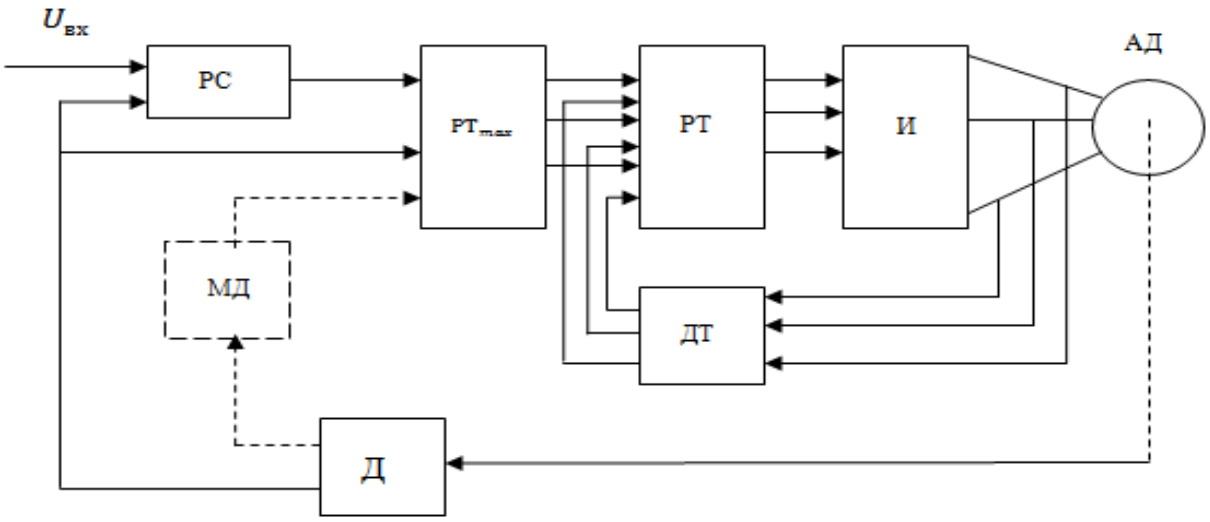


Рис. 1.41. Функциональная схема асинхронного электропривода с векторным управлением

При бездатчиковом управлении сигнал о скорости вращения вала двигателя формируется контроллером в функции скольжения вычисляемого по измеренным значениям фазных токов и напряжений. Близкую к приведенной на рис. 1.41 структуру имеет и электропривод с синхронным двигателем, в котором отсутствует МД и обязательно присутствует датчик угла поворота (энкодер) ротора синхронного двигателя чаще всего с возбуждением от постоянных магнитов и трехфазной статорной обмоткой. Приводы снабжаются системами защиты от

перегрева и перегрузок, а исполнительные двигатели (по желанию заказчика) – встроенными вентиляторами и электромагнитными фрикционными тормозами, служащими для фиксации вала в положениях статического равновесия и аварийном исчезновении питания.

1.5. Структура и состав роботизированных технологических комплексов

Роботы, применяемые в промышленности, получившие наименование промышленные роботы (ПР), подразделяются на технологические, которые выполняют основные технологические операции, и вспомогательные, занятые на вспомогательных операциях по обслуживанию основного технологического оборудования. Комплексы с такими роботами называются роботизированными – роботизированные технические комплексы (РТК). Классификации соответствующих РТК, сложившейся в машиностроении и приборостроении и основанной на следующих основных признаках:

- тип производственного подразделения;
- степень изменения производства, связанная с применением ПР;
- вид технологического процесса;
- количество выполняемых технологических операций;
- тип и количество используемого основного технологического оборудования;
- тип и количество используемых ПР;
- серийность и номенклатура продукции;
- компоновка комплекса;
- принцип управления комплексом;
- степень участия (функции) человека в комплексе.

В табл. 1.2 представлена общая классификация технологических комплексов применительно к машиностроению, основанная на перечисленных выше признаках.

Таблица 1.2 - Классификационные признаки и соответствующие им основные типы технологических комплексов с роботами

№ п/п	Признак	Наименование
1.	Тип подразделения	технологическая ячейка участок линия цех
2.	Степень изменения производства, связанная с применением ПР	Для вновь создаваемого производства: с принципиально новой технологией с новым технологическим оборудованием Для модернизируемого производства: с изменением технологии с модернизацией оборудования с созданием новых ПР
3.	Вид технологического процесса	Комплекс: механообработки холодной штамповки ковки литья прессования пластмасс термической обработки сварки транспортный контроля и испытаний и т.д.
4.	Тип и количество технологического оборудования	С выполнением основных технологических операций: технологическим оборудованием ПР их комбинацией
5.	Серийность и номенклатура продукции	С определенным размером выпускаемых партий продукции без переналадки комплекса С определенным перечнем видов (типов) выпускаемой продукции
6.	Компоновка комплекса	С компоновкой: линейной круговой линейно-круговой по площади объемной
7.	Тип управления	С управлением: централизованным децентрализованным комбинированным
8.	Участие человека	С участием человека: в выполнении технологических операций основных вспомогательных основных и вспомогательных

Тип производственного подразделения. Здесь классификационным признаком служит количество выполняемых технологических операций. Простейшим типом, который лежит в основе более крупных комплексов, является *технологическая ячейка* (ТЯ). В ней выполняется всего одна основная технологическая операция (помимо вспомогательных). При этом количество единиц технологического оборудования и ПР в составе ТЯ не регламентируется. В частности, в ТЯ может совсем отсутствовать технологическое оборудование помимо ПР, когда основную операцию выполняет ПР, или, наоборот, могут отсутствовать самостоятельные ПР, когда последние объединены с основным технологическим оборудованием. Следующим более крупным комплексом является *технологический участок* (ТУ). Он характеризуется тем, что здесь выполняется несколько технологических операций, которые объединены технологически, конструктивно (оборудованием) или организационно (управлением). Эти операции могут быть одинаковыми или различными. Если различные операции технологически последовательно связаны, то такой участок представляет собой *технологическую линию* (ТЛ).

Классификация технологических комплексов по степени изменения производства, связанного с применением ПР. Такое изменение, очевидно, будет максимально для создаваемых новых производств, основанных на новых технологиях и минимально для действующего производства, автоматизируемого на базе серийных ПР. Классификация по виду технологического процесса не исчерпывает перечень последних, а включает только типовые для современного состояния областей применения ПР в машиностроении. Классификация по типу и количеству используемого основного технологического оборудования. Здесь выделены два уже названных выше основных варианта: когда ПР выполняют основные технологические операции (сборку, сварку, окраску и т.д.) или – вспомогательные по обслуживанию основного технологического оборудования. Серийность и номенклатура продукции определяется в данном случае объемом партий продукции, которые можно изготавливать без переналадки комплекса, а номенклатура – широтой перечня выпускаемых видов (типов) продукции. Оба эти показателя

имеют существенное влияние на эффективность применение ПР. В частности, каждый технологический комплекс характеризуется предельными значениями этих параметров, вне рамок которых данный комплекс оказывается экономически невыгодным вплоть до целесообразности перехода от гибких комплексов к специальным автоматам (при большой серийной и узкой номенклатуре) или даже к использованию рабочих вместо ПР (в противоположном случае предельно единичного производства).

В классификации по типу размещения технологического оборудования и ПР приведены основные (базовые) типы компоновок. При простой линейной компоновке оборудование располагается в один ряд (по линии), а при наиболее сложной объемной компоновке – на нескольких этажах (уровнях). Классификация по типу управления включает рассмотренные выше централизованное, децентрализованное и комбинированное управления. Централизованное управление осуществляется устройством группового управления. Децентрализованное управление реализуется с помощью совокупности местных устройств управления, связанных друг с другом с целью взаимной координации. Классификация по степени участия человека включает два случая участия человека в работе: когда человек непосредственно выполняетнекоторые технологические операции (основные или вспомогательные) и когда он участвует в управлении комплексом.

Исходя из большого многообразия применения роботов в промышленном производстве, в качестве конкретных примеров приведем примеры применения РТК в производстве автомобилей на предприятиях ОАО «АВТОВАЗ».

На рис. 1.42. представлен вид РТК дуговой сварки панели приборов. РТК оснащен поворотными столами и кантователями с электромеханическим приводом поперечины панели приборов, для ручной сборки и автоматической дуговой сварки поперечины панели приборов с кронштейнами в сборе. Сварка осуществляется в среде углекислого газа с периодической зачисткой и смазкой горелки через заданное число циклов. Проект был выполнен по всем мировым стандартам с

учетом промышленной безопасности и эргономики. РТК состоит из четырех постов, на которых задействованы семь роботов TUR-15 с современным навесным сварочным оборудованием. Единственная ручная операция – закладка свариваемых деталей. Пост 1 состоит из промышленного робота TUR-15 с комплектом автоматической сварки и поворотного стола с электромеханическим приводом, который имеет пневматический фиксатор для контроля положения. Положение фиксатора (нижнее и верхнее) определяется двумя конечными выключателями. На поворотном столе смонтированы две плиты с фиксирующей оснасткой для сборки свариваемых деталей. Для распознавания плит установлены два конечных выключателя. Робот в исходном положении контролируется стойкой с конечным выключателем.



Рис. 1.42. Вид РТК дуговой сварки панели приборов

Посты 2–4 имеют одинаковый состав, включающий два робота TUR-15, оснащенных комплектами автоматической сварки, и два кантователя с электромеханическими приводами и блочными выключателями, на которых установлены рамы с фиксирующей оснасткой. Посты имеют ограждения, которые являются комплексной системой безопасности от травмирующих факторов исполнительных узлов РТК, а также защищают от воздействия электрической дуги. Ограждения состоят из типовых секций-рамок с проволочной сеткой, стоек, калитки с датчиком контроля, брызгозащитных экранов и светового барьера в зоне загрузки-выгрузки. Поперечина панели приборов – довольно сложное изделие, и ВМЗ является сегодня единственным поставщиком этой детали для семейства автомобилей Lada Kalina, Chevrolet Niva и Lada Granta. Автоматическая линия контактной точечной сварки кузова, предназначенная для сборки и сварки кузова автомобиля представлена на рис.1.43.



Рис. 1.43. Автоматическая линия контактной точечной сварки кузова

Автоматическая линия оснащена 24 роботами, в том числе 20 роботами TUR-150 конструкции ВМЗ, четырьмя роботами KR180L150-2K фирмы KUKA и клещами для контактной точечной сварки, также конструкции ВМЗ.

Посты автоматической линии включают в свой состав следующие типовые конструкции:

- ГЕО-тележка – сварная рама, на которой смонтированы пневмоприжимы, ложементы и фиксаторы для автомобильных деталей с целью создания геометрии основания. Снизу рамы закреплены цепь, служащая для зацепления со звездочками мотор-редукторов, и ролики для движения по направляющим.
- Гидравлический подъемник грузоподъемностью 3 т предназначен для перемещения ГЕО-тележки. В состав подъемника входит сварная рама, на которую установлен конический мотор-редуктор со звездочкой на выходном валу.
- Стационарный стол – сварная двухуровневая металлоконструкция, на которой установлены направляющие. Для перемещения ГЕО-тележки по направляющим на верхнем уровне смонтированы два мотор-редуктора: один стационарно, другой – на откидном кронштейне. Для фиксации ГЕО-тележки в положении сварки предусмотрены откидные упоры и пневмоцилиндр дожима. На нижнем уровне для возврата ГЕО-тележки на пост также смонтирован мотор-редуктор со звездочкой на выходном валу.

В состав постов также входят роликовые столы с электромеханическим приводом, устройства для укладки и подъема скидов, перекладчики основания, которые имеют электромеханические приводы на перемещение между постами и подъем-опускание, а также пневмопривод зажима основания. Для безопасности работы операторов предусмотрены фотобарьеры. При этом собственно сварку выполняют напольные роботы и роботы, установленные на портале.

РТК лазерной резки объемных кузовных деталей и раскроя листового материала (металла, пластмасс и т. д.) приведен на рис 1.44.



Рис. 1.44. РТК лазерной резки объемных кузовных деталей
и раскроя листового материала

Комплекс состоит из промышленного робота ПР-125, двухпозиционного поворотного стола, комплекса ограждений и электрооборудования. РТК работает следующим образом. Операторы вручную загружают заготовку детали на обе планшайбы поворотного стола, закрывают ворота ограждения и нажимают кнопку «Пуск». Робот начинает резку детали по программе. По окончании резки он возвращается в исходное положение, операторы открывают ворота, разгружают готовую деталь и загружают следующую заготовку. Далее циклы повторяются.

РТК для нанесения жидкой прокладки на корпус картера сцепления для механосборочного производства представлен на рис. 1.45.



Рис. 1.45. РТК для нанесения жидкой прокладки на корпус картера сцепления

Основным исполнительным органом РТК является программируемая рука робота TUR15 с шестью степенями свободы, установленная на подставке манипулятора. Нанесение жидкой прокладки на картер сцепления производится через клапан подачи мастики, куда мастика подается от насосной станции. Точное позиционирование паллеты вместе с заготовкой в зоне обработки, а также отсечение транспортного потока обеспечивают два гидроцилиндра устройства фиксации и подъема, установленные на сварном основании. Для дублирования работы робота TUR-15 при его отключении введен пост ручного до нанесения мастики. В пост входит ручной стопор, ложемент под картриджи и ручной пистолет с пневмоуправлением. Подача паллет с заготовками и отвод их из зоны работы робота TUR-15 производится цеховым транспортом.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение термина «мехатроника».

2. Что такое мехатронный объект?

3. Каким мехатронным уровням может соответствовать технический объект? Приведите примеры.

4. Что такое «устройство»?

5. Мехатронность технических объектов, что это такое?

5. Какие основные принципы положены в основу построения мехатронных систем?

6. Какие устройства могут являться составной частью машин с компьютерным управлением движением?

7. Какие функции выполняет устройство компьютерного управления в мехатронной системе или модуле?

8. Объясните суть мехатронного подхода к проектированию.

9. Какие основные преимущества мехатронного подхода при создании машин с компьютерным управлением по сравнению с традиционными средствами автоматизации?

10. Что такое мехатронный модуль движения?

11. Приведите пример мехатронного модуля вращательного движения.

12. Приведите пример мехатронного модуля поступательного движения.

13. Какова структура мехатронного модуля движения?

14. В чем заключаются преимущества применения линейных двигателей?

15. Объясните структуру мехатронного моторшпинделя.

16. Приведите классификацию информационных устройств и систем используемых в мехатронике и промышленных роботах.

17. Приведите примеры датчиков внутренней информации устройств мехатроники и робототехники.

18. Приведите примеры датчиков внешней информации устройств мехатроники и робототехники.

19. Объясните принцип работы пъезодатчиков.

20. Назовите уровни управления в мехатронных системах.

21. Объясните типовую структуру системы управления движением.

22. Объясните структуру адаптивной системы с эталонной моделью.

23. В чем заключается особенность применения нечеткого регулятора в системах управления?

24. Приведите структуру современного электропривода переменного тока, используемого в мехатронных модулях движения.

25. Приведите классификацию роботизированных технологических комплексов.

Глава 2. ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ МОНТАЖНЫХ РАБОТ ОБОРУДОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1. Технологическая подготовка роботизированного производства и проведение монтажных работ

Правила выбора оборудования и средств технологического оснащения, комплектующих роботизированную технологическую систему изложены в рекомендациях Р 50-54-85-88**.** Основное технологическое оборудование выбирают по параметру, в наибольшей степени выявляющему функциональное назначение и технические возможности данного типа оборудования. При разработке усовершенствованного технологического процесса выбор нового или сохранение действующего оборудования обусловлены увеличением объема выпуска продукции, повышением качества изделий, снижением уровня издержек, обеспечением гибкости производственного процесса, улучшением условий труда, техники безопасности и промышленной санитарии. Оборудование, входящее в состав РТС, по возможности, должно быть однотипным, так как содержание такого оборудования обходится дешевле. При проектировании новых моделей следует придерживаться принципов агрегатного построения и широкой унификации с оборудованием, действующим на предприятии. Прежде чем приступить к выбору моделей оборудования для проектируемого технологического процесса, необходимо оценить, можно ли использовать действующее оборудование в новых условиях. Должна быть проведена оценка физического состоя-

ния оборудования и его технических показателей. При списании устаревшего оборудования следует определить технико-экономическую целесообразность использования в структуре РТС его отдельных деталей и механизмов. Основное технологическое оборудование, предназначенное для выполнения конкретных операций (станки, прессы и т. д.), должно отвечать требованиям, сформулированным в ГОСТ 26.228 – 85. Выбор моделей ПР должен сопровождаться расчетом экономической эффективности его применения в конкретных условиях работы РТС. В зависимости от условий производства РТС могут комплектоваться ПР различных типов, выбранными из числа существующих моделей, или конструкциями, специально разработанными для конкретных целей. При отсутствии ПР с необходимой технической характеристикой, одновременно с заданием на РТС необходимо разработать техническое задание на проектирование и создание новой конструкции ПР. Выбор или разработка захватных устройств и инструмента, комплектующих ПР, осуществляется после разработки технологического процесса. Конструкции оснастки и вспомогательных устройств, входящих в состав РТС, разрабатывают с учетом материала, массы, формы и типоразмеров деталей; параметров и конструктивных особенностей поверхностей изделия, влияющих на конструкцию оснастки, в том числе базовых поверхностей для установки в рабочей зоне оборудования и поверхностей для захвата рукой робота; технологических схем оборудования и фиксации деталей; характеристик основного технологического оборудования; характеристик ПР или другого загрузочного устройства; характера ориентации детали перед установом ее в рабочую зону оборудования, т. е. перед захватом ее рукой ПР (желательно, чтобы на позицию загрузки заготовка приходила ориентированной соответственно ее положению в рабочей зоне оборудования); серийности производства. Технологическую оснастку выбирают в соответствии с ГОСТ 14.301-83. Порядок составления, согласования и утверждения технического задания на разработку новых конструкций технологической оснастки обусловлен ГОСТ 15.001--73. Правила выбора средств технологического оснащения процессов технического контроля обусловлены ГОСТ 14.306-73.

Анализ действующего производственного процесса. До анализа должна быть установлена характеристика данного производства, а именно:

- тип производства (массовое, крупносерийное, среднесерийное, мелкосерийное);
- организационные методы производства (поточные однопредметные и многопредметные, непоточные);
- характер перемещения деталей по технологическому процессу (непрерывный, прерывистый);
- специфические особенности данного производства (вредные условия труда, обработка специальных материалов и др.).

В результате анализа действующего производства должны быть определены:

- номенклатура деталей, обработка которых может быть осуществлена с применением ПР;
- характеристики деталей и вид заготовок;
- неиспользованные резервы и узкие места производственного процесса; выявлены потери, возникающие вследствие технических и организационных недостатков;
- состав основного технологического оборудования и технические требования по его модернизации либо замена новыми моделями оборудования;
- специфические особенности действующего производственного процесса, от которых зависит повышение его эффективности;
- пути изменения организационной структуры производства;
- пути усовершенствования технологического процесса обработки, механизации или автоматизации отдельных операций;
- средства механизации и автоматизации труда, повышающие производительность, в том числе путем применения ПР;
- число основных и вспомогательных рабочих, участвующих в производственном процессе обработки отобранной номенклатуры деталей до и после автоматизации;
- планировка и размеры производственных площадей, занимаемых оборудованием до и после автоматизации;
- методы организации и средства межстаночного транспортирования и складирования заготовок, полуфабрикатов и готовых деталей до и после автоматизации;
- методы контроля размеров и точности отобранной номенклатуры деталей до и после автоматизации;

• характеристика отходов обработки и методы их удаления до и после автоматизации.

Предложения по применению ПР должны быть обоснованы результатами анализа существующего производственного процесса и предварительной оценкой ожидаемого экономического эффекта. При подготовке заявки и разработки технического задания на создание РТС следует сформулировать конкретные цели проведения работы, указать состав роботизированной технологической системы (комплекс, участок, поточная линия, цех и т. п.), ее назначение, характер связи с основным производством (в том числе с организацией его управления и транспортными потоками) и определить источники ожидаемого экономического и социального эффекта. Анализ и отбор деталей, подлежащих обработке на РТС, производят в соответствии с рекомендациями, приведенными в ГОСТ 14.306-73. При отборе деталей следует руководствоваться также положениями, учитывающими правила обеспечения технологичности конструкции изделий, а также ГОСТ 14.324-84 ЕСТПП, определяющим правила выбора объектов роботизации. В результате отбора и группирования деталей по конструктивно-технологическим признакам, обеспечивающим типизацию технических и организационных решений в процессе производства, устанавливают детали-представители с общими для каждой из указанных групп признаками, для обработки которых требуется наибольшее количество основных и вспомогательных операций, характерных для изделий этой группы. Применительно к деталям-представителям в дальнейшем проводят анализ действующего и разработку нового технологического процесса. Анализ производственного процесса, разработка предложений по его рационализации и автоматизации операций (в том числе с помощью ПР) должны предшествовать работам по составлению заявки и технического задания на создание РТС. Анализу можно подвергнуть как весь производственный процесс в целом (от получения заготовок и способа подачи их на обработку до выпуска готового изделия), так и его составные части и даже отдельные операции. Анализ выполняют с целью выявления особенностей производства данного изделия на Конкретном предприятии, выявления неиспользованных резервов и узких мест, разработки рекомендаций по повышению рентабельности производства и сокращению трудовых затрат путем рационализации, механизации и автоматизации труда (в том числе и с помощью ПР). Для

этого необходимо весь процесс расчленить на простейшие составляющие элементы и подвергнуть их всестороннему критическому анализу, в результате которого должны быть разработаны экономически обоснованные предложения по совершенствованию процесса. Анализ технологических процессов производят применительно к изготовлению деталей-представителей на основе обследования процесса на предприятии заказчика. Для облегчения техники работы и обеспечения единообразия сбора и обработки информации можно рекомендовать применение графических схем, отображающих технологические процессы обработки деталей. Каждая операция может производиться с участием или без участия рабочего (автоматически). С помощью условных обозначений, приведенных в таблице, строят графическую схему любого производственного процесса.

Монтажу систем автоматизации и роботизации должна предшествовать подготовка в соответствии со СНиП 3.01.01-85. Подготовкой производства монтажа называется разработка и осуществление взаимоувязанных организационных, технических и технологических, планово-экономических и финансовых документов и мероприятий, обеспечивающих эффективное выполнение работ в установленные сроки при заданных технико-экономических показателях. На стадии подготовки производства монтажа должны быть выполнены следующие мероприятия: рассмотрена и укомплектована документация для монтажных работ; составлены накопительные ведомости на трубопроводы и металлоконструкции, материалы; оформлены заказы на изготовление конструкций и заготовок, а также задания на разработку ППР и чертежей металлоконструкций; проверена правильность сметной документации и уточнены объемы работ; разработаны, согласованы, утверждены и выданы исполнителям проекты и схемы производства работ, технологические карты и другая документация по производству, механизации и сдаче монтажных работ; составлены графики производства работ и обеспечения их материально-техническими ресурсами; обеспечение монтажных зон, участков монтажными кранами и механизмами, инструментом и приспособлениями, такелажным оборудованием и оснасткой; определен порядок поставки оборудования и его подачи в монтажную зону, установки и закрепления его на фундаментах; проведен анализ монтажной технологичности оборудования; подготовлена монтажная площадка и др. К подготовительным монтажным работам

относят: приемку и подготовку оборудования к монтажу; приемку строительной готовности монтажной зоны; предмонтажное укрупнение оборудования; установку фундаментных болтов. При приемке оборудования в монтаж проверяют: комплектность его по упаковочным листам и комплектовочно-отгрузочным ведомостям; его соответствие заводским чертежам и техническим условиям, исправность; наличие пломб. Результаты приемки оборудования в монтаж закрепляются приемосдаточным актом. Акты подписывают представители заказчика, монтажной организации и генерального подрядчика на строительство объекта, а при необходимости и завода-изготовителя. В подготовку оборудования к монтажу входят: расконсервация и очистка оборудования; ревизия его; подготовка материалов и комплектующих изделий (прокладок, сальниковых набивок, уплотняющих манжет, колец, герметизирующих составов и др.). Расконсервация - это удаление консервационных смазок, лакокрасочных и других защитных покрытий с поверхностей оборудования. При расконсервации, в зависимости от примененного метода консервации, используют соответствующие способы и материалы

Предмонтажная ревизия - это комплексная проверка состояния оборудования и устранение повреждений, вызванных хранением машин и агрегатов на складах сверх нормативных гарантийных сроков, предусмотренных техническими условиями на их изготовление и поставку. При отсутствии гарантийного срока ревизия производится через год. Предмонтажная ревизия предусматривает расконсервацию оборудования; разборку его для расконсервации и осмотр вращающихся и движущихся деталей; удаление коррозии; посторонних частиц с последующей промывкой, протиркой и консервацией обработанных поверхностей; проверку состояния (сохранности) изделий; замену антикоррозионных смазок рабочими, прокладок, сальниковых набивок и мелких деталей (подшипников, питательных трубок, масленок, пробок и т.п.); исправление мелких (неконструктивных) дефектов, шабрение посадочных мест подшипников, трущихся поверхностей, шлифование шеек и цапф валов; перемещение и кантовку оборудования, связанных с ревизией; последующую сборку оборудования.

2.2. Монтаж механических систем роботов и станков

Промышленные роботы поставляются заводу-потребителю в виде отдельных сборочных единиц, упакованных в тару. При транспортировании этих сборочных единиц необходимо учитывать руководство по эксплуатации ПР, в котором приводятся схемы разделения на сборочные единицы, методы их транспортирования и места зачаливания грузов. При распаковке ящиков, в которых размещаются отдельные части ПР, сначала снимают верхний, а затем боковые щиты. При этом следует соблюдать необходимые меры предосторожности, чтобы не повредить изделие. До распаковки узлов необходимо проверить наличие сопроводительной документации и ознакомиться с ее содержанием.

Монтаж механических систем ПР является одним из первых этапов проведения монтажных работ, который обеспечивает установку ПР в проектное положение и закрепление его на месте эксплуатации. Поскольку ПР работает в комплексе с другим оборудованием, особое внимание следует уделять точности установки ПР и сохранения его пространственного положения в процессе работы.

В зависимости от способа установки ПР подразделяются на: настольные или встраиваемые в оборудование; напольные; подвесные с расположением на портале или консольном монорельсе; с подвижным основанием; мостовые.

Наиболее просто осуществляется монтаж механических систем (манипуляторов) настольных или встраиваемых в технологическое оборудование ПР. Масса их манипуляторов не превышает 40 кг. Манипуляторы устанавливаются на кронштейне, конструкция которого определяется видом технологического оборудования и посадочными размерами манипулятора. Монтаж напольных и подвесных манипуляторов осуществляется на фундаменте. Фундаменты относятся к строительным конструкциям, поэтому допуски на их размеры значительно выше требуемой точности установки ПР. В связи с этим монтаж ПР непосредственно на фундаментах почти не производится и для достижения требуемой точности установки используются промежуточные элементы (клинья, регулировочные башмаки), устанавливаемые между

фундаментом и опорной поверхностью ПР. На конструкцию фундамента влияют масса и габариты ПР, режим их работы, характер воздействия нагрузок на фундамент (вибрация, ударные нагрузки т. п.), характер связи ПР с другим оборудованием комплекса. Фундаменты чаще всего выполняются в виде бетонных, железобетонных или кирпичных блоков. Размеры основания (площадь) определяются исходя из величины допустимого удельного давления па грунт из следующего соотношения: $S=Q/o_z$ при $o_z < p_д$, где S- площадь основания фундамента, $м^2$; Q-нагрузка на основание фундамента, слагаемая из массы фундамента, массы ПР с учетом максимальной грузоподъемности, Н; o_z -давление подошвы основания фундамента на грунт, Па; $p_д$ -допустимое давление на грунт (берется из справочника по механике грунтов), Па.

Для обеспечения требуемой точности проведения монтажных работ на фундаментах и опорных частях здания закрепляются оси и отдельные точки, определяющие положение оборудования в пространстве. Совокупность продольных и поперечных осей, высотных точек, служащих для установки и проверки положения ПР, околороботного и технологического оборудования, называется геодезическим обоснованием монтажа. Монтажные оси и высотные отметки подразделяются на рабочие и контрольные. По рабочим осям и отметкам устанавливают и выверяют оборудование, а по контрольным контролируют положение рабочих осей и отметок относительно геодезического обоснования монтажа. Контрольные монтажные оси и отметки закрепляются на монтажной площадке с помощью плашек (положение осей) и реперов (высотные отметки). Плашки (рис. 2.1, а) должны иметь рабочую поверхность не менее 30*150 мм. Положение оси на верхней поверхности плашки отмечается точкой, выбиваемой керном. Кернение производят с точностью +- 0,5 мм. Вокруг осевой точки кернекнием наносится треугольник, направленный одной из вершин по оси, Репером (рис. 2.1, 6) обычно служит стальной стержень с полукруглой головкой. Верхняя часть репера устанавливается на заданной высоте с точностью +- 2 мм. Дальнейшие геодезические измерения производят установкой нивелирной рейки на репер.

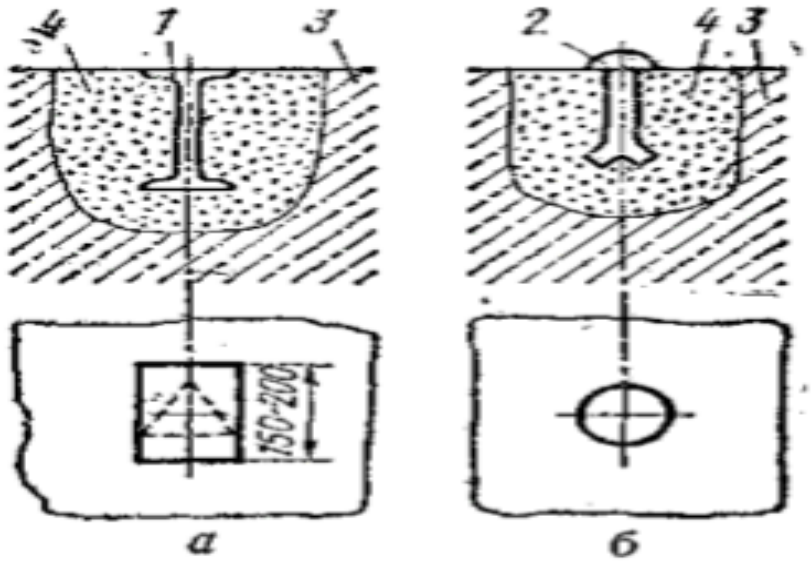


Рис. 2.1. Закрепление монтажных осей и отметок:
а - с помощью плашки, б – с помощью репера (1- плашка,2 – репер, 3 – фундамент, 4 – заливка фундамента)

Рабочие оси и отметки, по которым производится установка оборудования, служат сравнительно недолго и закрепляются, главным образом, при помощи струн и отвесов относительно контрольных отметок. До недавнего времени установка закладных частей фундамента (болтов, анкерных плит, рам, опор и т. п.) выполнялась строительными организациями. Однако опыт монтажа технологического оборудования показал, что наилучшие результаты достигаются при установке закладных частей монтажной организацией с использованием монтажных приспособлений, которые обеспечивают точную установку болтов в плане и по высоте, неизменное их положение во время бетонирования. Основными частями монтажных приспособлений являются каркас и кондукторы. Каркас собирают из типичных стоек и прогонов. Стойки опираются на пластины, залитые в специальные бетонные тумбочки, которые возводятся одновременно с бетонной подготовкой фундамента. На балках каркаса устанавливают кондукторы, выполненные из листового материала, уголков или швеллеров и имеющие отверстия по разметке оснований ПР. Диаметры отверстий в кондукторе должны на 1-1,5 мм превышать диаметры фундаментных болтов. Кондукторы выверяют относительно осей фундамента и приваривают к каркасу. В от-

верстия кондуктора устанавливают анкерные болты н производят заливку пространства под кондуктором бетоном. Для образования закладные болты в отверстия кондукторов устанавливают металлические пробки. В зависимости от способа установки и крепления в фундаменте болты могут быть: глухими или заливными, заделанными в бетонном основании; съёмными, устанавливаемыми в фундаменте без сцепления с бетоном и анкеровкой при помощи, например, закладных плит; устанавливаемыми в готовый фундамент ввертыванием в предварительно заделанные фундаментные гайки и т. п. Диаметр фундаментных болтов с учётом предварительной затяжки рассчитывают по формуле $d_1=\sqrt{1,35P (4/\pi [o_p])}$, где d_1 – внутренний диаметр резьбы болта, м; 1,35– коэффициент, учитывающий предварительную затяжку болта; Р- вертикальная составляющая внешних сил, действующих по оси болта, Н; $[o_p]$ -допустимое напряжение на растяжение (для углеродистой стали 70-80 Н/мм^2).

Наименьшие значения длин фундаментных болтов (мм) в зависимости от материала фундамента приведены ниже:

Болт ….. М12 М14 М16 М18 М20 М24 М30

Материал фундамента

Бетон … 120 140 170 190 220 260 320

Кирпич .. 130 160 200 200 240 300 360

В зависимости от типа и грузоподъёмности ПР поступают в монтажную зону в собранном и разобранном видах в заводской упаковке. При распаковке первоначально снимается верхний щит упаковочных ящиков, а затем боковые. Необходимо следить за тем, чтобы не повредить ПР распаковочным инструментом. Перед установкой ПР открытые, а также закрытые кожухами и щитками обработанные неокрашенные поверхности необходимо очистить от антикоррозионных покрытий. Для этого используются деревянные лопаточки, которыми первоначально снимается толстый слой покрытий или смазки. Оставшаяся смазка удаляется с поверхностей чистыми салфетками, смоченными в бензине или уай-спирте. Во избежание коррозии очищенные поверхности рекомендуется покрыть тонким слоем индустриального масла.

Порядок установки ПР в проектное положение указывается в техническом описании и инструкции по эксплуатации, входящих в комплект поставки. Перед строповкой ПР и установкой его непосредственно на фундамент необходимо заблокировать звенья подвижности,

исключив тем самым возможность их самопроизвольного перемещения при транспортировке ПР мостовым краном или другим грузоподъемным механизмом. Схемы строповки указаны в руководствах по монтажу. Под стропы необходимо подкладывать деревянные прокладки, не допуская касания строп чисто обработанных, шлифованных и пришабренных поверхностей, а также тонких и хрупких деталей. Перед установкой на фундамент нижнюю поверхность основания необходимо тщательно очистить от грязи, предохранительной краски или смазки. На фундамент устанавливается временные или постоянные опорные элементы, служащие для выверки и закрепления основания ПР. Плавным опусканием ПР отверстия основания фундаментные болты и проверяют их взаимное расположение. При дальнейшем опускании необходимо следить за прохождением через отверстия резьбовой части болтов, не допуская смятия витков резьбы. При соприкосновении опорной поверхности основания ПР с опорными элементами следует обратить внимание на ее равномерное прилегание во всех опорных точках. После выверки ПР на месте установки производится предварительная затяжка фундаментных болтов, подливка и окончательная (через 2-3 суток) затяжка. Методы выверки ПР описаны ниже.

Монтаж ПР, поставляемых в разобранном виде

В разобранном виде поставляются потребителю ПР, имеющие большие габариты и массу, портальные, а также специальные различного назначения. В разобранном виде поставляются также, как правило, ПР модульного исполнения. Например, электромеханический робот модульного типа РПМ-25 состоит из группы модулей, включающих стационарное и подвижное основание в напольном или подвесном исполнении, модули сдвига, подъёма, одинарного и двойного качания, радиального хода, руки трех модификаций (с одной, двумя и тремя степенями подвижности). Путем комбинации модулей можно получить 95 модификаций ПР. В стационарном исполнении все модули ПР монтируются на неподвижном основании, а в подвижном на тележке, перемещающейся по напольным или подвесным направляющим.

Монтаж ПР, поставляемых в разобранном виде, необходимо начинать установки основания, которая осуществляется аналогично, как при монтаже ПР, монтируемых в собранном виде. После выверки

основания и проверки правильности его установки производят затяжку фундаментных болтов и монтаж остальных модулей ПР (Рис.2.2).

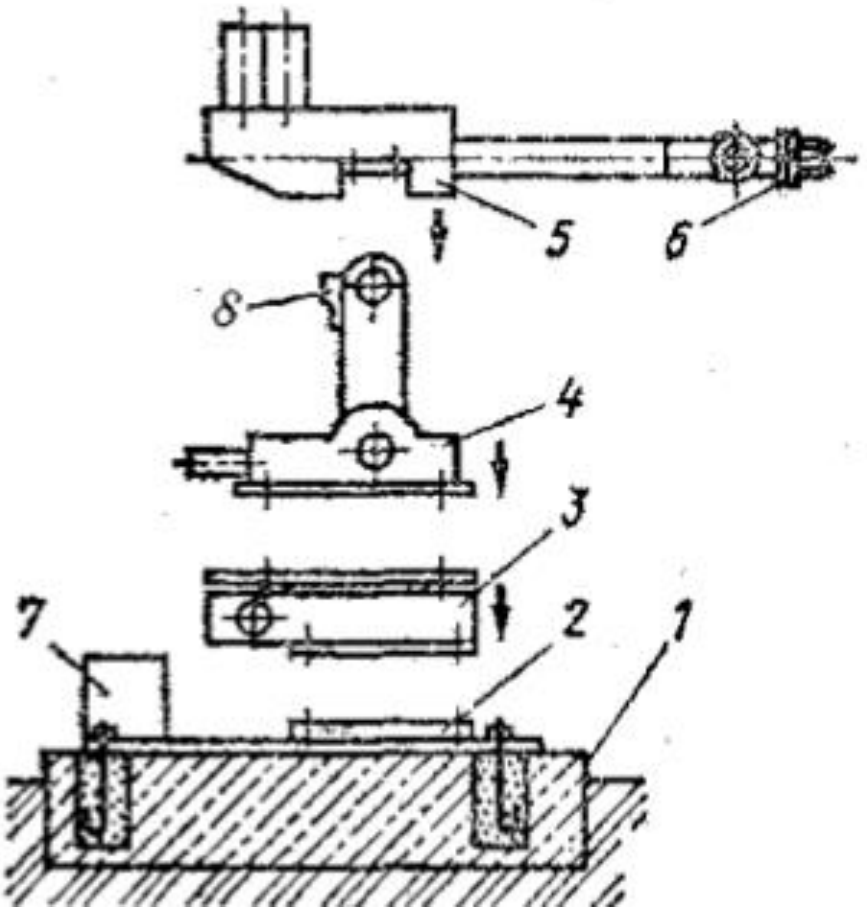


Рис. 2.2. Порядок монтажа модулей манипулятора РПМ-25

Модуль «основание неподвижное» 2 представляет собой плиту с приваренными к ней платиками для установки последующих модулей. На плите установлена система подготовки воздуха 7, обеспечивающая питание сжатым воздухом всех модулей ПР. Необходимо отметить, что в роботе РПМ-25 предусмотрена транзитная передача сжатого воздуха и сигналов между модулями.

Вначале на фундаменте 1 монтируют основание 2, которое через отверстие в плите закрепляют анкерными болтами. Правильность установки основания контролируют уровнем. Затем с помощью мостового крана или тали на основание 2 устанавливают модуль поворота 3. Модуль содержит неподвижную и подвижную части, кинематически свя-

занные через червячный редуктор. Неподвижной частью модуль устанавливают на платики основания, при этом необходимо обеспечить совпадение осей крепежных отверстий. Особое внимание следует уделять наличию резиновых уплотнений в канале воздухопровода между основанием и неподвижной частью (корпусом) модуля поворота. После затяжки крепежных болтов внутреннюю часть модуля поворота закрывают ограждением. Контроль параллельности подвижной части (стола) модуля поворота 3 осуществляется с помощью уровня во взаимно-перпендикулярных направлениях.

На подвижной части модуля поворота 3 устанавливается модуль двойного качания 4, который имеет два исполнительных звена, вращающихся относительно параллельных горизонтальных осей. Модуль качания 4 также обеспечивает транзитную передачу сжатого воздуха к последующим модулям. Для этого на стыковочной поверхности модуля имеется подводное отверстие. При установке модуля необходимо убедиться в наличии резинового уплотнения между отводным отверстием стола 3 и подводным отверстием модуля 4, совместить оси крепежных отверстий и закрепить модуль 4 на столе модуля 3 болтами. Рука 5 манипулятора РПМ-25 устанавливается в расположенной в верхней части стойки модуля двойного качания 4 люльке 8. Для этого базовый корпус руки имеет стыковочные поверхности и крепёжные отверстия. При установке руки также необходимо следить за наличием и правильностью установки резинового уплотнения воздухопровода между отводным отверстием люльки и подводным отверстием руки. Крепление руки 5 к люльке 8 осуществляется четырьмя болтами.

Последним устанавливается захватное устройство 6. Торцевая стыковочная поверхность ориентирующей головки руки 5 и стыковочная поверхность захвата 6 выполнены таким образом, что при подаче сжатого воздуха обеспечивается автоматическое крепление захвата к руке с помощью замка с шариками. Сигнал о наличии захвата снимается с конечного выключателя и подаётся в систему управления ПР.

После монтажа манипулятора производятся установка системы управления, подключение сжатого воздуха, электропитания и осуществляется наладка и опробование работы ПР на холостом ходу.

Специфические требования, связанные с порядком установки опорной системы, предъявляются к монтажу портальных и мостовых

ПР. Как правило, опорная система должна устанавливаться с повышенной точностью. Так, опорные колонны устанавливаются в вертикальной плоскости по отвесу или уровню (цена деления шкалы уровня 0,05 мм; погрешность установки не более трех делений), а в горизонтальной плоскости по струне (отклонения от струны не более 0,5 мм на длине 1 м). Монорельсы монтируют таким образом, чтобы погрешность их установки в вертикальной плоскости не превышала 0,1 мм. Погрешность установки в горизонтальной плоскости измеряют посредине пролета монорельса; она не должна превышать 1 мм на длине 1 м. Если монорельс составной, то после завершения его монтажа не допускаются перекосы направляющих в месте стыков. Системы программного управления ПР проверяют в соответствии с инструкцией по эксплуатации применяемого устройства.

Последовательность монтажа станков в станочных системах следующая:

• разметка и изготовление фундамента под станок в соответствии с чертежом проекта;

• завоз оборудования и предварительная расстановка его на фундаментах; завозят и монтируют основное технологическое оборудование, контрольные и транспортные устройства, магазины, стеллажи и др. его распаковка, технический осмотр и составление акта техосмотра;

• удаление с оборудования средств противокоррозионной защиты (керосином или бензином) и покрытие его тонким слоем чистого масла;

• установка оборудования в горизонтальной и вертикальной плоскостях с «привязкой» к колоннам (установить на фундамент станину станка и выверить уровнем ее положение);

• закладка в отверстия фундамента фундаментных болтов, их заливка цементным раствором и (после его затвердевания) затяжка болтов;

• установка на фундамент станины станка и выверка уровнем ее положения;

• монтаж станка и окончательная выверка его положения;

• заливка бетоном фундаментных болтов, выдержка бетона и затяжка гаек фундаментных болтов;

• установка гидростанций, воздухоочистительных станций, шкафов электрооборудования, стендов и аналогичного оборудования согласно указаниям в фундаментном чертеже;

• укладка в полу коммуникаций, присоединение их к оборудованию;

• разводка коробов, трубопроводов, гидросистем, электропитания, сжатого воздуха и прочих коммуникаций, размещаемых над полом;

• закладка в короба трубопроводов, электропроводки и соединение их с оборудованием, шкафами электрооборудования и пультами; прозванивание (проверка правильности соединения); выполнение работ по заземлению оборудования.

• обкатка станка вхолостую, испытания под нагрузкой и проверка на точность;

• смазка станка и его пробный пуск при соблюдении правил техники безопасности;

• составление акта испытания и акта на приемку из монтажа и сдачу в эксплуатацию оборудования.

Перед установкой станка смывают антикоррозийное покрытие, пыль и грязь керосином. Механизмы станка промывают бензином, насухо вытирают и покрывают тонким слоем машинного масла. Точность и долговечность станков зависят от правильности установки их на фундаменты. Для руководства при установке станка служит установочный чертеж, на котором указаны размеры наибольшей площади для установки и обслуживания. Эти размеры обеспечивают свободное пространство для выступающих частей; станка и для того, чтобы движущиеся части (суппорты, ползуны, столы) в своих крайних положениях не упирались в станину соседнего станка. Следует сохранять межстаночные проходы, установленные правилами техники безопасности. В бетонном полу, опирающемся на грунт, должны быть предварительно пробиты колодцы для фундаментных болтов. При установке станка на бетонном полу междуэтажного перекрытия для фундаментных болтов пробивают сквозные отверстия. Положение станка выверяют уровнем. Для изменения положения станка применяют стальные клинья, укладываемые под подошву станины станка. После предварительной выверки станка поверхности колодцев фундаментных болтов увлажняют и заливают цементным раствором. После затвердевания раствора гайки

фундаментных болтов плавно и равномерно затягивают, производят повторную выверку положения станка и подливают цементный раствор под подошву станины станка.

Тяжелые крупные станки, имеющие недостаточно жесткую станину или составленную из отдельных частей, соединенных болтами, как, например, горизонтальный станок для расточки длинных цилиндров, устанавливаются на отдельных прочных фундаментах. Фундамент как бы дополняет станину станка и придает ей дополнительную жесткость и массу. Подливку цементного раствора под подошву длинной недостаточно жесткой станины тяжелого станка, имеющего точные направляющие, производят только в средней части, а концы станины опирают на регулируемые клинья или башмаки. Это позволяет при эксплуатации станка периодически выверять и регулировать положение его станины. До начала монтажа следует ознакомиться с конструкцией станка по сборочным чертежам и описаниям, прилагаемым к станку. Перед монтажом станка нужно освободить части его от упаковки и очистить от пыли и грязи. Покрытия, предохраняющие обработанные и неокрашенные наружные поверхности деталей станка при транспортировке, следует смыть скипидаром. •Механизмы станка, находящиеся в закрытых коробках (шпиндельная бабка и др.), не следует разбирать и промывать. Смазку, покрывающую их детали, оставлять для использования при работе механизмов.

2.3. Монтаж пневмогидрооборудования

Движение звеньев манипулятора ПР осуществляется исполнительными устройствами. В ПР с пневматическим приводом в качестве исполнительных устройств используются пневмоцилиндры, а в ПР с гидравлическим приводом – гидроцилиндры или гидромоторы. Для обеспечения работы приводов ПР применяются различные блоки и устройства: вентили, влагоотделители, пневмоклапаны, маслораспылители, пневмораспределители, пневмодроссели, гидростанции, масляные фильтры, гидрораспреде- лители, гидроклапаны, гидроаккумуляторы, дроссели с регуляторами потока, пневмогидролинии и т. п. Гидро и пневмо приводы используются в металлорежущих станках для вспомогательных движений.

Порядок монтажа пневмогидрооборудования ПР регламентируется технической документацией заводов-изготовителей. Широкая номенклатура ПР с пневматическим и гидравлическим приводами определяет конкретные виды и объем выполняемых монтажных работ. Так, например, для введения ПР типа МП-9С в режим эксплуатации достаточно только подсоединить узел подготовки воздуха к цеховой магистрали и подключить устройство управления ЭЦПУ-6030, ПР типа СМ40.Ф2.80.01 требует предварительного монтажа гидростанции, соединения ее с аппаратурой гидроуправления и гидроприводами. Несмотря на различие объемов монтажных работ ПР конкретных типов существует ряд общих правил и требований, которые заключаются в предварительной подготовке пневмогидроаппаратуры к монтажу, проведении непосредственно монтажных работ, наладке и сдаче в эксплуатацию. Элементы пневмогидрооборудования поступают к потребителю в законсервированном и упакованном виде. В качестве консервирующих веществ применяют гидравлические масла, минеральные масла с антикоррозионными присадками. Упаковку производят в парафинированную или водонепроницаемую бумагу, полиэтиленовую или полихлорвиниловую пленку. При расконсервации изделий необходимо снять внутреннюю упаковку (чехол, бумагу и т. д.). Мелкие изделия следует промыть в уайт-спирите или моечном растворе с добавкой соды кальцинированной или каустиковой, эмульгатора ОП-7, жидкого стекла, Наружные законсервированные поверхности крупногабаритных изделий протирают чистыми салфетками, смоченными в Уайт спирте или бензине. Из внутренних полостей изделий необходимо полностью удалить консервационную жидкость. Не разрешается пользоваться хлопчатобумажными концами, ворс которых может попасть в капиллярные отверстия устройств. После проведения работ по расконсервации элементы пневмогидрооборудования необходимо подвергнуть проверке на работоспособность. Проверку производят на испытательных стендах при рабочем давлении сжатого воздуха или масла. Все обнаруженные неисправности устраняют до монтажа. Трубные проводки, используемые при монтаже, также требуется подвергнуть предварительной обработке. При наружном осмотре отбраковывают трубы, имеющие свищи, рванины, вмятины глубиной более 0,5 мм и овальность свыше 10 % диаметра, Пригодные для монтажа трубы очищают снаружи и внутри и продувают сжатым воздухом.

На металлические трубы должно быть нанесено покрытие, предохраняющее от коррозии. Перед покрытием наружные и внутренние поверхности труб очищают от ржавчины, краски, жира и пыли. Жировые загрязнения удаляют ветошью или кистью, смоченными органическими растворителями. Можно применять и химический способ, который заключается в обработке поверхности труб водными растворами минеральных кислот: серной, соляной, фосфорной и в отдельных случаях азотной. После обработки растворами кислот трубы необходимо промыть водой, обработать 5 %-ным раствором кальцинированной соды, а затем вновь 2-3 раза промыть водой. После сушки поверхности труб грунтуют, а затем покрывают 3 -5 слоями эмали и 2-3 слоями покровного лака. Допускается обработка внутренних поверхностей труб минеральным маслом, используемым в гидросистеме ПРИ. Трубы из красной меди, используемые при монтаже, необходимо отжечь путем нагревания до вишневого цвета с последующим резким охлаждением в воде. После отжига трубы необходимо выпрямить, для чего рекомендуется использовать лебедку и выпрямление производить натягиванием трубы.

Правильный монтаж пневмоцилиндров и гидроцилиндров в значительной степени определяет срок их службы. Цилиндры могут устанавливаться на лапах, фланце (на передней или задней крышке), проушине, цапфе и удлиненных стяжках. Способ монтажа определяется условиями использования цилиндра. Необходимо отметить, что цилиндры, установочная плоскость которых расположена у основания параллельно оси штока, под действием рабочих усилий могут деформироваться. Это приводит к увеличению трения и повышенному износу деталей. Цилиндры должны быть доступны для обслуживания и демонтажа, за исключением тех случаев, когда они выполнены вместе с опорной конструкцией ПР или оборудования. Крепление цилиндров должно быть достаточно прочным и жестким. Соединение штока с приводом желательно осуществлять через шарнир. Затяжка регулируемых уплотнений штока должна обеспечивать герметизацию при допустимых потерях на трение. При монтаже цилиндров на цапфах должно обеспечиваться беспрепятственное качание в пределах заданного угла поворота. Во избежание появления значительных изгибающих нагрузок на штоке и резкого ухудшения условий работы цилиндра

необходимо обеспечить соосность или параллельность штока цилиндра и соединяющегося с ним вала или направляющих ведомого механизма. Погрешность установки в этих случаях не должна превышать 0,05 мм на длине 1 м. При монтаже пневмоцилиндров их рекомендуется располагать вниз отверстиями для подвода воздуха, чтобы исключить возможность сбора конденсата в полостях цилиндра, Гидроцилиндры можно монтировать в любом положении, необходимо лишь обеспечить удобство доступа к устройствам стравливания воздуха. Гидромоторы также могут быть установлены в любом положении: вертикально, горизонтально, наклонно, Вал гидромотора должен соединяться с ведомым механизмом с помощью эластичной муфты, компенсирующей смещение осей. Допустимое радиальное смещение соединяемых осей валов не должно превышать (например, для гидромоторов типа Г16) 0,1 мм и максимальный угол перекоса осей 1°. Дренажный трубопровод должен быть выведен выше вертикального габарита мотора и обеспечивать свободный, без давления, слив масла в бак. Гидромоторы крепят, как правило, к фланцам с помощью винтов. Монтаж направляющей и регулирующей пневмогидроаппаратуры. К этой аппаратуре относятся пневмо- и гидрораспределители, клапаны, дроссели и регуляторы потока. Для управления всеми звеньями ПР, а также перемещения узлов околороботного и технологического оборудования, входящих в состав РТК, используется от одного до нескольких десятков распределителей и дросселей. В последнем случае распределители целесообразно монтировать на панелях. Монтаж должен обеспечивать легкий доступ к пневмогидроаппаратуре для регулирования и технического обслуживания в процессе эксплуатации. Аппаратура, как правило, может монтироваться в любом пространственном положении, Специальные требования на установку оговариваются в руководствах по монтажу и эксплуатации. При монтаже двухпозиционных распределителей с двусторонним электрическим управлением без пружинного возврата необходимо обеспечить горизонтальное положение их продольной оси. Это предотвращает самопроизвольное перемещение золотников при обесточенных катушках электромагнитов и нарушение последовательности цикла работы ПР и РТК в момент пуска. Крановые распределители на вертикальной или наклонной плоскости необходимо монтировать в таком положении, при котором исключается самопроизвольное их переключение под действием веса рукоятки. Пневмо-

и гидрораспределители с резьбовым присоединением монтируют при помощи трубопроводной арматуры с конической резьбой, Распределители со стыковым присоединением монтируют с помощью винтов непосредственно на панельной плоскости или на промежуточных плитах. Монтажная поверхность панелей должна иметь шероховатость менее 1,25 мкм и неплоскостность не более 0,01-0,05 мм на длине 100 мм. Винты для крепления распределителей должны быть изготовлены из сталей с пределом прочности на растяжение не менее 1000 МПа (в комплект поставки распределителей не входят). Во избежание деформации корпусов распределителей затяжка крепежных винтов должна производиться без особых усилий. Герметичность стыкового соединения обеспечивается за счет уплотнений, выполненных в виде резиновых колец и прокладок. Дроссели, пневмо- и гидроклапаны можно монтировать в различных местах системы (непосредственно у исполнительных механизмов, распределителей, на трубопроводной магистрали). При их монтаже необходимо обеспечить удобство доступа для регулировки и возможность визуального наблюдения при ее выполнении за действиями исполнительных механизмов. При монтаже регулирующей пневмогидроаппаратуры необходимо следить за совпадением направлений движения рабочего тела в системе и установочной стрелки на корпусе прибора.

При монтаже пневмогидропанелей, поступающих с заводов-изготовителей с готовой внутренней разводкой, производится лишь подключение их к исполнительным механизмам с помощью внешних трубопроводных магистралей.

Располагать пневмогидропанели с пускорегулирующей аппаратурой следует группами, вблизи исполнительных механизмов, но вне рабочего пространства ПР. Если панели содержат большое число пускорегулирующей аппаратуры и требуют подключения множества исполнительных механизмов, то разъемные стыки подводящих и отводящих трубопроводов следует располагать в нескольких плоскостях. Трубные проводки при этом рекомендуется подсоединять на резьбах или зажимных кольцах, а шланги на ниппелях с обжатием хомутом.

Высокую производительность и качество проведения монтажных работ можно обеспечить при использовании пускорегулирующей аппаратуры модульного исполнения. В отличие от аппаратуры стыкового

монтажа с одной стыковой плоскостью, эта аппаратура имеет две стыковые плоскости с одинаковыми координатами присоединительных отверстий, расположенных на корпусе сверху и снизу. Это позволяет устанавливать различные аппараты один на другой в вертикальный столбик (пакет), замыкаемый сверху распределителем, плитой связи или плитой-заглушкой. Пакеты могут наращиваться как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях (рис. 2.3). Уплотнение соединений плит и аппаратуры обеспечивается резиновыми кольцами, а крепление пакетов к монтажной плите и плит между собой осуществляется с помощью сквозных стяжек или винтов. Монтаж устройств подготовки рабочего тела. В ПР с пневматическим приводом обязательным блоком является блок подготовки воздуха. В одних конструкциях такой блок предусматривается для каждого ПР, в других – для группы ПР. Блок подготовки воздуха монтируется, как правило, на элементах конструкций (корпусе, станине) ПР. При монтаже необходимо убедиться в правильности установки влагоотделителя, редукционного клапана и маслораспылителя (указательные стрелки по направлению движения сжатого воздуха).

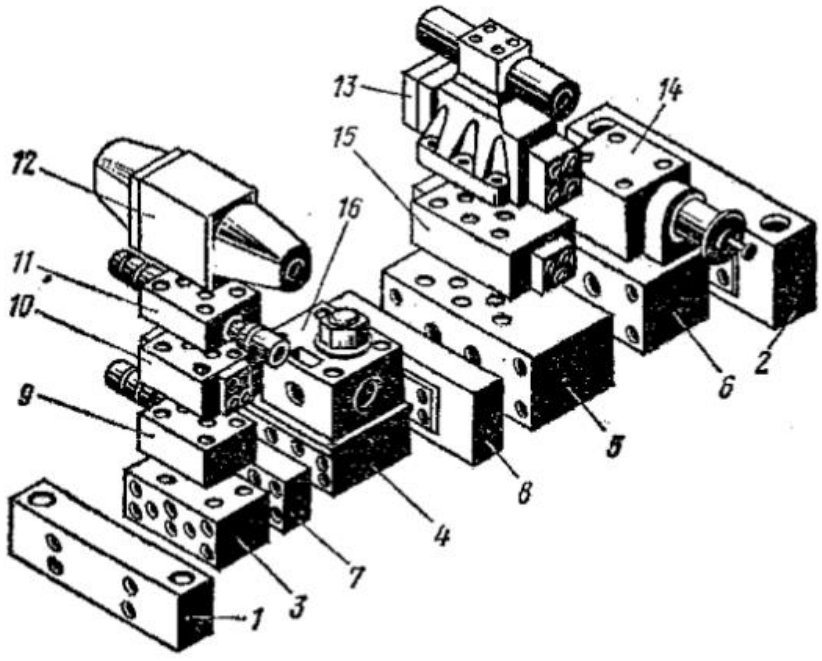


Рис. 2.3. Модульный монтаж пневмогидроаппаратуры:
1, 2 – крепежные плиты; 3-6 – монтажные плиты;
7,8 – переходные плиты; 9-16 – элементы пневмогидроаппаратуры
(распределители, дроссели, клапаны; регуляторы потока и т.п.)]

Стеклянные колпаки влагоотделителя и маслораспределителя должны быть направлены вертикально вниз; место их установки должно обеспечивать удобство слива влаги, залива свежего масла и наблюдения за уровнем масла в процессе работы ПР. В ПР с гидравлическим приводом питание гидросистемы осуществляется от насосной установки (гидростанции), обеспечивающей очистку рабочей жидкости от твердых частиц и влаги, создание и поддержание заданного давления жидкости в напорной магистрали, охлаждение или нагрев жидкости до рабочей температуры.

ПР комплектуются гидростанциями в собранном виде. Монтаж таких гидростанций заключается в выставке на подкладках и закреплении анкерными или крепежными болтами бака-отстойника со смонтированным на нём оборудованием. При монтаже необходимо предусмотреть удобство доступа к фильтрам и горловине для заливки масла, сливному отверстию, смотровым люкам, а также удобство наблюдения за приборами-указателями давления и уровня масла. Защитные кожухи не должны препятствовать циркуляции воздуха для охлаждения.

В системах пневматического и гидравлического приводов ПР исполнительные механизмы, аппаратура управления и регулирования, вспомогательная аппаратура соединяются между собой с помощью металлических трубопроводов, резиновых рукавов, гибких металлических рукавов, шлангов и полиэтиленовых труб. Выбор типа проводок зависит от рабочего давления и температуры, агрессивности рабочего тела и внешней среды, вида соединения стыков, условий гибки и монтажа. Так, например, трубы из углеродистых сталей применяются в неагрессивных средах при температуре до 250 °С. Трубы из нержавеющих сталей применяются при температурах до 500 °С и обладают повышенными по сравнению с трубами из углеродистых сталей прочностью и коррозийной стойкостью в агрессивных средах. Трубы из меди используются при температурах до 150 °С и давлениях до 25 МПа. Они устойчивы к воздействиям атмосферы и морской воды. Трубы из меди отличаются высокой гибкостью, удобны для применения на коротких участках со сложными изгибами и при необходимости подгонки в процессе монтажа.

Жесткие трубные проводки применяются для монтажа неподвижной аппаратуры. Наиболее рационально применение цельных трубопроводов с минимальным числом соединений.

Гибкие проводки применяются в тех случаях, когда необходимо подвести сжатый воздух или рабочую жидкость к устройствам, закрепленным на узлах и механизмах, имеющих относительное перемещение, или поочередно к различным потребителям от одного источника. Гибкие проводки обеспечивают удобство монтажа, особенно в труднодоступных местах.

Внутренний диаметр канала, трубы или рукава пневмогидропроводок определяется по формуле $d = \sqrt{4Q/\pi\upsilon} = 1{,}13\sqrt{Q/\upsilon}$, где Q – расход рабочего тела (воздуха, жидкости), $м^3/с$; υ – скорость потока рабочего тела, м/с.

Оптимальные скорости движения воздуха или потока жидкости зависят от многих факторов. На основании практических данных рекомендуются следующие величины скоростей, м/с:

Воздуха

В магистральных трубопроводах … 6 – 12

В подводящих трубопроводах … 16 – 40

Рабочей жидкости

В напорных гидролиниях … 5 – 10

В сливных гидролиниях … 2 – 2,5

Во всасывающих гидролиниях … 0,5 – 1,5

Толщина стенки труб определяется по формуле $\delta = p_{max}D/2\sigma_{доп} = p_{max}D_n/2\sigma_в$, где p_{max} – максимальное давление рабочего тела, Па; D – наружный диаметр трубы, м; $\sigma_{доп}$ – допустимое напряжение материала трубы, Па; $\sigma_в$ – предел прочности материала трубы, Па (для труб из стали 20 $\sigma_в$ = 140 МПа); n – коэффициент запаса прочности (n = 3÷6).

Разметку и разрезку труб на нужные длины обычно производят в монтажно-заготовительных мастерских. Для этого используется разметочно-отрезной агрегат, позволяющий получать детали трубопроводов с точностью ± 1 мм. Затем производится гибка труб. Трубы изгибают по шаблонам, изготовленным из стальной проволоки по месту установки трубопровода, либо по монтажным чертежам. Гибку можно производить как в холодном, так и в горячем состоянии. Нагрев труб на монтажно-заготовительном участке осуществляют на стыковых электросварочных машинах, а в монтажной зоне – с помощью газосварочных горелок. Трубы диаметром до 1 ½″ гнутся, как правило, с помощью ручных трубогибов, а 2″ и более – на трубогибочных станках.

Радиусы изгиба труб, работающих под давлением, ограничиваются значениями, при которых не происходит существенного сниже-

ния их статической и усталостной прочности. Минимальный допустимый радиус внутренней кривой изгиба труб должен быть для:

– медных труб – не менее 2D (D – наружный диаметр);

– стальных и полиэтиленовых труб, изгибаемых в горячем состоянии, отожженных труб из алюминия и алюминиевых сплавов, для полихлорвиниловых труб – не менее 3D;

– остальных труб, изгибаемых в холодном состоянии, – не менее 4D;

– полиэтиленовых труб, изгибаемых в холодном состоянии, – не менее 6D.

При монтаже труб необходимо соблюдать следующие требования: трубы, прокладываемые вдоль корпусных деталей, должны следовать их контуру; трубы не должны закрывать съемные детали, крышки, окна для транспортирования, карманы для болтов в станине и т.п.; трубы необходимо устанавливать с небольшим уклоном в сторону устройств подготовки рабочей среды для обеспечения возможности удаления конденсата; при использовании ресиверов подсоединение трубопровода необходимо производить в верхней точке ресивера; при скрытой прокладке труб в бетонных каналах заглубление должно быть не менее 20 мм от поверхности пола.

Крепление труб к опорным конструкциям производят с помощью скоб или колодок (рис. 2.4).

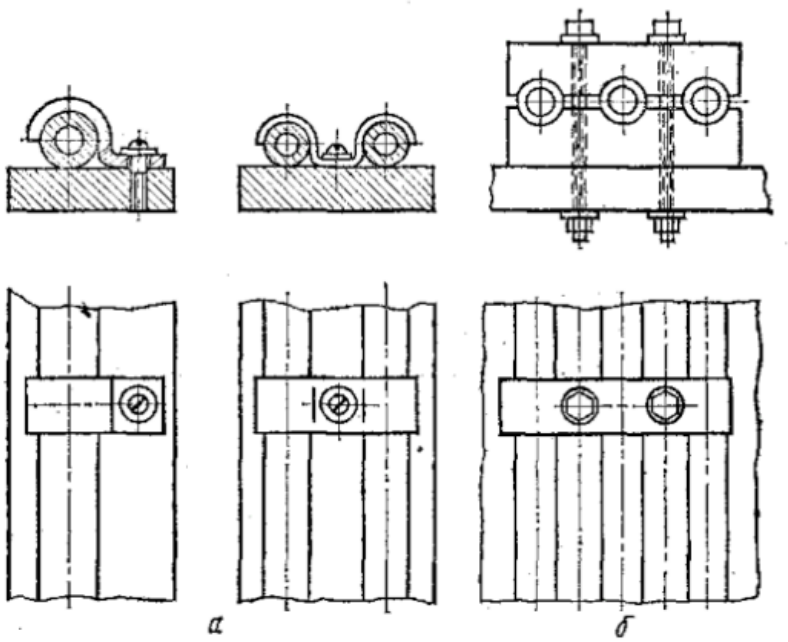


Рис. 2.4. Крепление трубопроводов:
а – с помощью скоб; б – с помощью колодок

Расстояние между крепежными элементами трубных проводок должно быть для:

– трубопроводов из цветных металлов на горизонтальных участках 0,6 – 0,8 м, на вертикальных 1 м;

– стальных трубопроводов диаметром 8 – 14 мм на горизонтальных участках 0,75 м, на вертикальных – 1 – 1,5 м;

– стальных трубопроводов диаметром 22 – 60 мм на горизонтальных участках 2 – 4 м, на вертикальных – 3 – 5 м;

– пластмассовых трубопроводов диаметром 6 – 10 мм на горизонтальных участках 0,3 м, на вертикальных – 0,5 м.

Расстояния между опорными конструкциями трубных проводок (полками, кронштейнами, консолями, пакетными скобами и т.п.) должны быть такие же, как и между крепежными элементами для одиночных труб и могут быть несколько больше для групповых (блочных) проводок.

Соединения трубных проводок могут быть неразъемными и разъемными.

Неразъемные соединения (рис.2.5) применяются для трубопроводов, не требующих демонтажа. Их выполняют сваркой встык, в раструб и с применением безрезьбовых муфт. Соединение трубопроводов встык требует обязательного провара кромок на всю толщину. Для этого на торцах свариваемых труб делают фаску под углом 60 – 70 °. Стыковой способ сварки не гарантирует отсутствия шлака на внутренней поверхности трубы в месте сварки.

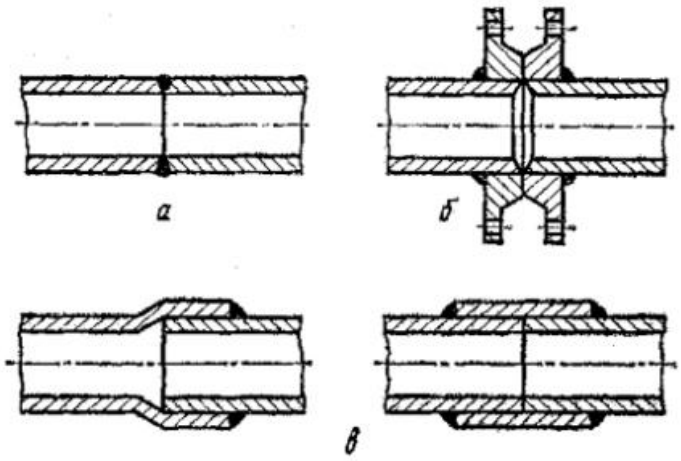


Рис. 2.5. Неразъемные соединения трубопроводов:
а – встык; б – при помощи безрезьбовой муфты; в - враструб

Полностью исключается попадание шлака на внутренние поверхности труб при сварке их враструб или с применением безрезьбовых муфт. При этом также облегчается процесс сварки. Неразъемные соединения полиэтиленовых труб так же выполняют сваркой встык или в раструб. Для образования раструба используют нагретую металлическую оправку соответствующего диаметра. Длина раструба должна быть примерно равна наружному диаметру соединяемых труб. Затем внутреннюю поверхность раструба и наружную поверхность конца трубы оплавляют на специальном металлическом блоке, нагретом предварительно до 220–260 °С, и производят соединение. Сварка встык выполняется путем предварительного нагрева и оплавления на длине 3-4 мм концов труб при температуре 250-300°С с последующим их прижатием и выдержкой для охлаждения не менее 2 мин. Неразъемные соединения полихлорвиниловых труб выполняют склеиванием. Для этой цели применяют 20 % - ный раствор поливинилхлоридной смолы в обезжиренном ацетоне. На одном конце трубы делается раструб. После обезжиривания склеиваемых поверхностей ацетоном тонким слоем наносят клей, дают подсохнуть в течение 25–30 мин, затем наносят еще один слой и соединяют. Для схватывания склеиваемые трубы выдерживают без нагрузки в течение 2,5–3 ч. При выполнении неразъемных соединений медных или латунных труб сварку заменяют пайкой. К разъемным относятся соединения, позволяющие производить разборку без нарушения целостности соединяемых труб или без их вращения. Применяется четыре основных вида соединения труб: по наружному и внутреннему конусам, с уплотнительным кольцом и фланцевые (рис. 2.6).

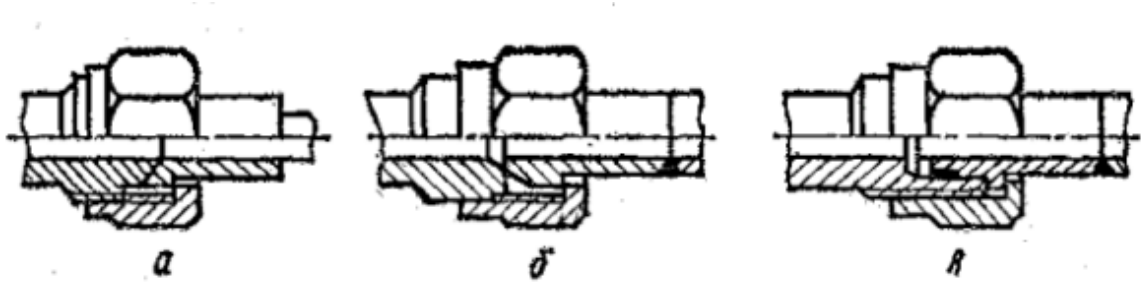


Рис. 2.6. Разъемные соединения трубопроводов:
а – по наружному конусу; б – по внутреннему конусу;
в – с уплотнительным кольцом

Первые три вида соединений обеспечивают герметичность за счет обжатия или прижатия конца трубы или полусферического ниппеля к штуцеру с помощью накидной гайки. Фланцевое соединение применяется для труб диаметром более 40 мм и обеспечивает герметичность за счет стягивания болтами двух фланцев, приваренных к концам труб. Между торцевыми поверхностями фланцев помещается прокладка из резины или паронита. Для монтажа разъемных соединений стальных тонкостенных труб применяются присоединения (рис. 2.7): прямые концевые, угловые концевые, тройниковые концевые, медных или также промежуточные (прямые и тройниковые).

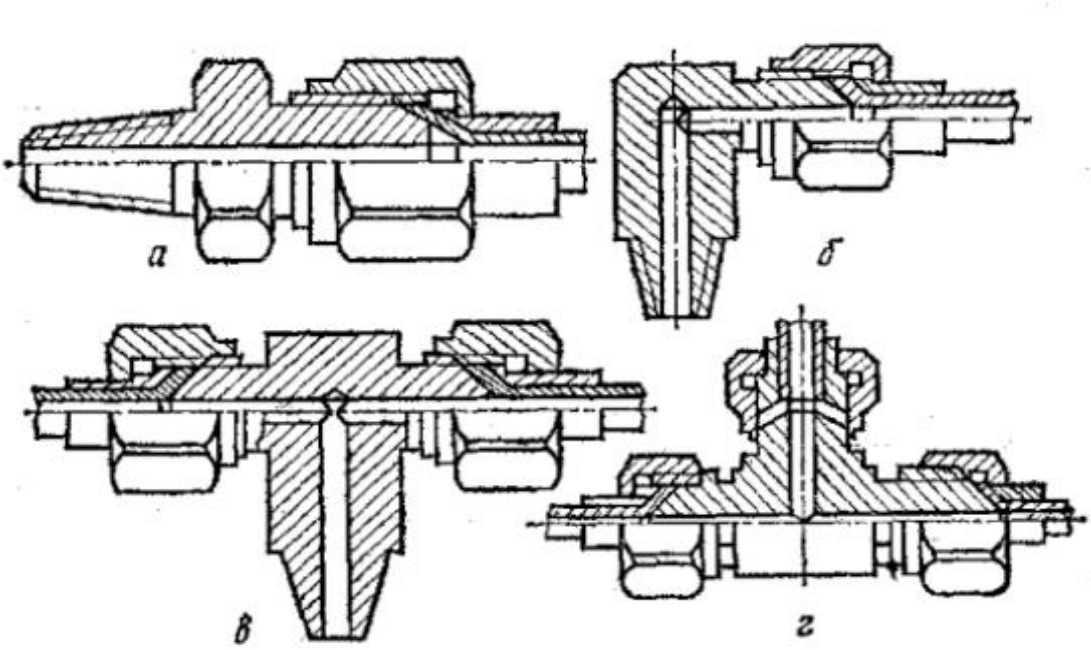


Рис. 2.7. Конструкция присоединений:
а – прямое концевое; б – угловое концевое; в – тройниковое концевое; промежуточное

Данные соединения рассчитаны на номинальное давление до 6,3 МПа (для медных труб) и до 12,5 МПа (для стальных труб). При затяжке гайки ниппель прижимает развальцованный конец трубопровода к конусной поверхности штуцера, обеспечивая герметичность соединения. Шланги и рукава, используемые для подвода сжатого воздуха к подвижным исполнительным и устройствам, монтируют на ниппеле с кольцевыми проточками и обжимают хомутами, Такие соединения используются для давлений до 0,5 МПа. При больших давлениях рукава

зажимаются между ниппелем и резьбовой муфтой. Для систем гидравлики и давлений до 30 МПа применяются гибкие металлические рукава высокого давления, которые поставляются с резьбовой фланцевой или специальной арматурой.

Техника безопасности при монтаже пневмогидрооборудования ПР

При подготовке пневмогидрооборудования к монтажу, чистке и промывке бензином или уайт-спиритом необходимо обеспечить соответствующую вентиляцию. Обтирочный материал после употребления следует убрать в металлический ящик с крышкой. Запрещается производить работы с применением открытого огня (сварка, резка и пр.) вблизи оборудования в период расконсервации (обработка бензином, уайт-спиртом).

При работе с отрезными и шлифовальными кругами необходимо убедиться в надежности их закрепления и наличии ограждающего кожуха. При гибке труб должна быть очищена поверхность (пол). Используемые стационарные или передвижные трубогибочные и другие приспособления должны иметь предохранительные отключающие устройства, а также заземление и зануление.

При работе с кислотами и щелочами опасные зоны должны быть ограждены. Рабочие, занятые на химической обработке трубопроводов, должны пройти специальное обучение и иметь защитную одежду (очки или маску, резиновые рукавицы и сапоги, шерстяные куртки и брюки). Необходимо соблюдать особую осторожность при сливе или выдувании кислоты из трубопроводов, так как при этом возможно разбрызгивание кислоты и попадание е на открытые участки тела.

При производстве электросварочных работ сварочные кабели должны находиться в технически исправном состоянии н не иметь оголенных частей. Обратный кабель от сварочного агрегата должен подсоединяться непосредственно к свариваемому предмету.

При использовании газосварочных аппаратов необходимо надежно закрепить баллоны с кислородом и ацетиленом. Шланги должны соответствовать назначению и их соединение между собой н аппаратурой должно производиться инвентарными хомутами. Особо опасно соприкосновение кислорода с маслом, поэтому пользоваться промасленными рукавицами и спецодеждой при работе с кислородными баллонами запрещается.

Соединение трубопроводов, подтяжка и обтяжка аппаратуры и шлангов должны производиться при полностью снятом давлении. Торцовые и гаечные ключи, используемые при установке аппаратуры и соединений, должны быть исправны и соответствовать по размеру.

2.4. Монтаж устройств управления и электрооборудования роботов и мехатронных систем

Устройства (системы) управления ПР и мехатронных модулей в зависимости от конструкции могут быть встраиваемые и выносные. Наибольшее распространение получили выносные устройства управления, выполненные в виде отдельного приборного шкафа, внутри которого расположены элементы и аппаратура силового питания приводов ПР, блоки управления, памяти, преобразования информации. В верхней части шкафа располагается пульт оператора с выведенными на него органами включения-выключения питания, выбора режима работы, набора отрыто проложенные заземляющие проводники в местах, где возможно их механическое повреждение, должны быть защищены. Защита может быть осуществлена стальной трубой, плетеным чехлом и др. Присоединение заземляющих проводников к заземляемым элементам должно быть выполнено надежным болтовым или винтовым соединением с принятием мер против ослабления контакта (установка контргаек, пружинных шайб и т. д.). Заземление оборудования, подвергающегося частому демонтажу, следует выполнять при помощи гибких медных заземляющих проводников сечением не менее 4 мм^2 (для малогабаритного оборудования допускается 1,5 мм^2). Оконцовывание медных заземляющих проводников должно выполнено с помощью привариваемых к ним кабельных наконечников. Ответвления к однофазным электроприемникам для их заземления должно осуществляться отдельным (третьим) проводником. Использование для этой цели нулевого (рабочего) провода ответвления запрещается. В целом система заземления ПР должна быть выполнена таким образом, чтобы при снятии любого из заземляемых элементов не нарушалась целость всего заземления.

Техника безопасности. Монтаж электрооборудования ПР и мехатронных систем должен производиться только при отключенном пи-

тающем напряжении. Электрифицированный инструмент, используемый при монтаже, должен быть заземлен. Крепление электрических аппаратов на несущих конструкциях (панелях, пультах и т. д.) должно производиться стационарными крепежными изделиями без сорванных резьб, шлицев и граней с необходимой затяжкой резьбовых соединений и принятием мер от самопроизвольного развинчивания. При затяжке проводов в трубы стальная проволока не должна иметь заломов и сростков и должна иметь надежное соединение со всеми затягиваемыми проводами. При продувке защитных труб нельзя стоять против открытых концов труб и протяжных или соединительных коробок. Во время затягивания проводов в трубы необходимо предусмотреть меры против падения рабочего в случае отрыва натянутой проволоки. Направлять затягиваемые провода в защитные трубы необходимо таким образом, чтобы не произошло захвата пальцев рук проводами и затяжки их в трубу. Затяжку проводов в трубы на высоте нельзя производить стоя на приставной лестнице или стремянке; для этой цели следует пользоваться лесами, специальными настилами или площадками. Перед прокладкой кабеля по кабельным конструкциям в помещении каналах, кабельных сооружениях должны быть тщательно проверены прочность крепления и устойчивость этих конструкций. Кабель при этом предварительно раскатывают по полу или по дну кабельного канала.

Монтаж информационных систем

Информационные системы по назначению делятся на три группы: внутренней информации ПР, восприятия внешней среды и обеспечения техники безопасности. **Система внутренней информации ПР** содержит датчики оценки положения и скорости перемещения звеньев ПР, а также датчики, обеспечивающие блокировку движения ПР при появлении случайных сбоев. Для цикловых ПР наибольшее распространение получили путевые конечные выключатели типов ВК-200, ВК-300, ВКП-1000, ВКП-2000, ВКП-4000, а также бесконтактные конечные выключатели типов БВК, У143 и У511. Для определения величины линейных или угловых перемещений звеньев манипулятора используется потенциометры, вращающиеся трансформаторы, индуктосины, цифровые датчики типа перемещение – фаза – код.

Контактные выключатели срабатывают в результате непосредственного механического воздействия упора управления на приводной

элемент выключателя (рычаг с роликом, толкатель и др.), поэтому необходимо, чтобы ход упора был несколько больше рабочего хода выключателя, но вместе с тем не превышал бы величины полного хода, допустимого для данного выключателя.

Контактные или путевые выключатели обычно монтируют вблизи рабочих зон перемещаемых механизмов и крепят винтами через крепежные отверстия к неподвижной части узлов ПР. Если контактный выключатель используется для фиксации определенной точки при движении звеньев ПР, например, точки синхронизации, то в этом случае взаимодействующий с выключателем упор имеет конструкцию, обеспечивающую прохождение его по обе стороны от выключателя (рис 2.8). Для обеспечения возможности подстройки положения упора он должен иметь продольные пазы длиной 15-20мм.

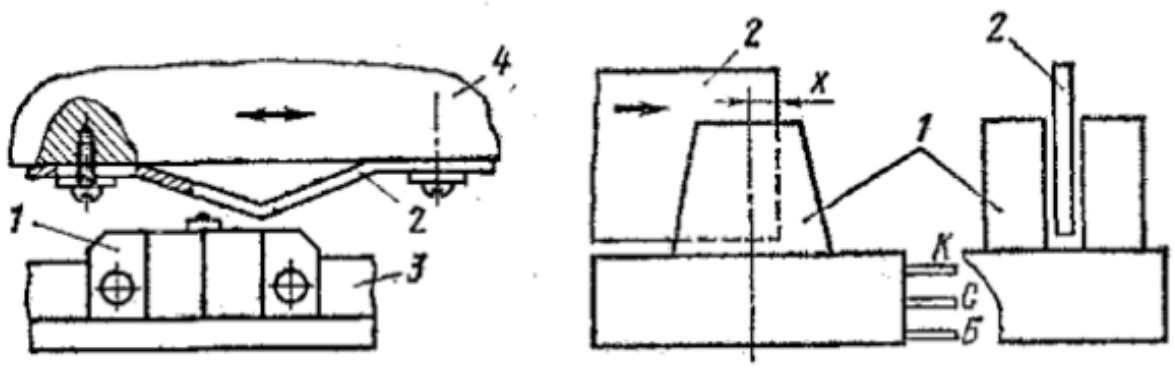


Рис. 2.8. Монтаж конечного выключателя

Бесконтактные конечные выключатели типа БВК также монтируют на неподвижных узлах ПР и оборудования с помощью винтов. Они имеют щелевидную рабочую зону, поэтому на подвижном элементе или звене ПР с помощью винтов закрепляют алюминиевую пластину толщиной 3 мм и шириной 30 мм. Срабатывание датчика происходит при переходе кромки пластины за центр рабочей зоны на величину от 0 до 4 мм (в зависимости от характеристики выключателя).

Наибольшее распространение в робототехнике получили бесконтактные конечные выключатели пальчикового типа. На рис. 2.9 представлена конструкция индуктивного бесконтактного переключателя фирмы “Баллуфф” (ФРГ).

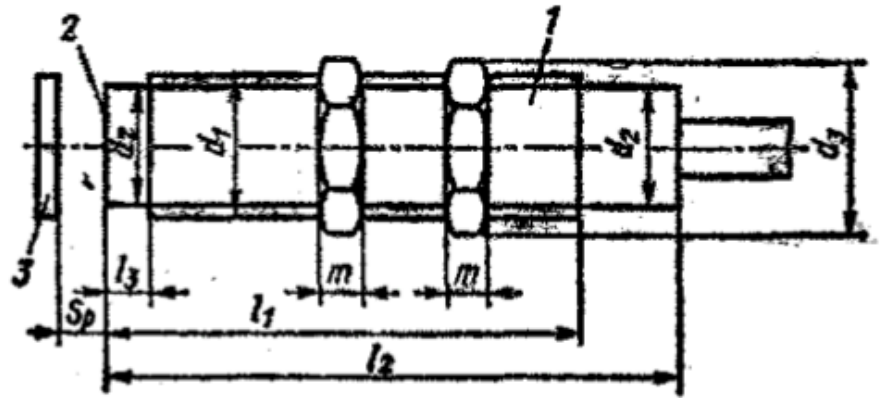


Рис. 2.9. Конструкция индуктивного бесконтактного переключателя фирмы “Баллуфф” (ФРГ)

Они имеют цилиндрическую конструкцию с металлическим или пластмассовым корпусом 1 и могут устанавливаться на специальных кронштейнах, либо встраиваются в металл заподлицо или незаподлицо. Срабатывание датчика происходит при приближении к его активной поверхности 2 измерительной пластинки 3 из стали толщиной 1 мм квадратной формы со стороны квадрата, равной диаметру датчика. Рабочий зазор переключения S_p=2/20 мм (в зависимости от типа датчика). При использовании латунной измерительной пластинки рабочий зазор уменьшается вдвое.Отечественная промышленность выпускает аналогичные датчики типа У551 с рабочим зазором 1, 2, 4 мм и ДКП с рабочим зазором 1 и 2 мм. При монтаже датчиков на кронштейне с помощью крепежных гаек выставляется номинальный рабочий зазор от торцевой поверхности датчика до измерительной пластинки, наклеенной на подвижное звено. Датчики пальчикового типа могут быть встроены в металл. Если необходимо расположить рядом два датчика, то расстояние между их центрами должно быть равно или больше двух их диаметров. Если датчики не позволяет встраивать его в металл до уровня активной поверхности то для обеспечения его работоспособности с заданными параметрами должна быть обеспечена свободная от металла зона. Соединительные провода от датчиков при монтаже рекомендуется прокладывать в резиновых патрубках соответствующего диаметра с нахлестом на корпус датчика. При монтаже датчиков, регистрирующих перемещение звеньев манипулятора, их скорости и ускорения, необходимо обеспечить кинематическую связь перемещаемого звена с датчиком.

Основные варианты конструктивных схем связи датчика со звеном манипулятора приведены на рис. 2.10.

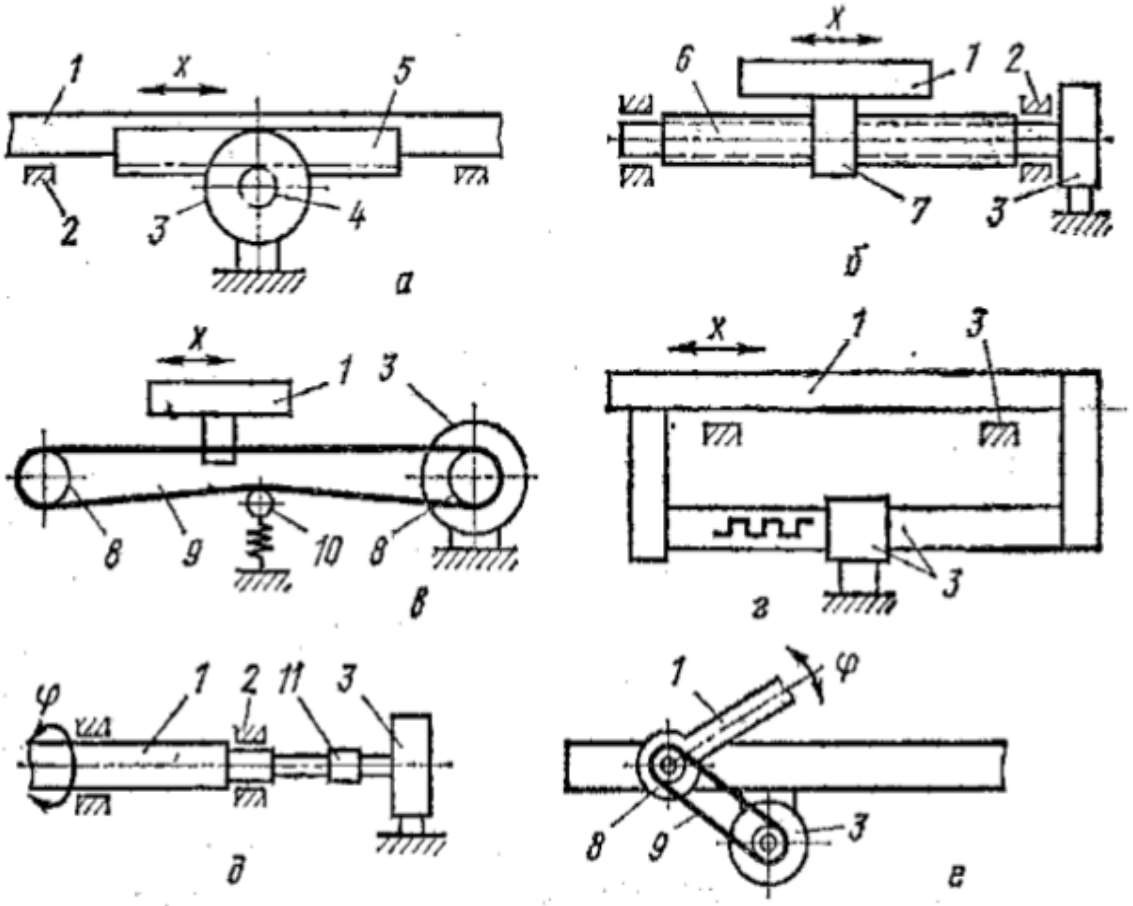


Рис. 2.10. Основные варианты конструктивных схем связи датчика со звеном манипулятора

На практике обычно отдается предпочтение вращательным датчикам перемещений, так как они более технологичны, отличаются относительной легкостью подсоединения к измеряемому звену и обеспечивают хорошую разрешающую способность. Датчики перемещения либо непосредственно подсоединяются к подвижному элементу, либо соединяются с ним посредством механической передачи того или иного типа. На рис. 2.10, а приведен вариант связи поступательно перемещающегося звена 1 с вращательным датчиком 3 с помощью зубчатого колеса 4 и зубчатой рейки 5. Точность измерений перемещения x определяется в первую очередь погрешностью зубчатого зацепления и качеством механической обработки.

В схеме, приведенной на рис 2.10, б, вращение ходового винта 6 вызывает линейное перемещение х гайки 7, к которой крепится подвижное звено 1. С ходовым винтом связан вал вращательного датчика 3, измеряющего угол поворота ходового винта 6, а следовательно, и перемещение х звена 1. Погрешность измерения этой схемы зависит от механического преобразователя вращательного движения в линейное, что определяется точностью ходового винта, гайки, опорных подшипников 2 и качеством сборки механической передачи. Более точную передачу движения на вращательный датчик 3 можно обеспечить (Рис. 2.10, в) с помощью гибкого тросика 9, шкивов 8 и устройства натяга 10. Следует отметить, что при измерении линейного перемещения подвижного звена наибольшую результирующую точность обеспечивает вариант с непосредственным подсоединением к подвижному звену линейного датчика перемещения (рис. 2.10, г), так как механическая передача между подвижным звеном 1 и датчиком 3 лишь увеличивает погрешность измерения перемещения. Аналогично при измерении углового перемещения подвижного звена 1 предпочтителен вариант подсоединения к нему вращательного датчика 3 либо непосредственно, либо с помощью соединительной муфты 11(рис. 2.10, д). Если конструкция манипулятора не позволяет осуществлять такой вариант, то ось подвижного звена 1 можно связать с входным валом вращательного датчика 3 механической передачей, в частности, в виде шкивов 8 и гибкого тросика 9 (2.10, е).

В системах восприятия внешней среды наибольшее применение находят системы технического зрения. В качестве датчиков в таких системах используют телевизионные передающие трубки (видиконы) либо полупроводниковые матричные формирователи сигналов изображения на основе фотодиодных матриц. Монтаж датчиков систем технического зрения производят преимущественно на конце руки или рабочих органах ПР. При этом необходимо обеспечить надежное крепление датчиков и одновременно создать условия для возможности обзора области захвата объектов манипулирования. Видиконы и матричные формирователи не должны мешать работе рабочих органов ПР и не должны быть повреждены объектами манипулирования в любых рабочих ситуациях. На рис. 2.11 показан пример установки видикона 2 на фланце руки ПР 1. К этому же фланцу посредством разъема крепится рабочий орган 3 с матрицей пневматических присосок 4.

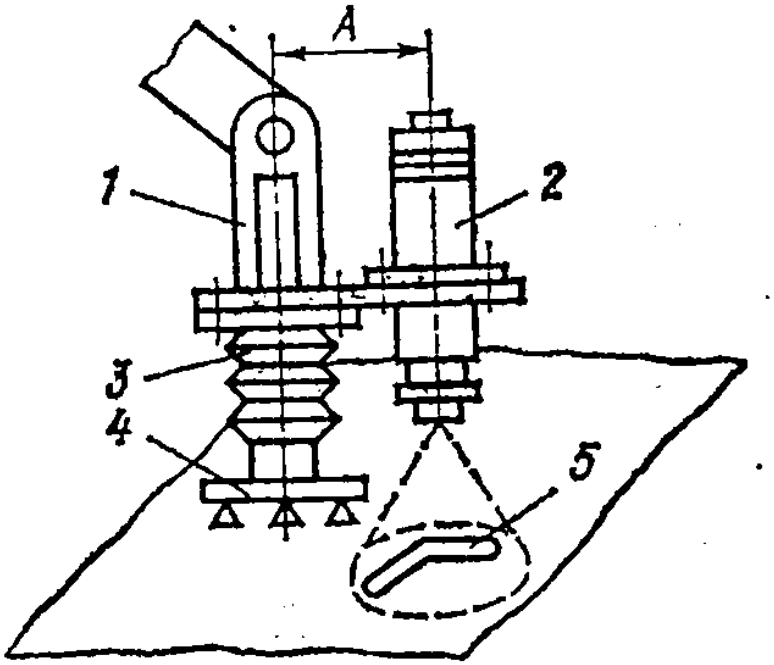


Рис. 2.11. Монтаж видеокамеры на руке робота

Оси руки ПР и видикона смещены в горизонтальной плоскости на расстояние А, определяемое конструктивными размерами элементов. В процессе работы ПР с помощью видикона осуществляет поиск объекта 5 на плоскости захвата. Затем координаты объекта переносятся в память устройства управления и ПР перемещается в направлении центра объекта на величину фиксированного расстояния А для захвата.

Электрические машины и аппараты в зависимости от их веса и габаритов поступают на монтаж от заводов-изготовителей в собранном или разобранном виде в соответствующей упаковке. Выгружают их с транспортных средств кранами и в исключительных случаях на катках по наклонным настилам, хранят в сухих вентилируемых помещениях. Части машин, подверженные коррозии, покрывают слоем технического вазелина или какой-либо другой смазки. Шейки валов покрывают антикоррозионной смазкой, обертывают влагонепроницаемым материалом и защищают от механических повреждений. При приемке электрических машин и аппаратов под монтаж проверяют их целостность, соответствие заводских характеристик проектным и комплектность. Во избежание повреждения машин и аппаратов их распаковывают осторожно в закрытом, сухом и чистом помещении, недоступном для посторонних лиц. Помещения для установки электрических машин

и аппаратов принимают от строительных организаций под монтаж в состоянии, годном для нормального ведения работ, и с готовыми фундаментами для машин.

Помещения должны иметь проемы в стенах и перекрытиях для транспортирования тяжелого и крупногабаритного электрооборудования. Если проектом предусмотрена закладка в фундаменты стальных труб, предназначенных для прокладки в них проводов или кабелей, электромонтажная организация укладывает их еще до бетонирования фундамента, одновременно с вязкой арматуры.

Размеры помещений, основные размеры фундаментов, размещение и размеры колодцев под анкерные болты, проемов и ниш, размещение осей фундаментов проверяют по данным чертежей проекта.

Непосредственно перед началом монтажа производят ревизию и регулировку электрических машин и аппаратов. При ревизии проверяют крепление обмоток, наличие доски с выводными зажимами, исправность активной стали, отсутствие вмятин, задиров, ржавчины, состояние выводов обмоток, коллектора и щеточных устройств у машин постоянного тока и контактных колец у машин переменного тока, шеек валов, правильность соединений обмоток, величины зазоров, сопротивление изоляции обмоток. У электрических аппаратов проверяют и регулируют одновременность включения контактов, раствор контактов, работу механизмов зацепления и срабатывания и др.

Обнаруженные мелкие дефекты устраняют собственными силами. Для устранения серьезных дефектов аппараты отправляют на завод-изготовитель или в специальные ремонтные мастерские. Машины и аппараты, прибывающие на монтаж в собранном виде, разбирают только в том случае, если возникают сомнения в их исправности после транспортировки и хранения. Разборку и последующую сборку машин и аппаратов производят так, как это указано в инструкции завода изготовителя. На первой стадии монтажа низковольтной пускорегулирующей аппаратуры, приборов контроля и защиты в соответствии с общим принципом организации электромонтажных работ размечают и пробивают гнезда, проемы и отверстия в строительных основаниях для крепления и заделки в них опорных конструкций или крепежных деталей.

Разметку ведут по отметкам чистого пола, наносимым на стенах или перегородках (представителями строительной организации) чер-

ной краской в виде полос шириной 10 и длиной 100–150 мм, в соответствии с данными чертежей проекта или по размерам, снятым с натуры, пользуясь шаблонами для ускорения этой операции. (Последнее особенно целесообразно при установке большого количества однотипного оборудования.) Разметку начинают с нанесения основных вертикальных и горизонтальных осей мест установки оборудования, а затем размечают места заделки опорных конструкций или крепежных деталей (болтов, шпилек, дюбелей и т. п.). На металлических опорных поверхностях оборудование крепят или непосредственно винтами и болтами, или с помощью конструкций, привариваемых электросваркой к металлическим опорным поверхностям. Крепежные детали и опорные конструкции, если они не выпускаются заводами, изготовляют в мастерской по эскизам группы подготовки производства или чертежам проекта. В мастерской выполняют также ревизию низковольтных аппаратов и подготовку их к установке.

2.5. Монтаж роботизированных технологических комплексов

При монтаже роботизированного технологического комплекса особое внимание нужно уделять системе обеспечения техники безопасности. Системы обеспечения техники безопасности осуществляют аварийную блокировку работы ПР при воздействии на отдельные его части и узлы предельных усилий, а также при попадании в рабочую зону ПР людей. Ограждение рабочей зоны ПР может выполнено на базе устройств с контактными, силовыми, ультразвуковыми, индукционными, светолокационными и другими датчиками. К числу таких устройств относятся трапики, переходные мостики, буфера, чувствительные матрицы.

Система светозащиты рабочей зоны ПР, выполненная по модульному принципу и обеспечивающая эффективную защиту человека при любых конфигурациях РТК. В состав системы входят стойки светоизлучателей и фотоприемников, применяемых попарно, а также блок логических преобразователей. В состав стойки светоизлучателя входят излучатель, сигнальный светофор и кнопка сброса, а в состав стойки фотоприемника - приемник, сигнальный светофор, кнопка сброса и плата усиления выходного сигнала фотоприемника. Стойки излучате-

лей и фотоприемников предназначены для регистрации момента появления человека в соответствующей зоне рабочего пространства ПР. На рис.2.12 приведены типовые конфигурации РТК и места монтажа светолокацнонных стоек. Светоизлучатели и фотоприемники рекомендуется крепить на стойках на высоте 0,8 – 1 м от уровня пола.

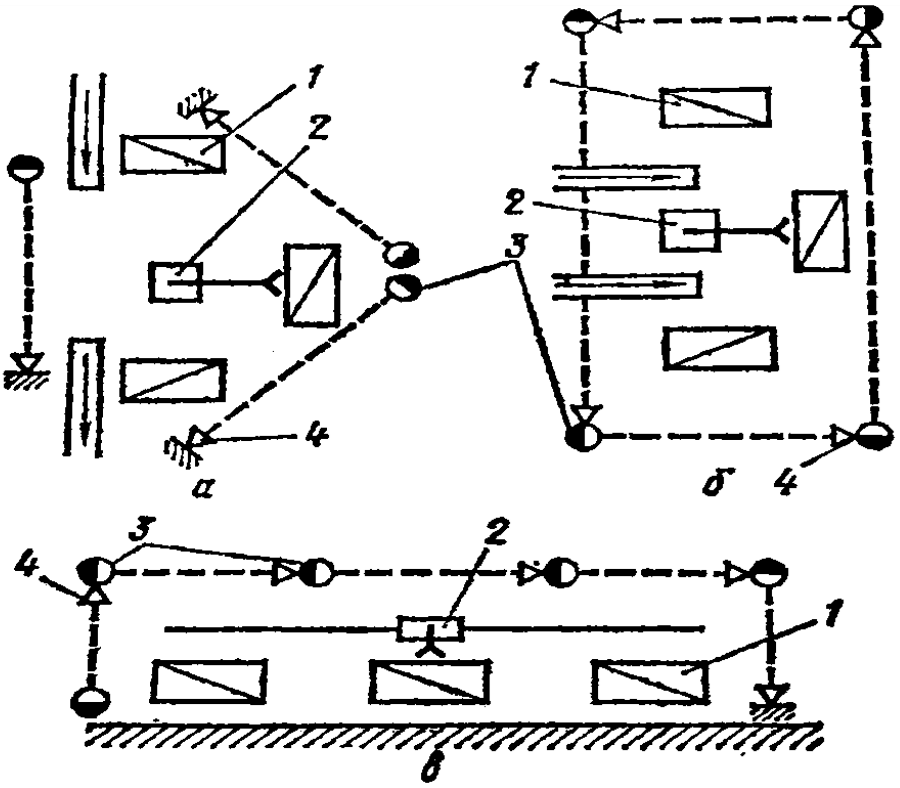


Рис. 2.12. Типовые конфигурации РТК
1 – технологическое оборудование, 2 – ПР,
3 – светоизлучатель, 4 – фотоприемник

Луч света должен быть сфокусирован и освещать поверхность фотоприемника, работающего в паре со светоизлучателем. На этих же стойках размещаются кнопки сброса аварийной блокировки.

Пересечение светового луча при входе человека в зону рабочего пространства приводит к включению всех лампочек-светофоров стоек, ограничивающих эту зону. Таким образом, осуществляется сигнализация запрещенной для работы ПР зоны рабочего пространства (рис 2.12, а). Если ПР находится в этой зоне, либо входит в нее, что регистрируется соответствующими бесконтактными выключателями, то формируется команда на аварийное торможение и выключение движения робота (рис. 2.12, б). При необходимости может быть вновь дано

разрешение на одну из кнопок «Сброс», находящихся на стойках, ограничивающих запрещенную зону работы ПР (рис. 2.12, в).

В целях большей безопасности обслуживающего персонала помимо светозащиты предусматривают монтаж дополнительных устройств, одним из которых являются выдвижные упоры, расположенные в местах, ограничивающих работу зоны ПР. При появлении в этой зоне человека упоры выдвигаются (как по команде оператора, так и по сигналу устройства светозащиты) и препятствует перемещению ПР в эту зону.

Если РТК имеет круговое ограждение с одной или несколькими калитками, то в поверхность пола на входе калиток можно вмонтировать гравитационные трапы, верхняя горизонтальная поверхность которых должна быть на уровне пола. Длина трапа не должна быть меньше 1 м, с тем чтобы человек при нормальном шаге хотя бы одной ногой обязательно наступил на трап. Это вызывает блокировку движений ПР и элементов РТК. После монтажа датчиков информационных систем всех видов осуществляется подключение их к информационным магистралям в соответствии с проектом, и передача в комплексе с другим оборудованием в наладку.

Планировка участков и линий ПР, РТК должна обеспечивать свободный, удобный и безопасный доступ обслуживающего персонала к ПР, основному и вспомогательному технологическому оборудованию, к органам управления и аварийного отключения всех видов оборудования и механизмов, входящих в их состав. Например, требованиям обеспечения свободного доступа к оборудованию и его осмотра в большей степени соответствуют подвесные передвижные ПР, рабочие зоны которых не совмещены с рабочими зонами операторов. Планировка зоны РТК должна проводиться в зависимости от типа используемого технологического оборудования, его компоновки, формы, размеров и расположения рабочих зон, уровня автоматизации оборудования, надежности его работы и степени информационного обеспечения, а также от компоновки и структурно-кинематической схемы ПР с учетом действующих норм технологического проектирования соответствующего производства. При манипулировании и перемещении заготовок, готовых изделий и т. п. над проходами, проездами и рабочими местами под зоной движения исполнительных устройств ПР устанавливают за-

щитные сетки и другие устройства, исключающие травмирование персонала при случайном падении предметов манипулирования. Пульт управления РТК по ГОСТ 22269–76, как правило, размещается за пределами зоны ограждения с обеспечением оператору возможности хорошего обзора за работой ПР, технологического оборудования, входящего в состав комплекса, и окружающего его пространства. Освещенность пультов управления РТК должна составлять по ГОСТ 12.2.072–82* не менее 400 лк. Освещенность в рабочей зоне устанавливается СНиП II-4–79 и отраслевыми нормами соответствующих производств. Так, роботизированные комплексы для обработки отливок (ТУ 2-043-862–88) имеют освещенность площадок обслуживания 400 лк, а отраслевые нормы (ОСТ 5.9854–80) устанавливают общую освещенность рабочих мест на поточно-механизированных сварочных линиях 300 лк при использовании газоразрядных ламп и 200 лк – при лампах накаливания. Шумовые и вибрационные характеристики РТК должны соответствовать ГОСТ 12.1.003–83. При размещении постов управления РТК, участками или линиями в закрытых кабинах минимальные внутренние размеры кабины по ГОСТ 12.2.072–82* должны составлять: высота – 2100 мм, ширина – 1700 мм, длина – 2000 мм, ширина дверного проема – 600 мм. Температуру, относительную влажность, скорость движения воздуха и содержание вредных веществ в воздухе кабины или помещения, откуда ведется управление комплексом, устанавливают по ГОСТ 12.1.005–76. Количество подаваемого в кабину воздуха определяют по СН 245–71. Интенсивность лучистого потока, поступающего через смотровые окна кабины, не должна превышать 1200 кДж/(м2ч), а уровень звука – до 80 дБА. Зоны размещения органов управления на пультах и средства отображения информации выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ 23000–78, ГОСТ 22269–76, ОСТ 12.2.033–78, ГОСТ 12.4.040–78*. Оснащение РТК, участков, линий унифицированными комплектами средств для диагностирования состояния оборудования в процессе эксплуатации и оценки состояния внешней среды с выводом оперативной информации на дисплеи пультов управления позволяет значительно повысить уровень безопасности производственных процессов, обслуживающего персонала и безаварийной работы оборудования в составе РТК.

В общем случае монтаж РТК производят в следующей последовательности:

1. В соответствии со строительным заданием изготавливают фундаменты под ПР, технологическое и околороботное оборудование, каналы для кабельных и трубопроводных магистралей.

2. Производят установку ПР на фундаменте, методы его выверки и крепления описаны выше. Затем устанавливают шкаф управления ПР, соединяют ПР со шкафом информационными и силовыми кабелями, прокладываемыми без крепления в каналах, и подают на шкаф управления временное питание.

3. При включенном питании проверяют отработку движений ПР по степеням подвижности при управлении с выносного пульта управления, а также уточняют направление оси синхронизации ПР и границы его рабочей зоны, особенно по углу поворота основания.

4. Производят установку технологического оборудования.

5. Далее устанавливают магазины выдачи заготовок.

6. Устанавливают шкаф пневмооборудования, производят прокладку трубных проводок к прессам, магазинам и соединение трубных проводок с элементами пневмооборудования согласно проекту.

7. Монтируют шкаф электрооборудования, датчики положений механизмов, осуществляют прокладку силовых и информационных кабелей и подключение их к элементам электрооборудования.

8. Монтируют элементы информационной системы обеспечения техники безопасности (выключатель открывания входа в ограждение, световой барьер) и вводят блокировки в системы управления ПР и околороботного оборудования.

9. Производят закрепление трубных проводок, силовых и информационных кабелей в каналах и закрывание их крышками.

10. РТК по акту сдают в наладку.

Вопросы для самопроверки

1. Каким образом производится закрепление на площадке монтажных осей и отметок?

2. Назовите способы установки и крепления в фундаменте фундаментных болтов.

3. Порядок монтажа ПР, поставляемых в разобранном виде.

4. Как производится выверка ПР и оборудования?

5. Назовите способы установки пневмо- и гидроцилиндров.

6. Из каких соображений определяются внутренний диаметр пневмогидропроводок и допустимый радиус внутренней кривой изгиба труб?

7. Назовите основные способы монтажа шкафов устройств управления ПР?

8. Основные способы монтажа соединительных проводов на панелях.

9. Как выполняется электропроводка при монтаже электрооборудования непосредственно на исполнительном устройстве ПР?

10. Правила заземления электрооборудования ПР.

11. Назовите основные варианты конструктивных схем связи датчиков информационных систем с звеном манипулятора.

12. На базе каких датчиков и устройств может быть выполнено ограждение рабочей зоны ПР?

13. Назовите рекомендуемую последовательность монтажа элементов РТК.

Глава 3. НАЛАДКА И НАСТРОЙКА РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Различают три вида наладки технологического оборудования: первичную – перед проведением приемочных испытаний и сдачей на заводе-изготовителе; контрольную – перед сдачей в эксплуатацию после монтажа на предприятии-потребителе; вторичную – после планового ремонта или восстановления работоспособности при поломках и отказах. Наладка производственных систем на заводах-изготовителях проводится в соответствии с технической документацией и техническими условиями.

Контрольная наладка, которая выполняется, как правило, силами специалистов завода-изготовителя либо специализированной пусконаладочной организации, предназначена для проверки и обеспечения (при необходимости) характеристик оборудования, указанных в документации изготовителем. Контрольная наладка предусматривает проверку и обеспечение характеристик оборудования и организацию вза-

имодействия всех составных частей РТК в соответствии с требованиями технологического процесса. При этом каждая единица оборудования должны быть проверены при максимальных нагрузке и скоростных режимах. При вторичной наладке производят настройку всех систем с целью восстановления их первоначальных (паспортных) характеристик. Она производится силами предприятия-потребителя.

3.1. Наладка механических устройств ПР и мехатронных систем

Наладка механических устройств проводится с целью достижения основных механических и кинематических характеристик ПР и мехатронных систем. К таким характеристикам относятся: максимальные или требуемое перемещения звеньев, их скорости, время перемещения захватного устройства из одной точки в другую, точность позиционирования рабочего инструмента при максимальной скорости.

Наладку механических устройств ПР и мехатронных систем следует начинать с изучения кинематической схемы. Это дает возможность разбить всю систему на узлы и механизмы и определить порядок их взаимодействия.

ПР состоят из соединенных в той или иной последовательности опорных систем, оснований, механизмов поворота, подъема, выдвижения руки, захватного устройства и т. п. В зависимости от грузоподъемности ПР, типа привода и системы координат, в которых они работают, механизмы ПР имеют различную конструкцию. Однако это не мешает выработке ряда общих правил и приемов, используемых при наладке.

Для проведения наладочных работ необходимо пользоваться общими видами ПР и его узлов, схемами размещения узлов и оборудования, техническим описанием и инструкцией по эксплуатации, картой смазки. Вся документация перед наладкой должна быть тщательно изучена.

Внешним осмотром должны быть проверены правильность выполнения монтажных работ, качество сборки узлов и элементов робота. Все крепежные болты должны быть затянуты, соединения должны быть надежными. Учитывая, что механическая система ПР представляет собой разомкнутую кинематическую цепь, наладку целесообразно выполнять последовательно каждого отдельного механизма (например, основания, механизма поворота, механизма подъема и т.

д.), используя уже налаженные механизмы для наладки последующих. В процессе наладки каждого механизма необходимо многократно повторять его движения, наблюдая при этом за его работой. В случае обнаружения отказов наладчик должен выяснить причину отказа, устранить ее и вновь испытать механизм в работе. В ПР с цикловым управлением и пневматическими приводами звеньев выход объекта манипулирования в заданную точку осуществляется по регулируемым жестким упорам. Плавная остановка по упорам выполняется демпферами, а выход в заданные точки контролируется микровыключателями. Основной объем работ по настройке механических систем таких ПР заключается в регулировке плавности хода механизмов и выставлении упоров, ограничивающих движение звеньев. Регулировка скорости перемещения штоков пневмоцилиндров производится при помощи дросселей с обратными клапанами. В ПР с контурным управлением и электромеханическим приводом используется следящий принцип управления с обратной связью по положению звеньев манипулятора и наладку приводов производят путем настройки параметров регуляторов на заданные технические характеристики. Наладку и программирование робота следует начинать при остановленном обслуживаемом оборудовании и при отключённом электропитании робота. Вначале необходимо задать требуемые перемещения робота (крайние точки по каждой координате). При этом проверяют отсутствие заеданий, особенно в конце хода.

Наладка подшипниковых узлов

В процессе наладки механической части ПР и мехатронных систем важно проверить отсутствие люфтов и создание натяга заданной величины в подшипниковых узлах. Подшипники используются в конструкциях фиксирующих либо плавающих опор. Для плавающих опор применяют посадку подшипника с зазором, обеспечивающим подвижность внешнего кольца подшипника в осевом направлении (схемы Рис.3.1а, б). Обычно плавающей делают опору, которая несёт меньшую часть радиальной нагрузки. При создании фиксирующей опоры длинного вала часто используют два подшипника для увеличения жёсткости (схема б). Температурное перемещение обеспечивается посадкой радиального шарикоподшипника с зазором (внешнее кольцо подвижно) либо применением радиального роликоподшипника с цилиндрическими роликами.

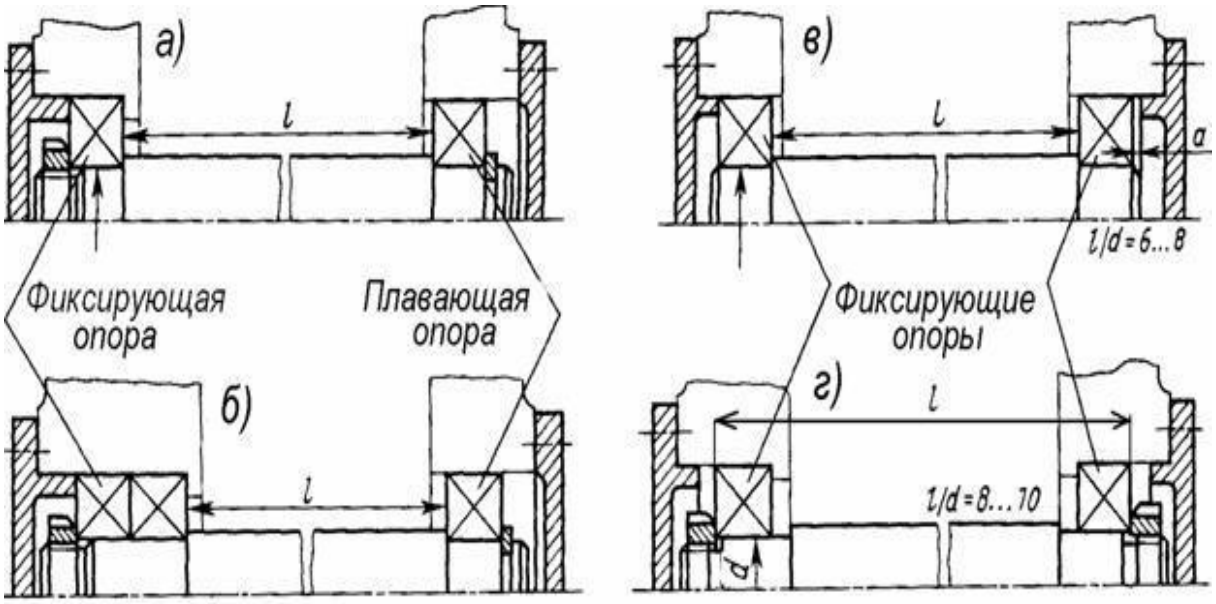


Рис. 3.1. Схемы установки подшипников

Наружные и внутренние кольца фиксирующих опор неподвижны (схема в, г) в осевом направлении и препятствуют смещению вала в ту или в другую сторону. Применение фиксирующих опор допустимо при установке коротких валов враспор в условиях незначительного нагрева. Вал с фиксирующими опорами удобен при монтаже, но требует контроля линейных допусков и учёта теплового расширения, чтобы предотвратить заклинивание тел качения. Для радиально-упорных подшипников установка враспор должна включать возможность осевой регулировки. Величина внутреннего зазора определяет взаимное расположение пары однорядных радиально-упорных шарикоподшипников. Внутренний зазор выставляют после их монтажа, причём осевую фиксацию обеспечивает второй подшипник. Для повышения точности и жёсткости подшипниковых узлов, устранения люфтов и улучшения виброакустических параметров, рекомендуют установку подшипников с предварительным натягом. Преднатяг, т.е. заданная осевая нагрузка, компенсирует зазоры подшипника, создаёт упругую деформацию между максимально возможным количеством тел качения подшипника и его кольцами, предотвращает их проскальзывание. Типичные примеры применения преднатяга - это небольшие быстроходные электродвигатели, шпиндели станков и т.п.

В случае возникновения проблем с подшипником или его установкой, или с тем и другим, температура подшипника не выравнивается, а

возрастает до аномального уровня. Температура насыщения подшипника варьируется в зависимости от теплоемкости, теплоотдачи, количества вращений и нагрузки самого станка. Как правило температура варьируется от 20°С до 30°С. Возможные причины постоянного роста температуры до аномальных пределов следующие: чрезмерная подача консистентной смазки или масла; непредусмотренная нагрузка на подшипник; чрезмерное трение уплотнений подшипника; неправильный контакт подшипника ввиду несоответствия вала, корпуса или заплечиков; недостаточный зазор подшипника; завышенная скорость по отношению к типу подшипника и способу смазки; неправильный контакт подшипника; дефекты подшипника и др. Более того, это могут быть случаи неправильной установки, неточного изготовления или неверного выбора подшипника. Звук подшипника можно проверить с помощью локатора шума или другого соответствующего устройства, приложив его к корпусу. Ненормальные звуки, такие как громкие звуки металла, странные необычные шумы, могут быть вызваны недостаточной смазкой, неподходящим выбором вала или корпуса, попаданием чужеродных частиц или соринок в подшипник, или наличием дефекта подшипника. Даже небольшое отслаивание подшипника создаст аномальный или неровный шум, который опытный работник с помощью локатора легко отличит от нормального шума. Несмотря на то, что температуру можно грубо определить, просто прикоснувшись к поверхности корпуса, все же рекомендуется вставить термометр в отверстие для смазки или в подобное отверстие для непосредственного измерения температуры. Подшипники для движущихся устройств, у которых невозможно проводить мониторинг шума или температуры во время функционирования, например, роликовые подшипники для транспортных средств, необходимо периодически проверять и смазывать свежей смазкой. Проверка состояния смазки во время работы также является полезным способом определения технического состояния подшипника. Техническое состояние может быть определено по количеству грязи и мелкого железного порошка, содержащегося в смазке, а также по любому признаку утечки или ухудшения качества смазки. Каждый раз при выявлении неисправностей или поломок подшипника в результате таких проверок подшипник необходимо разобрать для дальнейшего тщательного обследования и определения причин возникновения неполадок.

Регулировка зазора-натяга по нагреву опор

Температуру подшипников измеряют с помощью термопар, устанавливаемых в отверстиях корпуса шпиндельной бабки так, что они непосредственно касаются наружных колец подшипников, либо с помощью термометров, устанавливаемых в отверстиях в корпусе бабки (отверстия заполняют маслом). Нагрев опор не должен превышать известных границ, но и не должен быть ниже известного уровня. Если указанное условие не выполнено - проводится регулировка подшипников. Такой метод регулировки возможен лишь при том условии, что показатели точности подшипников и сопряженных сними деталей имеют малое рассеяние.

Регулировка зазора-натяга по моменту трения

По результатам исследования прототипа станка устанавливают допуск на величину момента трения покоя или движения (при медленном) вращении. Изменяют момент трения с помощью рычага с грузом, гибкой тяги с пружинным динамометром или с помощью рычага и манометра. Достоинство описанного метода - измерение очень простое и кратковременно. Однако еще в большей мере, чем при испытаниях на нагрев, стабильность регулировки подшипников зависит от постоянства точностных параметров подшипников.

Наладка устройств выборки люфта в механических передачах

Различают два способа выборки бокового зазора в винтовых механизмах – радиальное и осевое смещение гайки относительно винта. При радиальном способе осуществляют сжатие гайки в радиальном направлении, а при осевом способе – смещение гайки относительно винта в осевом направлении. Устройства, обеспечивающие выборку радиальной составляющей бокового зазора, представляют собой разрезные гайки. Конструкция люфтовыбирающего механизма с разрезной гайкой показана на рис. 3.2. Две половинки гайки 1 стягиваются винтами 3 и обжимают винт 2. При этом создается неравномерное обжатие винта, что вызывает неравномерный износ резьбы гайки. Выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляют путем относительного осевого смещения части составной гайки. На рис. 3.2, а показана конструктивная схема

люфтовыбирающего механизма на основе гайки с жесткой регулировкой осевого зазора, в котором выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляют поворотом гайки 1.

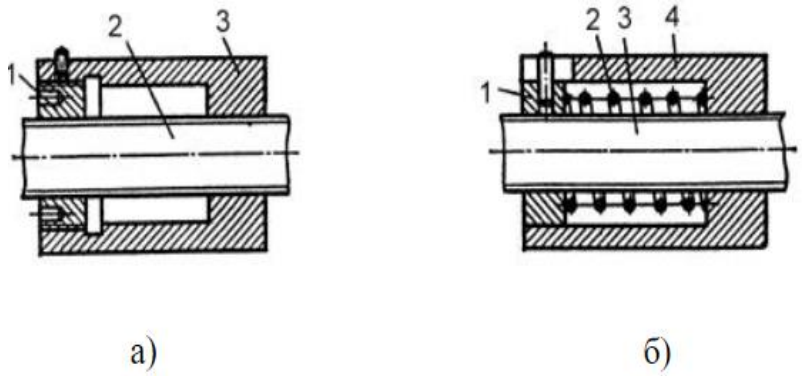


Рис. 3.2. Конструкция люфтовыбирающего механизма с разрезной гайкой

При этом обеспечивается одновременный контакт правых профилей резьбы винта 2 и левых профилей гайки 1, а также левых профилей резьбы винта 2 и правых профилей резьбы гайки 3 при сжатии витков винта. Люфтовыбирающий механизм на основе гайки с эластичной регулировкой осевого зазора показан на рис. 3.2, б. Выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляет пружина 2, отжимая гайку 1 от гайки 4, обеспечивая двухпрофильный контакт резьбы винта 3 с резьбами гаек 1 и 4. Расчет пружины проведен в разделе 9.2. Механизмы выборки мертвого хода на основе гаек с жесткой и эластичной регулировкой осевой составляющей бокового зазора обеспечивают высокую точность относительного перемещения винта и гайки при их движении как в прямом, так и в обратном направлениях. В мехатронных модулях используют механизмы выборки бокового зазора между зубьями колес зубчатых передач двух типов: автономные и с дополнительной кинематической цепью (замкнутым энергетическим потоком). В автономных механизмах выборки мертвого хода используют метод раздвоения ведомого колеса, где в качестве силовых элементов используют пружины.

На рис. 3.3 приведена конструктивная схема такого механизма. Основная половина 1 раздвоенного зубчатого колеса закреплена на валу, а вторая половина 2 образует с втулкой основной

половины 1 колеса подвижное соединение и ее фиксируют от осевого смещения шайбой 3. Под влиянием пружины 4, закрепленной одним концом на половине 1 колеса, другим – на половине 2, половинки колес поворачиваются относительно друг друга в разные стороны и выбирают боковой зазор между зубьями ведущего и ведомого колес.

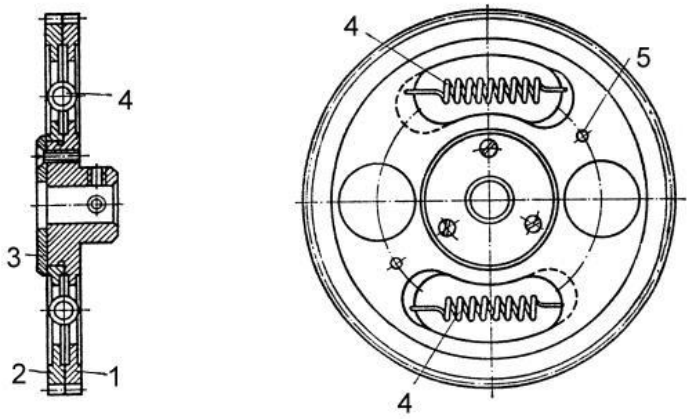


Рис. 3.3. Конструктивная схема выборки зазора

Пружину 4 устанавливают во время сборки механизма с предварительным натяжением, достаточным для выборки мертвого хода в данной зубчатой паре и передаче крутящего момента другого знака, т.е. при реверсе. При наличии мертвого хода необходимо установить пружину большей жесткости.

Кроме выборки зазора при помощи пружин используют жесткую фиксацию, заключающуюся в предварительном относительном смещении половинок раздвоенного зубчатого колеса и их жестком закреплении при помощи винтов, болтов, клеммовых соединений и т.д. Основными недостатками выборки мертвого хода методом раздвоения колеса являются: наличие большого числа дополнительных элементов (пружин, зубчатых колес, винтов и т.д.), увеличенные потери в зацеплении, обусловленные тем, что трение возникает не только на рабочей стороне зуба, но и на нерабочей. Это приводит к ускоренному износу зубьев. Указанные недостатки частично могут быть устранены в механизмах выборки

мертвого хода с дополнительной кинематической цепью (безлюфтовые механизмы с замкнутым энергетическим потоком). Они позволяют осуществить полный выбор люфтов во всех составляющих звеньях путем принудительного разворота в противоположные стороны двух соосно расположенных элементов одной из передач. На рис.3.4 приведена схема безлюфтового планетарного механизма.

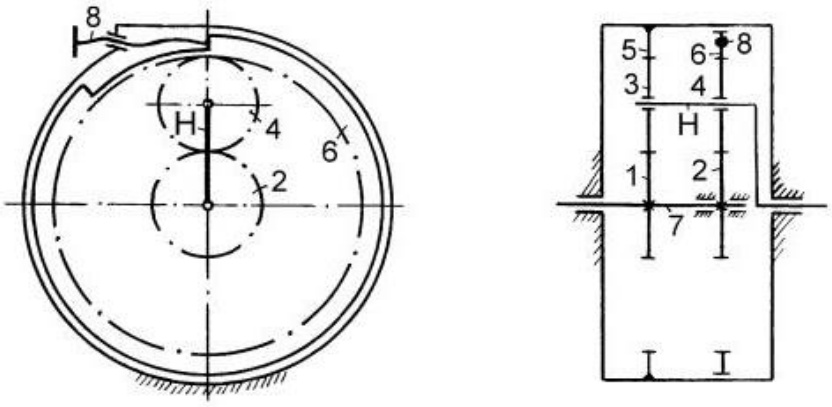


Рис. 3.4. Схема безлюфтового планетарного механизма

Обычно для образования замкнутого контура к исходной кинематической цепи добавляют точно такую же параллельно расположенную кинематическую цепь, однако это необязательно. Иногда замыкающая кинематическая цепь может представлять собой цепь иного рода, чем исходная. Исходная кинематическая цепь состоит из центрального колеса 1, сателлита 3, закрепленного на водиле *H* и неподвижного центрального колеса 5. Для выборки люфтов устанавливают дополнительную кинематическую цепь, состоящую из центрального колеса 2, соединенного с центральным колесом 1 при помощи упругого элемента (торсиона, пружины) 7, сателлита 4, подвижного центрального колеса 6 с внутренним зацеплением и винта 8.

При завинчивании винта 8 подвижное центральное колесо 6 поворачивается и выбирает зазор в паре зубчатых колес 6-4. Затем начинается поворот сателлита 4 и выбирается зазор в паре 4-2. Далее через торсион 7 поворот передается центральному колесу 1 и

выбирается зазор в паре 1-3 и далее поворот сателлита 3 приводит к выборке зазора в паре 3-5. После выборки всех зазоров во всей кинематической цепи происходит дополнительная закрутка торсиона 7, что обеспечивает постоянный натяг в цепи и исключает появление люфта при износе элементов отдельных передач.

3.2. Наладка пневмогидрооборудования ПР

Наладку пневмогидрооборудования ПР начинают с внешнего осмотра. При внешнем осмотре проверяют правильность сборки пневмо- или гидросистемы ПР по соответствующим схемам, обращая особое внимание на соответствие смонтированной аппаратуры, правильность ее установки и присоединения к трубопроводам. Затем трубные проводки пневмо- и гидросистем продувают сжатым воздухом или инертным газом. Данную операцию выполняют для удаления из трубопроводов твердых частиц и пыли, которые неизбежно попадают в них при проведении монтажных работ. Продувку ведут со стороны исполнительных механизмов в сторону блока подготовки воздуха или гидростанции. Сжатый воздух, используемый для продувки, должен быть осушен и очищен от масла и пыли. При продувке воздухом рекомендуется все сварные швы простукивать молотком. После продувки трубопроводов производят их соединение с аппаратами и проверяют герметичность и прочность пневмогидросистем. Для этого в систему подается пробное давление сжатого воздуха, которое для пневмосистем должно составлять 1,5, а для гидросистем 1,25 номинального давления. Поднимать давление в системах следует постепенно, делая выдержки при величинах 0,3; 0,6 и 1,0 пробного давления. Во время выдержек проверяют все сварные стыки, фланцевые и резьбовые соединения путем обмазки мест соединений мыльной водой и наблюдения за по-' явлением пузырей. Обнаруженные места утечек воздуха отмечают и после снятия давления производят подтяжку соединений. Для полного устранения всех утечек подобные операции повторяют 2–3 раза. При проверке пневмогидросистем на прочность их выдерживают при пробном давлении в течение 5 мин, затем плавно снижают давление и производят осмотр. Элементы пневмогидросистем не должны иметь вспучиваний, трещин, течей, запотеваний. Если в соответствии с ТУ на ПР или РТК проверку смонтированных пневмо- и гидросистем необхо-

димо проводить с отключением исполнительных механизмов, клапанов, то трубные проводки закольцовывают с помощью переходников. Следует помнить, что при первоначальном пуске ПР возможны любые случайные движения его исполнительных органов. Поэтому необходимо принять меры для исключения возможных аварийных ситуаций путем установки соответствующих упоров, тщательного наблюдения за движением рабочих органов в момент запуска. Наладку пневмогидрооборудования следует проводить в соответствии с рекомендациями, указанными в инструкциях к ПР. Рекомендуется дополнительно к инструктивному материалу прилагать паспорт типовых неполадок и способов их устранения, а все данные, полученные при наладке, заносить в паспорт наладки. Схему пневматической или гидравлической системы ПР рекомендует ся расчленять на структурные развертки в виде комплекта магистральных контуров типовой структуры, составленной по элементам рабочего цикла. Каждый магистральный контур обеспечивает выполнение только определенных функций, поэтому наладка, выполняемая по данной системе, становится более определенной, а все неполадки исключаются посредством последовательной проверки работы аппаратуры каждого магистрального контура. Магистральные контуры определяются схемами движения сжатого воздуха или рабочей жидкости.

Выделение магистральных контуров и схем движения потоков рабочего тела производят в следующей последовательности:

1) рабочий цикл ПР разбивают на такты, соответствующие движениям рабочего органа между точками позиционирования как основными, так и промежуточными '(например, исходное положение – опускание руки для захвата детали – подъем руки с деталью – поворот руки – выдвижение руки – опускание руки и освобождение детали – подъем руки – выдвижение руки – обратный поворот – исходное положение);

2) для каждого такта определяют перечень участвующих в работе клапанов, распределителей, дросселей, гидродвигателей и т. п.;

3) по принципиальной и монтажной схемам определяют каналы, соединяющие участвующие в работе аппараты;

4) выявляют магистрали подвода и отвода рабочего тела;

5) полученную развертку располагают между напорной и сливной (сбрасывающей) магистралями.

Перед пуском ПР с пневматическим приводом необходимо залить масло в маслораспределитель блока подготовки воздуха и проверить

затяжку винта сброса конденсата на фильтре-влагоотделителе. С целью предотвращения превышения давления в пневмосистеме ПР в первоначальный момент работы необходимо повернуть регулировочный винт редукционного пневмоклапана против часовой стрелки до упора. Затем необходимо открыть запорный вентиль подвода сжатого воздуха от внешней магистрали и с помощью редукционного пневмоклапана установить требуемое давление сжатого воздуха. Дальнейший пуск ПР осуществляется с пульта оператора устройства управления.

Перед пуском ПР с гидравлическим приводом в гидробак необходимо залить чистое масло, заполнить маслом трубопроводы и удалить из системы воздух. При этом пружины напорных гидроклапанов насосов должны быть полностью ослаблены. Краны или пробки для выпуска воздуха, установленные в наивысших точках гидросистем, открывают, накидные гайки на концах магистральных труб ослабляют. После того, как при включенных электромоторах из кранов и из-под гаек пойдет чистое масло, электродвигатели насосов отключают, краны закрывают, а напорные гидроклапаны насосов настраивают на рабочие давления, указанные в инструкциях. Необходимо также выпустить воздух из гидроцилиндров, для чего приоткрывают золотники в крышках гидроцилиндров, а поршни гидроцилиндров перемещают несколько раз на быстрых ходах из одного крайнего положения в другое. После полного удаления воздуха из гидросистемы необходимо долить масло в гидробак до верхнего уровня маслоуказателя.

Наладка отдельных элементов и аппаратуры пневмо-гидросистем производится следующим образом:

1. В пневматической системе настройка давления на выходе регулятора осуществляется при помощи регулировочного винта. При вращении винта по часовой стрелке давление на выходе регулятора повышается, а при вращении его против часовой стрелки понижается. При понижении давления рекомендуется вначале понизить его до величины, несколько меньшей требуемой, а затем плавно поднять до нужного значения.

2. Настройка реле давления производится в следующем порядке. К реле давления подводится сжатый воздух. Если при этом толкатель не подвинется в крайнее положение, то винт настройки пружины реле вывинчивается из корпуса до полного выдвижения толкателя.

Вывинчиванием установочного винта микропереключателя приближают его штифт к толкателю реле до момента переключения контактов. Этот момент контролируется либо электролампой, подключенной последовательно к электросети через нормально открытый контакт микропереключателя, либо на слух. После этого винт установки вывинчивается на 1/4 оборота и контрится. Снятие давления должно вызвать переключение контактов микропереключателя в обратном направлении.

3. Распределительные устройства проверяются путем поочередного ручного (путем воздействия на якорь) переключения электромагнитов. При переключении распределителей воздух должен подаваться в соответствующие полости пневмоцилиндров, обеспечивая движение звеньев манипулятора в соответствии с пневмосхемой. Затем при подключенной системе управления электромагниты включаются кнопками управления наладочного пульта. Звенья манипулятора должны двигаться в направлениях, указанных стрелками на фальшпанели пульта.

4. Настройку скорости перемещения поршня пневмо-цилиндра производят дросселированием выпуска воздуха из полостей цилиндра. При этом удается получить не только необходимую скорость движения, но и смягчить удары поршня о крышки цилиндра и обеспечить плавную работу ведомых механизмов. При этой настройке раздельно регулируют прямой и обратный ходы привода с помощью дросселей в сочетании с обратными клапанами, установленными на воздухопроводах каждой полости цилиндра. Такие устройства позволяют регулировать скорость на всем участке хода поршня. При наличии в цилиндре буферных устройств достигают замедления скорости поршня перед приходом его в крайние положения путем регулировки дросселирующих игл в буферном устройстве, что обеспечивает плавный останов механизма. Скорость поршня пневматического цилиндра изменяется при колебаниях внешней нагрузки, поэтому правильность произведенной регулировки проверяют при наибольшей и наименьшей нагрузке. По окончании регулировки величин давления, скоростей перемещения и длины ходов регулировочные винты должны быть законтрены.

5. Наладка гидрораспределители начинается с проверки правильности присоединения гидрокоммуникаций путем поочередного ручного включения электромагнитов. Затем следует путем включения электромагнитов с пульта управления проверить надежность перемещения (отсутствие зада-

ния) золотника управления и основного золотника направляющего распределителя, а также убедиться в отсутствии гидравлического удара (вызывающего шум и вибрации трубопровода) в момент переключения. Отсутствие заедания золотников проверяется при максимальном и минимальном (0,3–0,4 МПа) давлениях. При этом имеющиеся в распределительных гидропанелях дроссели должны быть полностью открыты, а клапаны затянуты до отказа. Если возникает гидравлический удар, то он должен быть ликвидирован путем регулирования дросселей, установленных в крышках распределителя.

Надежность переключения золотников распределителей определяется путем многократного включения электромагнитов. При этом электромагниты необходимо держать включенными не менее 5 мин. Не допускается гудение электромагнитов при их включении. Золотники управления распределителей должны иметь запас хода (после полного их перемещения) не менее 0,2–0,5 мм. Золотники управления с пружинами должны при обесточивании электромагнита четко и без задержки перемещаться своими пружинами в исходное положение после 2–5-минутной выдержки их под максимальным давлением. Золотники управления с фиксаторами должны быть проверены на надежность фиксации в каждом положении при отключенных электромагнитах и наименьшем давлении 0,3 МПа. При этом золотник управления должен перемещаться при силе не свыше 7 Н.

6. Наладка дросселей и регуляторов потока заключается в установлении с помощью лимба или стакана (для дросселей, встраиваемых непосредственно в трубопровод) подачи масла через дроссель, соответствующей заданной скорости перемещения звена ПР. Определение скорости перемещения звена производится с помощью электронного реле времени, управляемого от датчиков конечных положений с последующим пересчетом ее величины через пройденное звеном расстояние и время. При отсутствии электронного реле времени определение скорости звеньев можно производить с помощью секундомера. Для этого ПР программируется для выполнения одного повторяющегося движения. В момент пуска ПР включается секундомер и определяется время выполнения звеном ПР пяти или десяти двойных ходов. Скорость определяется по среднему времени выполнения одного хода и длине хода. Наладка путевых гидравлических дросселей заключается в подборе такого положения тормозного упора, при котором происходит плавное

торможение перемещающегося звена ПР. Если при любом положении тормозного упора не удается достичь плавного торможения, то следует установить упор с меньшим углом наклона рабочей грани, воздействующей на ролик путевого дросселя. При опробовании и наладке пневмоприводов часто случается, что поршень пневмопривода не в состоянии вести за собой ведомый механизм. Недостаточное усилие на штоке пневмопривода может быть вызвано различными причинами: чаще чрезмерным трением и заеданием вследствие неправильной сборки и монтажа, а иногда и недостаточной приработкой и обкаткой узлов ПР. В этом случае ведомые звенья ПР отсоединяют от привода, проверяют исправность работы каждого звена и устраняют выявленные дефекты. В случае надобности производят приработку и обкатку путем многократного повторения рабочих циклов механизма. Кроме того, может быть недостаточное давление в сети сжатого воздуха вследствие несоответствия производительности компрессора расходу сжатого воздуха потребителями и чрезмерных утечек. Понижение давления сжатого воздуха в сети имеет место также вследствие недостаточного сечения воздухопроводов, особенно при значительной длине их и неравномерном расходе воздуха потребителями. В этих случаях необходимо установить, какая из перечисленных причин имеет место.

3.3. Наладка электрооборудования и устройств управления

Работа электрооборудования в значительной степени зависит от четкости действия, входящих в его состав электрических устройств, которые должны быть исправными и соответствовать проектной документации. При наладке электрооборудования и устройств управления проводится следующий комплекс работ: проверка качества электромонтажных работ и соответствие их рабочим чертежам проекта; проверка установленной аппаратуры, ее настройка и регулировка; проверка состояния изоляции и заземляющих устройств; испытание электрооборудования и устройств управления в комплексе с другими системами в различных режимах работы, в том числе и под нагрузкой.

Учитывая, что для различных типов роботов и мехатронных устройств состав электрооборудования и сложность устройств управления также различны, невозможно выработать строго определенные

действия наладчика. Однако во всех случаях целесообразно использовать некоторые общие методы сокращения времени наладки и выявления неисправностей. Одним из наиболее простых и надежных методов является метод наблюдения. Он состоит в наблюдении за действием элементов схемы и оценке правильности их действия. Метод исключения или локализации проверяемого участка заключается в искусственном сокращении объема участка, содержащего необнаруженный неисправный элемент путем последовательного отключения до тех пор, пока не обнаружится неисправность. Под связями в данном случае понимают все виды связей, в том числе и механические. Например, проверка двигателя на холостом ходу позволяет установить, что именно неисправно – двигатель или механизм. Метод сравнения заключается в замене проверяемого элемента или узла схемы соответственно исправным элементом или узлом (панелью, блоком). Если после замены элемента или узла неисправность исчезнет, наладчик продолжает работу, оставляя неисправный элемент или узел в мастерской.

Метод обратной последовательности применяют при проверке схемы, состоящей из нескольких звеньев, связанных функциональной зависимостью. Он заключается в том, что проверку производят на выходе каждого звена последовательно, от последнего к первому. Если при этом какое-то промежуточное звено имеет нормальный выход, т. с. выполняет требуемую функцию, то сразу же после этого можно проверить выход предыдущего звена. Такой метод исключает лишние контрольные операции, и, следовательно, сокращает время наладки. Этот метод дает наибольший эффект в условиях серийного производства и эксплуатации.

При наладке электрооборудования возникает необходимость в определенном количестве электроизмерительных приборов, инструмента и приспособлений, номенклатуру и число которых определяют в зависимости от сложности схем, а также от типов применяемой электроаппаратуры и электронных приборов. Применяют как специальные, так и универсальные измерительные приборы. Универсальные многошкальные приборы обычно используют при наладке схем, содержащих одновременно элементы переменного и постоянного тока. Во избежание неправильных включений, приводящих к выходу из строя приборов, особенно электронных, проверка работоспособности электрических схем и их наладка должны осуществляться наладчиками,

имеющими определенные навыки и квалификацию. Оснащение участка наладки приборами, инструментом и соответствующими приспособлениями должно быть таким, чтобы способствовать обеспечению быстрого отыскания возможных неисправностей в схемах. Как показал опыт, большинство наладочных работ не требует высокой точности измерения, поэтому наибольшее применение находят более дешевые приборы классов 1,5 и 2,5, а также индикаторы напряжения. При наладке достаточно сложных устройств управления ПР следует пользоваться осциллографами, генераторами гармонических и периодических сигналов, частотомерами, логическими пробниками, пульсаторами и многоканальными логическими анализаторами.

Выдержку времени отключения электромагнитных реле постоянного тока в небольших пределах (до 0,5 с) регулируют: изменением толщины немагнитной прокладки (грубо); изменением натяжения пружины (более точно). Выдержку времени полупроводниковых и электронных реле, как правило, устанавливают на заданное значение по шкале реле путем поворота указательной рукоятки. Учитывая, что реле времени имеют определенную погрешность времени срабатывания, окончательно выдержку времени реле корректируют при испытаниях.

При наладке тепловых реле эксцентрик регулятора установки должен быть установлен в положение, указанное в конструкторской документации на монтаж электрооборудования. При отсутствии такого указания эксцентрик устанавливают в положение, при котором ток установки равен 1 –1,05 от номинального тока защищаемого двигателя. При регулировании величины уставки необходимо учитывать, что поворот эксцентрика вправо (к риске «+») ведет к загрублению защиты, т. е. увеличению минимального тока и времени срабатывания. Реле времени на заданную выдержку настраивают с помощью секундомера. В зависимости от необходимой точности замера величины выдержки времени применяют обычные и электрические секундомеры. Последние применяют для более точной настройки.

Наладка устройств управления ПР

Для управления движениями звеньев ПР используется множество различных систем управления - цикловых, позиционных, контурных, на базе микропроцессорных наборов. Если внимательно рассмотреть их структуру, то можно увидеть, что все они состоят из набора функ-

циональных блоков или модулей, например, управляющевы-числительных, программно-задающих, модулей сопряжения и т. п.

Первичная наладка устройств управления ПР производится на заводе-изготовителе перед проведением приемочных испытаний и сдачей ОТК. Работы по наладке производятся на специальных стендах с использованием контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры. Контрольная наладка устройств управления ПР производится после проведения монтажных работ перед сдачей в эксплуатацию оборудования на заводе-потребителе. Поэтому при наладочных работах основное внимание должно быть уделено проверке правильности распайки соединительных кабелей и подключения всех внешних элементов системы управления (катушек электромагнитов пневмо- и гидрораспределителей; датчиков контроля положения звеньев манипулятора; пусковой аппаратуры технологического оборудования и пр.). Контроль правильности подключения всех внешних элементов достаточно просто осуществляется при проверке отработки команд ПР с пульта ручного управления. При нажатии на кнопки пульта ПР должен отрабатывать движения, обозначенные мнемоническими символами (поворот, выдвижение руки, подъем и т. д.). С пульта управления также можно проверить срабатывание и состояние датчиков положения звеньев манипулятора. Если движение какого-либо звена не соответствует указанной мнемонике, то необходимо произвести переключение соединительных кабелей. Если при контроле отсутствует отработка манипулятором какой-либо команды, то при исправных внешних трассах, электромагнитах распределителей и датчиках, неполадки следует искать непосредственно в стойке управления. При этом необходимо вначале определить неисправный узел или модуль, а затем локализовать неисправность непосредственно на плате, выявив неисправный элемент.

Проверка работоспособности системы управления в комплексе со всеми узлами ПР может осуществляться по тестовой программе. Такая программа должна включать в себя произвольную последовательную отработку всех движений ПР, предусмотренных его степенями подвижности. Для ввода гест-программы необходимо переключатель номера кадра установить в нулевое положение, а манипулятор – в исходное положение. Нажав на пуль" те управления клавишу «Программа», необходимо набрать команду нулевого кадра и нажать кнопку «За-

пись». Далее набирается команда первого кадра программы и заносится в память. Аналогичным образом вводятся остальные команды тест-программы и в конце нажимается клавиша «Конец программы». Для проверки правильности ввода тест-программы система управления переводится в шаговый режим. Нажимая последовательно клавишу «Пуск», проверяется соответствие движений манипулятора программе, записанной в каждом кадре. Затем система управления переводится в цикловый режим и после нажатия клавиши «Пуск» проверяется правильность отработки одного цикла программы. Дальнейшая проверка осуществляется в автоматическом режиме с многократным повторением тест-программы и движений ПР. Наладчик должен внимательно следить за поведением ПР и в случае возникновения сбоев определить причину, устранить ее и произвести повторное включение.

Проверка работоспособности микропроцессорных систем управления. В состав любой микропроцессорной системы или контроллера входят модуль центрального процессора, модули оперативной и постоянной памяти, модули ввода-вывода для взаимодействия с периферийными устройствами, Проверка работоспособности модулей ввода-вывода осуществляется путем подачи на их входы последовательно по всем каналам сигналов «Установка в I» и «Установка в 0». Если модули оснащены светодиодами индикации состояния их выходов, то состояние светодиодов, не соответствующее входным сигналам, свидетельствует о наличии неисправности. Контроль состояния выходов модулей ввода-вывода при отсутствии светодиодной индикации может осуществляться тестером или логическим пробником.

Проверка работоспособности модулей оперативной памяти осуществляется путем записи нескольких команд по различным адресам с последующим просмотром содержимого на индикаторе пульта управления. Искажение информации свидетельствует о наличии неисправности. Проверка работоспособности модуля центрального процессора осуществляется значительно труднее. Дело в том, что правильная работа вычислительной системы требует исправных аппаратных средств и безошибочного программного обеспечения. Программа может работать правильно на конкретных тест-наборах, но отказывает при эксплуатации из-за получения непредвиденного набора кода, который она не может обработать. Такие ситуации возникают вследствие ввода инфор-

мации неопытным оператором, что приводит к кажущемуся отказу системы. Кроме отказов таких видов имеются и отказы, возникающие в системе после некоторого срока эксплуатации. Они вызываются электрическими отказами из-за неисправностей компонентов или, что происходит, гораздо реже, программными отказами, из-за искажения хранимых в памяти кодов команд. Двойственная природа вычислительной системы при возникновении отказа сразу же ставит следующую проблему. Если отказ не очевиден, оператор должен решить, скрыт отказ в аппаратных средствах или вызван ошибкой в программе. На этот вопрос часто ответить не так просто, так как характер отказа может препятствовать выполнению любой программы, а отказ в операционной системе может не допустить загрузку и выполнение любой тест-программы. Если тест-программы не работают, вероятно, имеет место отказ в аппаратных средствах, а вся тест-последовательность проверит главные функциональные блоки системы и покажет, не кроется ли отказ в прикладных программах.

Несмотря на наличие испытанных методов систематического контроля системы в случае отказа наиболее очевидным и часто игнорируемым первым действием еще до подключения какого-либо контрольно-измерительного прибора должен быть тщательный осмотр системы. Отказ может быть очевидным, например, «сгоревшая» микросхема, а состояние, в котором остановилась система, ' само может дать подсказку о месте возникновения отказа в системе. Необходимо проверить все встроенные в систему индикаторы, которые могут помочь в локализации отказа; кроме того, многие модульные системы имеют в подсистемах индикаторы типа «проходит/не проходит», которые идентифицируют неисправную подсистему. Принципы поиска неисправностей в системах с микропроцессорами в основном не отличаются от принципов тестирования обычных цифровых устройств. В соответствии со стандартной процедурой персонал должен Изучить проверяемую систему, определить состав требуемого контрольно-измерительного оборудования и составить логическую процедуру поиска неисправности.

Когда подозревается отказ, часто много информации о системе можно получить, не снимая крышек оборудования. В большинстве систем имеются какие-либо клавиши для ввода и индикаторы, которые

можно использовать для ввода данных и наблюдения реакций на индикаторах. Если, например, все индикаторы погашены, следует подозревать неисправность тумблера включения сети, обрыв в шнуре питания или неисправность в блоке питания. Если же не работает один из сегментов в 7-сегментном индикаторе, отказ, вероятно, возник в самом индикаторе или в схеме формирователя. Наблюдение даже за простейшими индикаторами может стать ключом к определению наиболее вероятного места отказа.

Наладка информационных систем начинается с проверки надежности крепления датчиков, а также правильности их подключения к информационным кабелям. Все подсоединения должны соответствовать принципиальным электрическим схемам соединений, маркировка выводов датчиков и соединительных проводов должна быть идентичной. При необходимости правильность подключения проверяют методам прозвонки.

Наладка конечных выключателей заключается в правильной настройке взаимодействующих с ними упоров (экранов) управления. Перед настройкой необходимо проверить четкость работы конечных выключателей. Проверка работы контактных выключателей осуществляется ручным воздействием на их приводные элементы, которые должны передвигаться без заеданий и повышенного сопротивления. Контроль работы бесконтактных конечных выключателей осуществляется при включенном напряжения питания цепей постоянного тока путем проверки срабатывания соединенных с выключателем реле. Если выходы датчиков подключаются непосредственно на входы логических элементов, то при срабатывании датчика уровень сигнала на его выходе должен соответствовать значению логической 1, либо логического 0.

Настройка упоров управления контактных конечных выключателей может быть выполнена при отключенном напряжении питания. С этой целью механизм устанавливается в требуемое положение, после чего упор, предварительно освобожденный от винтового зажима, плавно -перемещается навстречу приводному элементу выключателя до точки срабатывания последнего. Срабатывание выключателей мгновенного и полумгновенного действия фиксируется по характерному щелчку, сопровождающему срабатывание встроенных в них микровыключателей. Срабатывание выключателей прямого действия фиксируется

электрическим щупом, подсоединенным к замыкающим контактам выключателя. После этого управляющий упор должен быть перемещен за точку срабатывания на 1–2 мм, что обеспечивает надежность действия выключателя. В этом положении упор должен быть закреплен. Необходимо, чтобы при взаимодействии выключателя с упором управления ход приводного элемента выключателя был больше рабочего хода выключателя, но вместе с тем не превышал бы величины полного хода, допустимого для данного выключателя. При выполнении этого требования исключается возможность воздействия на приводной элемент силой, превышающей силу срабатывания выключателя. При отводе упора управления необходимо, чтобы приводной элемент выключателя возвращался в начальное положение, т.е. полностью освобождался от действия упора. В противном случае выключатель может остаться во включенном состоянии.

Настройка бесконтактных выключателей осуществляется путем регулировки величины рабочего зазора между торцевой поверхностью датчика и измерительной пластинкой либо (для датчиков типа БВК) введением пластины в рабочую зону выключателя. Надежность срабатывания проверяется путем многократного (не менее 10 раз) взаимодействия перемещаемого и неподвижного механизмов^ до конечного положения. В случае обнаружения эффекта «дребезга контактов» необходимо уменьшить рабочий зазор. Настройка датчиков определения текущей координаты звеньев манипулятора производится при крайних положениях звеньев. В одном из крайних положений звена подвижный элемент датчика должен быть установлен таким образом, чтобы его выходная величина (сопротивление, напряжение, частота и т. п.) соответствовала минимальному либо максимальному значению. При перемещении звена подвижный элемент должен приводиться во вращение без проскальзывания. Передаточное число кинематической пары должно быть таким, чтобы диапазон перемещения подвижного элемента датчика несколько (на 10%) превышал величину хода подвижного звена манипулятора. После настройки передаточных механизмов и датчиков регулировочные элементы должны быть надежно закреплены с помощью фиксирующих винтов.

Наладка информационных систем восприятия внешней среды – систем технического зрения (СТЗ) представляет собой достаточно

трудную задачу. Это обусловлено тем, что помимо датчиков (видиконов) СТЗ содержит блоки обработки информации, включающие зачастую микро ЭВМ. На работу СТЗ в значительной степени влияет контраст между объектом и фоном, а следовательно, и освещение объектов.

Работы по наладке СТЗ следует проводить строго в соответствии с инструкцией по эксплуатации. В общем случае при наладке необходимо выставить оптическую систему на заданной высоте от поверхности захвата. Особое внимание при этом следует обращать на перпендикулярность оптической оси видикона рабочей плоскости. Далее необходимо выставить угловое положение видикона относительно системы координат ПР (совмещение главных осей). В режиме «настройка» производится тщательная фокусировка изображения и проверке восприятия информации по эталону с заданной конфигурацией. Если не удается сфокусировать изображение, необходимо проверить правильность установки оптических линз видикона. Если СТЗ правильно воспринимает информацию с эталонной детали, то процесс наладки можно.считать законченным.

Для проверки правильности настройки системы светозащиты необходимо последовательно перекрывать световой поток между парами светоизлучатель – приемник. При этом должно происходить отключение приводов и остановка ПР. Затем необходимо проверить снятие блокировки путем нажатия на кнопку «Сброс», находящуюся на стойке. ПР при этом должен продолжить выполнение прерванной программы.

Существенную помощь в наладке системы программного управления робототехнического устройства или комплекса может оказать моделирование с использованием виртуальных моделей рабочей среды и самих роботов. Использование моделирования снижает затраты, и роботов можно программировать в автономном режиме, что исключает время простоя оборудования. Действия роботов и сборочные детали можно визуализировать в трехмерной виртуальной среде за несколько месяцев до того, как будут созданы прототипы. Написать код для моделирования также проще, чем написать код для физического робота. Одним из известных технических решений создания виртуальной

среды является приложение FANUC ROBOGUIDE, которое выполняет симуляцию как движений робота, так и команд для конкретной сферы применения и обеспечивает значительную экономию времени при создании новых настроек движения. Чтобы гарантировать минимальное влияние на производство, модули можно разрабатывать, тестировать и изменять полностью автономно. Чтобы сократить время на трехмерное моделирование, модели деталей можно импортировать из ПК в виде данных САПР. Большая библиотека программного обеспечения для симуляции позволяет пользователям выбирать и изменять детали и размеры. Для работы с интуитивно-понятным и чрезвычайно простым в использовании приложением ROBOGUIDE требуется минимальное обучение. Оно также доступно со специализированными инструментальными средствами для конкретных сфер применения. Моделирование в среде Roboguide предоставляет возможность офлайн-программирования технологических процессов для роботов FANUC и включает 3D-моделирование комплекса, программное обучение манипуляторов и воспроизведение запрограммированных обучением траекторий и программ. Моделирование в пакете Roboguide основано на использовании виртуального контроллера FANUC Robotics Virtual Robot Controller, который обеспечивает точное обучение и выполнение программ в соответствии с информацией о времени цикла.

3.4. Настройка параметров регуляторов в электроприводах роботов и мехатронных систем

3.4.1. Настройка по компьютерной и математической моделям

В современных промышленных устройствах в качестве исполнительных двигателей используются, главным образом, синхронные и асинхронные двигатели переменного тока, динамика которых описывается сложными существенно нелинейными уравнениями. В то же время современные блоки управления (преобразователи) содержат математические модели двигателей, на базе которых в реальном мас-

штабе времени осуществляется линеаризация их нелинейных характеристик и указанные выше двигатели в целях аналитически с успехом описываются линейными зависимостями аналогично двигателям постоянного тока.

Типовой преобразователь в управляемом приводе содержит регуляторы скорости, тока, датчик тока. Регуляторы скорости и тока являются ПИД – регуляторами с изменяемой структурой, а обратная связь по скорости организуется путем подсчета числа импульсов с датчика угла поворота ротора в единицу времени.

На рис. 3.5 приведена типовая структурная схема привода включая двигатель, на которой обозначено: РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; k_u– коэффициент передачи инвертора; k_u , k_e , $T_э$, $k_м$, $J_{пр}$ - параметры двигателя; $k_{дт}$ - коэффициент передачи датчика тока; $k_{рп}$ – коэффициент передачи регулятора перемещения. Связь структурной схемы системы управления и её математической модели в виде дифференциальных уравнений или передаточных функций является вполне очевидной. Исходя из этого, ограничимся представлением математической модели привода в виде структурной схемы, приведенной на рис. 3.5. Синтез системы будет производиться с использованием пакета Matlab, ориентированного на представление исследуемой системы в виде структурной схемы. Динамические свойства системы во многом определяются качеством контура скорости. Поэтому необходимо и достаточно осуществить настройку регулятора скорости. Для этого воспользуемся стандартным инструментом настройки коэффициентов ПИД регулятора, входящим в комплект последней версии Matlab. Для вызова процедуры настройки необходимо дважды кликнуть на блоке ПИД регулятора и нажать в появившемся окне кнопку «Tune». Инструментальный пакет «PID tuner» предоставляет в распоряжение пользователя графический интерфейс для настройки коэффициентов ПИД регулятора, обеспечивающих желаемое качество переходных процессов.

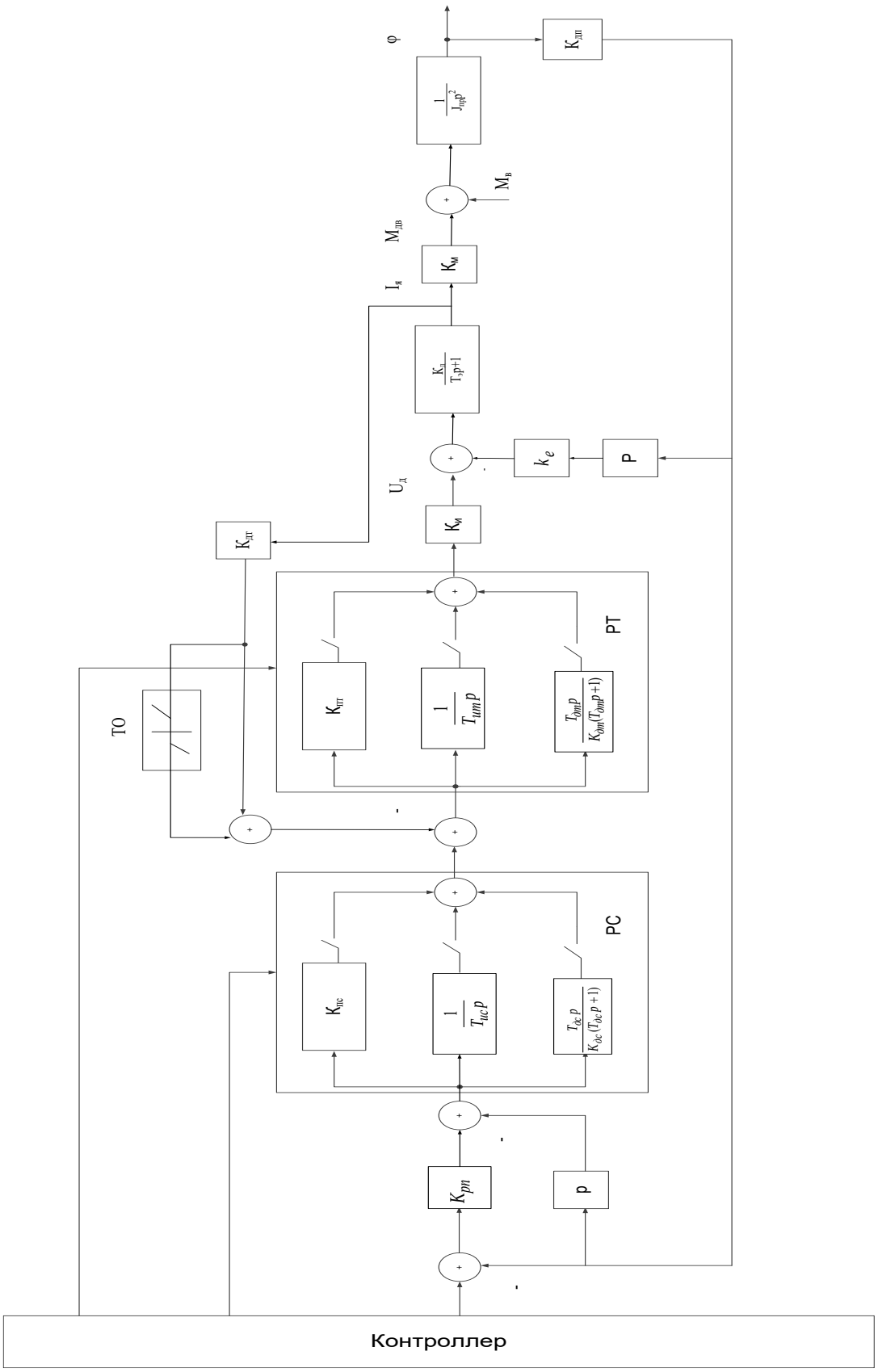


Рис. 3.5. Структурная схема привода

В качестве средства для достижения указанной цели принимается оптимизационный подход, обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. Особую значимость имеет то обстоятельство, что весь процесс настройки проходит в графическом режиме без необходимости проведения каких-либо вычислений. Окно пакета «PID tuner» представлено на рис. 3.6.

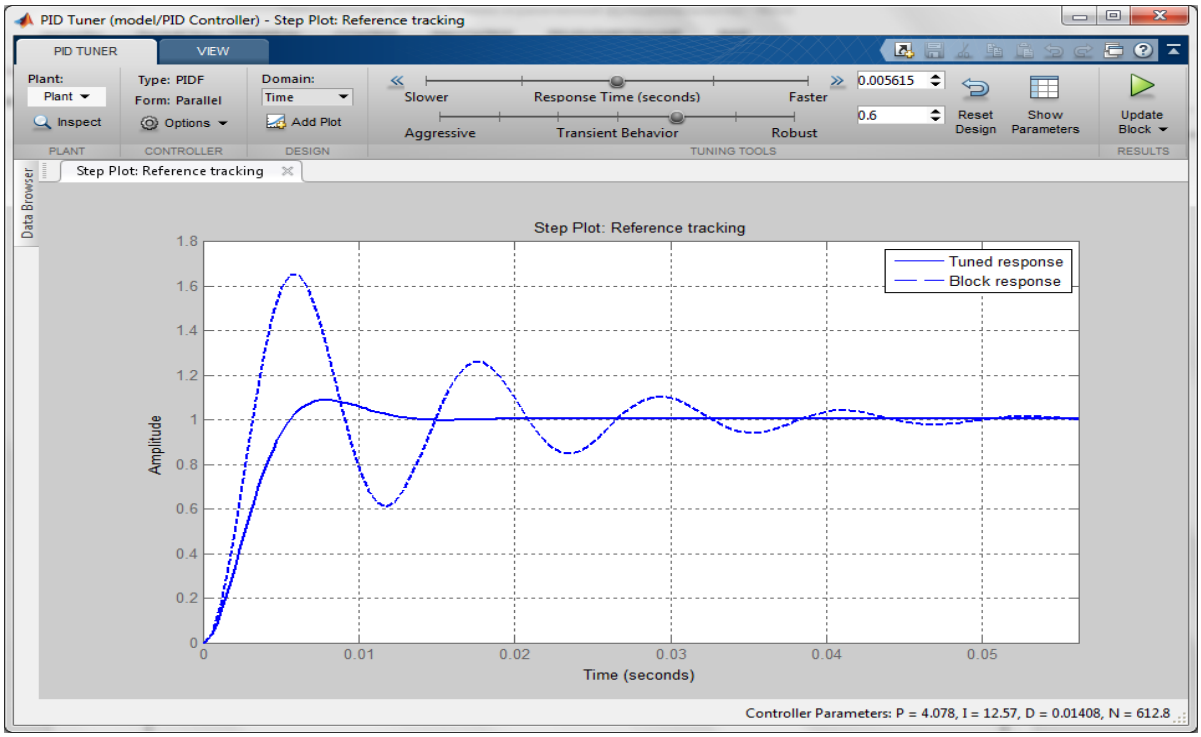


Рис. 3.6. Окно пакета «PID tuner»

Здесь пунктирной линией показан переходный процесс не настроенной системы, сплошной линией – результат настройки. При помощи ползунков «response time» (время отклика) и «transient behavior» (переходный режим) убираем колебательность и перерегулирование с сохранением оптимального быстродействия системы.

Вид настроенного переходного процесса показан на рис. 3.7.

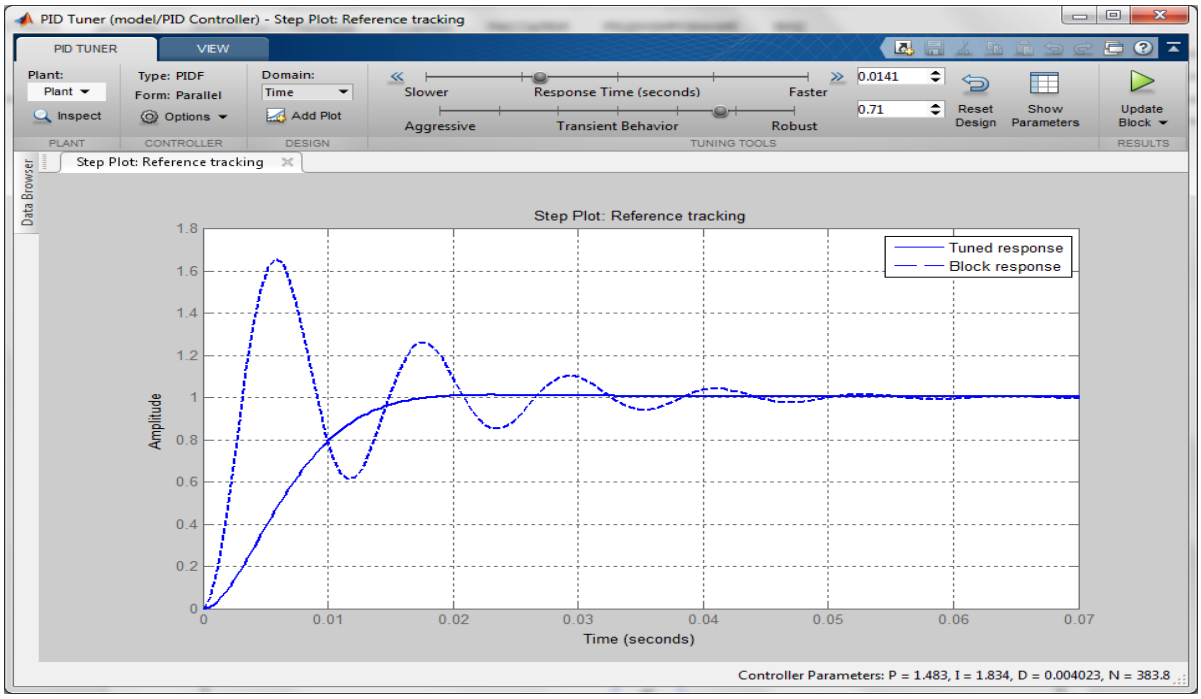
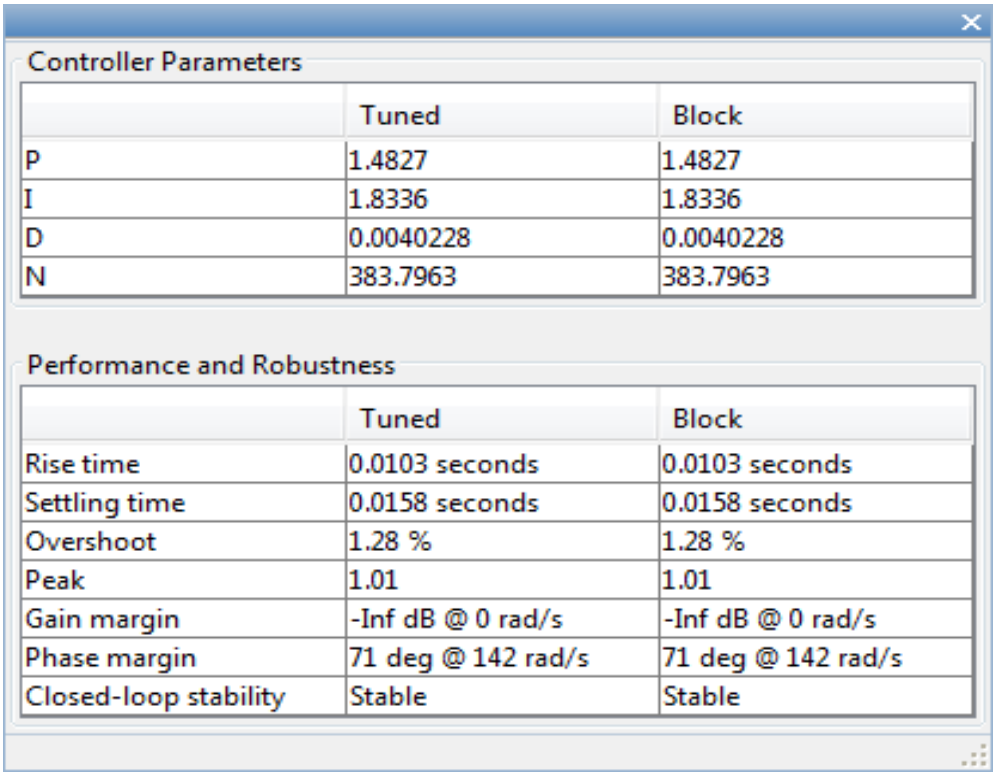


Рис. 3.7. Переходный процесс после настройки коэффициентов

Таблица с результатами выводится по нажатию на кнопку «Show parameters». Результаты настройки представлены на рис.3.8.



Controller Parameters

	Tuned	Block
P	1.4827	1.4827
I	1.8336	1.8336
D	0.0040228	0.0040228
N	383.7963	383.7963

Performance and Robustness

	Tuned	Block
Rise time	0.0103 seconds	0.0103 seconds
Settling time	0.0158 seconds	0.0158 seconds
Overshoot	1.28 %	1.28 %
Peak	1.01	1.01
Gain margin	-Inf dB @ 0 rad/s	-Inf dB @ 0 rad/s
Phase margin	71 deg @ 142 rad/s	71 deg @ 142 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Рис. 3.8. Результаты настройки коэффициентов ПИД регулятора скорости

По завершении процесса настройки необходимо подтвердить результаты, нажав на кнопку «Update block».

Структурная схема контура регулирования тока при пренебрежении противо-ЭДС имеет вид, представленный на рис. 3.9.

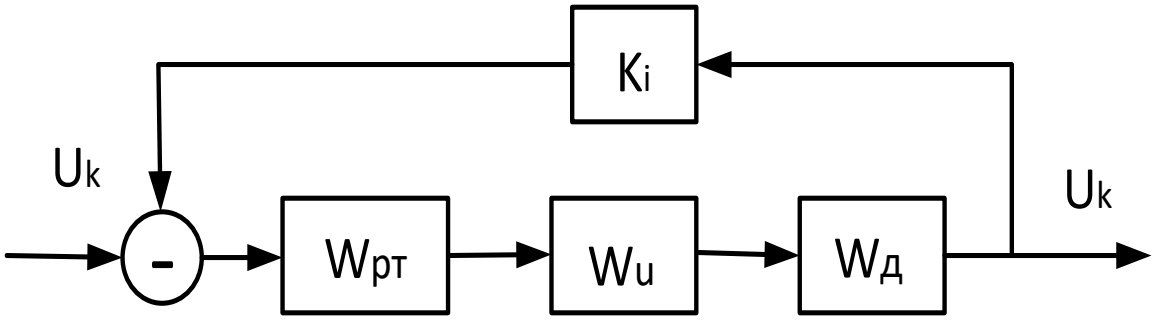


Рис. 3.9. Структурная схема контура тока

Здесь $U_{кт}$ – входное воздействие контура тока; K_I – коэффициент обратной связи по току; $W_{рт}$, W_u, $W_д$ – передаточные функции регулятора тока, инвертора и двигателя.

Передаточные функции компонентов контура тока имеют вид:

$$W_{pT} = k_T(T_T p + 1)p^{-1};\ W_U = k_u;\ W_д = k_д(T_э p + 1)^{-1}. \quad (3.1)$$

Передаточная функция замкнутой системы, полученная из условия компенсации электромагнитной постоянной времени двигателя будет иметь вид:

$$W_{кт} = \frac{k_I^{-1}}{(k_T k_u k_д k_I)^{-1} p + 1}. \quad (3.2)$$

Постоянная времени и коэффициент передачи апериодического звена (3.2) легко определяются исходя из требований к динамическим показателям привода.

3.4.2. Практическая настройка электропривода CSD-DH мехатронной системы металлорежущего станка

Первоначальный пуск электропривода

Перед проведением работ по настройке электропривода (ЭП) необходимо визуально проверить комплектность, монтаж и электропроводку согласно схемам электрическим принципиальным и соединений, прилагаемым к металлорежущему станку.

Затем необходимо проверить исправность составных частей станка перед пуском и определить готовности их к пуску согласно руководству по эксплуатации станка.

Произвести включение и выключения станка и проверить режим аварийного выключения от аварийных кнопок и при наезде на конечные выключатели (если они имеются). При проведением работ по настройке ЭП необходимо пользоваться измерительной аппаратурой:

• профессиональный мультиметр;

• ПК с установленной программой Servo Monitor, поставляемой с ЭП.

Ввод в эксплуатацию электропривода и электродвигателя

При первом включении электропривода необходимо следовать следующей процедуре:

1. Подать силовое питание на ЭП, сигналы разрешения работы и включения ЭП не подавать. Подключить ПК к ЭП и запустить программу Servo Monitor. Установить соединение, происходит автоматическое считывание параметров ЭП.

2. Проконтролировать правильность установки параметров, определяющих тип ЭП (p3) и ЭД (p200) фактически уставленным на станке. При несоответствии следует выполнить процедуру "Установка конфигурации", но перед этим связаться с сотрудниками фирмы "Балт-Систем".

3. Записать версии ПрО в свидетельство о выходном контроле на станок.

Процедура "Установки конфигурации" ЭП (для ЭП "BSD-XX").

1. Подключить ПК к ЭП и запустить программу Servo Monitor. Установить соединение, происходит автоматическое считывание параметров ЭП.

2. В диалоге "Служебные" выбрать "Установка конфигурации". В новом меню выбрать необходимый тип силовой части ЭП и ЭД. Нажать "Установка".

3. В диалоге "Файл" выбрать "Запись параметров в EEPROM". В диалоге "Служебные" выбрать "RESET".

4. Снять силовое питание и через паузу подать его вновь. Установить соединение, происходит автоматическое считывание параметров ЭП. Проконтролировать правильность установки параметров, определяющих тип ЭП (p3) и ЭД (p200)

5. ЭП готов к настройке.

Циклограмма включения и выключения электропривода

ЭП имеет 4-е устойчивых состояния:

1. ЭП выключен (Drive OFF) – силовое напряжение на ЭП не подключено.

2. Готовность к включению (Ready to power up) - силовое напряжение на ЭП подключено, идет заряд звена постоянного тока =540 В.

3. Готовность к работе (Ready to operation) - силовое напряжение на ЭП подключено, отключение зарядных резисторов от звена постоянного тока =540 В.

4. ЭП в работе (In-operation) – включается ШИМ и подано разрешение ЭП.

При нормальном включении ЭП, он последовательно проходит эти 4-е состояния. Каждое состояние необходимо контролировать в логике контроллера и аппаратно в электрической схеме включения ЭП.

При нормальном выключении ЭП, он последовательно проходит эти 4-е состояния в обратной последовательности.

Возможны аварийные ситуации, когда эта последовательность может нарушаться. В этих случаях возможно аварийное, неконтролируемое торможение ЭП на свободном выбеге. Если такая ситуация недопустима, то необходимо предусмотреть дополнительное динамическое торможение ЭД, не зависящее от состояния ЭП. На рис. 3.10 приведена циклограмма включения и выключения ЭП.

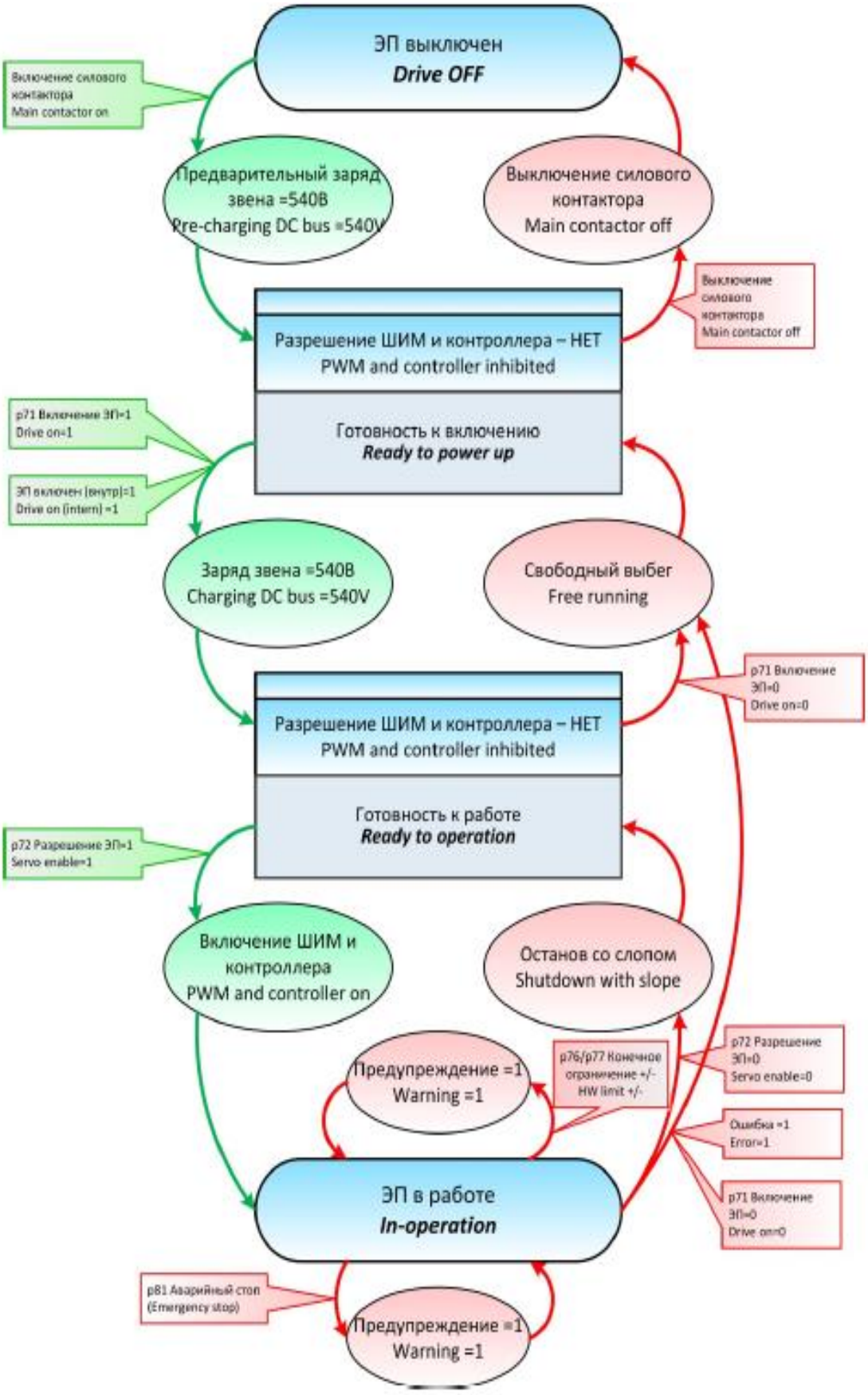


Рис. 3.10. Циклограмма включения и выключения ЭП

Настройка электропривода

Общие замечания.

• Если не указано дополнительно, то параметры ЭП и ЭД были установлены "по умолчанию", т.е. рекомендуемые изготовителем, без оптимизации настройки контуров регулирования.

• настоящая инструкция была написана на примере настройки ЭП CSD-DH16 и ЭД 215NYS-M-20

• последовательность настройки – в соответствии с данным документом, т.е. сначала настраивается регулятор тока, затем скорости и в конце - регулятор положения (если он имеется).

• настройка регуляторов тока и скорости ЭП производится при отключённом регуляторе положения (ЧПУ). Особенно внимательно необходимо быть при настройке неуравновешенных вертикальных осей и осей с механическим зажимом (тормозом).

• некоторые тесты предполагают большие скорости вращения ЭД, поэтому перед проведением настройки необходимо вывести контролируемые оси в безопасное положение, например, в середину хода.

Настройка регулятора тока (момента)

Параметры регулятора тока определяются электромеханическими данными ЭД и силовой частью ЭП. Поэтому обычно настройки не требуется, необходимо лишь проконтролировать окончательные ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ

Установить параметры регулятора тока по умолчанию:

• Кр – пропорциональный коэффициент (параметр p304);

• Ki – интегральный коэффициент (p305);

• отключить фильтр сглаживания команды тока (p311=0);

k_p=12AV k_i=5$mmmm$ F_i=0.

Контролируемые данные:

• заданное значение тока на входе регулятора тока IqsetAF, A;

• актуальное значение тока Iqact, A.

Заданное воздействие:

• наброс заданного тока в виде Чирп-сигнала Iqset, A;

• частота 0-2000 Гц;

• амплитуда – 50 % от номинального значения ЭД.

Время измерения:

• зависит от длины Чирп-сигнала (при длине 2048 точки получаем 512 мсек);

• период съема данных 0,25 ms.

Результат настройки: после преобразования Фурье контролируемых данных получаем ЛАЧХ и ЛФЧХ. Определяем полосу пропускания регулятора по уровню -3дБ и запас по фазе на этой частоте.

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ F=200 Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-65˚=115˚.

На рис. 3.11 изображена предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора тока.

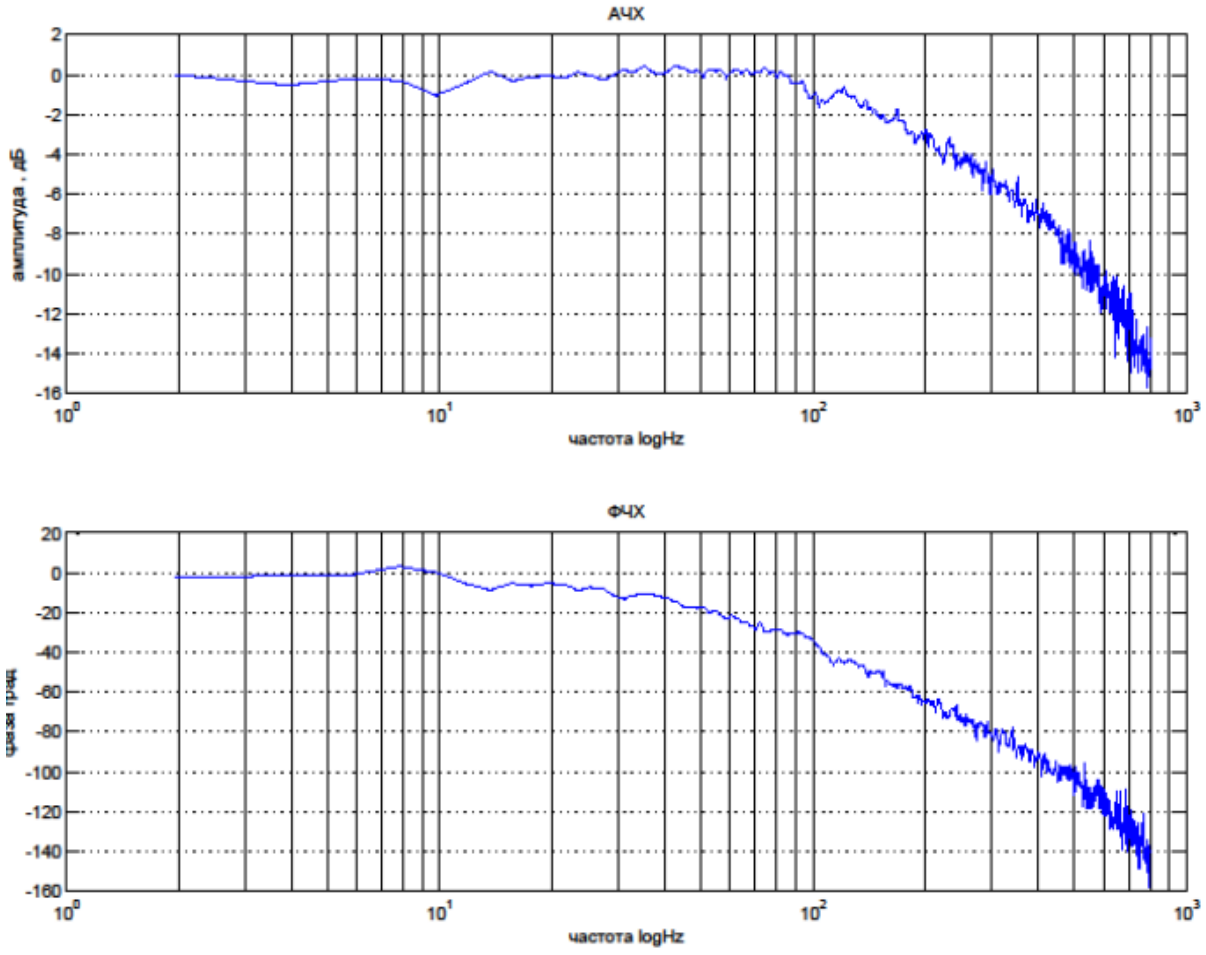


Рис. 3.11. Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора тока

Настройка пропорциональной и интегральной составляющей

1-й шаг. Настройка пропорционального коэффициента.

Установить параметры регулятора тока по умолчанию (отключить фильтр сглаживания команды тока).

Установить интегральный коэффициент равный 0.

Контролируемые данные:

• заданное значение тока на входе регулятора тока IqsetAF, A;

• актуальное значение тока Iqact, A;

• актуальное значение тока Idact, A;

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока Iqset , A;

• величина тока – 25% от номинального значения ЭД;

• период наброса заданного значения – 50 мсек;

• длительность заданного значения – 25 мсек;

• количество повторений – 10.

Период съема данных: 0,25 мсек

Результат настройки:

• увеличивая пропорциональный коэффициент, можно добиться перерегулирования Iqact не более 5-10 %;

• контролировать отсутствие возбуждения тока Idact.

Данный тест необходим, если

• неизвестны параметры регулятора тока по умолчанию;

• ЭП пускается в первый раз.

Ниже приведены графики при:

$$k_p = 12\frac{A}{V}\ k_p = 25\frac{A}{V}\ k_p = 35\frac{A}{V}.$$ Выбираем $k_p = 25\frac{A}{V}$.

На рис. 3.12. изображен ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Kp=12 A/V. На рис. 3.13. показан ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Kp=25 A/V. На рис. 3.14. представлен ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Kp=35 A/V.

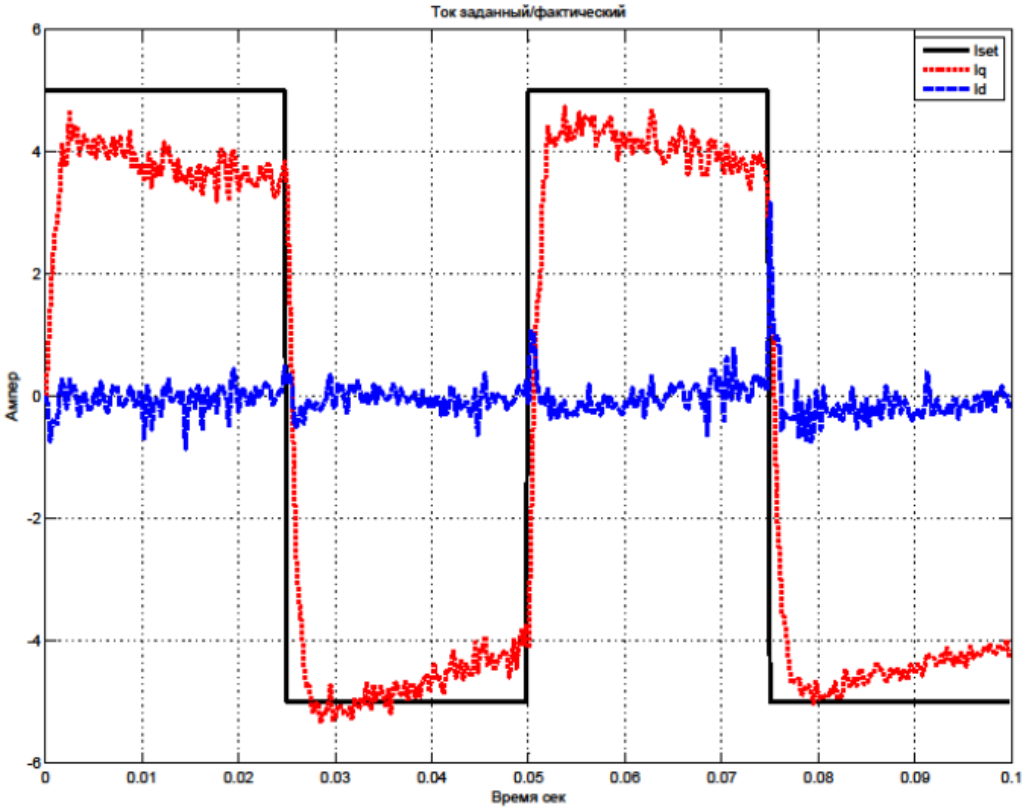


Рис. 3.12. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_p=12 A/V

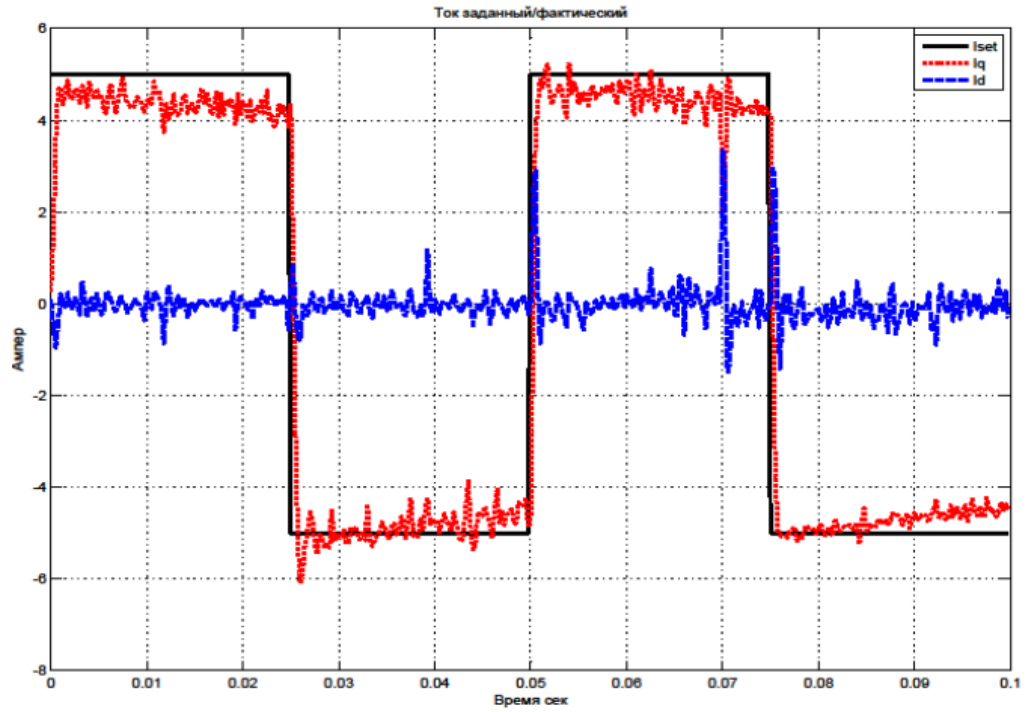


Рис. 3.13. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_p=25 A/V

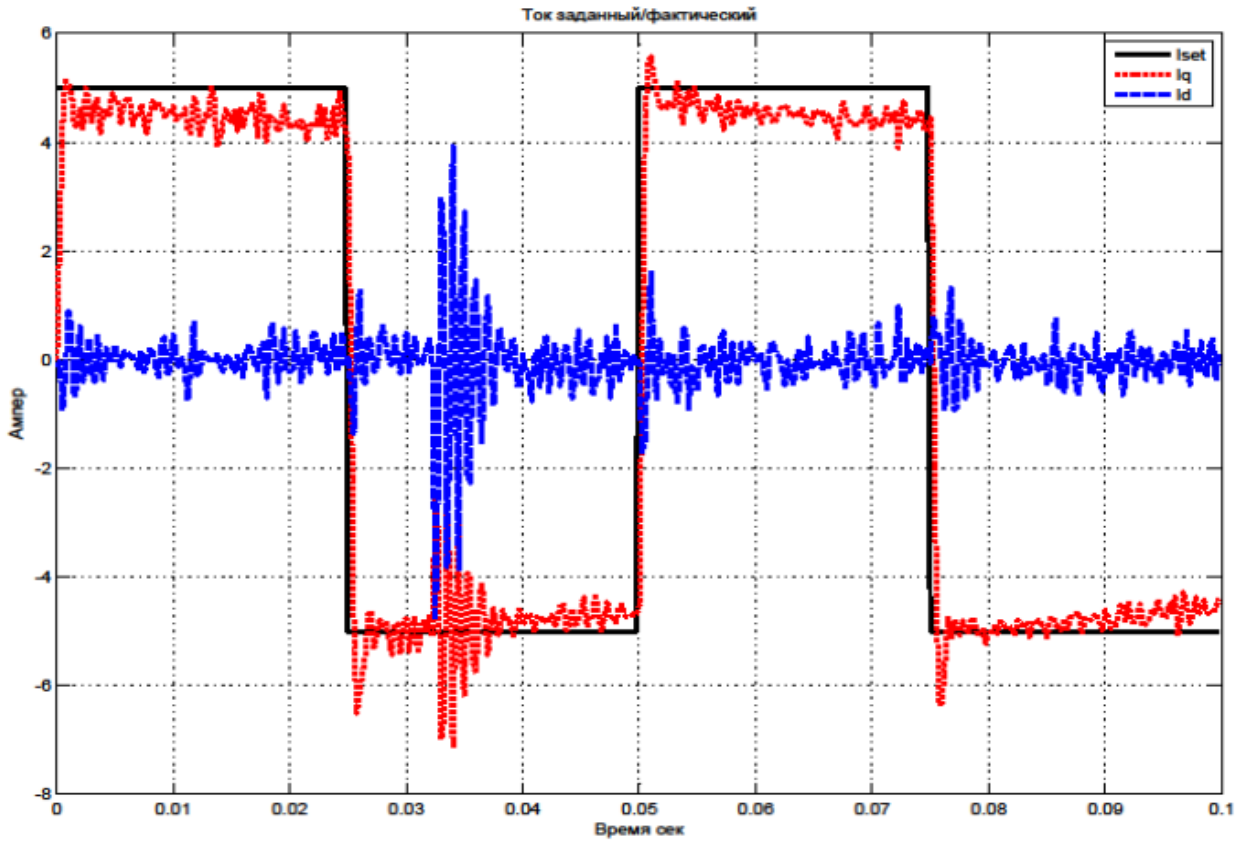


Рис. 3.14. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_p=35 A/V

2-й шаг. Настройка интегрального коэффициента.

Установить пропорциональный коэффициент, выбранный в 1-м шаге ($kkpp$=$25AAVV$). Установить интегральный коэффициент по умолчанию.

Контролируемые данные:

• заданное значение тока на входе регулятора тока IqsetAF, A;

• актуальное значение тока Iqact, A;

• актуальное значение тока Idact, A.

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока Iqset, A;

• величина тока – 25% от номинального значения ЭД;

• период наброса заданного значения – 50 мсек;

• длительность заданного значения – 25 мсек;

• количество повторений – 10.

Период съема данных: 0,25 мсек.

Результат настройки:

• изменяя интегральный коэффициент, добиться перерегулирования Iq не более 5-10 %. Возможен небольшой колебательный процесс (не более 2-3 волн);

• контролировать отсутствие возбуждения тока Idact.

Ниже приведены графики при: k_i=5ms, k_i=3ms и k_i=2ms.

Выбираем k_i=3ms. На рис. 3.15 изображен ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Ki=5ms. На рис.3.16 показан ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Ki=3ms. На рис.3.17 представлен ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Ki=2ms.

3-й шаг. Проверка работы сглаживающего фильтра заданного тока.

Установить пропорциональный коэффициент, выбранный в 1-м шаге ($kkpp$=25$AAVV$). Установить интегральный коэффициент, выбранный во 2-м шаге (k_i=3m).

Включить фильтр сглаживания команды тока (p311=1)

k_p=25AV k_i=3m F_i=1.

Контролируемые данные:

• заданное значение тока на входе регулятора тока IqsetAF, A;

• актуальное значение тока Iqact, A;

• актуальное значение тока Idact, A.

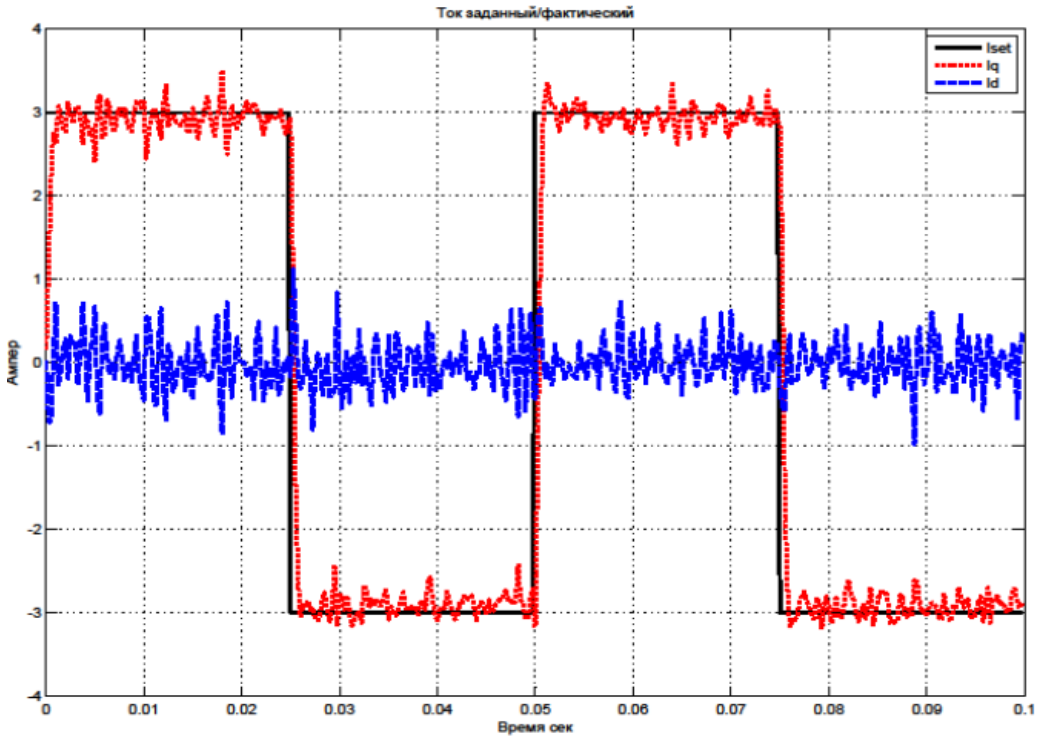


Рис. 3.15. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_i=5ms

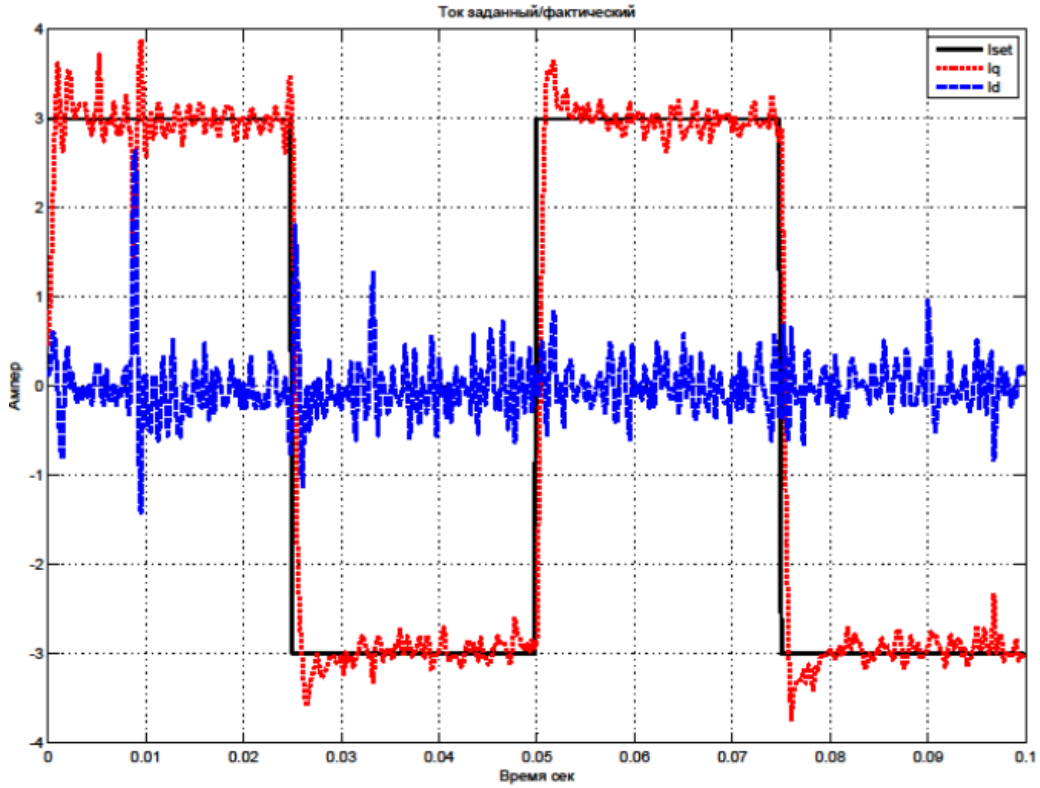


Рис. 3.16. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_i=3ms

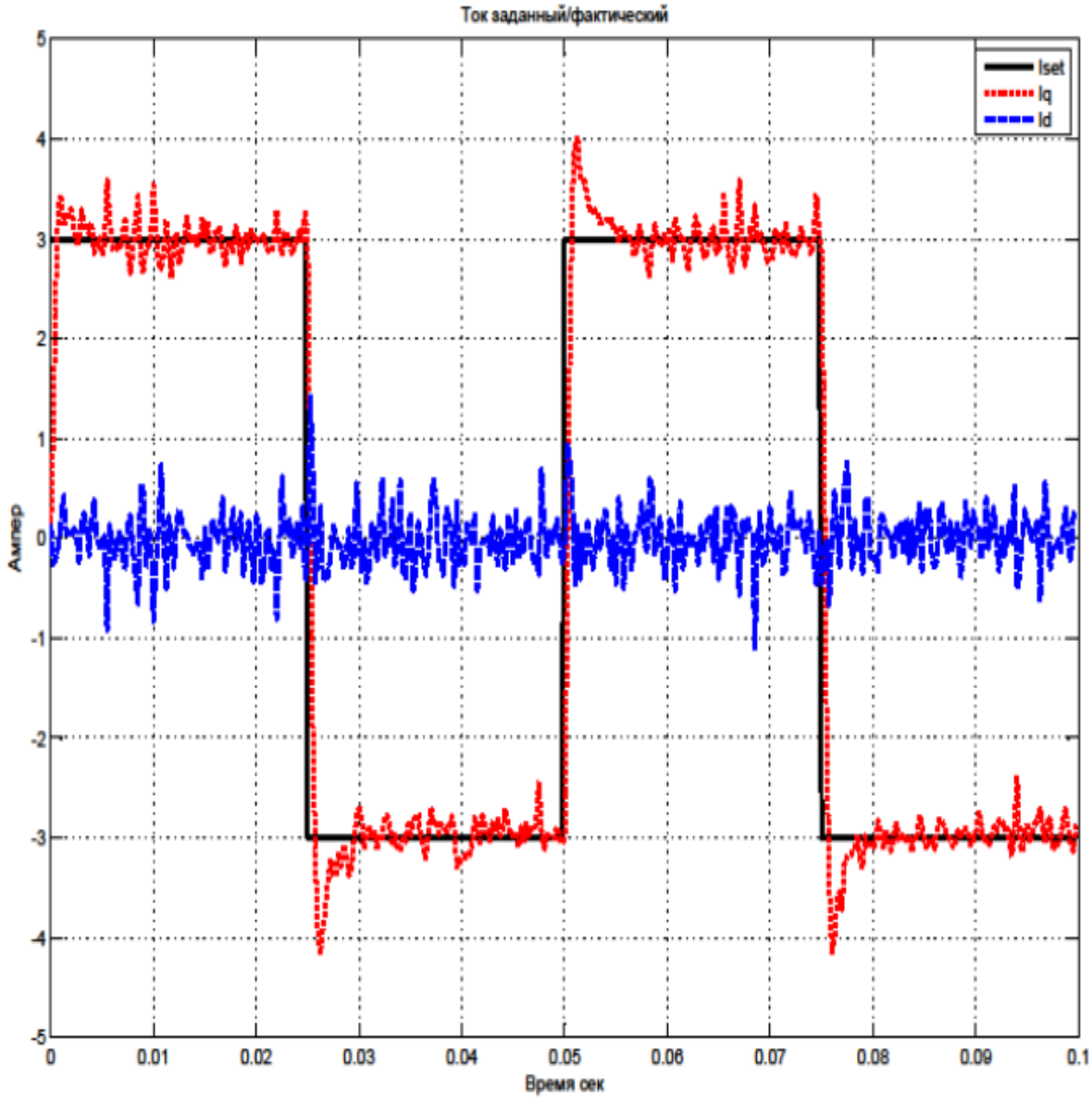


Рис. 3.17. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_i=2ms

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока Iqset, A;

• величина тока – 25% от номинального значения ЭД;

• период наброса заданного значения – 50 мсек;

• длительность заданного значения – 25 мсек;

• количество повторений – 10.

Период съема данных:

• 0,25 мсек

Результат настройки:

• передний и задний фронт заданного значение тока на входе регулятора тока IqsetPI имеет сглаженный вид;

• переходный процесс должен быть аналогичен шагу 2;

• контролировать отсутствие возбуждения тока Idact.

На рис. 3.18 показан ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при Kp=25 A/V, Ki=3ms и Fi=1.

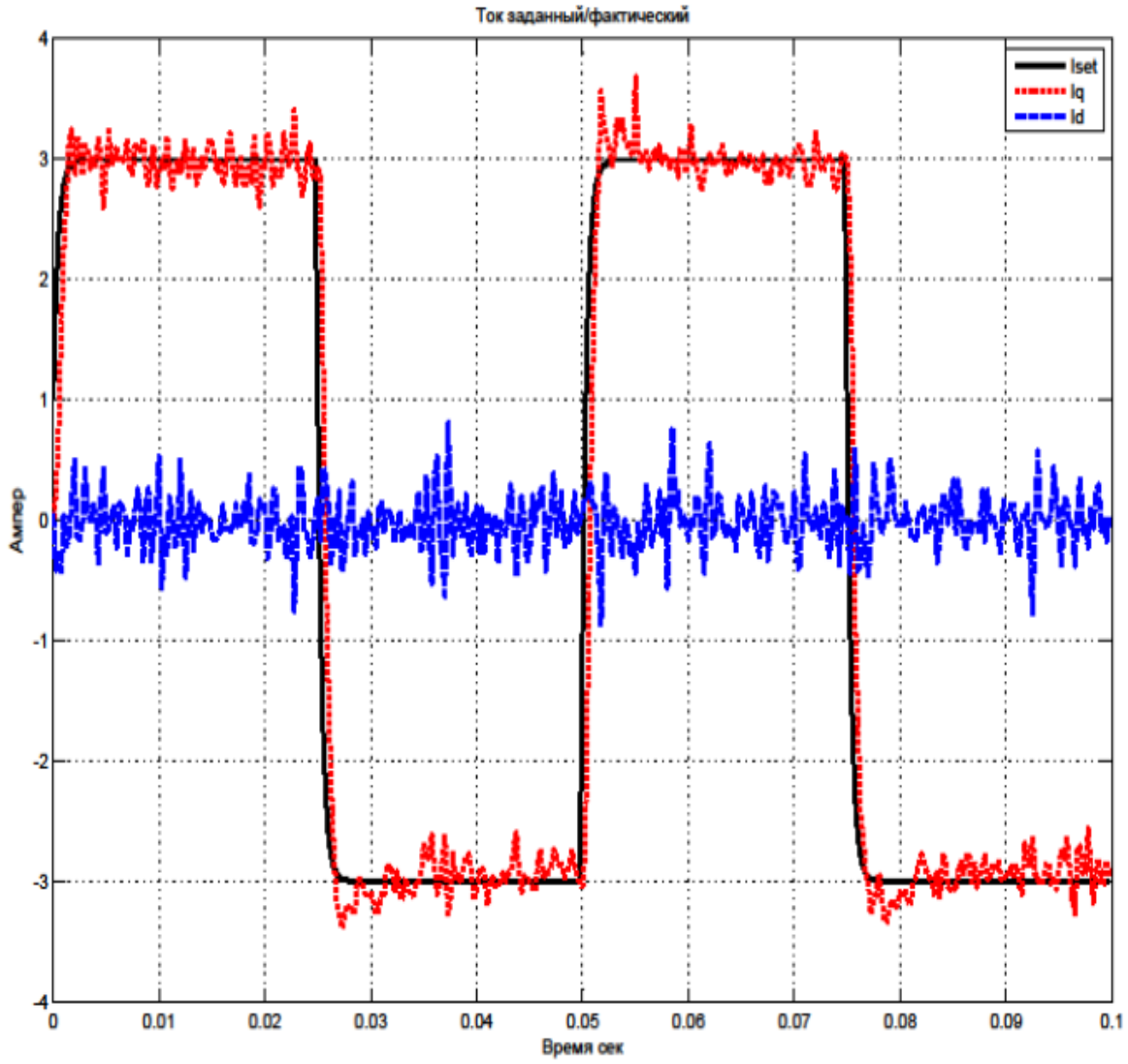


Рис. 3.18. Ступенчатый наброс заданного значения тока на входе регулятора тока IqsetPI при K_p=25 A/V K_i=3ms F_i=1

Окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ

При изменении параметров по умолчанию необходимо ещё раз снять ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Ниже приведены графики при параметрах регулятора тока:

• k_p=25AV k_i=3m F_i=1.

Результат настройки:

• после преобразования Фурье контролируемых данных получаем ЛАЧХ и ЛФЧХ. Определяем полосу пропускания регулятора по уровню -3дБ и запас по фазе на этой частоте.

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ F=650 Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-120˚=60˚.

На рис. 3.19 показана окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора тока.

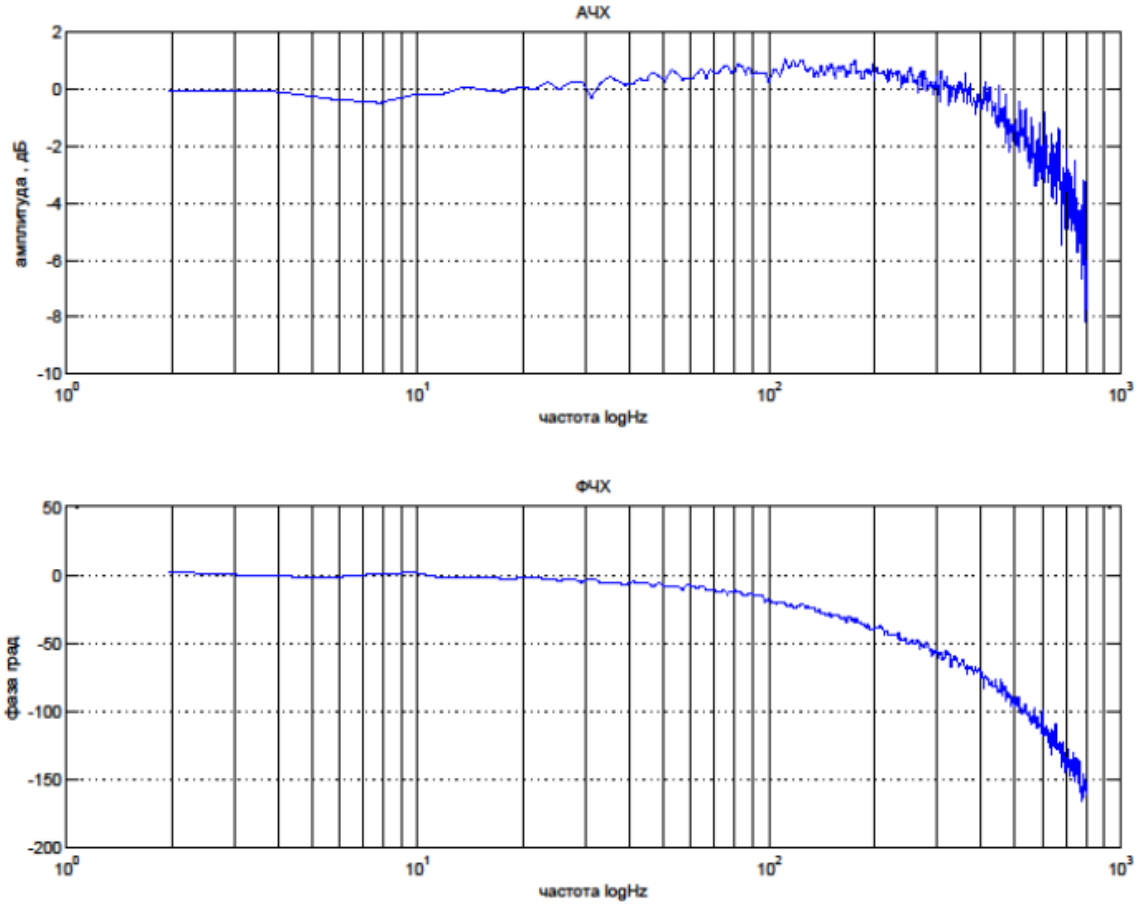


Рис. 3.19. Окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора тока.

Настройка регулятора скорости

Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ

Установить параметры регулятора скорости по умолчанию:

• Кр – пропорциональный коэффициент (р404);

• Кi – интегральный коэффициент (р405);

• Kpd - Псевдо дифференциальная составляющая регулятора (р406);

• отключить фильтр обратной связи по скорости (р414=0);

k_p=600 s^{-1} k_i=10m k_p=100% F_n=0.

Контролируемые данные:

• заданное значение скорости на входе регулятора скорости NsetPI, об/мин;

• актуальное значение скорости ЭД NactBF, об/мин.

Заданное воздействие:

• наброс заданной скорости в виде Чирп-сигнала Nset, об/мин;

• частота 0-500 Гц;

• амплитуда – 2,5% от номинального значения ЭД.

Время измерения:

• зависит от длины Чирп-сигнала (при длине 2048 точки получаем 1024 мсек);

• период съема данных 0,5 ms;

Результат настройки:

• после преобразования Фурье контролируемых данных получаем ЛАЧХ и ЛФЧХ. Определяем полосу пропускания регулятора по уровню -3дБ и запас по фазе на этой частоте.

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ F=110 Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-130˚=50˚.

Обращаем внимание на то, что имеется подъем ЛАЧХ на +2,6дБ на частоте 27 Гц. На рис.3.20 представлена предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора скорости.

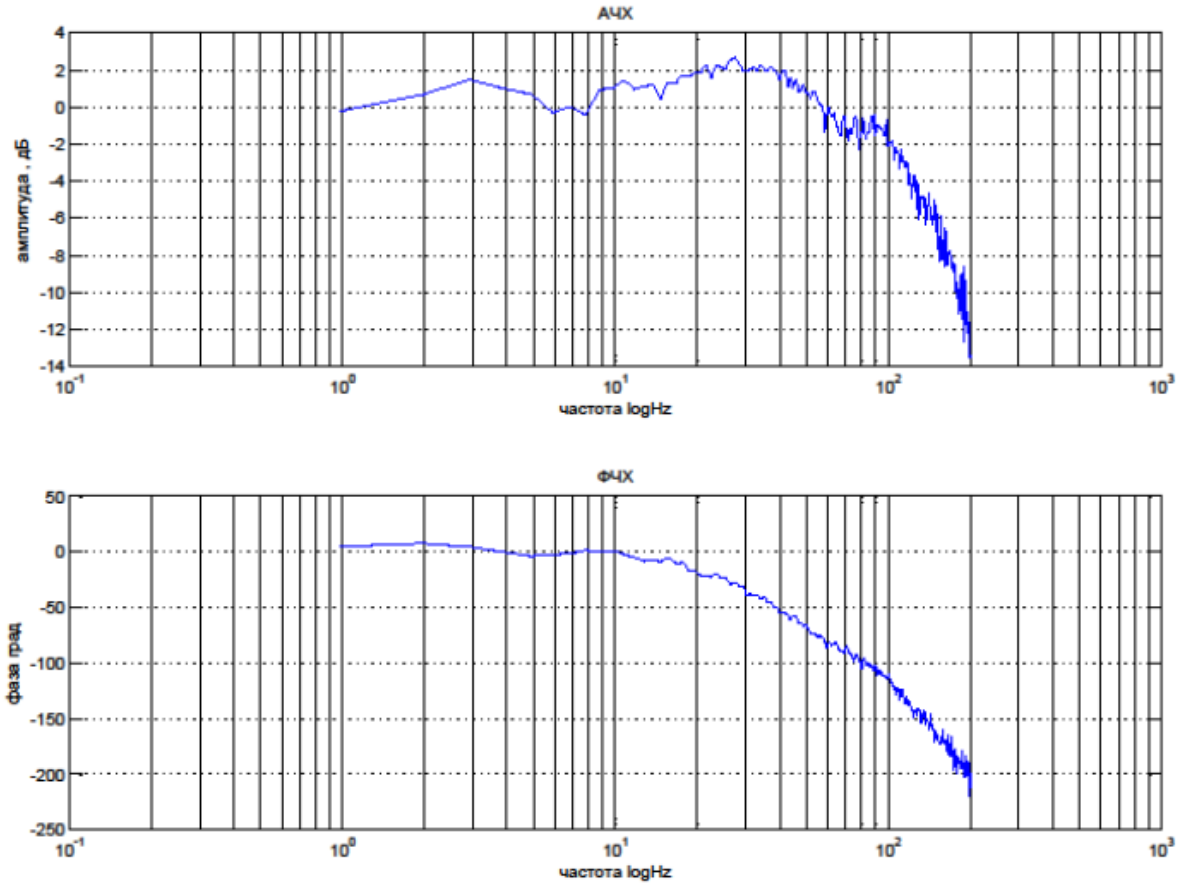


Рис. 3.20. Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора скорости

Настройка пропорциональной и интегральной составляющей

1-й шаг. Настройка пропорционального коэффициента.

Установить параметры регулятора скорости по умолчанию (отключить фильтр обратной связи по скорости).

Установить интегральный коэффициент равный 0.

Контролируемые данные:

• заданное значение скорости на входе регулятора скорости NsetPI, об/мин;

• актуальное значение скорости ЭД NactBF, об/мин;

• заданное значение на входе регулятора тока (Iq set AF), А;

• актуальное значение тока Iqact, А.

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости Nset, об/мин;

• величина скорости – 2,5% от номинального значения ЭД;

• период наброса заданного значения – 200 мсек;

• длительность заданного значения – 100 мсек;

• количество повторений – 10.

Период съема данных: 0,5 мсек.

Результат настройки:

• увеличивая пропорциональный коэффициент, добиться отсутствия перерегулирования скорости;

• контролировать отсутствие ограничения (насыщения) заданного значения на входе регулятора тока Iq set AF и тока Iqact.

При необходимости - уменьшить амплитуду заданной скорости.

Ниже приведены графики при: k_p=400 s^{-1} , k_p=500 s^{-1} и k_p=600 s^{-1}.

Выбираем k_p=500 s^{-1}.

На рис.3.21 показан ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{kp} = \mathbf{444}\ \boldsymbol{s^{-11}}$. На рис.3.22. представлен ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{kp} = \mathbf{544}\ \boldsymbol{s^{-11}}$. На рис.3.23 изображен тупенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{kp} = \mathbf{644}\ \boldsymbol{s^{-11}}$.

2-й шаг. Настройка интегрального коэффициента.

Установить пропорциональный коэффициент, выбранный в 1-м шаге ($k_p = 500\ s^{-1}$).

Установить интегральный коэффициент по умолчанию.

Контролируемые данные:

• заданное значение скорости на входе регулятора скорости NsetPI, об/мин;

• актуальное значение скорости ЭД NactBF, об/мин;

• заданное значение на входе регулятора тока (Iq set AF), А;

• актуальное значение тока Iqact, А.

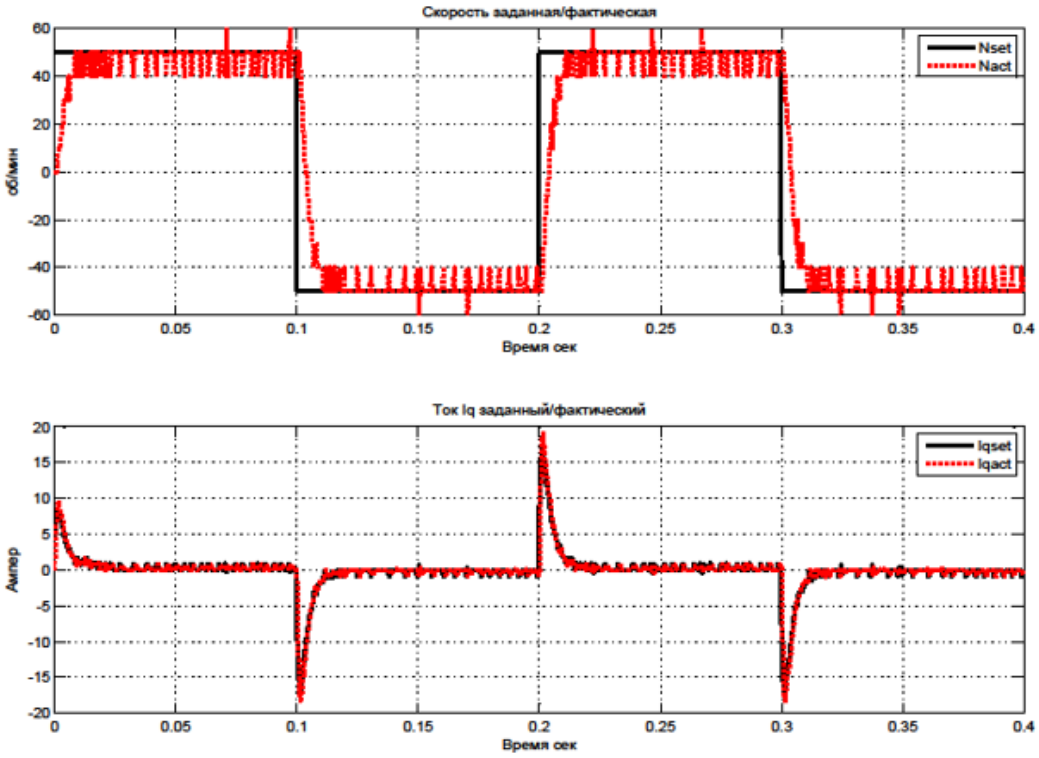


Рис. 3.21. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_p = 444\ s^{-11}}$

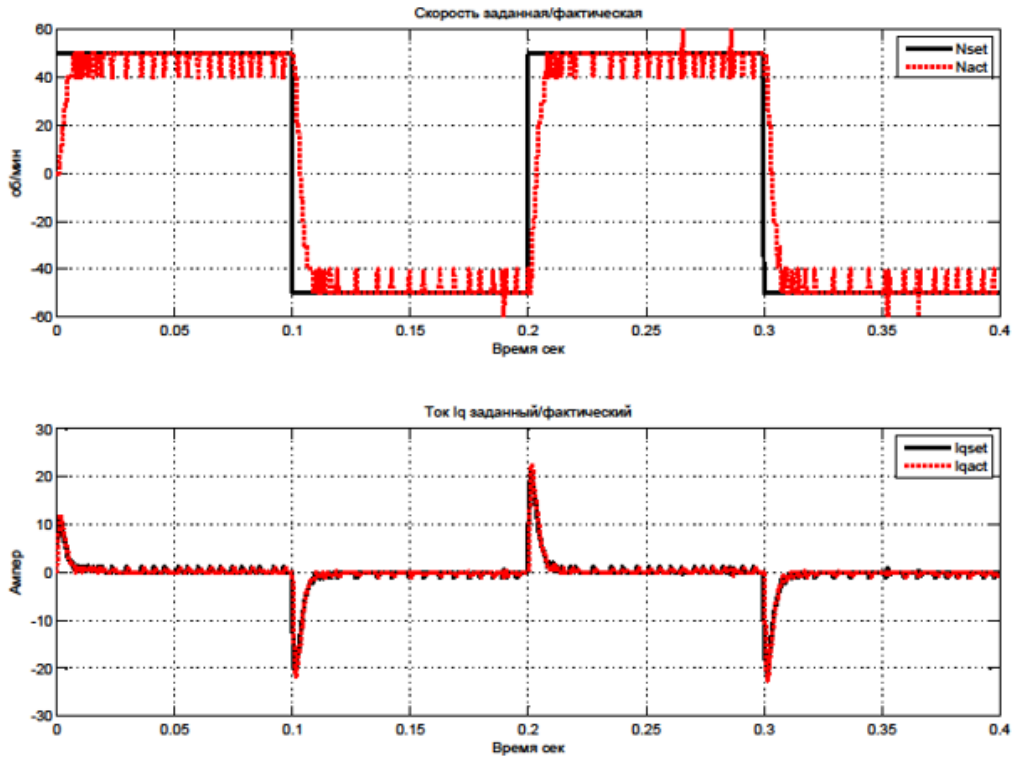


Рис. 3.22. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_p = 544\ s^{-11}}$

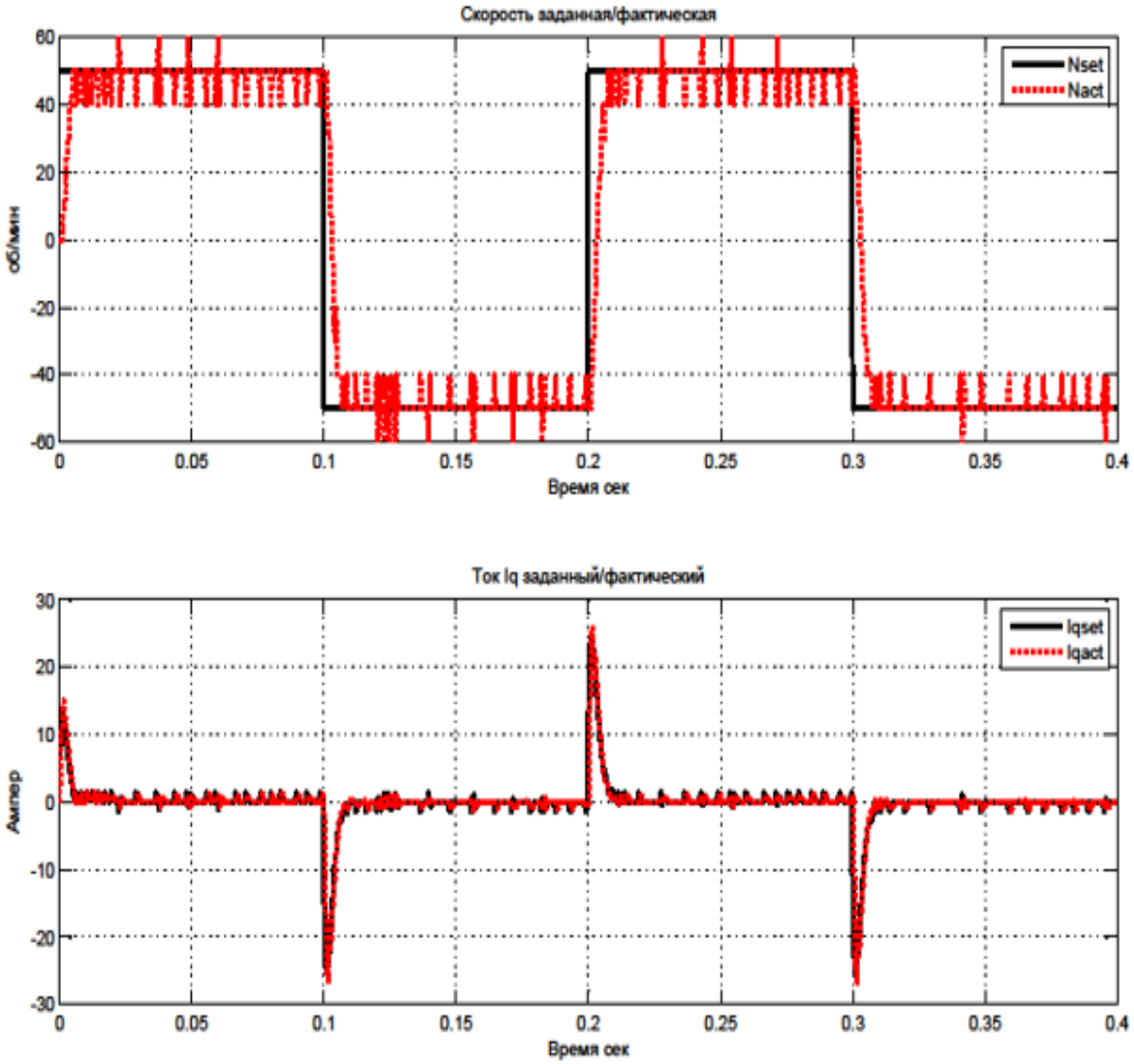


Рис. 3.23. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_p} = \mathbf{644}\ \boldsymbol{s^{-11}}$

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости Nset, об/мин;

• величина скорости – 2,5% от номинального значения ЭД;

• период наброса заданного значения – 200 мсек;

• длительность заданного значения – 100 мсек;

• количество повторений – 10.

Период съема данных: 0,5 мсек

Результат настройки:

• изменяя интегральный коэффициент, добиться отсутствия перерегулирования скорости. Возможен небольшой колебательный процесс (не более 2-3 волн);

• контролировать отсутствие ограничения (насыщения) заданного значения на входе регулятора тока Iq set AF и тока Iqact. При необходимости - уменьшить амплитуду заданной скорости.

Ниже приведены графики при: $k_i = 10ms$, $k_i = 30ms$ и $k_i = 50ms$.

Выбираем $k_i = 50ms$. На рис. 3.24 изображен ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{ki} = \mathbf{141}\boldsymbol{s}$. На рис. 3.25 показан ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{ki} = \mathbf{341}\boldsymbol{s}$. На рис. 3.26 представлен ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{ki} = \mathbf{541}\boldsymbol{s}$.

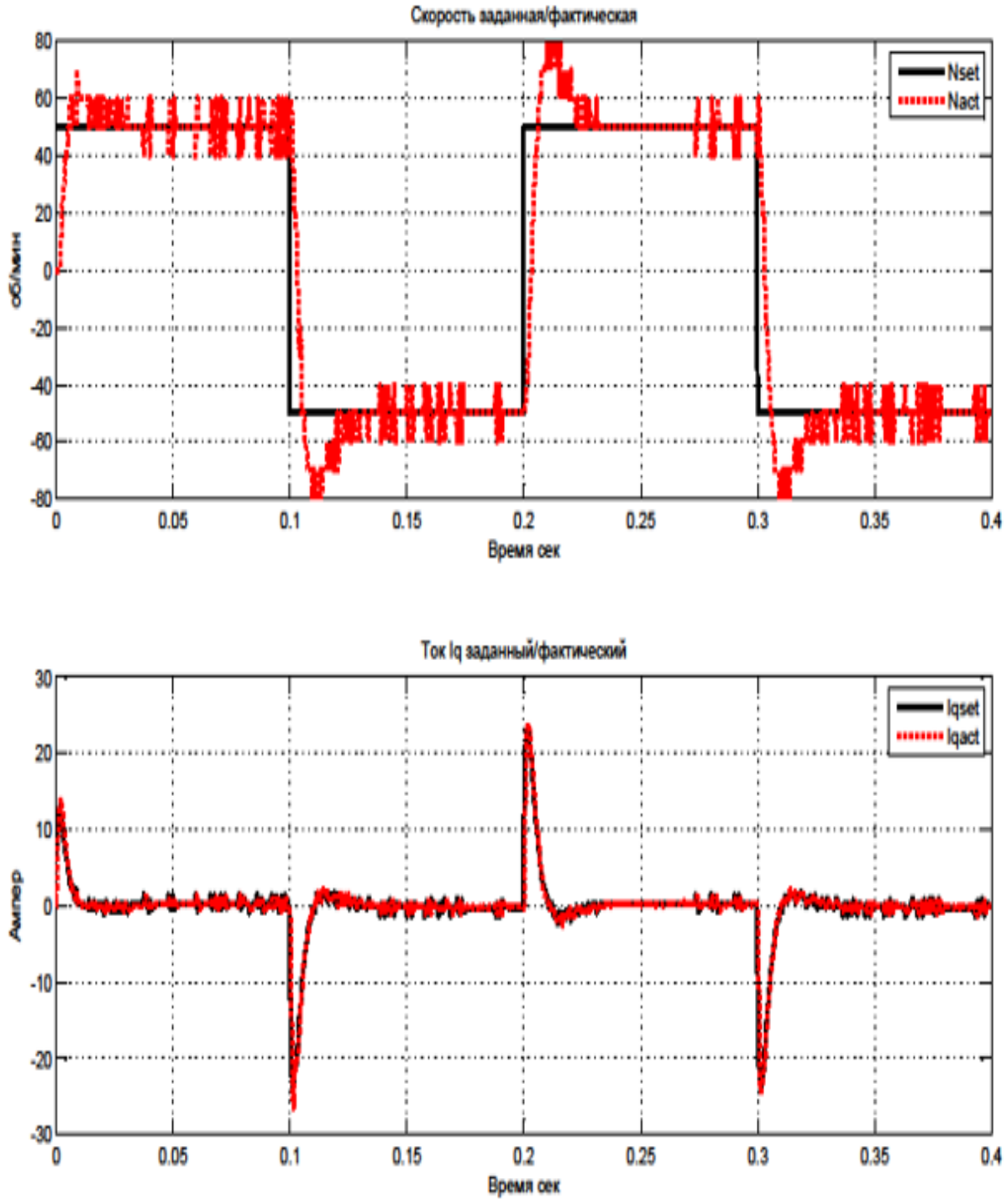


Рис. 3.24. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_i = 141s}$

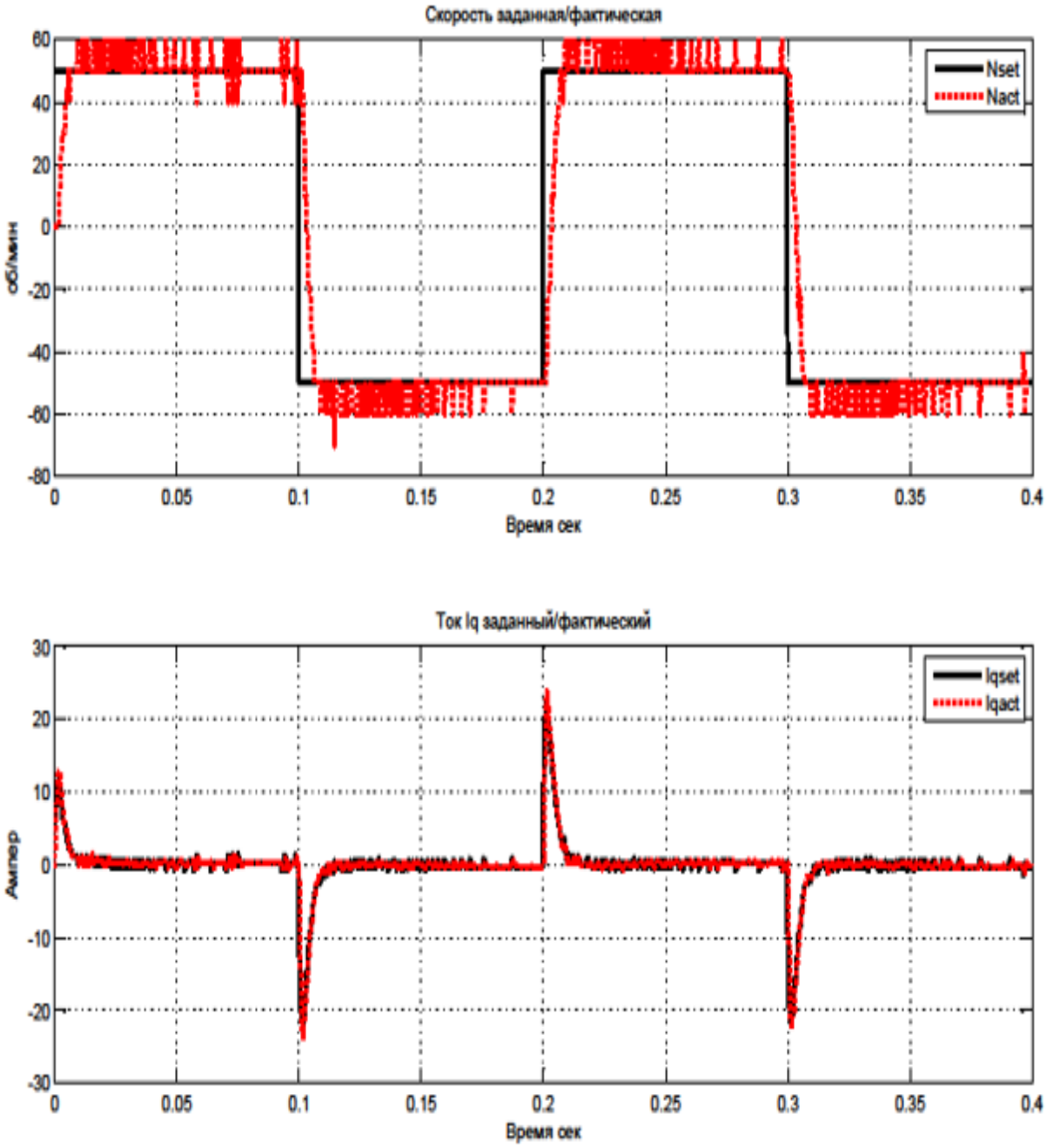


Рис. 3.25. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_i} = \boldsymbol{341s}$

3-й шаг. Проверка работы сглаживающего фильтра обратной связи по скорости.

Установить пропорциональный коэффициент, выбранный в 1-м шаге ($kp = 500\ s{-}1$). Установить интегральный коэффициент, выбранный во 2-м шаге ($kii = 50ms$).

Включить фильтр обратной связи по скорости (p311=1) и его параметры по умолчанию:

• p415 Частота среза фильтра обратной связи по скорости – 100 Гц

• p416 Уровень фильтра обратной связи по скорости – 40 об/мин.

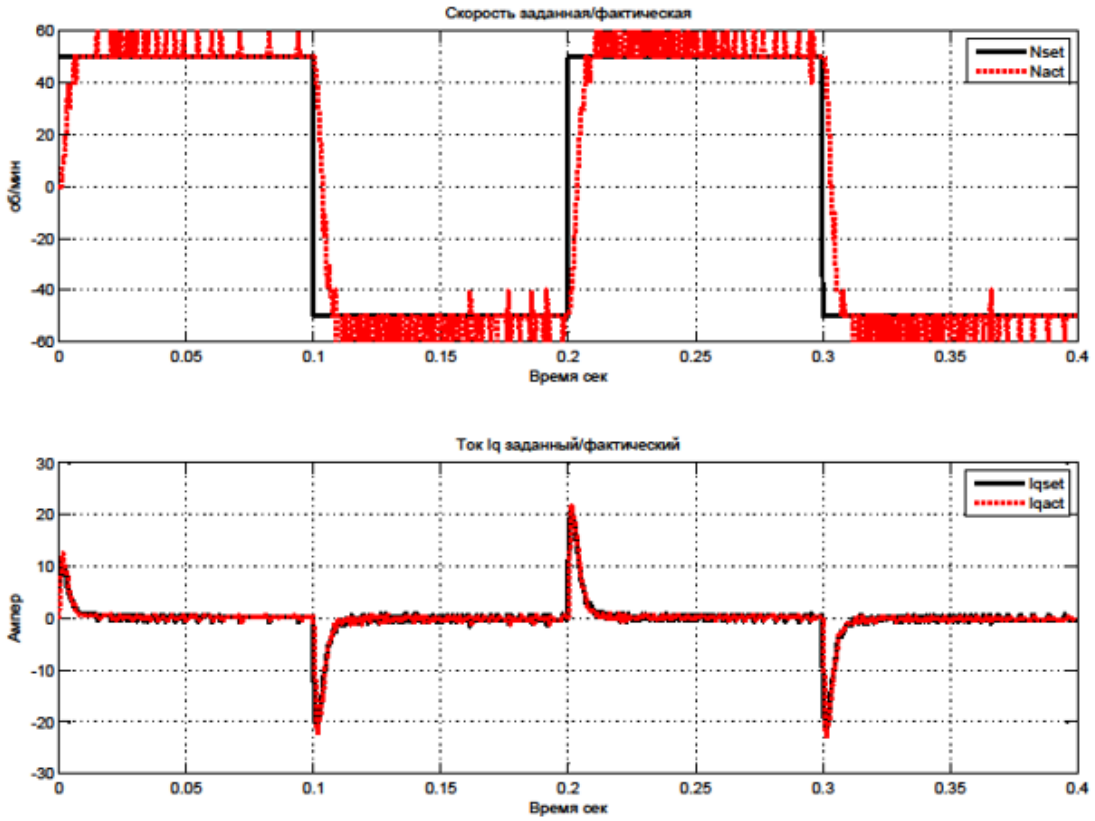


Рис. 3.26. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_i} = \mathbf{541}\boldsymbol{s}$

Таким образом, имеем следующие значения параметров ЭП:

$k_p = 500\ s^{-1}\ k_i = 50ms\ Fn = 1\ F_n = 100\ Hz\ Fnlev = 40\ rpm.$

Контролируемые данные:

• заданное значение скорости на входе регулятора скорости Nset PI, об/мин;

• актуальное значение скорости ЭД NactAF, об/мин;

• заданное значение на входе регулятора тока (Iq set AF), А;

• актуальное значение тока Iqact, А.

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости Nset, об/мин;

• величина скорости – 2,5% от номинального значения ЭД;

• период наброса заданного значения – 200 мсек;

• длительность заданного значения – 100 мсек;

• количество повторений – 10.

Период съема данных: 0,5 мсек.

Результат настройки:

• изменяя пропорциональный и интегральный коэффициент, добиться отсутствия перерегулирования скорости. Возможен небольшой колебательный процесс (не более 2-3 волн);

• контролировать отсутствие ограничения (насыщения) заданного значения на входе регулятора тока Iq set AF и тока Iqact. При необходимости - уменьшить амплитуду заданной скорости.

На рис 3.27 представлен ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{kp} = \mathbf{544}\ \boldsymbol{s}\mathbf{-1}\ \boldsymbol{ki} = \mathbf{541}\boldsymbol{s}\ \boldsymbol{Fn} = \mathbf{11}\ \boldsymbol{FnF} = \mathbf{144}\ \boldsymbol{Fnv} = \mathbf{44}\ \boldsymbol{rp}\mathbf{1}$.

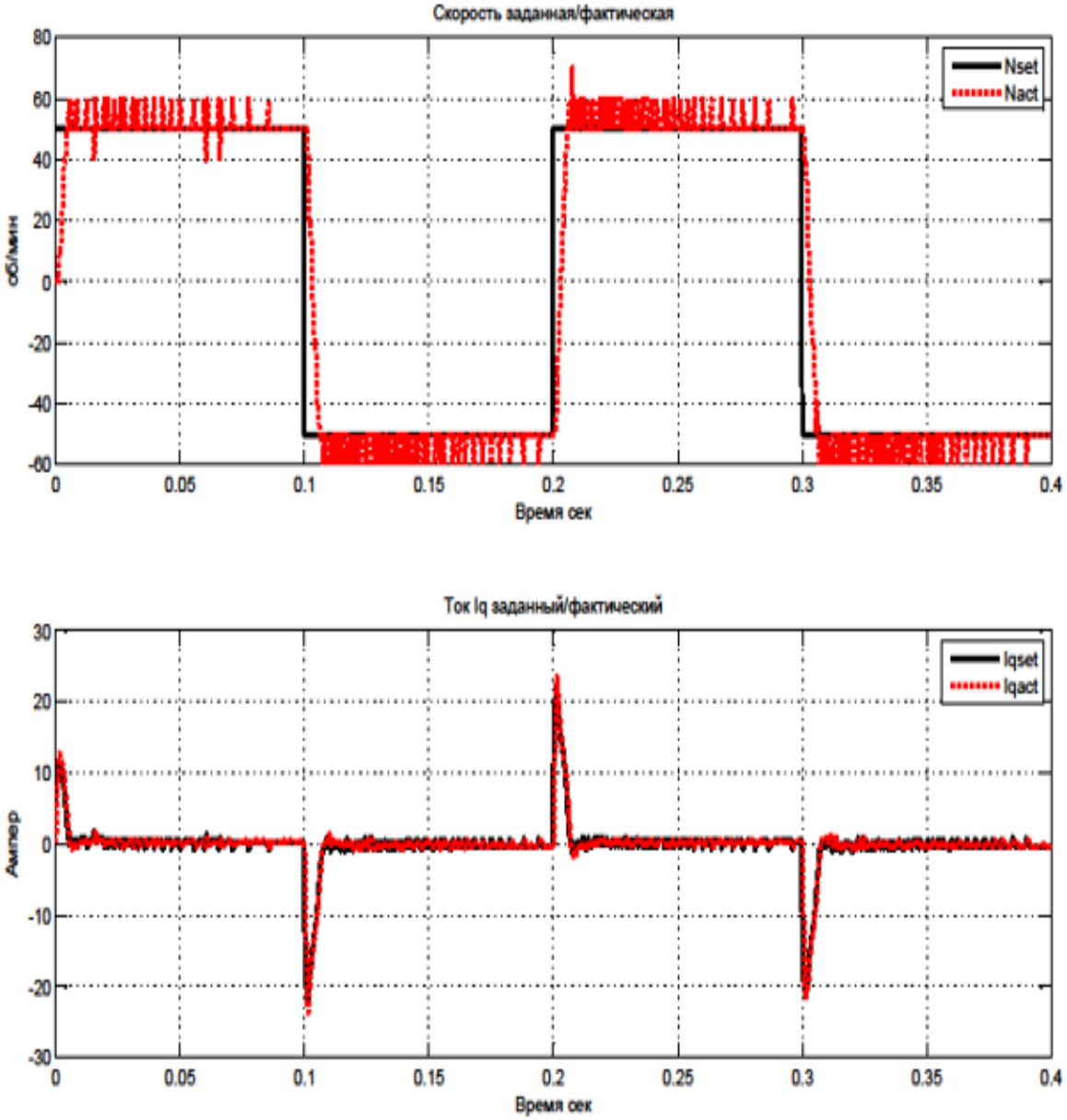


Рис. 3.27. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при $\boldsymbol{k_p} = \mathbf{544}\ \boldsymbol{s^{-1}}\ \boldsymbol{k_i} = \mathbf{541}\boldsymbol{s}\ \boldsymbol{F_n} = \mathbf{11}\ \boldsymbol{F_{nF}} = \mathbf{144}\ \boldsymbol{F_{nv}} = \mathbf{44}\ \boldsymbol{rp1}$

4-й шаг. Проверка токоограничения на выходе регулятора скорости.

Установить параметры, как и в 3-м шаге:

$k_p = 500\ s^{-1}$, $k_i = 50ms$, $F_n = 1\ F_n = 100\ Hz$, $Fnlev = 40\ rpm$.

Проконтролировать установленные параметры регулятора тока по умолчанию:

• Iq_lim_cont - ограничение длительной команды тока (p300);

• Iq_lim_peak - ограничение максимальной команды тока (p301);

• T_lim_peak - время ограничения максимальной команды тока (p302);

• Mlim - максимальный момент ЭД (p206);

$Iq_\text{lim}_cont = 25A$; $Iq_\text{lim}_peak = 25A$; $T_\text{lim}_peak = 1s$, $Mlm = 125Nm$.

Контролируемые данные:

• заданное значение скорости на входе регулятора скорости NsetPI, об/мин;

• актуальное значение скорости ЭД NactAF, об/мин;

• выходное значение регулятора скорости (Mset), 0.01 Нм;

• заданное значение на входе регулятора тока (Iq set AF), А.

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости Nset, об/мин;

• величина скорости – 100% от максимальной скорости оси, пересчитанной в об/мин ЭД;

• период наброса заданного значения – 1000 мсек;

• длительность заданного значения – 500 мсек;

• количество повторений – 1.

Период съема данных: 1 мсек.

Результат настройки:

• контролировать время ограничения (насыщения) выходного значения регулятора скорости (Mset) и заданного значения на входе регулятора тока Iq set AF. Для станков с моментом инерции нагрузки, приведенной к валу ЭД, равной 2-5 момента инерции ЭД это время составляет 400-800 мсек. Если момент инерции нагрузки имеет большую величину, необходимо увеличить параметр T_lim_peak;

• величина ограничения момента (Mset) должна бать равна M_lllm, а ограничения тока Iq set AF - $Iq_\text{lim}_cont * \sqrt{2}$.

Ниже (рис. 3.28) приведены графики при вышеуказанных параметрах.

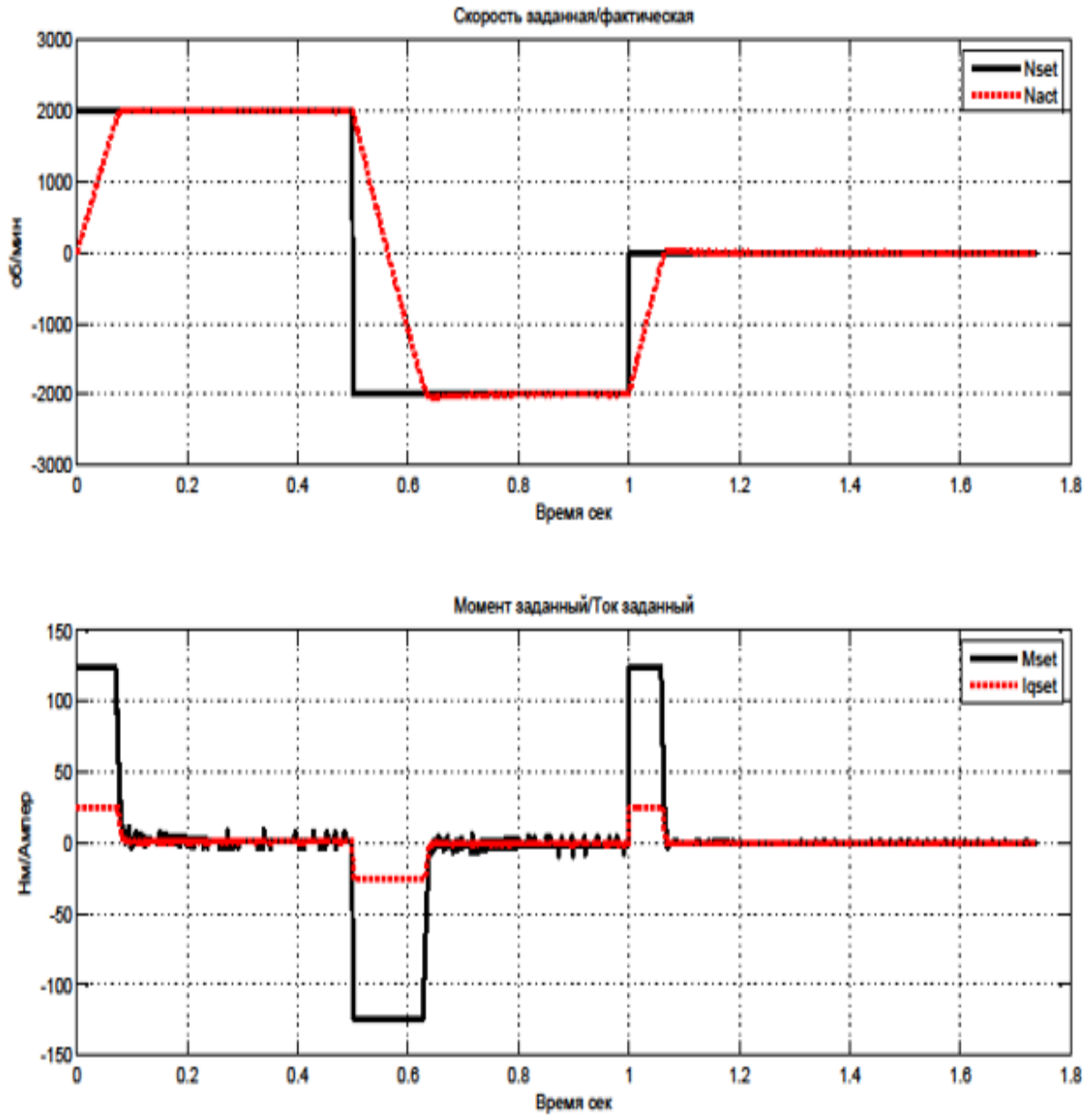


Рис. 3.28. Ступенчатый наброс заданной скорости на входе регулятора скорости NsetPI при проверке токоограничения на выходе регулятора скорости

Окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ

После изменения параметров по умолчанию необходимо ещё раз снять ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Ниже приведены графики при параметрах регулятора тока:

• $k_p = 500\ s^{-1}\ k_{ii} = 50ms\ F_n = 1\ F_{nbnn} = 100\ Hz\ F_{nlev} = 40\ rpm.$

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ, $F = 95$ Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-115˚=65˚.

На рис. 3.29 показана окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора скорости.

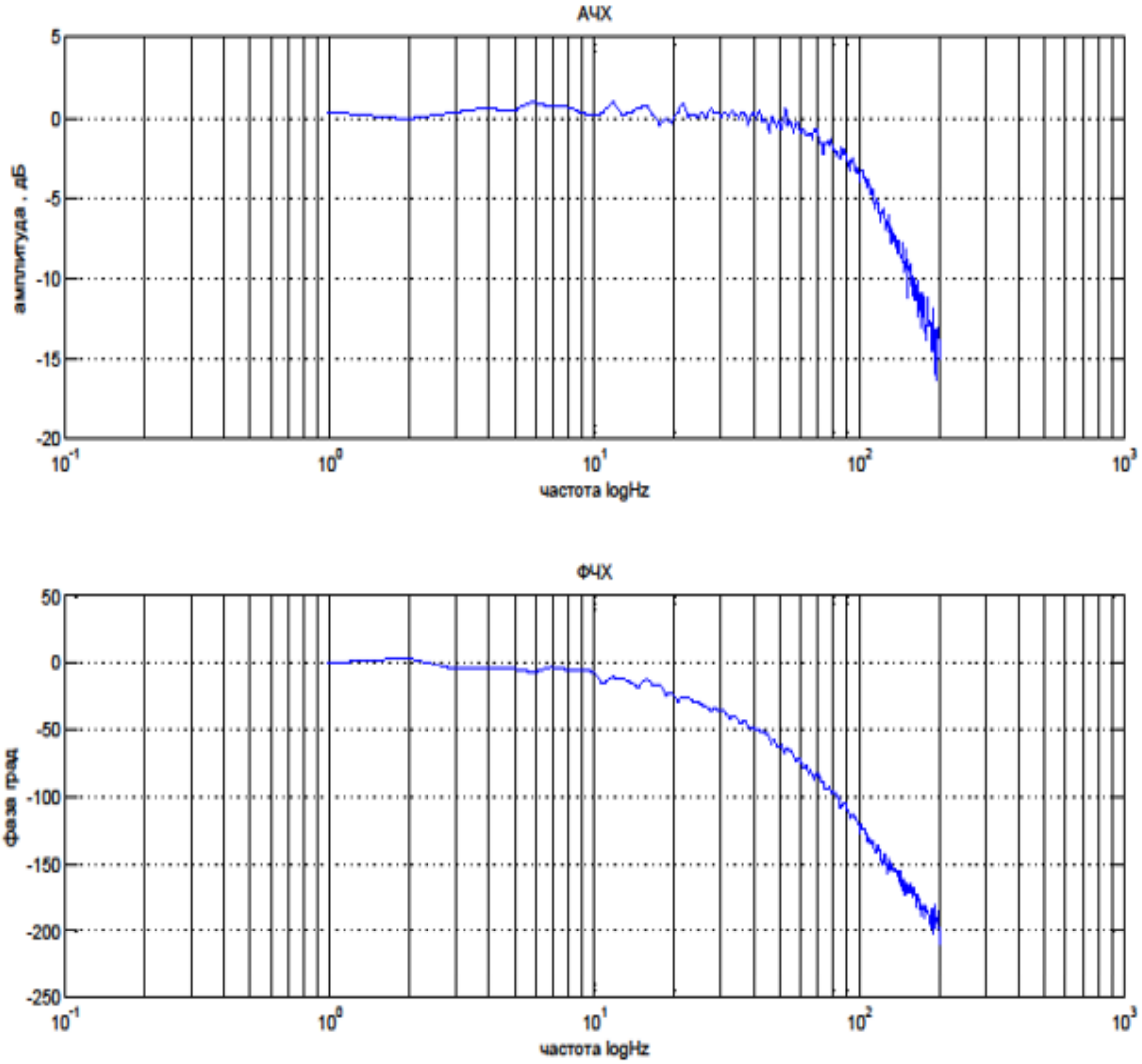


Рис. 3.29. Окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора скорости

Настройка регулятора положения ЭП

Регулятор положения ЭП может быть использоваться, например, в случае, если в качестве ЧПУ используется NC-202/220/302 ф. Балт-Систем с цифро-импульсным преобразователем (ЦИП).

При значении 3-го параметра в инструкции CAS=1, параметр p505=1, а при значении 3-го параметра в инструкции CAS=2, параметр p505=2.

Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ

Установить параметры регулятора положения по умолчанию:

• K_v – пропорциональный коэффициент (p502);

• K_i – интегральный коэффициент (p503);

• K_{ffw} - Коэффициент предуправления (p504).

$k_v = 30\ s^{-1}, k_i = 0ms, \quad k_{fn} = 100\%$.

Контролируемые данные:

• заданное значение входе регулятора положения (CNTSsetPI), cnts/ms;

• актуальное значение положения (CNTSact), cnts/ms;

• актуальное значение тока Iqact, A.

Заданное воздействие:

• заданное значение на регуляторе положения в виде Чирп-сигнала (CNTSset), cnts/ms;

• частота 0-250 Гц;

• амплитуда – 2,5% от номинального значения скорости ЭД.

Время измерения:

• зависит от длины Чирп-сигнала (при длине 2048 точки получаем 2048 мсек);

• период съема данных 1 ms.

Результат настройки:

• контролировать актуальное значение тока Iqact, чтобы он не превышал максимального значения тока ЭД;

• после преобразования Фурье контролируемых данных получаем ЛАЧХ и ЛФЧХ. Определяем полосу пропускания регулятора по уровню -3дБ и запас по фазе на этой частоте.

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ, F = 100 Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-140˚=40˚.

Обращаем внимание на то, что имеется подъем ЛАЧХ на +1,7дБ в диапазоне частот 1-40 Гц.

На рис.3.30. изображена предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора положения ЭП. Предварительная настройка Kv-фактора без предуправления.

Установить параметры регулятора положения:

• Kv – пропорциональный коэффициент (p502);

• Ki – интегральный коэффициент (p503);

• Kffw - Коэффициент предуправления (p504);

$k_v = 30\ s^{-1}, k_i = 0ms, \quad k_{fn} = 0\%$.

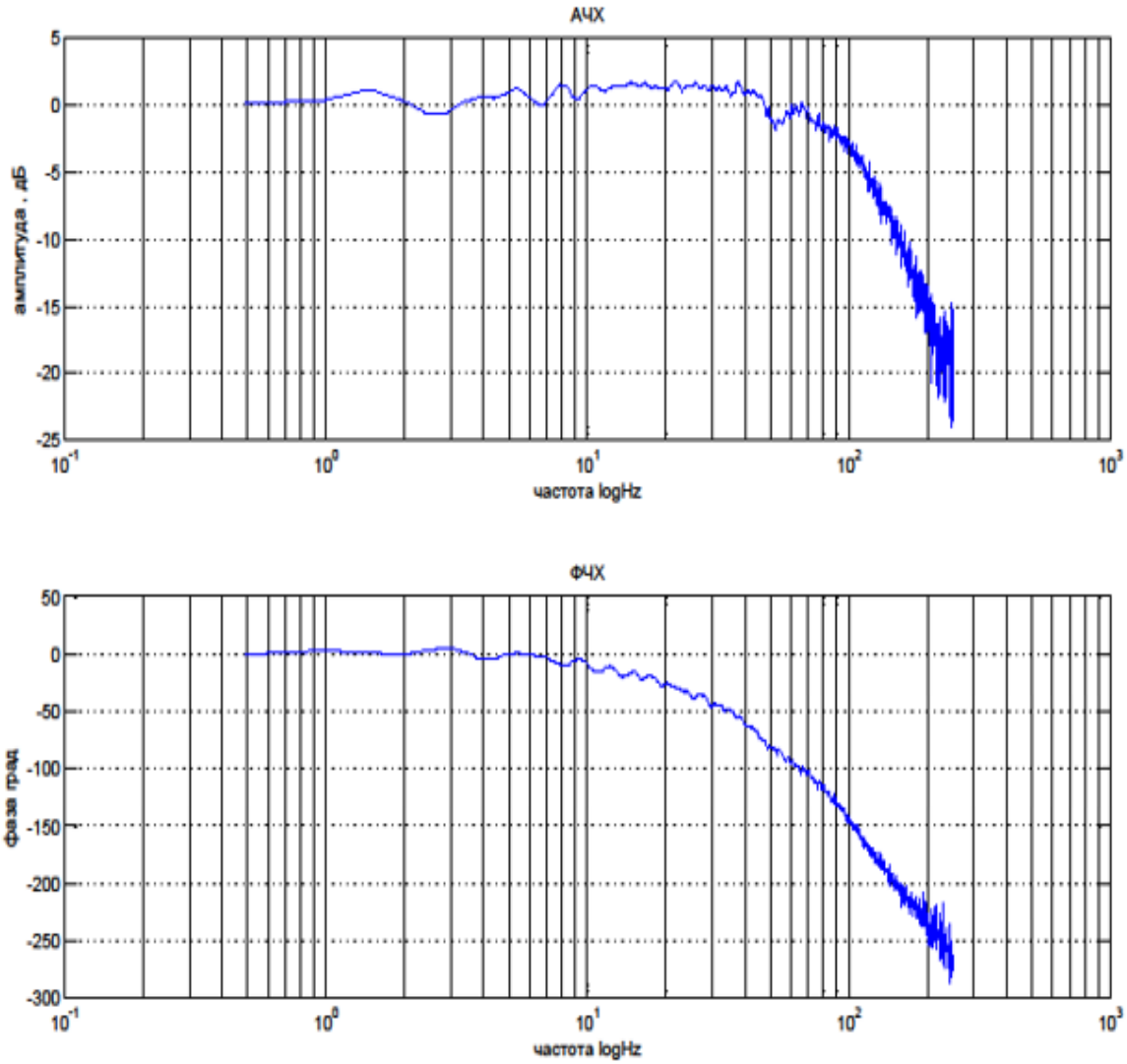


Рис. 3.30. Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора положения ЭП

Контролируемые данные:

- заданное значение на регуляторе положения (CNTSsetPI), cnts/ms;
- актуальное значение положения (CNTSact), cnts/ms;
- Рассогласование по положению (FE), cnts;
- актуальное значение тока Iqact, A.

Заданное воздействие:

- ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset), cnts/ms;
- амплитуда – 5% от номинального значения скорости ЭД;
- период наброса заданного значения – 500 мсек;
- длительность заданного значения – 250 мсек;
- количество повторений – 1.

Время измерения:

- период съема данных 1 ms.

Результат настройки:

- увеличивая Kv-фактор, добиться минимального времени переходного процесса без перерегулирования;
- контролировать актуальное значение тока Iqact, чтобы он не превышал номинального значения тока ЭД.

Ниже приведены графики при:

$k_v = 30\ s^{-1}, k_v = 100s^{-1}$, $k_v = 133s^{-1}$. Выбираем $k_v = 100s^{-1}$.

На рис. 3.31 представлен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{kv = 34\ s^{-1}}$. На рис. 3.32 изображен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{kv = 144\ s^{-1}}$. На рис. 3.33 показал ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{kv = 133\ s^{-1}}$.

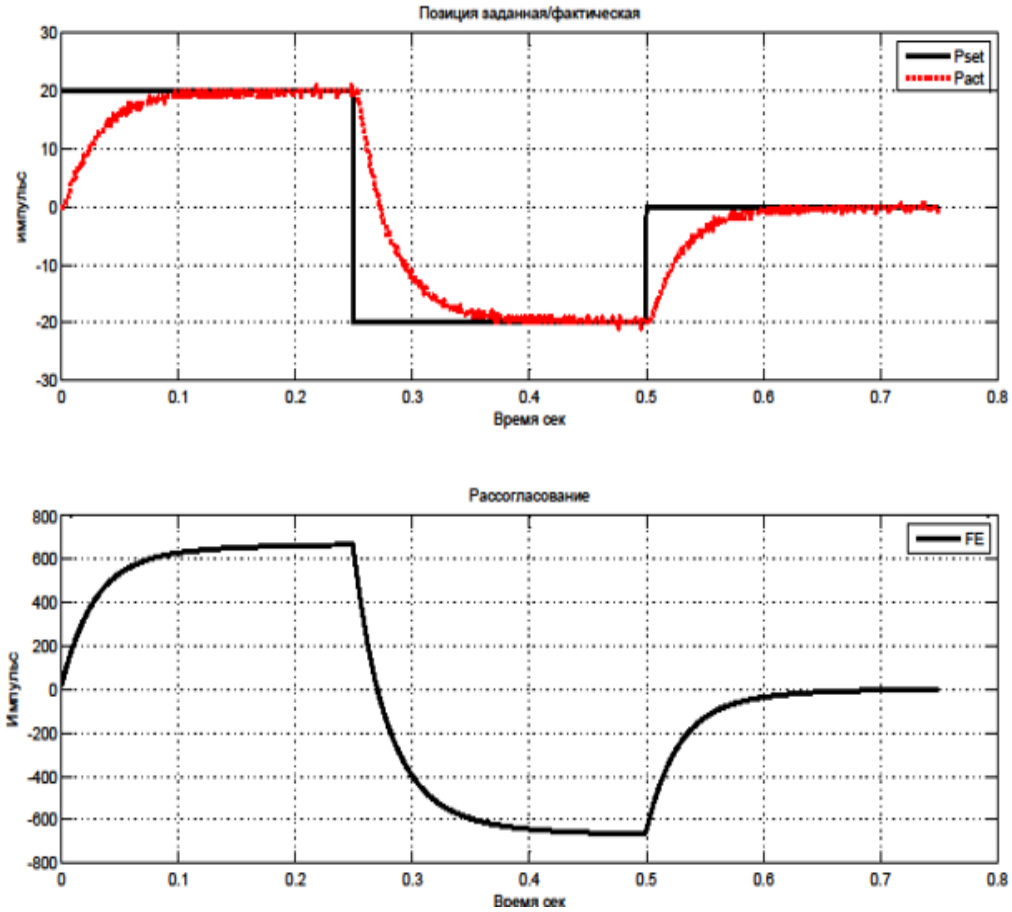


Рис. 3.31. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v = 34\ s^{-1}}$

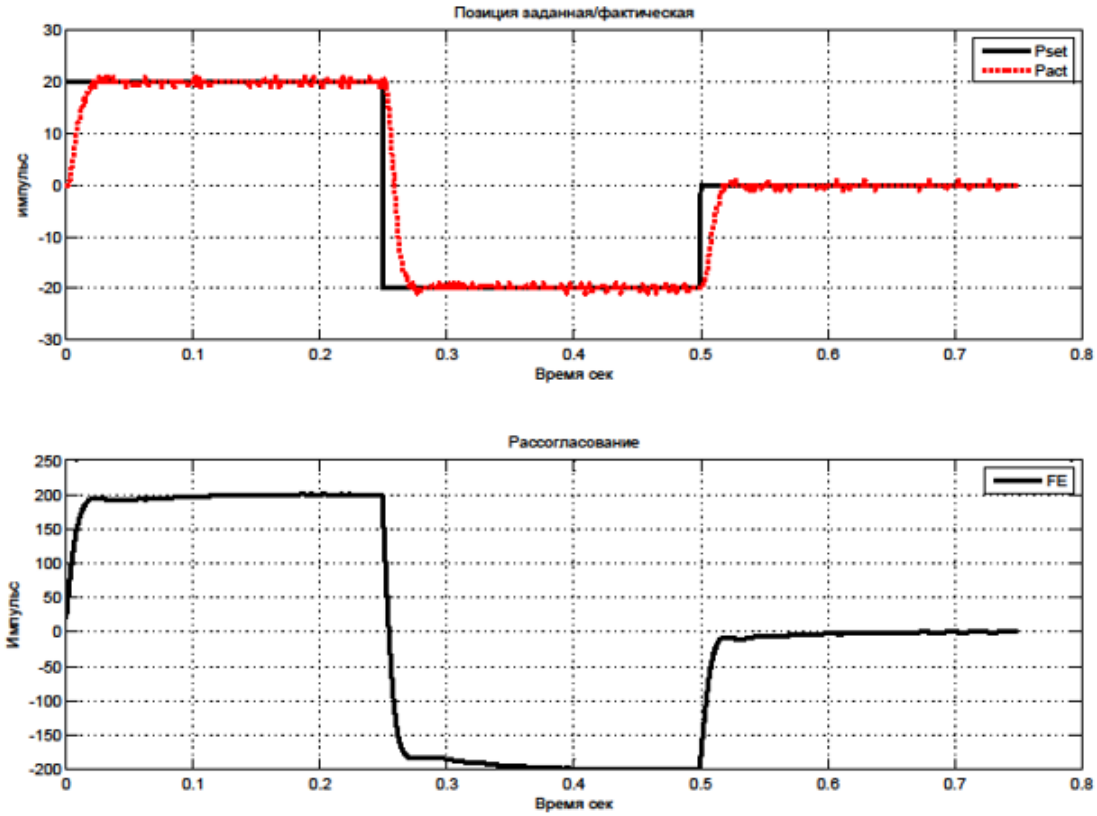


Рис. 3.32. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v = 144\ s^{-1}}$

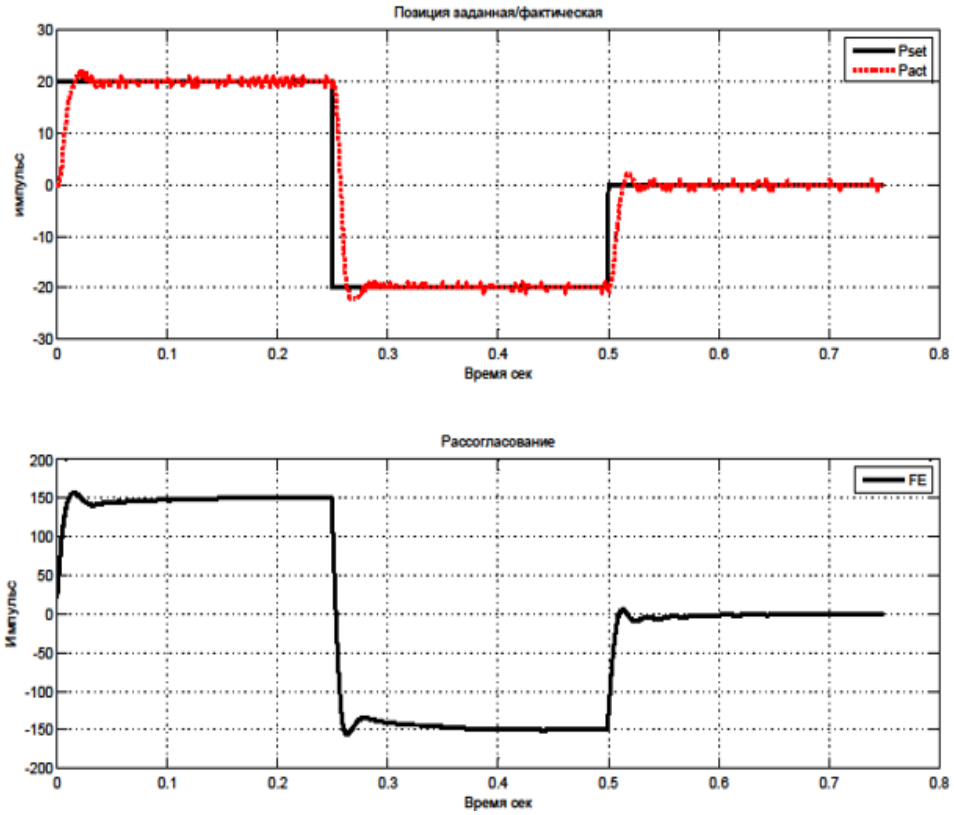


Рис. 3.33. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v = 133\ s^{-1}}$

Установить Kv-фактор=0.

Контролируемые данные:

• заданное значение на регуляторе положения (CNTSsetPI), cnts/ms;

• актуальное значение положения (CNTSact), cnts/ms;

• рассогласование по положению (FE), cnts;

• актуальное значение тока Iqact, A.

Заданное воздействие:

• ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset).

cnts/ms:

• амплитуда – 5% от номинального значения скорости ЭД;

• период наброса заданного значения – 500 мсек;

• длительность заданного значения – 250 мсек;

• количество повторений – 1.

Время измерения:

• период съема данных 1 ms.

Результат настройки:

• увеличивая Kffw, добиться отсутствия перерегулирования при выходе в заданную позицию.

Ниже приведены графики при k_{fn} = 100 %, k_{fn} = 60 %.

Выбираем k_{fn} = 60 %.

На рис. 3.34 представлен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{kfF}$ = **14** %. На рис.3.35. изображен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{kfF}$ = **64** %.

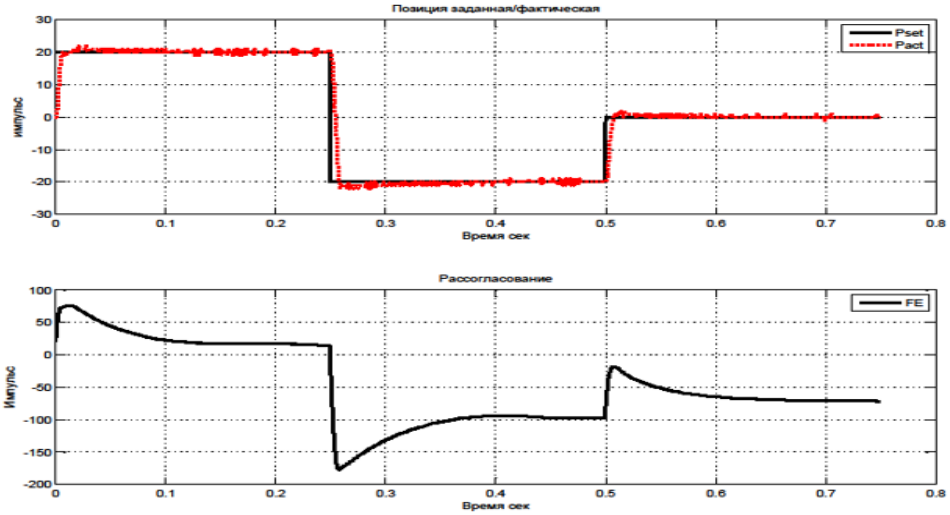


Рис. 3.34. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_{fF}}$ = **14** %

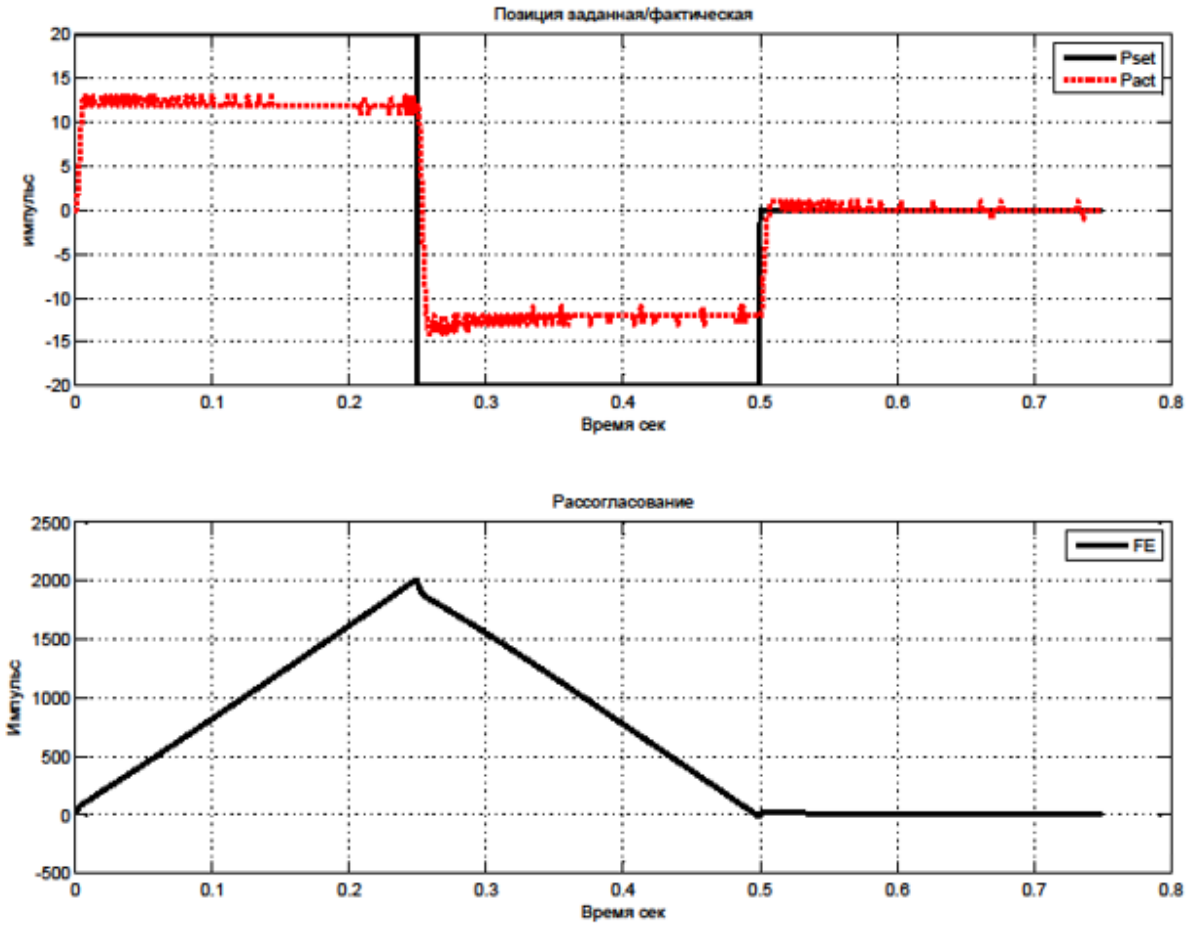


Рис. 3.35. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_{fF}}$ = **64** %

Настройка Kv-фактора с предуправлением

Установить Kv-фактор, определённый в п.2.4.2. и Kffw в п.2.4.3:

$k_v = 100\ s^{-1}$ $k_{fn} = 60\%$

Контролируемые данные:

- заданное значение на регуляторе положения (CNTSsetPI), cnts/ms
- актуальное значение положения (CNTSact), cnts/ms
- Рассогласование по положению (FE), cnts
- актуальное значение тока Iqact, A

Заданное воздействие:

- ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset), cnts/ms

- амплитуда – 5% от номинального значения скорости ЭД
- период наброса заданного значения – 500 мсек
- длительность заданного значения – 250 мсек
- количество повторений - 1

Время измерения:

- период съема данных 1 ms

Результат настройки:

- изменяя Kfw, добиться отсутствия перерегулирования при выходе в заданную позицию.

Ниже приведены графики при:

$k_v = 100\ s^{-1}$ $k_{fn} = 60\%$ и $k_v = 100\ s^{-1}$ $k_{fn} = 40\%$

Выбираем

$k_v = 100\ s^{-1}$ $k_{fn} = 40\%$

На рис.3.36 изображен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v = 144\ s^{-1}}$ $\boldsymbol{k_F = 64\%}$. На рис. 3.37 представлен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v = 144\ s^{-1}}$ $\boldsymbol{k_{fF} = 44\%}$.

Окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ.

После изменения параметров по умолчанию необходимо ещё раз снять ЛАЧХ и ЛФЧХ.

Ниже приведены графики при параметрах регулятора положения:

$k_v = 100\ s^{-1}$ $k_{fn} = 40\%$

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ $F = 60$ Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-110˚=70˚.

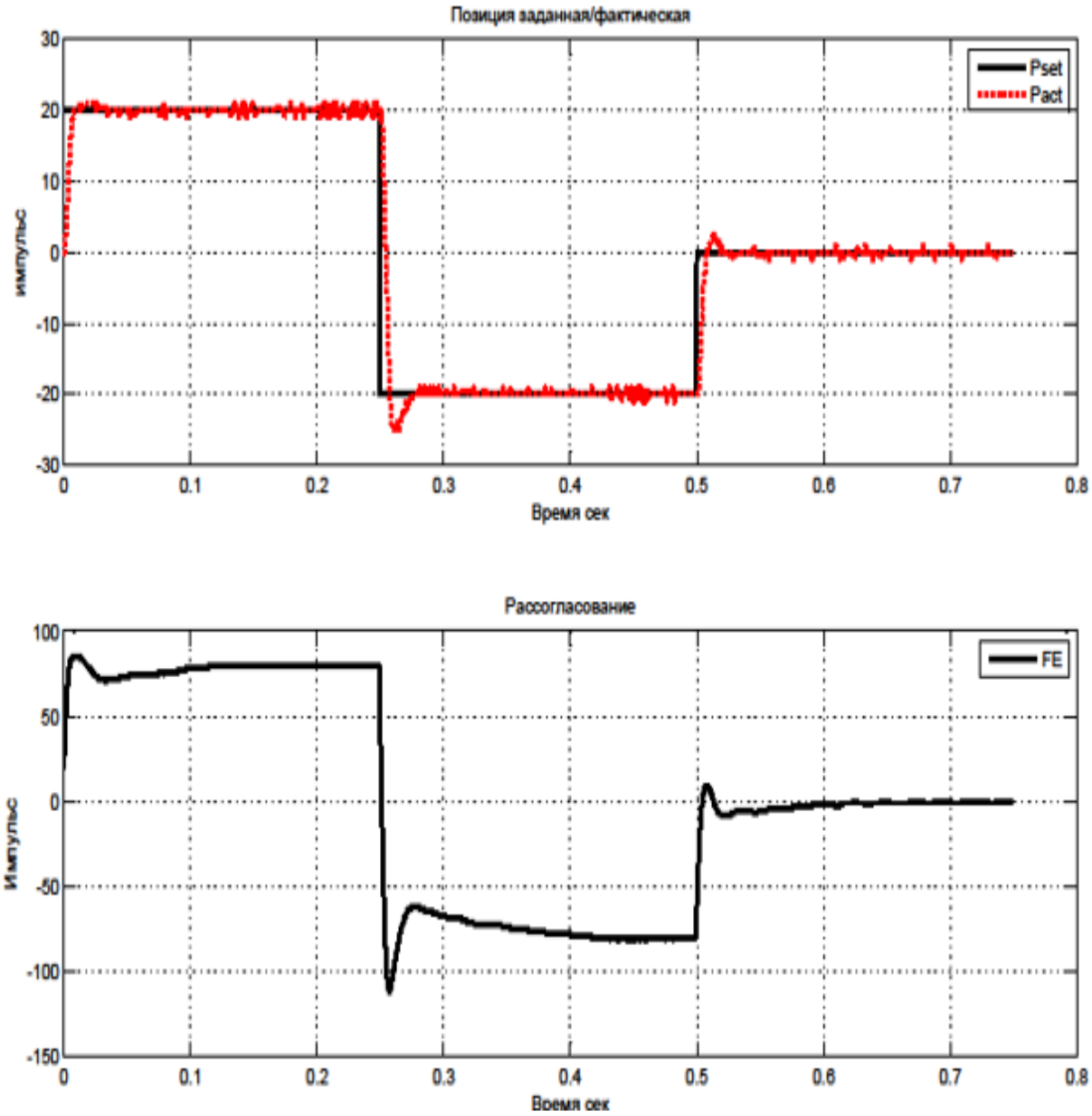


Рис. 3.36. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v = 144\ s^{-1}}$ $\boldsymbol{k_F = 64\%}$

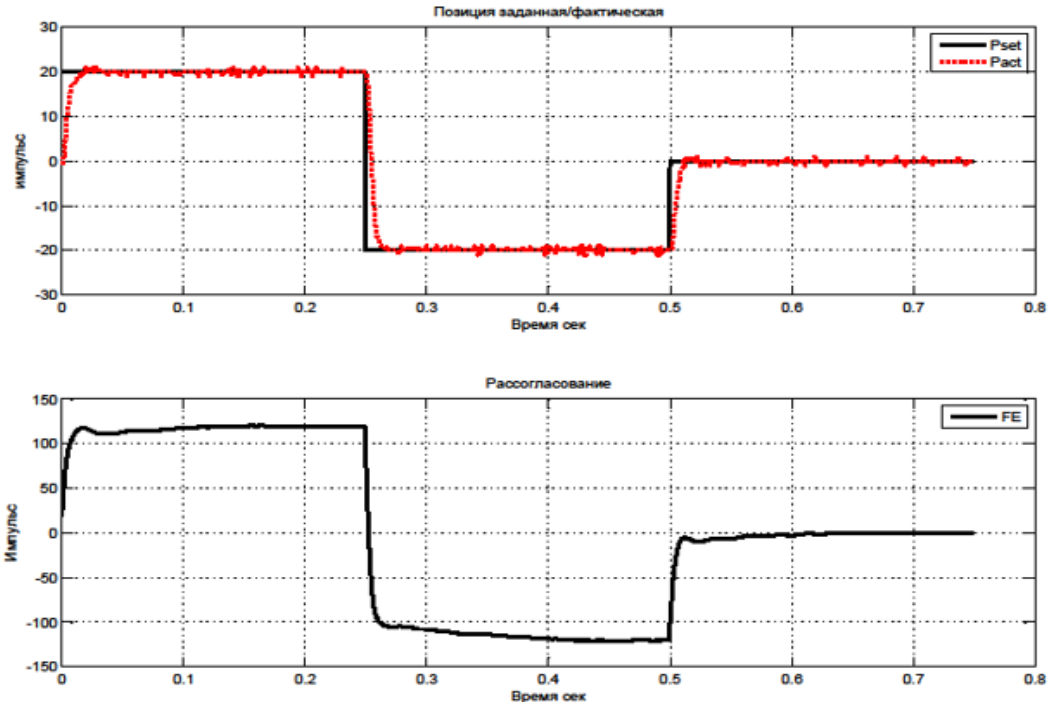


Рис. 3.37. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения (CNTSset) при $\boldsymbol{k_v} = \mathbf{144}\ \boldsymbol{s^{-1}}\ \boldsymbol{k_{fF}} = \mathbf{44}\%$

На рис.3.38 представлена окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора положения ЭП.

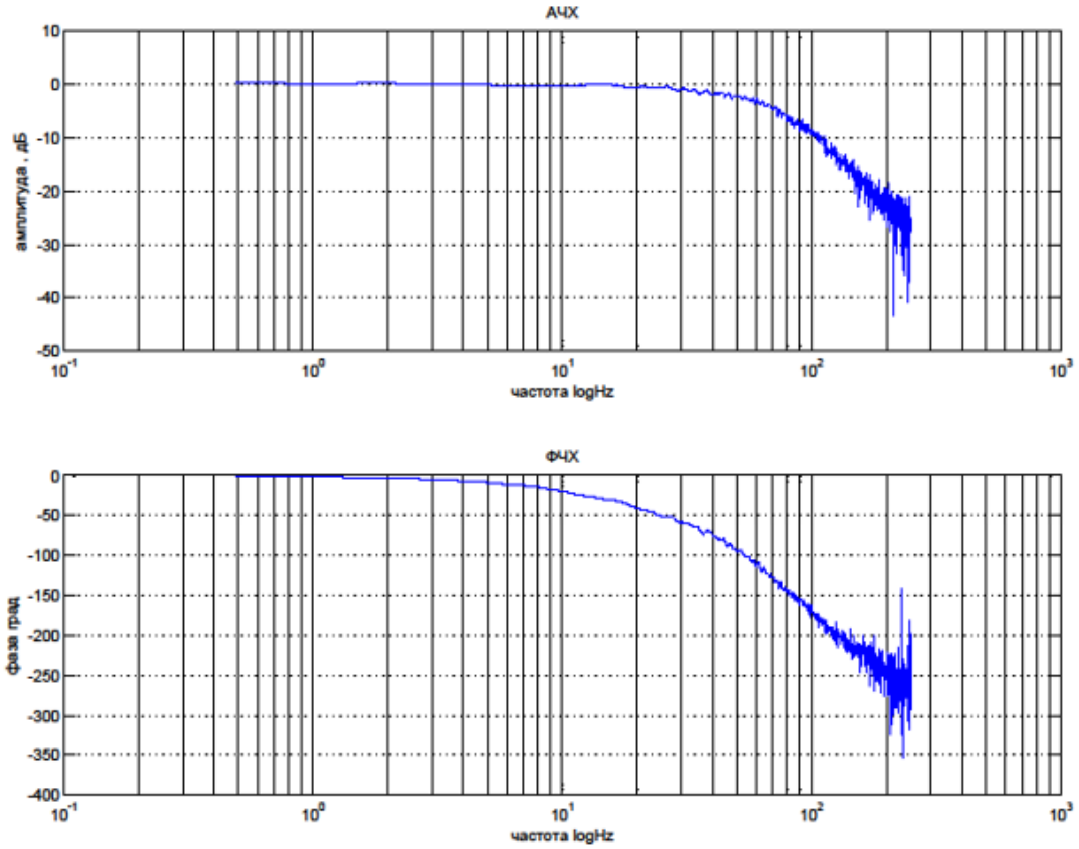


Рис. 3.38. Окончательная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора положения ЭП

3.4.3. Настройка регулятора положения при работе от ЧПУ

Предполагается, что в качестве ЧПУ используется NC-XXX ф. Балт-Систем и аналоговым заданием на ЭП. Таким образом, в самом начале необходимо произвести балансировку ЭП и ЧПУ (устранить рассогласование в следящем режиме ЭП при отсутствии задания на движение – параметр ЭП "p58 Смещение аналогового задания").

Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ

Установить параметры регулятора положения по умолчанию:

- K_v – пропорциональный коэффициент (3-й параметр в инструкции GM0 = xx);
- K_i – интегральный коэффициент (8-й параметр в инструкции FRC= xx);
- K_{fw} - Коэффициент предуправления (7-й параметр в инструкции FRC=xx).

$k_v = 16.667\ s^{-1}\ k_i = 0ms \qquad k_{fn} = 0$

Контролируемые данные:

- заданное значение входе регулятора положения, имп;
- актуальное значение положения, имп;
- актуальное значение тока Iqact, А.

Заданное воздействие:

- заданное значение на регуляторе положения в виде Чирп-сигнала, имп;
- частота 0-100 Гц;
- амплитуда – 2,5% от максимального значения рассогласования.

Время измерения:

- зависит от длины Чирп-сигнала (при длине 2048 точки получаем 4096 мсек);
- период съема данных 2 ms (1 tick).

Результат настройки:

- контролировать актуальное значение тока Iqact, чтобы он не превышал максимального значения тока ЭД;
- после преобразования Фурье контролируемых данных получаем ЛАЧХ и ЛФЧХ. Определяем полосу пропускания регулятора по уровню -3дБ и запас по фазе на этой частоте.

Получаем: полоса пропускания регулятора по уровню -3дБ F = 2,7 Гц и запас по фазе на этой частоте равен 180˚-56˚=124˚.

Частота, на которой фаза равна -180˚, равна 25 Гц и запас по амплитуде на этой частоте 18 дБ.

На рис 3.39 изображена предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора положения ЧПУ.

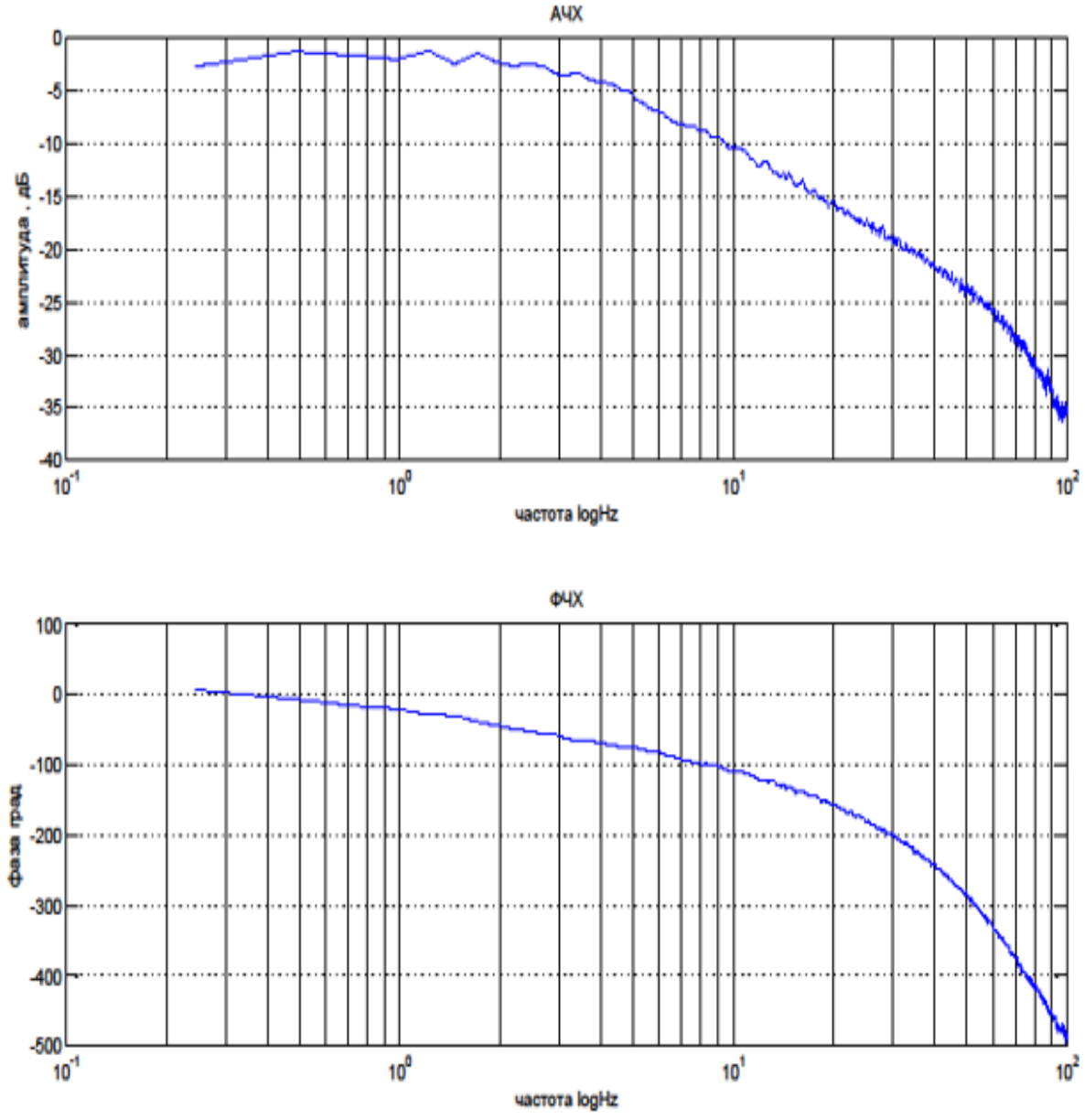


Рис. 3.39. Предварительная ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора положения ЧПУ

Предварительная настройка Kv-фактора без предупреждения

Установить параметры регулятора положения по умолчанию:

- K_v – пропорциональный коэффициент (3-й параметр в инструкции GM0 = xx);
- K_i – интегральный коэффициент (8-й параметр в инструкции FRC = xx);
- Kffw - Коэффициент предупреждения (7-й параметр в инструкции FRC = xx).

$k_v = 16.667\ s^{-1}$ $k_i = 0ms$ $k_{fn} = 0$ ($UEP = 1$)

Контролируемые данные:

- заданное значение входе регулятора положения, имп;
- актуальное значение положения, имп;
- рассогласование, имп.

Заданное воздействие:

- ступенчатый наброс заданного положения, имп;
- амплитуда заданного положения 2,5% от максимального значения рассогласования;
- длительность заданного положения 250 мсек.

Время измерения:

- 500 мсек

Результат настройки:

- увеличивая Kv-фактор, добиться минимального времени переходного процесса без колебаний.

Ниже приведены графики при:

$k_v = 16.667\ s^{-1}$ $k_v = 50s^{-1}$ $k_v = 66.667s^{-1}$

Выбираем $k_v = 50s^{-1}$

На рис. 3.40. изображен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 16.66\ s^{-1}}$.

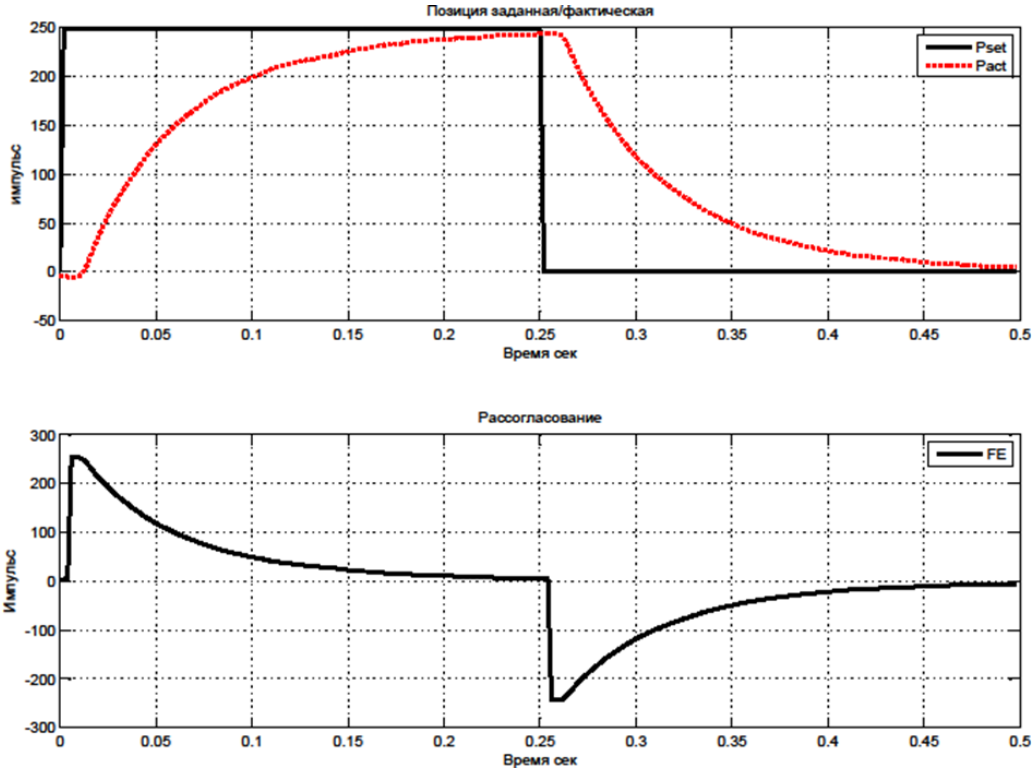


Рис. 3.40. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v} = \mathbf{16.666}\ \boldsymbol{s^{-1}}$

На рис. 3.41 представлен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v} = \mathbf{16.666}\ \boldsymbol{s^{-1}}$.

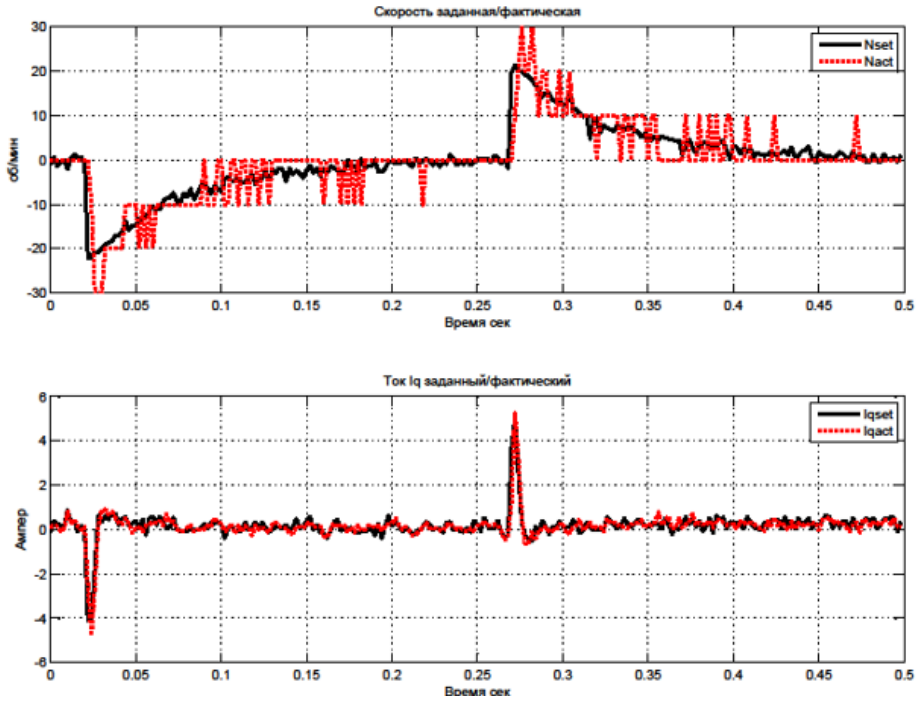


Рис. 3.41. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v} = \mathbf{16.666}\ \boldsymbol{s^{-1}}$

На рис. 3.42 показан ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 54.44\ s^{-1}}$.

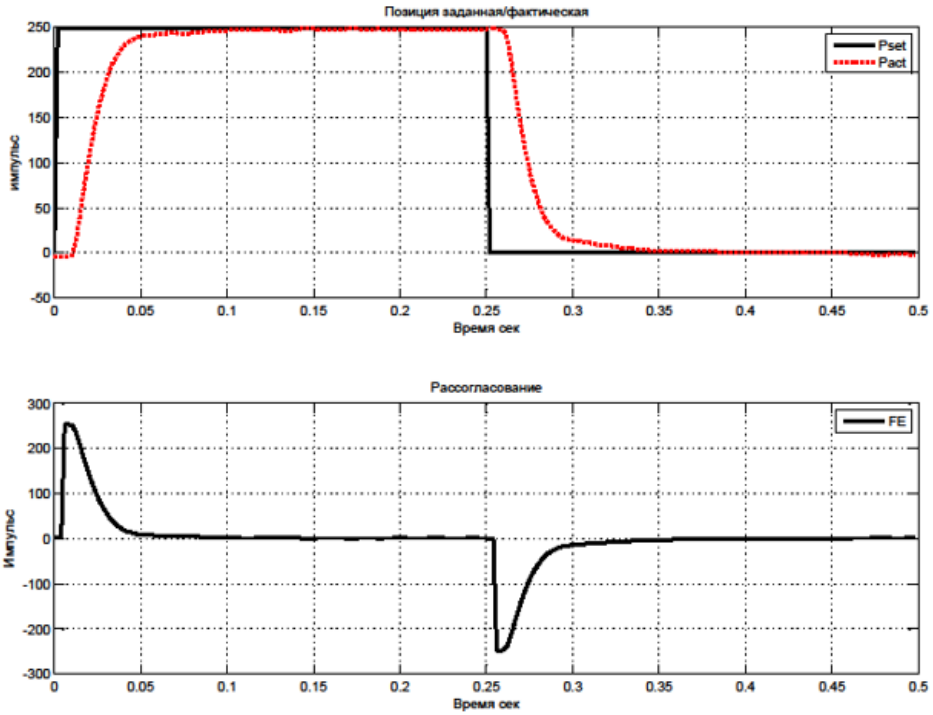


Рис. 3.42. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 54.44\ s^{-1}}$

На рис. 3.43 изображен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 54.44\ s^{-1}}$.

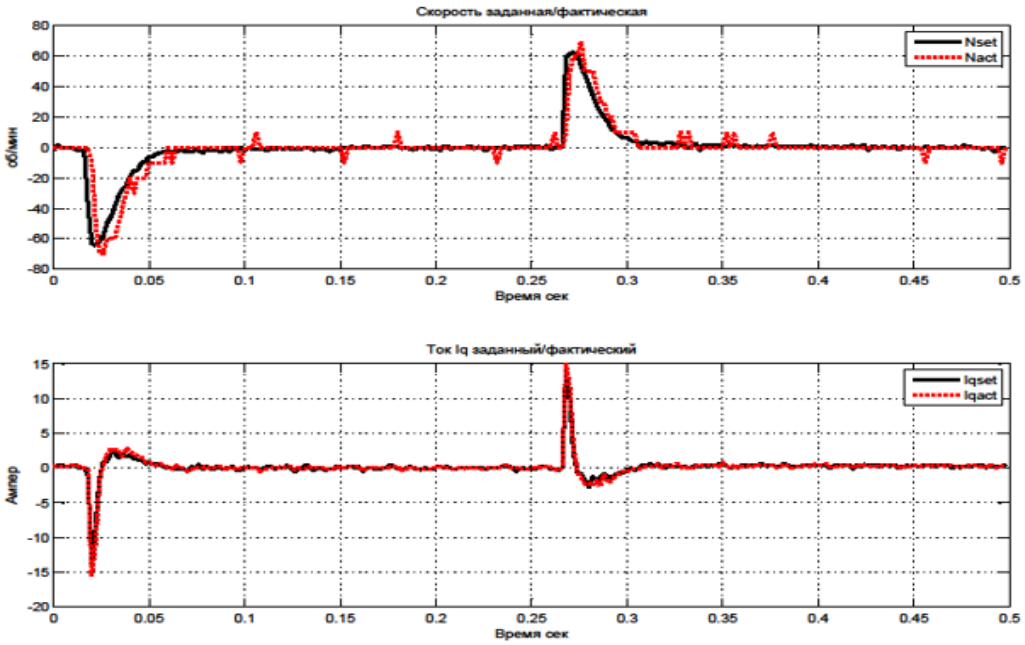


Рис. 3.43. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 54.44\ s^{-1}}$

На рис. 3.44 представлен ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 66.66\ s^{-1}}$.

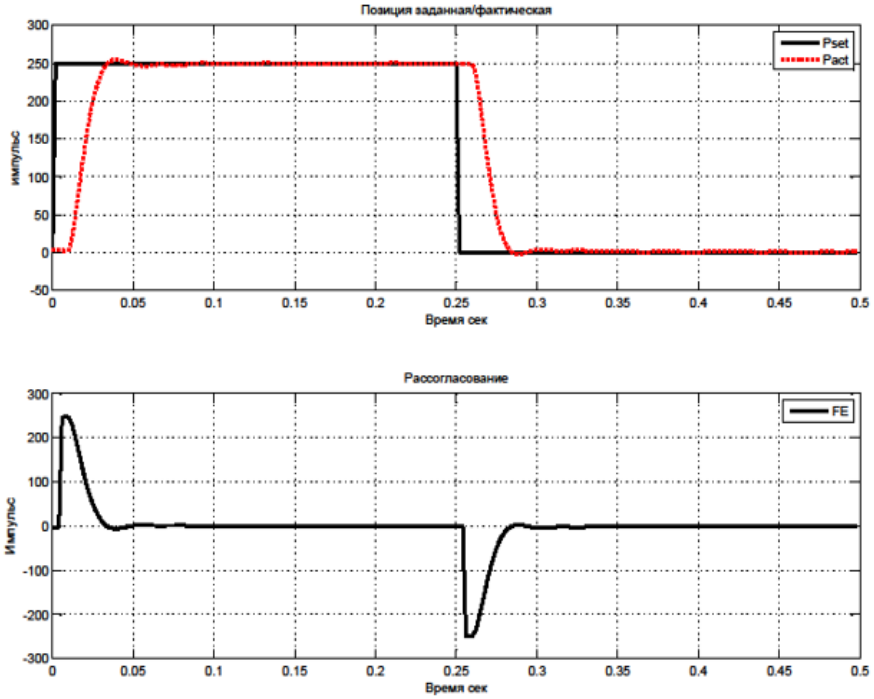


Рис. 3.44. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 66.66\ s^{-}}$

На рис. 3.45. показан ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 66.666\ s^{-1}}$.

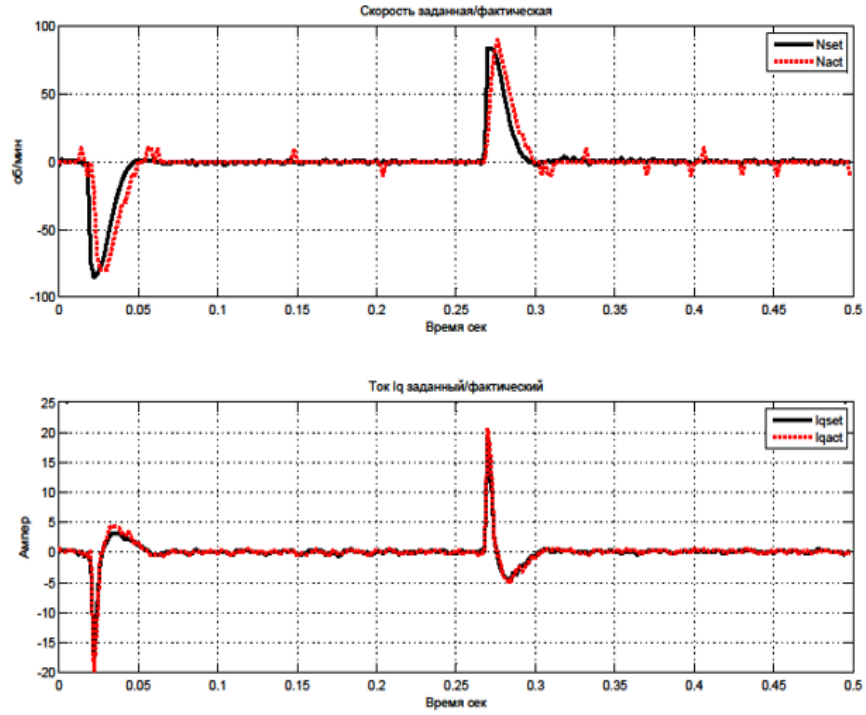


Рис. 3.45. Ступенчатый наброс заданного положения на входе регулятора положения при $\boldsymbol{k_v = 66.666\ s^{-1}}$

Определение максимального ускорения при настройке S-образной характеристики

Активизируем инструкцию ACC=1,05 в секции 1 файла AXCFIL. Устанавливаем параметры:

- Kv – Kv – фактор;
- K_{fw} - коэффициент предуправления;
- A – ускорение на рабочей подаче (по умолчанию).

$k_v = 50.0\ s^{-1}$ $k_{fn} = 1$ $A = 1000\ mm * s^{-2}$

Контролируемые данные:

- заданное значение входе регулятора положения, имп;
- актуальное значение положения, имп;
- рассогласование, имп;
- актуальное значение тока Iqact, A.

Заданное воздействие:

- наброс заданного положения по S-образной характеристике, имп;
- величина заданного положения – достаточная для достижения заданной скорости;
- заданная скорость – максимальная скорость подачи (может быть меньше скорости ускоренного хода).

Время измерения:

- 1-3 сек

Результат настройки:

- увеличивая ускорение, добиться достижения актуального значения тока Iqact максимального значения (ограничения), равного полученному в шаге 4 п.2.3.2 ($Iq_\mathrm{lim}\ _cont$).

Ниже приведены графики при: $A = 1000\ mm * s{-}2$ $A = 4400\ mm * s{-}2$. Таким образом, максимальное ускорение равно $A = 4400\ mm * s{-}2$

На рис.3.46. представлен наброс заданного положения по S-образной характеристике при $\boldsymbol{A = 144\ 11 * s^{-2}}$.

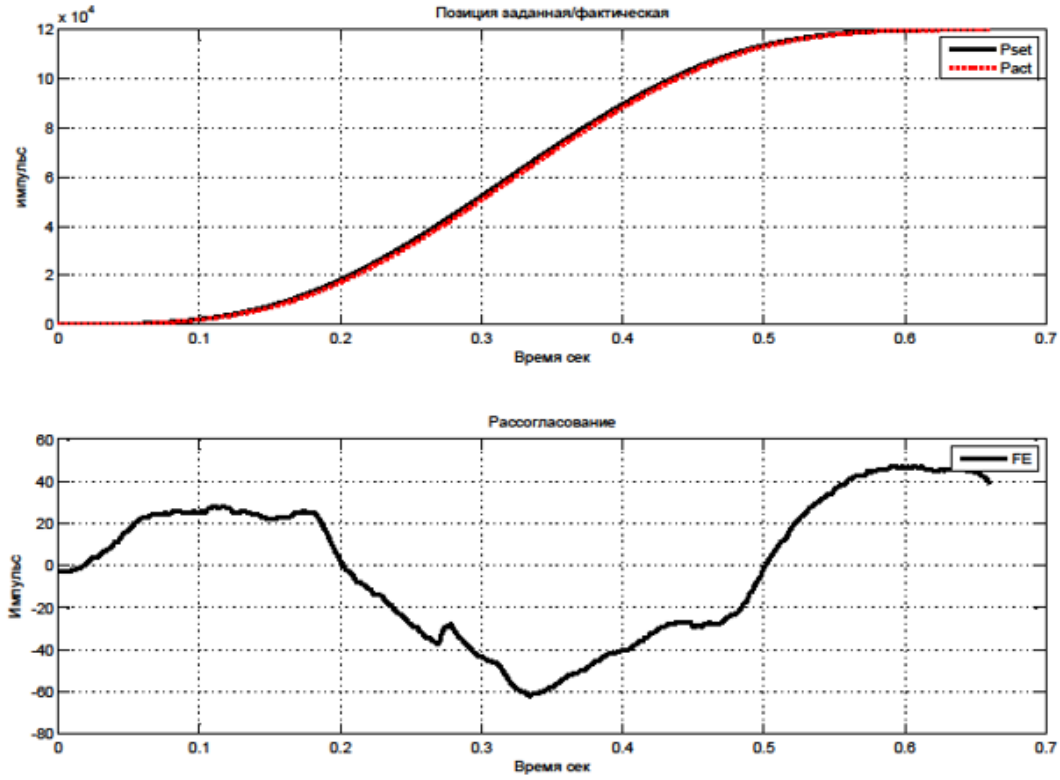


Рис. 3.46. Наброс заданного положения по S-образной характеристике при $\boldsymbol{A = 144\ 11 * s^{-2}}$

На рис. 3.47. изображен наброс заданного положения по S-образной характеристике при $\boldsymbol{A = 444\ 11 * s^{-2}}$.

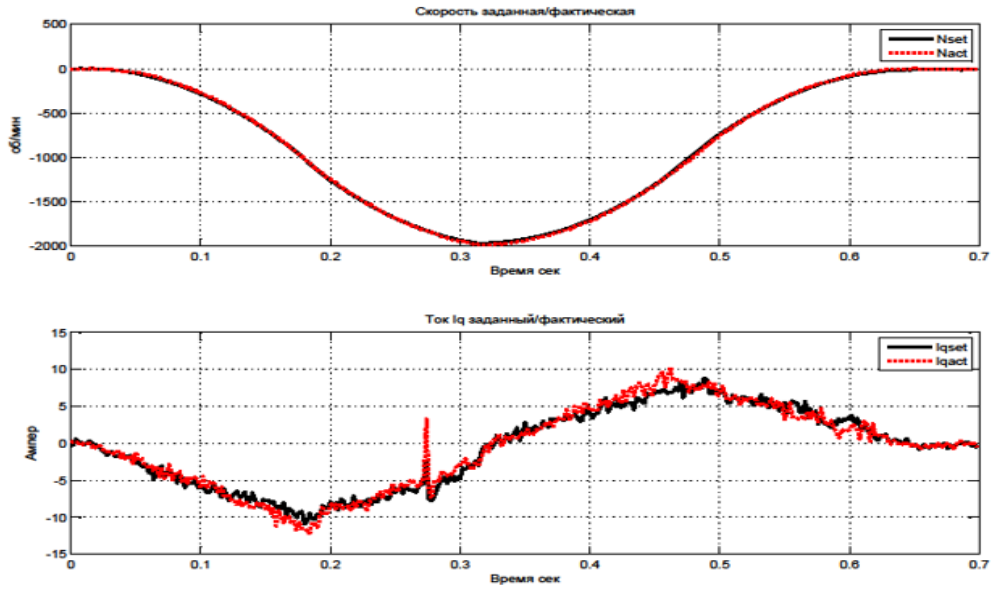


Рис. 3.47. Наброс заданного положения по S-образной характеристике при $\boldsymbol{A = 444\ 11 * s^{-2}}$

На рис.3.48. показан наброс заданного положения по S-образной характеристике при $\boldsymbol{A = 444\ 11 * s^{-2}}$.

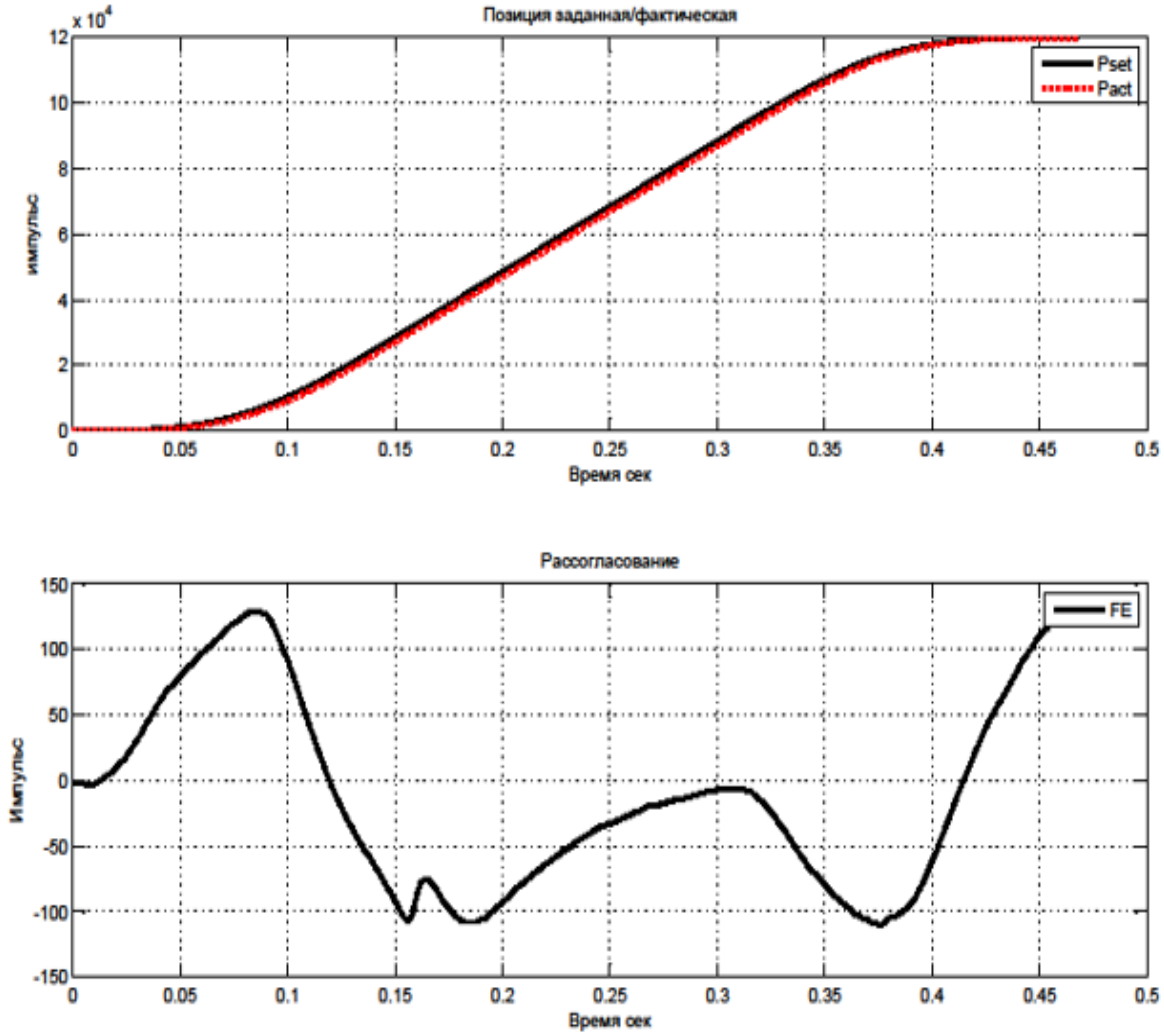


Рис. 3.48. Наброс заданного положения по S-образной характеристике при $\boldsymbol{A = 444\ 11 * s^{-2}}$

3.5. Наладка мехатронной системы металлорежущих станков

Наладка современных металлорежущих станков с ЧПУ как мехатронной системы является одним из ответственных этапов их эксплуатации. Правильная наладка способствует повышению производительности труда, качества продукции и сохранению долговечности оборудования. Наладка станка с ЧПУ включает в себя подготовку режущего инструмента и технологической оснастки, размещение рабочих органов станка в исходном положении, пробную обработки первой

детали, внесение корректив в положение инструмента и режим обработки, исправление погрешностей и недочетов в управляющей программе. Важным этапом наладки является базирование и закрепление заготовок. При определении схемы базирования крайне важно знать конструктивные особенности налаживаемого оборудования в частности элементов, обеспечивающих базирование приспособления или заготовки. Для токарных станков с ЧПУ выбор схемы базирования сводится к выбору используемого приспособления для закрепления заготовок (различные зажимные патроны), а также к выбору наладочных элементов выбранного приспособления (к примеру, обычные или сырые кулачки). Важно заметить, что для станков сверлильно-фрезерно-расточной группы возможны различные схемы базирования:

- непосредственно на столе станка с ЧПУ;
- в приспособлении, которое установлено на столе станка;
- в приспособлении, установленном на координатной плите;
- непосредственно на координатной плите.

Непосредственно на столе станка устанавливают заготовку, имеющую большие размеры, хорошую опорную поверхность и удобные поверхности для закрепления. Вместе с тем, объём выпуска должен быть сравнительно небольшим, а трудоемкость обработки сравнительно высокой (к примеру, обработка малых партий корпусных деталей на фрезерных и многоцелевых станках при высокой концентрации операций). При этом процент времени, затрачиваемого на установку будет незначительным. В случае если деталь имеет небольшие размеры, отсутствуют удобные поверхности для закрепления, повышается объём выпуска, сокращается концентрация операций и как следствие возникает крайне важность сокращения времени на переустановку заготовок, то целесообразно применять приспособления. При этом приспособление должна быть установлено на столе станка или на координатной плите. Координатная плита позволяет повысить точность установки приспособления и его быстросменность. Существует несколько вариантов расположения приспособлений на станках с ЧПУ.

- Приспособление может занять единственно возможное положение. В этом случае не требуется его выверять. Пример – крепление токарного патрона к шпинделю станка, установка вращающегося центра в пиноль задней бабки.

- Произвольное расположение приспособления вдоль осей координат, допускаемое управляющей программой. Характерно для фрезерных, сверлильных и расточных станков в том случае если обработка ведется с одной стороны. Приспособление должно бать выверено в угловом направлении относительно линейных координат.

- Приспособление должно занять относительно рабочих органов единственно допустимое управляющей программой положение. Примером является наладка станка на обработку детали с нескольких сторон при повороте стола станка. Приспособление должно быть выверено в угловом направлении относительно линейных координат, а также в линейном направлении по отношению к оси поворота.

Для правильной установки приспособления имеют соответствующие базовые элемента (шпонки, пальцы), которые соответствуют базовым элементом стола станка (пазы, центральное отверстие). Совмещая указанные базовые элементы добиваются правильного размещения приспособления в координатах станка. В случае если такие элементы отсутствуют или требуется более точная установка приспособления применяют мерные оправки. При этом мерная оправка закрепляется в шпинделе станка, перемещая стол в нужном направлении добиваются касания оправки базовых элементов приспособления, в случае если это крайне важно используют набор мерных плиток. Важно заметить, что для совмещения оси шпинделя и центра детали применяют оптический или индикаторный центроискатели.

Наладка режущего инструмента на размер

В современном производстве возможно определение положения вершины резца при помощи специальных приборов. Такие приборы имеют подставку, имитирующую присоединительные поверхности станка, подвижную каретку, измерительное устройство (микроскоп, проектор, индикатор). Установив режущий инструмента на подставке, при помощи каретки перемещают его до нужного положения, отслеживая все перемещения на измерительном устройстве. Полученную информацию заносят в автоматическом или ручном режиме в УЧПУ станка. Такие устройства позволяют, кроме того, проверить правильность и точность исполнения режущей части. Сегодня существуют системы, позволяющие автоматически распознавать инструмент. Для этого используются модульные инструментальные блоки, которые

оснащают носителем информации виде электронного чипа. В память инструмента заносят код инструмента, а также различную технологическую информацию, кроме того такой чип может использоваться для записи статистической информации и ходе технологического процесса, что обеспечивает обратную связь между технологической службой и непосредственным исполнением техпроцесса. Система имеет специальные устройства, позволяющие считать эту информацию, предать ее в ЭВМ склада, УЧПУ, технологам. Современные устройства ЧПУ позволяют автоматически осуществлять ''привязку'' инструмента к координатной системе станка. Для этого система должна иметь специальный цикл, а также устройство, позволяющее отследить местоположение режущей кромки инструмента. Оператору достаточно установить инструмент и задать соответствующую команду с пульта оператора. В случае отсутствия указанных систем ''привязка'' инструмента осуществляется оператором методом пробных проточек. Для этого оператору крайне важно в ручном режиме осуществить проточку заготовки на небольшую длину, отвести инструмент, от заготовки не перемещая его по фиксируемой координате. Произвести замер, включить режим привязки инструмента, записать измеренную информацию в УЧПУ. Такую процедуру крайне важно провести по всем координатам.

Режимы работы станков с ЧПУ. Станки с ЧПУ могут работать в нескольких режимах: автоматический, полуавтоматический, ручной ввод, ручной, режим привязки инструмента. В автоматическом режиме осуществляется отработка управляющей программы безостановочно до одной из вспомогательных команд. В полуавтоматическом режиме осуществляется покадровая отработка управляющей программы. После чего выполнение программы приостанавливается до нажатия клавиши ''Пуск''. В режиме ручного ввода оператор имеет возможность откорректировать управляющую программу или создать новую, а также ввести константы (параметры) станка. В ручном режиме оператор имеет возможность перемещать рабочее органы, задавать технологические команды (пуск-останов шпинделя, включение охлаждения, смена инструмента, установка рабочее подачи), выполнять простейшие переходы (проточить диаметр, подрезать торец). В режиме привязки инструмента вводится информация о фактическом положении

режущего инструмента в системе координат станка, а также вводится коррекция на износ инструмента.

Органы управления. Для работы оператора в ручном режиме предусмотрены следующие органы управления: кнопки включения и отключения шпинделя, зажима-отжима инструмента и шпинделя, смены инструмента, клавиши или манипулятор типа джойстик управления перемещениями рабочих органов вдоль координатных осей на рабочей подаче или ускоренном ходу, штурвал для дискретных перемещений рабочих органов, кнопка возврата рабочих органов в ''Нуль'' станка. Почти на всех станках с ЧПУ имеются корректоры рабочей подачи, а на станках с регулируемым приводом и частоты вращения шпинделя в пределах от 0-120%.

Органы сигнализации. Органы сигнализации можно разделить на три группы: оперативные сигнальные группы, оперативные сигнальные лампы, диагностические сигнальные лампы, устройство цифровой индикации.

Оперативные лампы сигнализируют о готовности к выполнению цикла соответствующими агрегатами: включение станка в сеть, включение выбранного режима и др. В качестве диагностических лам, т.е. свидетельствующих о неисправности или некорректной работе обычно используются те же. Современные УЧПУ немыслимы без дисплея, на который выводится полная информация о местоположении рабочих органов, и протекании технологического процесса. Также на экран монитора может выводится управляющая программа.

Управление точностью. Одним из непременных условий, обеспечивающих получение требуемой точности детали при обработке на станках, работающих в автоматическом цикле, является соответствие фактических размеров, размерам, заданным в управляющей программе. Выполнение этого условия зависит от сохранения положения режущих кромок инструмента и баз станка относительно начала отсчета. Для этого крайне важно компенсировать погрешности статической наладки, развивающиеся в результате изнашивания режущего инструмента и температурных деформаций системы СПИД, а также в результате замены инструмента. Для решения этой задачи используются автоматические системы, обеспечивающие коррекцию точности статической наладки в сходном положении. Коррекция точности статической наладки в исходном положении необходима при переналадке

станка непосредственно перед обработкой первой детали очередной партии. Именно на этом этапе погрешность составляет наибольшее значение. Автоматическую коррекцию наладки можно выполнять также непосредственно в процессе обработки партии деталей, после одного или нескольких циклов обработки. Такая коррекция позволяет уменьшить влияние систематически действующих факторов. Современные станки с ЧПУ имеют специальную систему управления точностью.

Рассмотрим систему автоматической коррекции для токарного станка с ЧПУ. Это устройство фиксирует отклонения вершины режущей кромки инструмента вследствие изнашивания, температурных деформаций или замены пластины. Отклонение положения вершины резца измеряется в двух перпендикулярных направлениях, соответствующих образованию линейных и радиальных размеров детали. Процесс измерения осуществляется по определенной программе системы ЧПУ. По команде системы ЧПУ револьверная головка выводится в определенное положение, при котором резец устанавливается в измерительной позиции. Далее происходит установочное перемещение револьверной головки до касания режущей кромкой измерительного наконечника датчика. Далее револьверная головка возвращается, в измерительную позицию, после чего установочное перемещение осуществляется для другой координаты. На основании результатов измерения производится автоматическая коррекция в блоке ЧПУ, позволяющая компенсировать изменение положения режущей кромки инструмента. Такую коррекцию целесообразно производить непосредственно перед чистовым проходом. Проверка и оценка новой управляющей программы. Весьма ответственным этапом работы является отладка новой УП. Этот этап наладки осуществляет чаще всего наладчик или наладчик совместно с технологом программистом. В ходе отладки УП проверяют ее оптимальность по параметрам производительности, качества обработки, отсутствия вибраций, стойкости инструмента, приемлемого схода стружки. По результатам обработки пробной детали УП редактируют. Наиболее высокий результат редактирования УП должна быть достигнут только с использованием теоретических знаний в области металлообработки, а также творческого подхода.

Работа наладчика станка начинается чаще всего с устранения ошибок, не позволяющих начать процесс обработки. Такие ошибке бывают сведены к минимуму при применении современных способов составления УП, который состоит в использовании средств автоматизированного проектирования CAD и CAM. Чаще всего встречаются следующие ошибки первоначальной редакции:

- нуль программы выбран за пределами рабочей зоны;
- использованы технологические команды невыполняемые станком;
- инструменты при холостых перемещениях и сменах задевают за элементы станка, крепежную оснастку или обрабатываемую деталь.

Наибольшего внимания требует проверка вероятности наличия в программе третьего вида ошибок, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации, поломке дорогостоящего инструмента. Новую программу целесообразно отрабатывать в полуавтоматическом режиме, проверяя каждый кадр программ перед его отработкой. Ситуация, связанная с нежелательными столкновениями инструмента с элементами станка могут возникнуть также при неправильном вводе информации о коррекции инструмента. По этой причине при пробной отработке УП следует также перед началом работы нового инструмента проверять правильность его ’’привязки’’. При первой отработке УП целесообразно снижать скорость перемещения рабочих органов, пользуясь регулятором подачи. При незапланированном контакте инструмента с заготовкой или другими элементами крайне важно остановить подачу при помощи соответствующего переключателя. При встрече препятствия инструментами во время его смены следует воспользоваться кнопкой аварийного отключения. В целях экономии материала, в случае больших деталей, отработку УП осуществляют с использованием более дешевого и легкообрабатываемого материала.

Для оценки оптимальности УП руководствуются принципами построения технологических процессов на станках с ЧПУ. Основная характерная черта – интеграция обработки, т.е. последовательное выполнение большого числа переходов, выполняемых различными инструментами. При этом характерен последовательный переход от черновой обработке к чистовой. Следующий этап проверки оптимальности УП – оценка правильного выбора режимов резания. При черновой обработке крайне важно достичь максимальной производительности, при этом

критерием выбора режима резания является экономическая стойкость инструмента. При чистовой обработке определяющую роль играют требования точности и шероховатости обработанной поверхности.

В процессе отладки программы крайне важно проверить соответствие заложенных режимов резания возможностям инструмента и станка, надежности закрепления заготовки. Особое внимание следует уделить возникновению вибраций, т.к. вибрации способствуют разрушению инструмента и повышенному износу узлов станка. Погасить вибрацию можно путем изменения скорости резания, подачи или глубины резания. Наиболее часто вибрации возникают при срезании тонких стружек, в связи с этим самый простой прием гашения вибрации – увеличение подачи на оборот. Возникновению вибраций способствует также очень острая кромка, при ее затуплении вибрации могут прекратится самопроизвольно. Надежно гасит вибрации фаска на режущей кромке, притупляющая лезвие инструмента. Фаску выполняют на передней поверхности режущей части инструмента под углом -15 º. Фаску можно выполнить при помощи алмазного бруска не снимая инструмент со станка.

При токарной обработке и сверлении существенным показателем правильно выбранных режимов резания является характер схода стружки. Сливная стружка представляет угрозу для инструмента т.к. не удаляется самостоятельно из зоны резания. Наилучшей по всем показателям является дробленая стружка. Решить проблему дробления стружки можно тремя способами:

- изменением движения рабочих органов;
- приданием передней поверхности инструмента соответствующей формы;
- режимами резания.

Изменение движения рабочих органов приводит к усложнению УП, а также к увеличению времени обработки. Наиболее перспективным является применение специальной заточки инструмента или применение инструмента с СМП с заложенными функциями стружкодробления. Также дробления стружки можно достичь увеличивая подачу и (или) снижая скорость резания. В ряде случаев, к примеру, при программировании сложного контура детали целесообразно выполнить прорисовку движения режущего инструмента при помощи программных средств.

При наладке станка с ЧПУ выбирают материал для пробной обработки и определяют режимы резания в следующей последовательности:

1. Устанавливают глубину резания (t) с учётом припуска и точности обработки.

2. Выбирают режущий инструмент, устанавливают его тип, размер, материал и геометрию заточки в зависимости от:

· вида обрабатываемых поверхностей;

· характера обработки;

· материала режущей части инструмента.

3. Выбирают рекомендуемую подачу (по справочнику) с учётом метода обработки, глубины резания, мощности станка, материала заготовки и режущей части инструмента, прочности инструмента, точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. Рекомендуемую подачу необходимо уточнить по паспорту станка.

4. Выбирают период стойкости режущего инструмента в зависимости от типа и размера инструмента, характеристики заготовки и условий работы.

5. Рассчитывают по формулам скорость резания, как функциональную зависимость от ряда факторов:

$$V = F (C_v, T, t, S, D, B, Z, K_v), \quad (3.3)$$

где C_v – коэффициент на скорость резания, учитывающий материал заготовки и режущей части инструмента; T – период стойкости инструмента, t – глубина резания; S – подача; D – диаметр инструмента; B – ширина фрезерования; Z – число зубьев фрезы; K_v – поправочный коэффициент на скорость.

При другом методе скорость резания выбирают по таблицам:

6. Определяют частоту вращения либо заготовки, либо инструмента и сравнивают с имеющейся на станке:

$$n = 1000V/\pi d. \quad (3.4)$$

3. Определив расчётную частоту вращения, принимают действительную частоту вращения по паспорту станка, ближайшее к расчётному:

$$n_{ст} \approx n. \quad (3.5)$$

4. Рассчитывают фактическую скорость резания, соответствующую частоте вращения шпинделя станка:

$$V_ф = \pi\ d\ n_{ст}/1000. \quad (3.6)$$

5. Определяют составляющие силы резания, как функциональную зависимость от ряда факторов:

$$P_{zyx} = F(C_p, t, S, V, K_p). \quad (3.7)$$

6. Определяют крутящий момент, как функциональную зависимость от ряда факторов:

$$M_{кр} = F(C_м, t, S, V, K_м). \quad (3.8)$$

7. Определяют мощность процесса резания (в киловаттах):

$$N = P_z \cdot V/1020 \cdot 60. \quad (3.9)$$

8. Сравнивают рассчитанную мощность процесса резания с мощностью станка. Если мощность станка меньше (недостаточна), то либо изменяют режимы резания, либо выбирают станок большей мощности.

3.6. Наладка мехатронной системы лазерного технологического комплекса

Особенности наладки лазерного технологического комплекса рассмотрим на примере автоматизированного комплекса лазерного термоупрочнения ЛК-5В, вид которого представлен на рис.1.11, а технические характеристики на листе 23. Комплекс предназначен для локального лазерного упрочнения путем перемещения пятна лазерного излучения относительно обрабатываемой детали. Значительные величины перемещений лазерного пятна позволяют производить поверхностное упрочнение быстроизнашивающихся поверхностей крупногабаритных дорогостоящих деталей.

Рабочий стол комплекса грузоподъёмностью до 2000 кг обеспечивает свободную установку и базирование спутников-паллет, а комплект системы ЧПУ Sinumerik 840Di позволяет производить управление пятью осями на станке. Конструкция рабочего стола обеспечивает свободную установку и четкое базирование спутников-паллет, приспособлений и устройств с обрабатываемыми деталями, исключая случайное смещение деталей по координатам X, Y и Z и от горизонтального положения.

Конструкция крепления и юстировки зеркал (СТФИ) исключает возможность произвольной разъюстировки. Конструкция технологического поста, его систем, узлов и элементов обеспечивает эксплуатационную надежность с наработкой на отказ не менее 600 часов машинного времени.

Пульт управления технологическим постом является центральным пультом управления лазерным комплексом. САУ принимает и реагирует на следующие сигналы от системы управления лазером:

– числовое значение мощности излучения;

– числовое значение тока вкладки;

– превышение предельной температуры теплонагруженных узлов лазера (превышение – нет превышения).

– готовность лазера (готов – не готов);

– состояние холодильной машины (включена – не включена);

– состояние включенности накачки лазера (включен – выключен);

– аварийное состояние.

САУ обеспечивает вывод на внешний разъем следующих сигналов для СУ лазером:

– требуемое (задаваемое) числовое значение мощности;

– включение (отключение) излучения (накачки) лазера и автоматический переход в рабочий режим с малой выходной мощностью;

– переключение режима установленной мощности и минимальной мощности;

– включение (отключение) холодильной машины.

Работа устройства может осуществляться как в автоматическом, так и в ручном режиме.

Ручной режим предполагает управление системой транспортировки и фокусировки излучения (СТФИ) во всех плоскостях и управление устройствами манипулирования деталями (при необходимости), а также установку параметров лазера оператором непосредственно с пульта управления технологического поста.

Автоматический режим предполагает управление манипулятором луча (СТФИ) и устройствами манипулирования деталями (при необходимости), а также параметрами лазера программным путем.

Исходными данными для работы в автоматическом режиме являются заданная траектория обработки и параметры режима технологического процесса обработки (мощность, скорость обработки, точки включения и отключения излучения и т.д.)

Процесс обработки поверхности в автоматическом режиме (фактическая траектория движения пятна излучения) должен наглядно

отображаться на устройстве вывода информации (дисплее). Комплекс выполнен на современной элементной базе, что позволяет достичь высокой точности, высоких динамических показателей, и обеспечивает надежность и долговечность работы. Скорости быстрых перемещений 30 м/мин и ускорения 5 м/с^2 обеспечивают обработку с минимальным машинно-вспомогательным временем.

Сложность процесса лазерной термообработки и его недостаточная изученность в настоящее время не позволяют создать достаточно точные математические модели технологического процесса, которые учитывали бы все многообразие условий обработки. Поэтому при выборе режимов обработки очень часто руководствуются либо экспериментальными данными, либо используют приближенные закономерности, имеющие простую форму.

Максимальная глубина закаленного слоя – Z получается в том случае, если температура на поверхности обрабатываемого металла достигает температуры плавления -Тпл.

Для каждого материала главным фактором, определяющим глубину закаленного слоя, является *время действия лазерного луча - t.*

Если известна требуемая глубина закаленного слоя (например, из условия допустимого износа детали в процессе эксплуатации или с учетом допустимого числа перешлифовок и т.д.), то требуемое время действия лазерного луча - t определяется по формуле:

$$t = \pi \cdot Z^2 \cdot [\, Тпл/ (Тпл - Тзак) \,]^2 / 4 \cdot a, (сек), \quad (3.10)$$

где а - коэффициент температуропроводности материала,см^2/с; Тзак –температура нагрева материала детали под закалку,°С; Тпл -температура плавления материала детали,°С.

Необходимая *эффективная плотность мощности - Qэф* теплового источника определяется из выражения:

$$Qэф = \lambda \cdot Z\ (Тпл - Тзак)/A, (Вт/см^2), \quad (3.11)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(см·°С); А– коэффициент поглощения энергии лазерного излучения материалом детали.

Для закалки на требуемую глубину *радиус лазерного луча - r* на детали можно определить по формуле:

$$r = [\, \gamma \cdot A \cdot Po \cdot Z/ \pi \cdot \lambda \cdot (Тпл - Тзак)]^{1/2}, (см), (3.12)$$

где γ – коэффициент, учитывающий долю энергии, распространяющейся вглубь обрабатываемого материала по нормали от его поверхности; Ро – мощность лазерного излучения, Вт.Для определения *необходимой скорости луча* используется зависимость:

$$Vзак = 2\ r/\ t = [8a\cdot (Tпл - Tзак)^{3/2} / \pi\cdot Tпл^2 \cdot Z^{3/2}] \cdot$$

$$(\gamma\cdot A\cdot Po/ \pi\cdot \lambda)^{1/2}, (см/сек). \qquad (3.13)$$

Получаемые значения режимов термоупрочнения носят ориентировочный характер и требуют дополнительного уточнения в конкретных производственных условиях, на конкретных лазерных комплексах. В таблице 3.1 приведены сведения о теплофизических свойствах материалов, используемые при расчетах режимов лазерного термоупрочнения, а в таблице 3.2 – расчетные коэффициенты.

Таблица 3.1

Теплофизические свойства обрабатываемых материалов

Материал	Плотность материала - ρ (г/см³)	$T_{плав}$ (°С)	Коэф. теплопроводности λ Дж/(см·с·°С)	Удельная теплоёмкость - C Дж/(г·°С)	Коэф.температуропроводности - a, (см²/с)
Углеродистые стали	*7,86*	*1530*	*0,38…0,42*	*0,75*	*0,075…0,09*
Нержавеющие стали	*7,8*	*1450*	*0,3*	*0,65*	*0,083*
Латунь	*8,85*	*1050*	*1,17*	*0,4*	*0,34*

Таблица 3.2

Расчетные коэффициенты для различных металлов и сплавов.

Материал	Средняя температура - t, °С	Коэф. теплопроводности - λ, Дж/(см · с · °С)	Объёмная теплоемкость Cp Дж/(см³ · °С)	Коэф. температуропроводности- a, см²/с
Углеродистые и низколегированные стали	*500…600*	*0,38…0,42*	*4,9…5,2*	*0,075…0,09*
Нержавеющие аустенитные стали	*600*	*0,25…0,33*	*4,7…4,8*	*0,053…0,07*
Медь	*400*	*3,7…3,8*	*3,85…4,0*	*0,95…0,96*
Латунь	*350…400*	*1,17*	*3,45*	*0,34*
Алюминий	*300*	*2,7*	*2,7*	*1,0*
Технический титан	*700*	*0,17*	*2,8*	*0,06*

В таблице 3.3 представлены типовые материалы, используемые для назначения теплопоглощающих покрытий.

Таблица 3.3

Свойства водорастворимых полимерных покрытий.

Марка покрытия	***Основа***	***Цвет***	***Коэфф. поглоще-ния- А***	***Упрочняемые материалы***
МЦС- 510	Силикат натрия и метилцеллюлоза	Белый	0,8	Железоуглеродистые сплавы
СГ-504	Силикат натрия	Темно-коричневый	0,9	Железоуглеродистые сплавы
ФС-1М	Алюмохромфосфат	Темно-зеленый	0,9	Алюминиевые сплавы

В таблице 3.4 представлены режимы термического упрочнения без оплавления некоторых сталей, полученные эмпирически на много-канальном CO_2 лазере.

Таблица 3.4

Режимы термического упрочнения

Сталь	Режим	Твердость, HRC	Глубина, мм
40Х	Р3500 V15 D15	60-62	1.1
50ХН	Р3500 V15 D15	55-58	1
38ХН3МФА	Р3000 V12,5 D15	54-56	1.5
ОХН3М	Р3500 V12,5 D15	50-52	1.4
ШХ15	Р3000 V20 D12	60-64	1.4
18ХГТ	Р3500 V14 D12	40-44	1.3

Методика выбора режимов лазерного термического упрочнения, приведенная в предыдущем разделе, сводится к итерационному поиску необходимых параметров на базе алгебраических уравнений (3.10) - (3.13) с многократной проверкой на образце материала. В то же время, термоупрочнение – высоко динамичный процесс, скорость протекания которого и определяет получаемую структуру поверхностного слоя. Исходя из этого, при назначении режимов следует оценивать динамику процесса.

Закалка предполагает не только нагрев металла выше температуры фазового превращения $T_{зак}$, но и достаточно быстрое охлаждение. Для превращения аустенита в мартенсит скорость охлаждения должна быть больше критической скорости закалки, т. е. такой, при которой весь аустенит переохлаждается до температуры начала мартенситного превращения $T_м$. Степень закалки при различных законах изменения температуры металла от времени можно оценить из термокинетических диаграмм превращения аустенита. Из термокинетической диаграммы для данного металла можно найти исключающие распад аустенита значения времени охлаждения в диапазоне от температуры фазового перехода $T_{зак}$ до значений температуры T_i наиболее быстрого распада аустенита. Найденное таким образом время является максимальным временем воздействия лазерного теплового источника, при котором возможна полная самозакалка металла. Большую роль в процессах охлаждения играют форма и масса обрабатываемой детали. Известно, что кинетика превращений переохлажденного аустенита зависит от большого числа разнообразных факторов. Небольшие изменения состава металла, условий выплавки, разливки, раскисления, теплофизических констант, условий нагрева при закалке и т. п. существенно влияют на кинетику его превращения, поэтому диаграммы распада аустенита рассматриваются как ориентировочные. Указанные причины приводят к тому, что оценить используемые в приведенных расчетах значения времени охлаждения и соответственно необходимые для получения максимальной глубины закалки режимы можно только ориентировочно. Скорости нагрева и охлаждения металла определяются следующими уравнениями:

- скорость нагрева по времени и глубине z

$$v = \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{A_{ef} \cdot q_S}{\lambda_T} \cdot \left(\sqrt{\frac{\alpha}{t}} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right) + \frac{z}{2t} \cdot ierfc\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right). \quad (3.14)$$

- скорость нагрева на поверхности (z=0)

$$v = \frac{A_{ef} \cdot |q_S}{\lambda_T} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \tau_i}} = \frac{q_S}{\sqrt{\lambda_T \cdot c\rho \cdot \pi \cdot t}}. \quad (3.15)$$

- скорость охлаждения по времени

$$v = \frac{\partial T(0,t)}{\partial t} = \frac{A_{ef} \cdot q_S}{\sqrt{\lambda_T \cdot c\rho \cdot \pi}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{t}} - \frac{1}{\sqrt{t - \tau_i}} \right). \quad (3.16)$$

Учитывая приближенный характер приведенных зависимостей, выбор параметров термоупрочнения целесообразно выполнять путем параллельных натурного и «машинного» экспериментов.

На рис.3.49 приведен алгоритм выполнения параллельных натурного и «машинного» экспериментов, который может использоваться при наладке комплекса. Для проведения экспериментов необходим датчик измерения температуры нагрева при воздействии лазерного луча на материал и программный продукт моделирования этого воздействия.

В качестве датчика температуры может быть использован оптический инфракрасный пирометр. Принцип действия инфракрасного пирометра основан на измерении абсолютного значения амплитуды электромагнитного излучения от объекта в инфракрасной части спектра и последующем преобразовании измеренного значения в температуру. Для выполнения поставленной задачи можно использовать пирометр фирмы Optris модель Optris CT 1M/2M. ИК термометры Optris CT 1M/2M - двухкомпонентные стационарные пирометры с электронным блоком, имеющим многофункциональный дисплей, кнопки для программирования и управления, предназначены для высокотемпературных измерений и применяются для измерений в спектральном диапазоне 1,0 мкм / 1,6. Миниатюрные размеры датчика (диаметр 14 мм, длина 28 мм) позволяют установку в труднодоступных местах. Работа при температуре окружающей среды до 125°C без охлаждения.

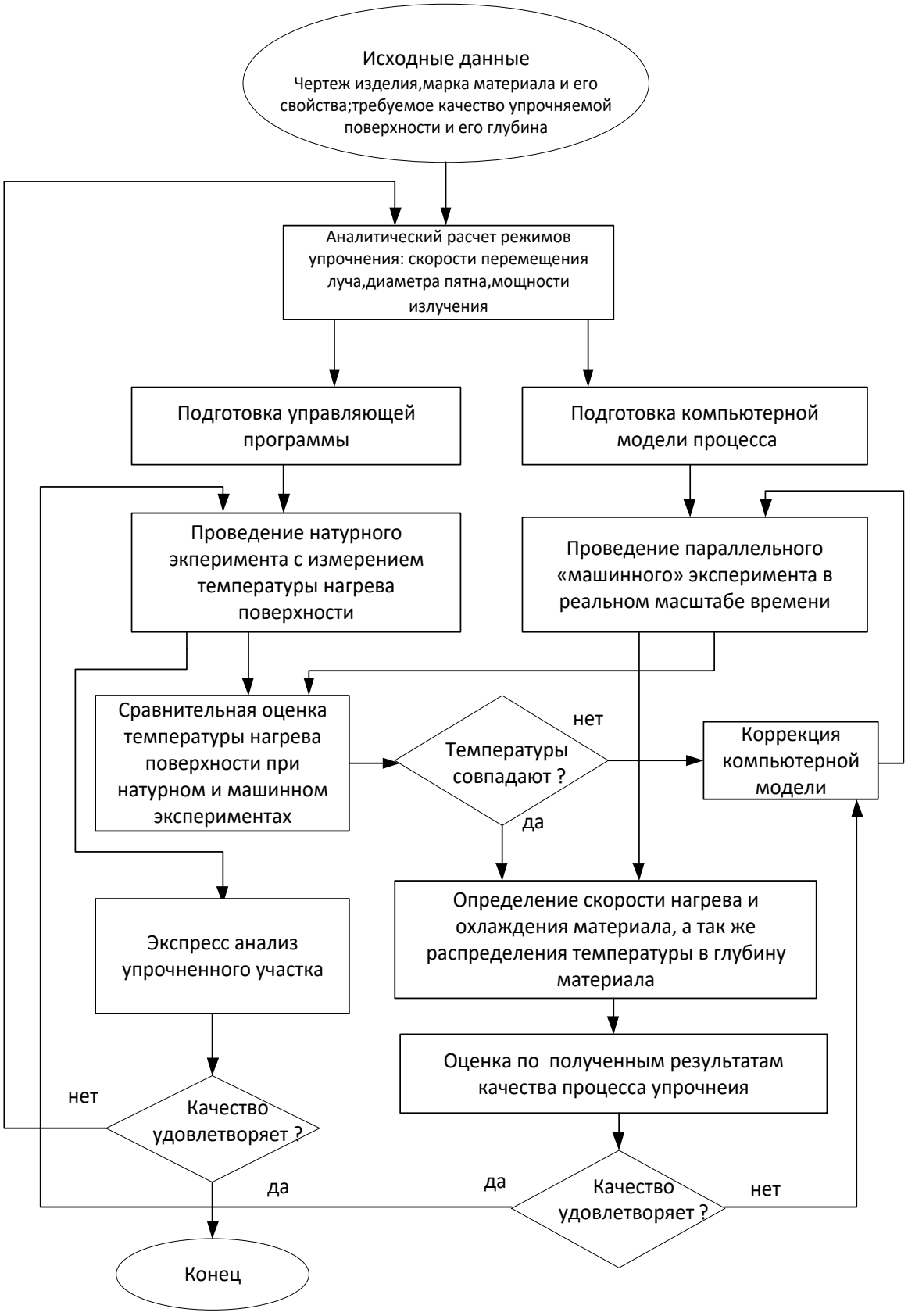


Рис. 3.49. Алгоритм выполнения параллельных натурного и «машинного» экспериментов

В соответствии с алгоритмом на рис. 3.49 и на основании исходных данных по выражениям (3.14) –(3.16) определяются приближенные режимы упрочнения. После этого разрабатываются управляющая программа для комплекса и программа компьютерного моделирования. При подготовке программы моделирования следует отобразить геометрические параметры и массу упрочняемого изделия, используя метод конечных элементов. Проводятся параллельные натурный и «машинный» (симуляция) эксперименты. На рис.3.50 представлена матрица температур нагрева поверхности стали 40Х.

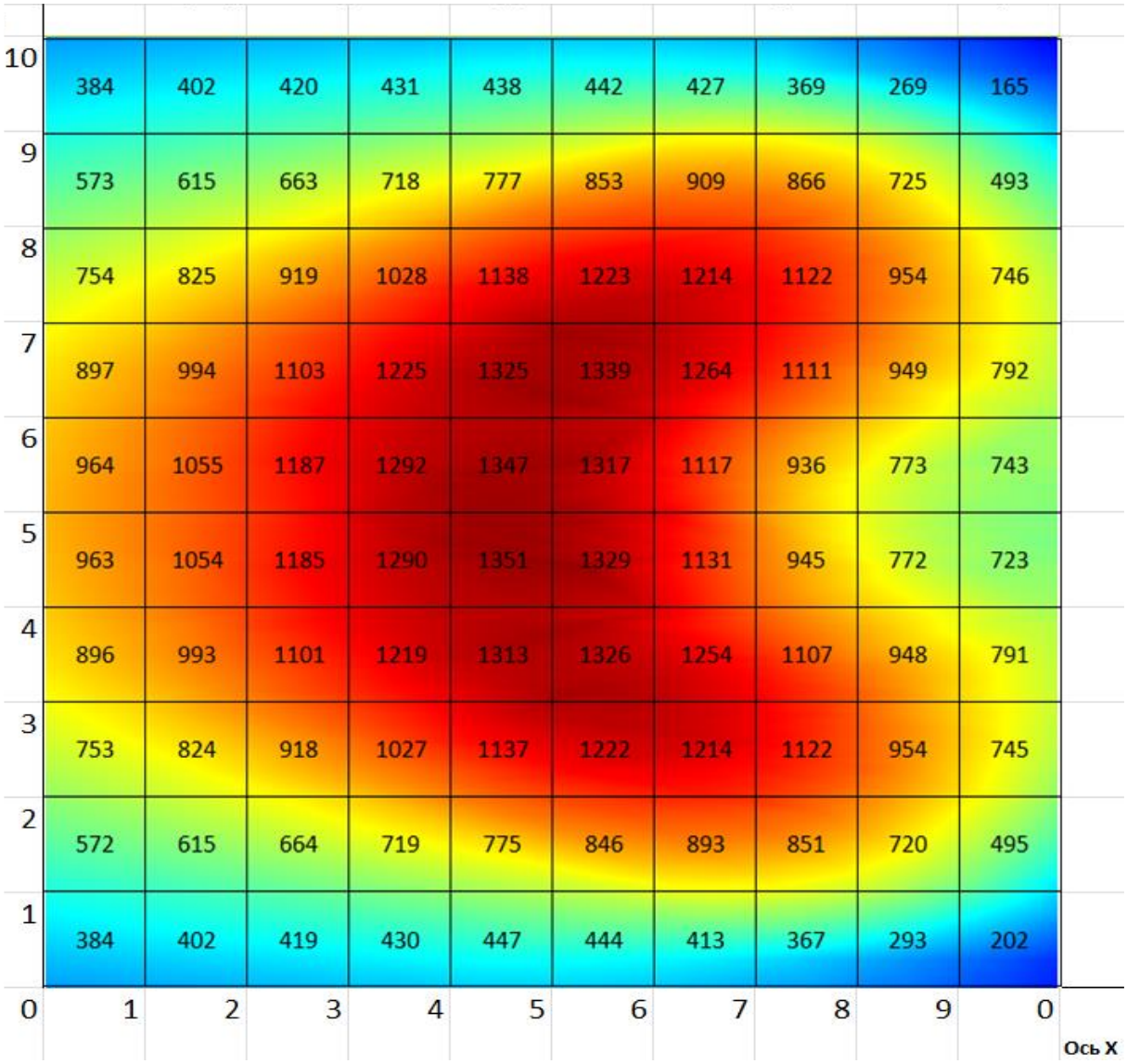


Рис. 3.50. Матрица температур модели нагрева поверхности изделия из стали 40Х

По модели оцениваются тепловые процессы в глубину материала. На рис.3.51 приведена свернутая 3х-мерная матрица температур нагрева указанного выше материала до глубины 4 мм в процессе движения пятна излучения. По этой матрице строятся графики изменения температуры во времени, вид которых до глубины 2мм представлен на рис. 3.52.

| Нагрев внутренней структуры во время движения лазера | | |

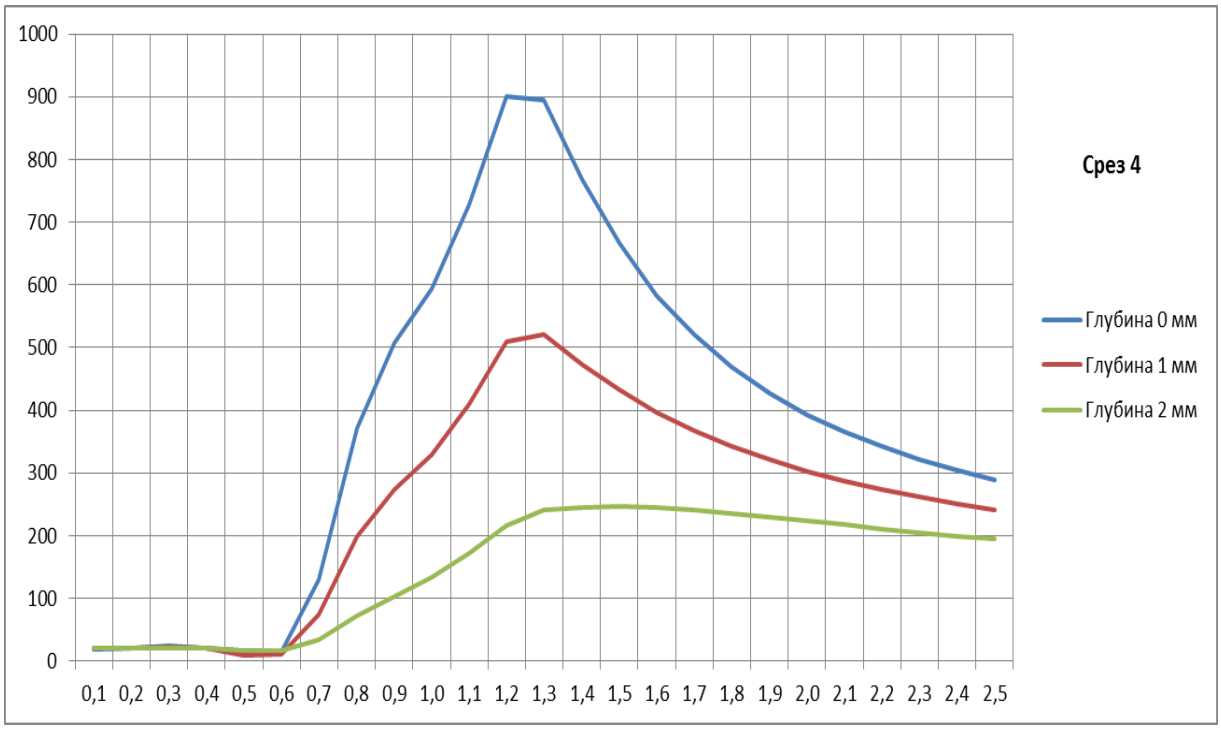


Рис. 3.52. Графики изменения температуры до глубины 2мм

По графикам рис.3.52 не сложно установить средние скорости нагрева и охлаждения материала в глубине и оценить его структурные преобразования. При получении неудовлетворительного результата корректируются режимы упрочнения (скорость движения луча и мощность излучения). Скорректированные параметры режимов вводятся в программу для ЧПУ и проводится натурный эксперимент.

Процесс подготовки программ обработки деталей на лазерном технологическом комплексе обычно включает следующие основные действия:

- оценка возможности проведения лазерной термической обработки на конкретной детали с учётом её формы и материалов, из которых она изготовлена;

- выбор режима лазерной термической обработки с учётом опыта, полученного при обработке изделий схожей формы и материала или опираясь на вновь проведённый эксперимент на отладочном изделии;

- измерение и описание геометрии обрабатываемой детали (при отсутствии ее модели);

- разработка плана обработки детали на лазерном технологическом комплексе;

- разработка управляющей программы лазерного термоупрочнения для лазерного технологического комплекса;

- компиляция программы либо набор с пульта в систему управления.

Ручное программирование возможно использовать при обработке сравнительно простых по конфигурации деталей, когда трудоемкость подготовки программ вручную соизмерима с трудоемкостью подготовки исходных данных для расчетов на ЭВМ. Для автоматизированного программирования с использованием ЭВМ систему автоматизированной подготовки управляющих программ упрочнения изделий лазерный технологический комплекс необходимо оснастить датчиком-измерителем, способным предоставлять для ЭВМ данные, необходимые для составления геометрической матрицы поверхности объекта с требуемой точностью измерения, программой-процессором и программой-постпроцессором для преобразования геометрической матрицы поверхности объекта в его 3-D модель, а так же программный код, воспринимаемым УЧПУ лазерного технологического комплекса. В качестве измерителя предлагается использовать лазерный датчик-дальномер семейства бинокулярных триангуляционных лазерных датчиков серии ЛД2, которые способны работать в режиме в режиме 3-D сканера для построения геометрической матрицы поверхности детали.

Бинокулярные триангуляционные датчики серии ЛД2 поставляются с программным обеспечением для ЭВМ/ПК, которое способно не только строить геометрическую матрицу поверхности сканируемого объекта, но и преобразовывать её для последующей обработки постпроцессором в 3-D модель.

Предлагается процесс подготовки программы в режиме обучения выполнять с следующей последовательности:

1. Сканирование объекта.

2. Составление геометрической матрицы поверхности сканируемого объекта.

3. Построение 3-D модели детали на основе геометрической матрицы поверхности сканируемого объекта.

4. Выбор на 3-D модели поверхностей или участков поверхностей, подлежащих термоупрочнению с использованием ПК.

5. Генерация постпроцессором программного кода.

6. Сохранение созданной управляющей программы упрочнения обрабатываемой детали в памяти УЧПУ и/или ПК.

Задание режимов обработки (требуемой мощности и скорости движения).

Алгоритм работы лазерного технологического комплекса, оснащенного бинокулярным триангуляционным лазерным датчиком ЛД2 в режиме обучения по осям X и Y приведен на рис.3.53.

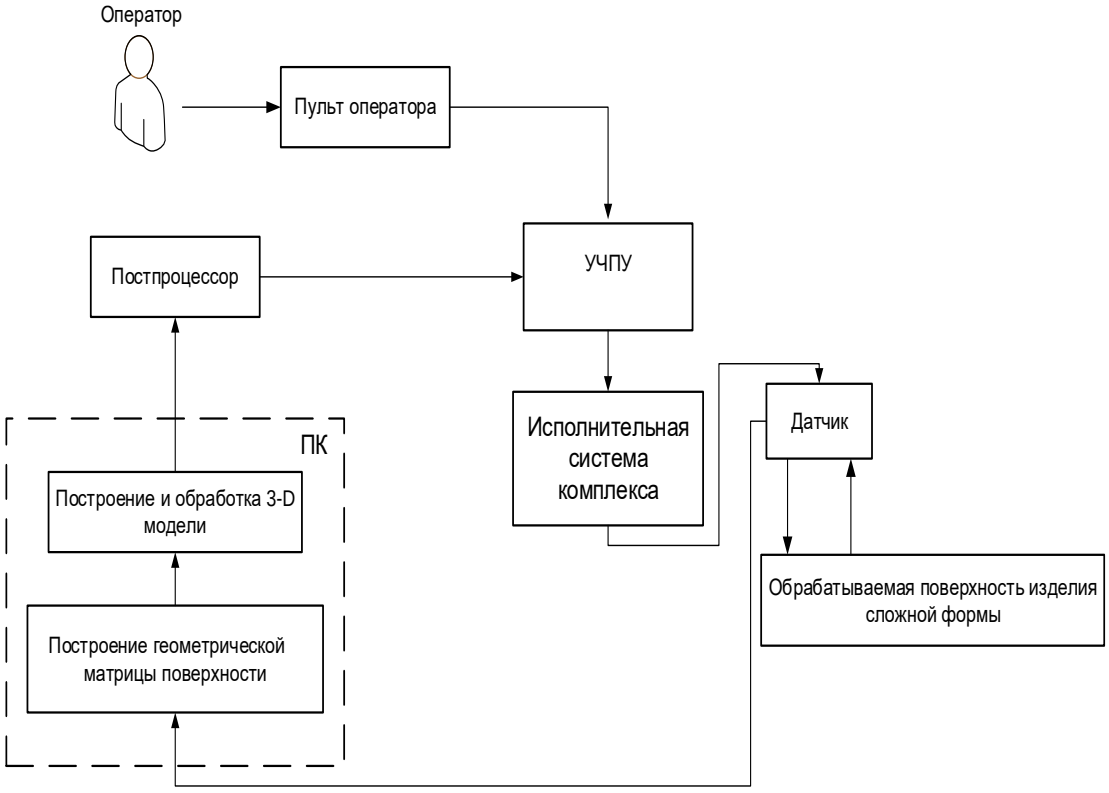


Рис. 3.53. Алгоритм работы лазерного технологического комплекса в режиме обучения

Вопросы для самопроверки

1. Как осуществляется контрольная наладка мехатронных и робототехнических систем?

2. Как осуществляется выборка зазоров в подшипниковых узлах?

3. Как осуществляется выборка зазоров в зубчатых передачах и механизмах?

4. Как осуществляется выборка зазоров в передачах винт – гайка?

5. Какова последовательность наладки пневмогидрооборудования?

6. Какие работы нужно выполнить перед пуском пневмопривода?

7. Какие работы нужно выполнить перед пуском гидропривода?

8. Как производится настройка давления в пневмо и гидро системах?

9. Как производится наладка гидрораспределителей?

10. Как производится наладка пневмораспределителей?

11. Как производится наладка пневмо и гидро клапанов?

12. Порядок действий при недостаточном усилии на штоке пневмо или гидро цилиндра.

13. Назовите общие методы сокращения времени наладки и выявления неисправностей.

14. В чем заключаются особенности метода обратной последовательности?

15. Какие приборы используются при наладке электрооборудования?

16. Как регулируют выдержку времени в реле времени?

17. Как выполняется контрольная наладка системы управления промышленного робота?

18. Как выполняется наладка робота по тестовой программе?

19. Как выполняется наладка микропроцессорных систем управления?

20. Как выполняется наладка информационных систем?

21. Как выполняется наладка информационных систем восприятия внешней среды?

22. Как выполняется проверка правильности настройки системы светозащиты?

23. Какова роль моделирования в наладке системы программного управления робототехнического устройства или мехатронной системы?

24. Задача настройки электроприводов робототехнического устройства или мехатронной системы.

25. Что настраивается в электроприводах робототехнического устройства или мехатронной системы?

26. Приведите типовую структурную схему регулируемого электропривода.

27. Как производится настройка привода по его модели с использованием пакета Matlab?

28. Приведите порядок практической настройки регулируемого электропривода.

29. Как выполняется практическая настройка параметров регулятора тока в электроприводе?

30. Как выполняется практическая настройка параметров регулятора скорости в электроприводе?

31. Как выполняется практическая настройка параметров регулятора положения в электроприводе?

32. Назовите последовательность галадки мехатронной системы металлорежущего станка.

33. Как производится наладка режущего инструмента в станке по размеру?

34. Назовите режимы работы станков с ЧПУ.

35. Как производится управление точностью металлорежущего станка?

36. Как производится исправление программы ошибок при наладке металлорежущего станка с ЧПУ?

37. Как назначаются режимы резания для металлорежущего станка?

38.Назовите режимы работы лазерного технологического комплекса.

39. Какие параметры задаются при наладке лазерного технологического комплекса?

40. Роль выполнения параллельных натурного и «машинного» экспериментов при наладке лазерного технологического комплекса.

41. Каково содержание процесса подготовки программ обработки деталей на лазерном технологическом комплексе?

42. Охарактеризуйте процесс подготовки управляющей программы для лазерного технологического комплекса в режиме обучения.

Глава 4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ И ДИАГНОСТИКИ РОБОТОВ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

4.1. Виды и общие требования к испытаниям промышленных и мобильных роботов

При проведении испытаний промышленных роботов (ПР) следует рассматривать их как машины широкого назначения, отличительными признаками которых являются:

- способность к переналадке для выполнения действий, отличающихся последовательностью, скоростью, величиной и точностью перемещений исполнительных органов;
- способность к взаимодействию с объектами внешней среды, в том числе способность сохранения динамических параметров процесса манипулирования при изменении свойств (например, массы) перемещаемых объектов; адаптация к изменению окружающей среды и т. п.;
- особенности динамики исполнительных органов, являющихся пространственными механизмами со многими степенями подвижности и незамкнутой кинематической цепью;
- небольшая жесткость исполнительных устройств в сравнении с обслуживаемым оборудованием и напряженные динамические режимы работы (скорости до 1,5 м/с при относительно небольших перемещениях, интенсивные разгоны и торможения).
- соответствие функциональных возможностей ПР и его систем технологическому назначению робота, который может относиться к группе производственных, подъемно-транспортных или универсальных ПР;
- соответствие требований техники безопасности предполагаемой области применения.

При проведении любых видов испытаний следует предусматривать проверки, отражающие все перечисленные особенности ПР.

ПР могут подвергаться всем видам испытаний, регламентированных ГОСТ 16504-81.

Вид испытаний обусловливает совокупность определяемых показателей ПР и осуществляемых проверок, метод их определения и проведения, а также необходимые измерительные средства.

Классификация и определение видов технического контроля и испытаний ПР принимаются в соответствии с ГОСТ 16504-81. В зависимости от этапа разработки и стадии освоения производства ПР должны подвергаться различным видам испытаний (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Виды испытаний ПР

Образец для испытаний	Доводочные	Приемо-сдаточные	Исследовательские	Предварительные	Приемочные	Аттестационные	Периодические	Типовые
Опытный	+ *	+	+	+	+	+ *	—	—
Из установочной (первой промышленной) серии	+ *	+	+ *	—	—	+ *	—	—
При серийном производстве	—	+	+ *	—	—	+	+	+

Общие требования к испытаниям ПР

Требования к условиям проведения испытаний. На месте проведения испытаний должны быть исключены резкие колебания температуры, шум, вибрации, помехи, наличие вредных газов, паров и т. п., превышающие нормативные значения и затрудняющие проведение испытаний или влияющие на их результаты. Испытания ПР следует проводить при нормальных значениях факторов внешней среды по ГОСТ 15150-69. Для ПР, рассчитанных на работу в условиях высоких температур, запыленности, загазованности и влажности окружающей среды, испытания следует проводить в эксплуатационных условиях или в климатической камере, обеспечивающей имитацию перечисленных условий. Порядок проведения испытаний регламентируется п. 4 и 5 ГОСТ 15.001-73. При этом приемочные испытания проводят, как правило, на заводе-изготовителе опытного образца ПР. В необходимых случаях испытания проводят в эксплуатационных условиях на заводе-потребителе. По согласованию с заинтересованными организациями и предприятиями допускается проводить приемочные испытания и в других

местах. Место проведения исследовательских и типовых испытаний определяется разработчиком или организацией (предприятием), которые проводят данные испытания.

Требования к испытуемым образцам ПР и их количество устанавливаются согласно ОСТ 2 Н02-3-76.

ПР должны передаваться для испытания в пригодном для эксплуатации состоянии, с полным комплектом принадлежностей, перечень которых оговорен в сопроводительной документации на ПР или изготовление которых предусмотрено техническим заданием (для приемочных испытаний, в том числе с комплектом принадлежностей, поставляемых за отдельную плату). Испытуемые образцы должны быть отрегулированы в соответствии с руководством по эксплуатации до той степени, которая исключала бы возможность изменения их свойств во время испытаний. Требование неизменности свойств образцов во время испытаний не распространяется на испытания на надежность. При одновременном испытании нескольких образцов их установка должна исключать взаимное влияние друг на друга, а также влияние на средства измерения. При проведении приемочных испытаний для проверки исполнения технологических команд, а также с целью контроля всех предусмотренных устройств, обеспечивающих технику безопасности и безаварийную работу, вспомогательные (подъемно-транспортные) ПР должны испытываться с технологическим и вспомогательным оборудованием или со специальными стендами, имитирующими работу оборудования. Технологические (производственные) ПР должны быть оснащены всеми необходимыми устройствами для осуществления технологического процесса (сварки, окраски, сборки и т. д.).

Требования к подготовке ПР к испытаниям. Для проведения испытаний ПР должен быть установлен в помещении, обеспечивающем его нормальную работу. Установка должна производиться в соответствии с требованиями, изложенными в руководстве по эксплуатации. Испытуемый образец должен быть заполнен эксплуатационными жидкостями и подсоединен к источникам энергии. На месте проведения испытаний должно быть обеспечено выполнение правил техники безопасности. Участок для проведения испытаний должен быть огражден, а в проходе установлены предупредительные надписи, запрещающие вход на участок посторонним лицам. На полу красной полосой шири-

ной не менее *100 мм* должна быть отмечена граница рабочего пространства ПР (если указанное пространство не ограничено другими средствами). В рабочем пространстве не должны находиться посторонние лица, предметы и оборудование, препятствующие или ограничивающие движения ПР. Оборудование и приборы, применяемые при испытаниях, должны быть заземлены. Должно быть обеспечено удобство визуального контроля за ПР, а обслуживание и наладка ПР должны производиться только лицами, прошедшими обучение и инструктаж по технике безопасности.

При работе в автоматическом режиме у пульта управления должен находиться оператор. При первых же признаках неполадок и сбоев ПР должен быть немедленно выключен; повторное включение допускается после выявления причин неисправностей и их устранения.

Требования к средствам измерений. Средства измерения, применяемые для проверок и исследований ПР, должны быть аттестованы в установленном порядке и иметь соответствующий паспорт. При установлении результатов измерения должны вноситься поправки, учитывающие погрешность примененных средств измерений в соответствии с паспортными данными. Жесткость оправок, стоек и державок должна быть такой, чтобы деформации их под действием измерительного усилия и веса измерительного прибора были пренебрежимо малы по сравнению с. допуском на проверяемый параметр. Средства измерения, применяемые для проверки точностных свойств ПР, должны соответствовать общим требованиям, изложенным в ГОСТ 8-82. Проверки, выполняемые при приемочных испытаниях, следует осуществлять, по возможности, простейшими измерительными средствами. В качестве регистрирующей аппаратуры рекомендуется использовать аналоговые регистраторы промышленного типа, а также измерительно-вычислительные системы и комплексы. При выборе датчиков рекомендуется принимать уровень максимально допустимой погрешности измерений не более *1-6 %.*

Оформление результатов испытаний. Результаты приемочных испытаний оформляют актом и протоколом приемки по формам, приведенным в ОСТ 2 Н02-3-76. Оценку результатов испытаний производят в соответствии с требованиями, приводимыми в методиках испытаний конкретных моделей ПР. В разделах протокола приводят только основные результаты испытаний. Таблицы, графики, схемы и т. п.

оформляют в виде приложений к протоколу. Протокол должен содержать перечень неполадок и неисправностей, выявленных в процессе испытаний. Результаты исследовательских испытаний оформляют в виде отчетов, утверждаемых руководством организации или предприятия, проводившего испытание. Результаты аттестационных испытаний оформляют в виде документов по формам, приведенным в инструкциях о пордке аттестации продукции предприятий соответствующих отраслей. Результаты периодических испытаний оформляют протоколом по форме, приведенной в ГОСТ 15.001-73. Результаты типовых испытаний оформляют протоколом, утверждаемым руководством предприятия-изготовителя.

Требования к проведению отдельных видов испытаний. Предварительные, приемочные и аттестационные испытания проводят по единым программам и методикам.Приемо-сдаточные испытания проводят по программе, представляющей собой выборку из программы приемочных испытаний. *Объем приемочных испытаний* должен быть минимальным, но достаточным для получения результатов, позволяющих оценить технико-экономический уровень ПР и сделать вывод о его пригодности к серийному производству. Приемочные испытания следует проводить при наиболее неблагоприятном сочетании определяемых параметров, допускаемом технической документацией (максимальные скорости и вылеты исполнительных устройств, номинальная грузоподъемность и т. д.). Основными этапами приемочных испытаний являются проверка соответствия состава и комплектности опытного образца документации и соответствия показателей ПР требованиям стандартов, техническим условиям и руководству по эксплуатации; испытание на холостом ходу; испытание под нагрузкой; проверка соответствия опытного образца нормам точности; проверка качества изготовления базовых деталей, качества сборочно-монтажных работ и внешней отделки; испытание всех принадлежностей и приспособлений; сравнительные испытания на производительность.

Особое внимание следует обращать на действие блокировок и устройств, обеспечивающих безопасную и безаварийную работу, в том числе невозможность присутствия человека в зоне работы ПР; надежность захватывания и удержания объекта манипулирования, в том числе при внезапном отключении источника энергии; правильность взаимодействия ПР с технологическим оборудованием; ограничение

максимальных перемещений исполнительного устройства. Проверку осуществляют не менее чем пятикратным включением блокировок. Грузоподъемность проверяют путем переноса в автоматическом режиме на наибольших скоростях заготовок номинальной массы. Число циклов - не менее 10. Цикл работы должен включать максимальные перемещения по всем координатам при наиболее неблагоприятном сочетании переносных движений. Визуально контролируются возможность осуществления всех движений, отсутствие выпадания и проскальзывания заготовок, отсутствие поломок и неисправностей исполнительного устройства. Средние и максимальные скорости перемещений поверяют при работе в автоматическом режиме путем фиксирования:

• при определении средних скоростей- времени двойного хода (вперед-назад, вверх-вниз, по часовой стрелке - против часовой стрелки) при максимальных перемещениях с заготовкой номинальной массы без выдержек времени в конце ходов. Число двойных ходов по каждой степени подвижности - не менее пяти;

• при определении максимальных скоростей - времени перемещения на отрезке пути после окончания разгона и перед началом торможения.

Исходя из замеренного времени перемещений рассчитывают средние максимальные скорости.

Погрешность позиционирования проверяют одним из следующих методов:

• путем установки вала, удерживаемого захватом, в неподвижную втулку с горизонтальной или вертикальной осью. Разность диаметров вала и втулки должна соответствовать паспортной погрешности позиционирования. На валу и втулке не допускается наличие фасок;

• определением погрешности позиционирования в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с помощью индикаторов часового типа, установленных в точках позиционирования. Погрешность позиционирования в каждой из плоскостей, определяемая по разности показаний индикаторов, не должна превосходить паспортного значения. По обоим из указанных методов погрешность позиционирования должна определяться для одной из точек рабочего пространства. Координаты точки указываются в методиках испытаний конкретных ПР. Проверка осуществляется в автоматическом цикле с заготовкой номинальной массы при наибольших паспортных скоростях. Программа должна

включать движение по всем координатам и остановку в конце цикла на время, необходимое для снятия показаний (для второго метода).

Проверки норм точности следует выполнять после испытания на холостом ходу и в работе в соответствии с внутризаводскими приемо-сдаточными нормами. При указанных проверках отклонения от прямолинейности при осуществлении движений измеряют в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В зависимости от исследуемых показателей программа *исследовательских испытаний ПР* включает: статические испытания, динамические испытания, испытания на надежность, прочие испытания (по усмотрению разработчика). При проведении испытаний на надежность исследуют свойства ПР, предусмотренные ГОСТ 27.002-83 (безотказность, долговечность, ремонтопригодность и др.). *Периодические испытания* проводят с целью сравнения качества серийных образцов, выпущенных в разное время. Периодическим испытаниям подвергают образцы, выдержавшие приемо-сдаточные испытания. Периодические испытания выполняют по программе приемочных испытаний, изложенной выше. Рекомендуемая периодичность испытаний - не реже одного раза в 2-3 года. *Аттестационные испытания* должны, как правило, совпадать с проведением ближайших по сроку периодических испытаний. *Типовые испытания* проводят с целью оценки эффективности изменений, внесенных в серийные образцы. Их проводят по программам и методикам, разработанным в соответствии с требованиями приемочных и исследовательских испытаний в объеме, необходимом для проверки функциональной работоспособности измененной составной части ПР и оценки влияния этой части на работу ПР в целом. Типовые испытания не проводят, если внесенные изменения не меняют функциональной работоспособности ПР (например, изменение конструкции крышки, замена комплектующего изделия на равноценное и т. п.). Общие правила приемки и методы испытаний ПР регламентируются ГОСТ 26053-84.

Испытания мобильных роботов для работы в экстремальных условиях проводятся по проходимости и постоянству скорости перемещения в соответствии ГОСТ Р60.6.3.9 – 2019.

Наземные роботы для работы в экстремальных условиях должны обеспечивать проходимость рельефа местности с разными видами препятствий. Требования по проходимости включают преодоление тре-

щин, барьеров, лестниц, уклонов, перемещение по разным видам поверхностей полов и почвы, а также по ограниченным проходам. Кроме того, к дополнительным требованиям к проходимости роботов относят способность двигаться с максимальной поддерживаемой скоростью и возможность буксировки. Стандартные методы испытаний необходимы для оценки соответствия этим требованиям испытуемых роботов. Испытательный комплект по проходимости обеспечивает количественную оценку рабочих характеристик наземных мобильных роботов, действующих в экстремальных условиях. Заказчики испытаний могут применять весь испытательный комплект или его часть, основываясь на своих технических требованиях. Результаты испытаний должны в совокупности представлять общую оценку проходимости наземного робота для работы в экстремальных условиях. Эти данные могут быть использованы при выборе роботов или при проведении приемочных испытаний роботов, предназначенных для работы в экстремальных условиях. Заданием для данного метода испытаний, состоящего в передвижении мобильного робота с максимальной поддерживаемой скоростью по ровной поверхности с твердым покрытием, является перемещение робота из исходной позиции по заданному маршруту обратно на исходную позицию, обеспечивая при этом возможность последовательного повторения испытательных попыток. По умолчанию маршрут должен иметь форму восьмерки вокруг двух стоек. Робот должен постоянно следовать вдоль заданной линии маршрута, поддерживая постоянно некоторую часть мобильного шасси на этой линии. Выполнение данного задания характеризует способность робота перемещаться по поверхности данного типа с поддерживаемой скоростью. Требуемое число успешных попыток выполнения задания в зависимости от общего числа попыток определяют на основании заданных заказчиком испытаний статистической надежности и доверительной вероятности данной способности робота. Полученная в результате испытаний средняя расчетная скорость считается скоростью, которую способен поддерживать данный робот. Для испытаний робота должно быть использовано телеуправление из указанного руководителем рабочего места оператора с помощью операторского пульта управления. Рабочее место оператора должно быть расположено и оборудовано так, чтобы изолировать оператора от прямого визуального и звукового контакта с испытательным оборудованием и роботом. Оператор

может провести тренировку до начала испытаний. Он также может отказаться от проведения испытаний до их начала. В ходе испытания не должно быть общения между оператором и руководителем испытаний, кроме команды начать испытание и сообщений о неисправностях робота или нарушении мер безопасности. Оператор несет полную ответственность за определение того, завершил ли робот и когда завершил очередную попытку, и за уведомление об этом руководителя. Решение о выполнении очередной попытки принимает только руководитель испытаний. Показателем для данного метода испытаний является полнота отработки заданного маршрута, успешно преодоленного за заданное число последовательных попыток. Кроме того, затраченное время на успешное перемещение по маршруту или расчетная скорость в метрах в минуту является показателем эффективности робота, простоты использования операторского пульта управления и уровня мастерства оператора. Поэтому данный временной аспект является вторым показателем, и его значение должно быть зафиксировано в протоколе испытаний. Средняя расчетная скорость, полученная в результате испытаний, принимается за скорость, которую способен поддерживать данный робот.

4.2. Определение технических характеристик ПР при испытаниях

К основным характеристикам, исследуемым при испытаниях ПР, относятся: грузоподъемность, быстродействие, быстроходность, зона обслуживания, погрешность позиционирования или воспроизведения заданной траектории, инерционные нагрузки. Первые пять из них являются взаимозаменяемыми, что учтено при построении методики. В частности, грузоподъемность робота, которая характеризуется максимальной массой груза, перемещаемого захватным устройством, существенно зависит от заданных точности позиционирования и быстроходности, а также от вылета руки, т.е. геометрии.

Грузоподъемность определяется путем измерения установленной в захватном устройстве массы груза при заданной быстроходности и мощности привода, допустимой нагрузке на детали механизмов и обеспечении требуемой точности позиционирования. Зависимость грузоподъемности от быстроходности часто отражается в паспортных

данных путем указания грузоподъемности при нормальной и пониженной скоростях.

Быстродействие робота, характеризуемое временем движения рабочего органа на заданную величину хода, определяется:

1) по измерениям величин скорости, ускорения и малых перемещений в конце хода;

2) по измерениям непосредственно временных интервалов.

В первом случае характерные участки движения, определяемые по измерениям параметра скорости, уточняются по измерениям величин ускорений и малых перемещений. Быстродействие зависит не только от скорости, задаваемой приводом, но и от величины и направления перемещения, грузоподъемности и сил демпфирования. От величины этих параметров зависит время, затрачиваемое на доведение до заданного уровня колебаний в конце хода. Допустимые амплитуды колебаний определяются требованиями технологического процесса (операции), выполняемого роботом, условиями захватывания перемещаемой детали и т.п. Допустимый уровень ускорений руки при захвате объекта ограничивается в случаях перемещения сосудов с жидкостью и при захвате нежестких деталей, когда возникающие инерционные нагрузки могут привести к повреждению зажимаемых деталей, и в других подобных случаях.

Быстроходность является производной характеристикой. Она рассчитывается по быстродействию с учетом заданной величины перемещения. При оценке этой характеристики необходимо определить допустимый диапазон изменения средних скоростей рабочего органа с учетом факторов, влияющих на него в наибольшей степени. На быстроходность и быстродействие наиболее сложное влияние оказывают характер изменения скорости движения и колебание узла после окончания его перемещения. Сокращение общего времени перемещения приводит не только к повышению быстродействия, но и к понижению точности работы робота и возрастанию динамических нагрузок. Для каждой конструкции при испытаниях необходимо находить наилучшее соотношение составляющих времени, позволяющих не допустить динамических перегрузок и снижения точности.

Зона обслуживания робота характеризуется рабочим объемом, который ограничивается траекторией движения между конечными

точками всех возможных поступательных и вращательных перемещений рабочего органа, всех его длин ходов и углов поворота для региональных движений. При экспериментальном определении обслуживаемого пространства ПР вначале производится оценка паспортного значения допустимой длины хода и угла поворота по. всем степеням подвижности. Величины ходов исполнительных механизмов, предусмотренные конструкцией робота, в ряде случаев не могут быть полностью реализованы при некоторых соотношениях грузоподъемности и быстроходности из-за возникновения сильных колебаний руки, препятствующих выполнению заданной операции. В случае не достижения при максимальных вылетах рабочего органа заданной точности позиционирования следует определить, при каком вылете руки (радиусе поворота) и данной нагрузке погрешности снижаются до допустимых. Таким же образом для нескольких значений нагрузок получают данные для расчета действительного объема зоны обслуживания.

Для предупреждения столкновения с периферийным оборудованием при определении зоны обслуживания необходимо оценить и неиспользованную зону, зависящую от конструктивного исполнения ПР. При этом величина отношения объема зоны обслуживания к объему неиспользуемой зоны может служить показателем, который характеризует эффективность применения испытуемой конструкции ПР для данного техпроцесса.

Погрешность позиционирования является одной из основных характеристик ПР, определяющей их точностные свойства. Под погрешностью позиционирования δ_D понимается отклонение действительного положения исполнительного органа ПР X_i от запрограммированного $X_{прог}$ при его многократном двухстороннем позиционировании в различных точках по пути перемещения по каждому из направлений движения. Погрешность позиционирования формируется всем комплексом - механической частью и системой управления ПР и зависит от погрешности блоков и элементов системы управления, погрешности привода, жесткости руки, жесткости и динамических свойств механизмов позиционирования, сил демпфирования и других факторов. Погрешность позиционирования должна определяться в общем случае для различных положений рабочего органа в зоне обслуживания при заданных соотношениях грузоподъемности и быстроходности (с учетом прогиба руки манипулятора), которые изменяются в зависимости от

значений масс объектов манипулирования и перемещений рабочего органа в радиальном направлении.

В связи с тем, что при расчете погрешности позиционирования приходится иметь дело со случайными величинами, меняющими свое значение при каждом испытании, для оценки погрешности позиционирования необходимо использовать методы статистического анализа. При этом величина δ_D определяется следующими статистическими показателями:

а) алгебраической разностью наибольшего и наименьшего (во всем диапазоне перемещений) средних арифметических значений отклонений фактических положений рабочего органа от запрограммированных $x_{прог}$. Этот показатель характеризует накопленное отклонение;

б) значением рассеяния отклонений Dx при многократном подходе рабочего органа к запрограммированному положению (отклонение рабочего органа от заданного положения). Этот показатель характеризует среднее квадратическое отклонение.

Накопленное отклонение $\Delta\overline{X}$ представляет собой разницу средних значений действительных позиций рабочего органа, образующуюся при подходе его к заданной координате на оси различных направлений (с правого $\overline{X}_{пр}$ и левого $\overline{X}_{л}$ направлений). Данная величина позволяет определить среднее отклонение рабочего органа, проявляющееся при позиционировании запрограммированного положения.

Среднее квадратическое стандартное отклонение DX характеризует диапазон отклонений координат рабочего органа от средней действительной координаты, возникающей при подходе к запрограммированной заданной координате с правой ($DX_{пр}$) или левой ($DX_{л}$) стороны. Эта величина позволяет установить, в каком диапазоне ожидаются отклонения действительных координат рабочего органа от средней действительной координаты, если заданная координата позиционируется в одном направлении.

При сокращенных испытаниях погрешность позиционирования рассчитывают для одной из точек зоны обслуживания. Выбор метода определения погрешности позиционирования зависит от типа системы управления, которой оснащен ПР. Для ПР с позиционной системой управления погрешность позиционирования оценивается по величине

погрешности, подвода захвата в заданную точку при многократном повторении цикла. Для этого в заданную точку рабочего пространства устанавливается измерительный прибор для определения малых перемещений и снимается серия замеров при подходе руки робота к заданной точке. При измерениях применяются контрольные тела, закрепляемые на фланце захватного устройства или в самом захватном устройстве. Используются контрольные тела, имеющие форму шара, куба, цилиндра, призмы, линейки, и сложные тела, позволяющие более точно определить угловые смещения. Число приборов или датчиков перемещения и зависимости от задач измерений изменяется в пределах 1÷6. Измерения проводятся для движений руки по всем программируемым координатам в нескольких точках рабочего пространства. Для последующей статической обработки целесообразно, чтобы каждая серия измерений включала не менее 10 замеров. Обработка результатов измерений производится статистическими методами в предположении, что случайные отклонения от заданного положения подчиняются закону нормального распределения Гаусса. Замеры производятся в автоматическом режиме работы ПР.

Для ПР с контурной системой управления задача контроля точности отличается большей сложностью и заключается в следующем. В процессе обучения ПР задаваемая вручную пространственная траектория воспроизводится автоматически. Требуется определить отклонения заданной траектории от фактической δ_D, воспроизведенной ПР. Данная величина характеризуется:

а) отклонением действительной средней траектории от запрограммированной заданной (погрешность траектории);

б) колебанием (разбросом) действительной траектории вокруг средней (погрешность перемещения).

Оба эти значения объединяются понятием отклонения заданной траектории от фактической.

Используются различные методы и схемы измерительных устройств для решений этой задачи. При использовании метода контроля точности воспроизведения пространственной кривой, основанного на использовании специальной измерительной головки, головка оснащена двумя индуктивными датчиками малых перемещений и крепится к рабочему органу ПР. Во время обучения измерительная головка перемещается на определенном расстоянии вдоль проверяемой

линии. Это перемещение регистрируется системой управления. При автоматическом воспроизведении траектории производят сравнение (с помощью ЭВМ) фактического и запрограммированного перемещений. С целью упрощения метода на практике проверка осуществляется путем перемещения головки вдоль призматического бруска, расположенного диагонально в пространстве. Рассмотренный метод, требующий специального измерительного стенда, может применяться, как правило, при лабораторных испытаниях ПР.

Для измерения значений отклонения заданной траектории от фактической можно использовать и датчик малых перемещений, который устанавливается в рабочем органе и перемещается по проверяемой пространственной траектории.

Для промышленных роботов, выполняющих технологические операции (например, сварочных ПР), важное значение имеет *обеспечение и оценка устойчивости перемещения* их исполнительных механизмов. Поэтому при испытаниях целесообразно определить степень и характер влияния различных факторов и параметров на неравномерность перемещения исполнительных механизмов ПР.

Оценка неравномерности перемещения исполнительных механизмов ПР, выполняющих технологические операции, в период установившегося движения может проводиться с помощью коэффициента неравномерности K_v или K_w. Значение коэффициента K_v или K_w зависит от конструкции, жесткости, качества изготовления, регулировки, смазки механизма, качества обработки и состояния направляющих, определяющих нелинейность характеристик трения. Поэтому при условии получения достаточного количества экспериментальных данных для их статистической обработки коэффициент K_v или K_w может использоваться в качестве критерия как для сравнения различных вариантов конструкции, так и для выявления дефектов изготовления и регулировки механизмов ПР.

Неравномерность движения исполнительных механизмов ПР может быть оценена также о помощью коэффициента неравномерности ускорения k_v^y или k_w^y.

Для исследования указанных выше характеристик достаточна регистрация скорости, ускорения и малых перемещений руки в конце хода. Эти параметры целесообразно регистрировать одновременно при движении по каждой координате в обоих направлениях (вверх-вниз,

вперед-назад, по часовой стрелке, против часовой стрелки). В этом случае время позиционирования связывается с заданным уровнем колебаний. Испытания проводятся в автоматическом режиме работы ПР.

При сокращенных испытаниях варьируются следующие параметры:

1. Масса груза m. Испытания проводятся на холостом ходу (m = 0) и при значениях массы груза $m = 0{,}5m_{max}$; $m = m_{max}$, где m_{max} - максимальная грузоподъемность ПР.

2. Величины перемещений по каждой степени подвижности;

а) для механизмов линейного позиционирования руки рекомендуются интервалы $0{,}2L_{max}$; $0{,}6L_{max}$; $1{,}0L_{max}$, где L_{max} - максимальный ход;

б) для механизмов углового позиционирования рекомендуются интервалы $0{,}2\Psi_{max}$; $0{,}6\Psi_{max}$; $1{,}0\Psi_{max}$, где Ψ_{max} - максимальный угол поворота.

3. Скорости перемещений и закон движения - для тех ПР, у которых это предусмотрено конструкцией. При этом величины скоростей перемещений по каждой степени подвижности рекомендуется варьировать в следующих интервалах:

а) для механизмов линейного позиционирования от $0{,}5v_{max}$ до $1{,}0v_{max}$, где v_{max} - максимальная линейная скорость;

б) для механизмов углового позиционирования от $0{,}5w_{max}$ до $1{,}0w_{max}$, где w_{max} - максимальная угловая скорость.

Для повышения достоверности результатов обработки каждое измерение целесообразно проводить не менее трех раз.

Значения временных интервалов, характеризующих длительность составляющих цикла и весь процесс в целом, можно определить, измеряя электрические сигналы в цепи управления (например, в соленоидах, реле и др.), причем наиболее просто найти время циклов. Для измерения других временных интервалов (например, времени разгона и торможения) необходимо получить информацию о моментах прохождения исполнительным устройством робота отдельных точек его хода. С этой целью вводят в схему измерения дополнительные первичные преобразователи, но это усложняет испытания и увеличивает их трудоемкость.

Временные интервалы можно получить и путем измерения скорости v (или w) исполнительного устройства робота. В этом случае характерные точки начала и конца отдельных временных интервалов уточняются по ускорениям *a* (или e) и малым перемещениям D в конце хода исполнительного механизма робота, которые регулируются вместе с его скоростью. При этом определяются:

1. Время разгона $t_р$ (как обычно, интервал времени с момента v = 0 до момента v = 0,95 v_{max}, где v_{max} - максимальная скорость движения).

2. Время установившегося движения $t_{уст}$.

3. Время торможения $t_т$ (интервал времени от конца установившегося движения до момента, когда v = 0).

4. Время успокоения колебаний $t_{усп}$. (интервал времени от конца торможения до момента, когда амплитуда колебаний исполнительного устройства робота уменьшится до заданной величины (например, до паспортного значения погрешности позиционирования).

5. Максимальные линейные v_{max} и угловые w_{max} скорости

$$v_{max} = \frac{L}{L_n} \cdot h;\ w_{max} = \frac{\Psi}{\Psi_n} \cdot h$$

где L и Ψ - заданные линейное и угловое перемещение исполнительного устройства робота; L_n и Ψ_n - линейное и угловое перемещения, определяемые путем интегрирования измеряемой скорости движения исполнительного устройства робота; h - максимальная ордината измеряемой скорости.

6. Наибольшие величины ускорений при разгоне $a_р$ и торможении $a_т$.

7. Амплитуда A и период T колебаний рабочего органа по измерениям параметров малых перемещений в конце исполнительного устройства робота.

С помощью параметров, определяемых экспериментально, рассчитываются:

1. Время движения $t_п$ без учета времени колебаний в конце хода

$$t_п = t_р + t_{уст} + t_т.$$

2. Общее время движения $T_п$ с учетом времени колебаний в конце хода

$$T_п = t_п + t_{уст}.$$

3. Средние линейные и угловые скорости без учета ($v_{ср_0}$, $w_{ср_0}$) и с учетом ($v_{ср}$, $w_{ср}$) колебаний в конце хода

$$v_{cp_0} = \frac{L}{t_n}; v_{cp} = \frac{L}{T_n};$$
$$w_{cp_0} = \frac{\Psi}{t_n}; w_{cp} = \frac{\Psi}{T_n}.$$

4. Угловое ускорение для механизмов углового позиционирования

$$\varepsilon_p = \frac{a_p}{R}; \ \varepsilon_T = \frac{a_T}{R}$$

где R - радиус установки линейного датчика ускорения.

5. Инерционные нагрузки по максимальным величинам масс ведомых звеньев M или их моментов инерции j.

$$Рир = Ma_р; Рит = Ma_т; Мир = je_р; Мит = je_т.$$

6. Частота колебаний f по намеренным величинам периода колебаний T

$$f = \frac{1}{T}$$

7. Логарифмический декремент δ затухания колебаний определяется по результатам измерения амплитуд двух последовательных колебаний A_i и A_{i+1}

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}$$

(i = 1, 2, ..., n - номер измерения).

На основании полученных данных строятся графики зависимостей между основными характеристиками ПР: $v_{ср} = f(L)$; $v_{ср} = f(m)$ и др.

8. Значения погрешности позиционирования по измерениям величин отклонения рабочего органа от заданного положения:

а) при одностороннем подходе к запрограммированной позиции (см. рис. 1) и нормальном распределении рассеяния можно определить по формулам

$$\delta_\Delta = (\overline{X}_{пр} - X_{прог}) \pm \Delta X_{пр};$$
$$\delta_\Delta = (\overline{X}_{л} - X_{прог}) \pm \Delta X_{л}$$

где $\Delta\overline{X}_{пр} = (\overline{X}_{пр} - X_{прог})$ и $\Delta\overline{X}_{л} = (\overline{X}_{л} - X_{прог})$ - накопленная погрешность при правом и левом подходе рабочего органа к заданной точке:

$$\overline{X}_{пр} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} X_{iпр} \text{ и } \overline{X}_{л} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} X_{iл}$$

- среднее арифметическое значение действительного положения рабочего органа ПР при многократном одностороннем соответственно правом и левом подходе; m - число измерений; $X_{iпр}$, $X_{iл}$, $X_{прог.}$ - соответственно действительное при правом и левом подходе и запрограммированное положения рабочего органа ПР; $\Delta X_{пр} = \beta S_{пр}$; $\Delta X_{л} = \beta X_{л}$ - границы доверительных интервалов для принятой надежности и числа измерений m при правом и левом подходе рабочего органа:

$$S_{пр} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(X_{iпр} - \overline{X}_{пр})^2}{m-1}};\ S_{л} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(X_{iл} - \overline{X}_{л})^2}{m-1}}$$

- средние квадратические отклонения от средних арифметических значений $\overline{X}_{пр}$ и $\overline{X}_{л}$ при правом и левом подходах; β - соответствующий коэффициент Стьюдента;

б) при подходе к запрограммированной позиции с двух направлений и нормальном распределении рассеяния:

$$\delta_{\Delta} = \left(\overline{X} - X_{прог}\right) \pm \left(X + \frac{\Delta U_x}{2}\right),$$

где $\Delta\overline{X} = (\overline{X} - X_{прог})$ - накопленная погрешность;

$$\overline{X} = \frac{\overline{X}_{пр} - \overline{X}_{л}}{2};\ \overline{X}_{пр} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} X_{iпр} \text{ и } \overline{X}_{л} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} X_{iл}$$

- средние арифметические отклонения при подходе рабочего органа к заданной позиции соответственно с правой и левой стороны, которые учитывают несовпадение центра рассеивания и заданного в режиме обучения исходного положения.

$X_{iпр}$ и $X_{iл}$ - результаты отдельных замеров в серии при подходе рабочего органа к заданной позиции соответственно с правой и левой стороны;

m - число измерений в серии;

$\Delta X = \frac{\Delta X_{пр} + X_{л}}{2}$; $\Delta X_{пр} = \pm\beta S_{пр}$ и $\Delta X_{л} = \pm\beta S_{л}$ - границы доверительных интервалов для принятой надежности и числа измерений m, определяемые при подходе рабочего органа к заданной позиции соответственно с правой и левой стороны;

$S_{пр} = \sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}(X_{iпр} - \overline{X}_{пр})^2}$ и $S_{л} = \sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}(X_{iл} - \overline{X}_{л})^2}$ - средние квадратические отклонения, определяемые при подходе рабочего органа к заданной позиции соответственно с правой и левой стороны;

β - соответствующий коэффициент Стьюдента; $\Delta U_x = (\overline{X}_{пр} - \overline{X}_{л})$ - зона нечувствительности, имеющая место при реверсе перемещения рабочего органа ПР.

9. Коэффициент неравномерности перемещения K_v или K_w :

$$K_v = 2\frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max} + v_{min}} \text{ или } \frac{K_v}{2} = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max} + v_{min}} 100\%$$

$$K_w = 2\frac{w_{max} - w_{min}}{w_{max} + w_{min}} \text{ или } \frac{K_w}{2} = \frac{w_{max} - w_{min}}{w_{max} + w_{min}} 100\%$$

где v_{max}, v_{min} и w_{max}, w_{min} - соответственно максимальные и минимальные линейные и угловые скорости движения исследуемого механизма ПР.

10. Коэффициент неравномерности ускорения K_a или K_ε:

$$K_a = \frac{a_{ср}}{a_{max}} \text{ или } K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{ср}}{\varepsilon_{max}}$$

где $a_{ср}$, a_{max} и $\varepsilon_{ср}$, ε_{max} - средние и максимальные значения соответственно линейных и угловых ускорений испытуемых механизмов ПР.

Конфигурация робота при проведении испытаний должна быть подробно описана в протоколе испытаний, включая все подсистемы и компоненты с их характеристиками и функциональными возможностями. Конфигурация робота, при необходимости, должна быть проверена всеми методами испытаний, установленными заказчиком испытаний, чтобы обеспечить достоверное и всестороннее определение его рабочих характеристик. При любом изменении конфигурации робота необходимо проведение повторных испытаний.

4.3. Особенности испытаний мехатронных систем

Экспериментальные исследования занимают главенствующее место среди всех способов получения информации о внутренних взаимосвязях в мехатронных системах. Под *экспериментом* принято понимать совокупность действий, осуществляемую посредством материальных средств исследования с целью получения новой информации об изучаемом объекте путем построения информационной модели, характеризующей различные его стороны и проявления. Разновидностью экспериментов являются ***испытания***, проводимые с целью контроля нахождения параметров объекта в допустимых пределах.

Испытания мехатронных систем, ярким представителем которых являются мехатронные модули металлорежущего станка с ЧПУ состоят из следующих этапов: испытания на холостом ходу и проверка паспортных данных; испытания под нагрузкой и в работе; испытания на точность; испытания на жесткость и виброустойчивость. Испытания на холостом ходу и проверку паспортных данных начинают включением минимальной скорости движения. Затем устанавливают другие скорости, включают подачу и ускоренный ход. Проверяют безотказность блокировок, действия системы смазывания, охлаждения, гидра и электрооборудования, уровень шума. При испытаниях под нагрузкой и в работе проверяют наибольшие силы (с кратковременной перегрузкой на 25%), наибольшие мощность и крутящий момент, убеждаются в безотказности действия под нагрузкой всех механизмов и систем, предохранительных устройств и тормозов.

Точность работы мехатронного модуля движения оценивают его погрешностью, т.е. разностью между действительным и расчетным положениями выходного звена. Основными причинами возникновения погрешности ММ являются погрешности системы управления и двигателя, кинематические погрешности, мертвый ход и упругие деформации элементов его преобразователей движения.

Погрешность системы управления и двигателя.

Погрешность системы управления и двигателя.

Погрешность системы управления и двигателя, приближенная к выходному звену преобразователя движения, может быть определена в виде:

$$\Delta q = \frac{\Delta\varphi_{дв}}{u}$$

u - передаточное отношение преобразователя движения; $\Delta\varphi_{дв}$ - погрешность угла поворота двигателя.

Погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения.

Звенья преобразователя движения ММ не являются абсолютно жесткими. Под действием нагрузок они деформируются. Это приводит к изменению положения выходного звена, т.е. возникновению погрешности ММ.

$$\Delta q' = e_п Q$$

$e_п$ - приведенная податливость преобразователя движения ММ

$$Q = \begin{cases} F - \text{ сила сопротивления(Н), при линейном перемещении выходного звена} \\ T - \text{момент споротивления(Нм), при угловом перемещении выходного звена} \end{cases}$$

Погрешность мехатронного модуля.

Полную погрешность выходного звена ММ определяют в виде:

$$\Delta = \Delta q + \delta_{\Sigma} + J_{\Sigma} + \Delta q'$$

Δq – погрешность системы управления и двигателя

δ_{Σ} - кинематическая погрешность преобразователя движения

J_{Σ} - мертвый ход преобразователя движения

$\Delta q'$ - погрешность, вызванная податливостью преобразователя движения

Ошибки в мехатронных модулях движения могут быть обусловлены следующими причинами и факторами:

1) причины, связанные со схемой погрешностей, которые появляются при изготовлении механизмов (т. е. при применении схемы);

2) технологические причины, которые по линейным, т. е. геометрическим размерам разделяются на:

а) ошибки размера – отклонения размеров элементов у образца и теоретического прототипа от номинальной величины, а также ошибки между элементами, которые появляются при перемещении узлов, составляющих пару (кинематические пары);

б) ошибки формы у рабочих поверхностей тех же пар;

в) ошибки во взаимном расположении рабочих поверхностей узлов;) отклонения в шероховатости и волнистости от номинальных;

3) ошибки, вызванные силами в самом механизме (это силы деформации, трения, вибрации и прочие, а также воздействие динамических факторов (например, ударно-колебательное движение);

4) ошибки, связанные с нарушением температурного режима эксплуатации механизма, из-за изменения сопротивлений и линейных размеров в узлах.

Также выделяют следующие ошибки:

1) ошибка положения механизмов. Имеется в виду следующее: если взять два механизма, которые должны совершить некоторое согласованное действие, то несмотря на полное соответствие параметров ведущих звеньев, обнаруживается разница; эта разница и есть искомая ошибка. Эти механизмы можно себе представить как механизм действительный и его теоретический прототип, то есть под ошибкой имеется в виду несоответствие образца теоретическому прототипу**;**

2) ошибка перемещения механизмов: речь идет о несоответствии параметров ведомых узлов при тех же параметрах ведущих. Только теперь разница в перемещении, а не в положении ведомых узлов;

3) ошибка положения ведомого звена – имеется в виду та же ошибка, что и в (1), только теперь ее причина в неточности ведущих звеньев, последние часто являются последствиями неправильных вводных данных;

4) ошибка перемещения ведомого звена: то же самое, что и ошибка (2), только теперь причина в ведущих звеньях, но по той же причине, что и в (3);

5) ошибка передаточного отношения (имеется в виду разность между действительным (у образца) и теоретическим передаточными отношениями);

6) ошибка линейного передаточного отношения. Аналогично предыдущей ошибке, речь идет о разности между действительным и теоретическим линейными передаточными отношениями.

Методы определения ошибок мехатронного модуля движения

Аналитический метод – самый общий и распространенный метод обнаружения ошибок. Сопоставляются уравнения движения уже имеющегося механизма и его теоретического прототипа. Цель: получить зависимость, которая выражала бы разность движений ведомых узлов в этих механизмах, в зависимости от движения ведущего звена уже произведенного механизма. При этом значительную роль играет компьютерное моделирование с использованием динамических моделей. В итоге получается функция от ошибок схемы. Значение погрешности получают, разделив линейное перемещение нарушенного ΔS_m ведомого звена на чувствительность измерительного устройства R, и находят ошибку схемы, выраженную в:

$$\Delta S_{m\ изм} = \frac{\Delta S_m}{R}$$

Экспериментальный метод применяют в том случае, когда использование предыдущего метода становится проблематичным из-за ряда причин, например, из-за плохого знания прибора, или же когда в приборах имеются упругие узлы, не позволяющие установить линейную зависимость между искомыми величинами. В случае обнаружения дефектов подвергают исследованию группы одинаковых приборов (механизмов). После определения ряда одинаковых параметров, для которых характерны общие по роду отклонения (для этого каждая единица прибора (механизма) исследуется многократно; в одних и тех же точках, где наблюдались отклонения, определяются средние значения

параметров для каждой единицы) находят среднее значение для всей исследуемой партии. После обработки полученных данных удается определить функцию от ошибки схемы прибора (механизма). Достоинством этого метода является следующее: функцию от ошибок схемы находят, например, методом наименьших квадратов, что значит уменьшение влияния ошибок каждого механизма на общую ошибку для всей группы. Если построить кривую для рядов найденных ошибок, то она будет отражать не только искомые ошибки схемы, но и систематические, которые были допущены при изготовлении или сборке приборов.

При проведении испытаний большое значение имеют условия, при которых производят измерения. Проверку необходимо проводить при температуре +20. °С; колебания температуры не должны превышать ±0,5. Объем испытания определяется соответствующими нормами точности, предусмотренными ГОСТом.

4.4. Методы и средства диагностирования роботов и мехатронных систем

Методы диагностирования мехатронных и робототехнических систем классифицируют по следующим признакам:

- степени информативности;
- видам диагностической информации;
- степени использования технических средств;
- стадиям эксплуатации;
- глубине диагностирования.

По степени информативности выделяют следующие методы:

- метод *временных интервалов,* применяемый для анализа простоев, определения показателей надежности, контроля работы системы управления, получения циклограмм;
- метод *эталонных модулей,* основанный на сравнении экспериментальных данных или рассчитанных значений и показателей качества;
- метод *эталонных зависимостей,* основанный на сравнении измеренных диагностических параметров с эталонными диагностическими параметрами;
- спектральный *метод,* основанный на измерении составляющих сложных вибрационных или акустических сигналов;

• корреляционный *метод,* применяемый для обнаружения отклонений в характере зависимости между диагностическими параметрами (взаимная корреляция) или изменении диагностических параметров во времени (автокорреляция).

По источнику информации выделяют тестовое и функциональное диагностирование.

При тестовом диагностировании на объект подаются тестовые воздействия от средств диагностирования. При функциональном на объект поступают только рабочие воздействия.

Методы диагностирования классифицируются **по типу физических процессов**, происходящих в объекте: механический, электрический, вибрационный, ультразвуковой, ударно-импульсный, тепловой, магнитный, фотометрический и др.

Механический метод заключается в измерении геометрических размеров частей механических объектов. Он используется при определении износа.

Электрический метод заключаются в измерении электрических величин, основан на измерении электрических диагностических параметров: тока, напряжения, сопротивления, мощности.

Вибрационный метод заключается в измерении параметров вибрационных процессов – виброперемещения, виброскорости, виброускорения.

Ультразвуковой метод заключается в измерении отраженных от границ раздела двух сред направленных ультразвуковых колебаний. Он позволяет обнаруживать внутренние дефекты в крупногабаритных объектах с возможностью определения их места и размеров.

Метод ударных импульсов заключается в измерении механических ударных волн, возникающих при соударении твердых тел. Его применяют для определения состояния подшипников качения и смазки.

Тепловой метод заключается в измерении температуры объектов.

Магнитный метод заключается в измерении магнитных полей рассеивания, возникающих над дефектом, и в определении магнитных свойств диагностируемых объектов. Он используется для измерения толщины, для контроля структуры, механических свойств деталей. В

зависимости от способа измерения магнитных полей рассеивания разделяется на магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, магниторезисторный, индукционный.

Фотометрический метод заключается в измерении освещенности. Используется для измерения линейных и угловых люфтов и зазоров в сопряжениях, загрязненности масел.

В настоящее время перспективными направлениями развития методов диагностирования являются приемы искусственного интеллекта, основанные на нечеткой логике, экспертных системах и нейронных сетях. Методы нечеткой логики позволяют значительно упростить описание модели объектов диагностирования, а также являются более простыми для аппаратной реализации. Экспертные системы позволяют принимать решения о состоянии объекта, если оценка состояния или поиска неисправности объекта является трудно формализуемой задачей. Нейронные сети используют для идентификации объектов, распознавания и прогнозирования состояния МС. Преимущества классификатора, построенного на основе нейронных сетей, перед традиционными оценочными методами заключается в следующих факторах: независимость от шумов, самообучаемость, возможность параллельной обработки.

Важным шагом в любом методе диагностирования является построение математической модели, дающей адекватную информацию о функционировании мехатронной и робототехнической системы.

При решении задачи моделирования в робототехнике и мехатронике возможно использование различных прикладных программ, пакетов и библиотек: Maple, Matlab, ProMechanic, AutoCad и других. Достаточно хорошие результаты при моделировании технических систем достигаются с помощью пакета Matlab. Пакет Simulink, входящий в состав системы Matlab, позволяет достаточно оперативно составлять исследуемые модели, изменять их структуру и регистрировать результаты моделирования, не прибегая к сложным программным процедурам. В последние версии пакета Simulink включена библиотека Sim Mechanics second generation, позволяющая выполнять моделирование движения различных механических систем в трехмерном пространстве в векторно-матричном виде, не прибегая к составлению сложных дифференциальных уравнений, а также библиотека Math Operations. Исходя из этого, предлагается использовать пакет Simulink в сочетании с

библиотекой Sim Mechanics second generation и Math Operations. Идеология составления блок - схем в библиотеке Sim Mechanics second generation существенно отличается от идеологии составления функциональных блок-схем библиотеки Simulink. В блок-схеме Sim Mechanics second generation отдельные блоки следует рассматривать как модели, имитирующие механическое движение одной части моделируемого механизма относительно другой. Входы и выходы блока фактически таковыми не являются, а имитируют «посадочное место» соответствующей части механизма. Линии соединения «входов» и «выходов» блоков имитируют жесткие соединения выходной части одного механизма с входной частью другого. Можно утверждать, что это соединение моделирует передачу силового воздействия между частями разных механизмов. Но поскольку в соответствии с третьим законом Ньютона сила действия равна силе противодействия, такую передачу силы нельзя рассматривать как однонаправленное воздействие. Поэтому в блок - схемах на линиях соединений механических блоков нельзя встретить изображений стрелок, указывающих направление воздействия. По той же причине графические изображения «входов» и «выходов» механических блоков имеют вид не стрелок, а квадратов с диагоналями.

«Входы» и «выходы» механических блоков нельзя рассматривать в качестве источников и приёмников, каких бы то ни было сигналов. К их соединительным линиям нельзя подсоединить обычные S-блоки, а потому нельзя и сформировать с помощью последних заданные воздействия или вывести информацию о получаемых в результате движениях механизмов (например, в обзорные окна или непосредственно в среду MATLAB). Но так как любое моделирование механизмов невозможно осуществить без указания нужных исследователю воздействий и без вывода результатов моделирования в среду MATLAB, такая идеология построения блок-схем механизмов требует включения в библиотеку блоков, осуществляющих прямую и обратную связь S-блоков с механическими блоками.

В состав библиотеки входит шесть разделов:

– Body elements (Тела) – содержит блоки, моделирующие твердые тела;

– Joints (Сочленения) – включает блоки имитации механических сочленений, обеспечивающих требуемые степени свободы одной части механизма относительно другой;

– Constraints (Связи) – состоит из блоков имитации ограничений на степени свободы механической системы;

– Frames and Transforms (система координат) – состоит из блоков систем координат;

– Utilities (Утилиты) – включает вспомогательные блоки, которые могут использоваться при создании модели механизма;

– Demos (Демонстрационные программы) – позволяет вызвать на исполнение демонстрационные модели.

При моделировании движения различных механизмов в пакете Sim Mechanics second generation предусмотрены источники сил и моментов сил (блок Extermal Force and Torque), действием которых можно управлять в функции времени или переменных состояния механизма. В то же время исследование движения характерной точки механизма по заданной траектории с использованием указанного блока вызывает значительные затруднения. Исходя из этого, поставим задачу максимального приближения модели исполнительной системы робота к реальному объекту и представим моделируемую систему в виде, изображенном на рис. 4.1.

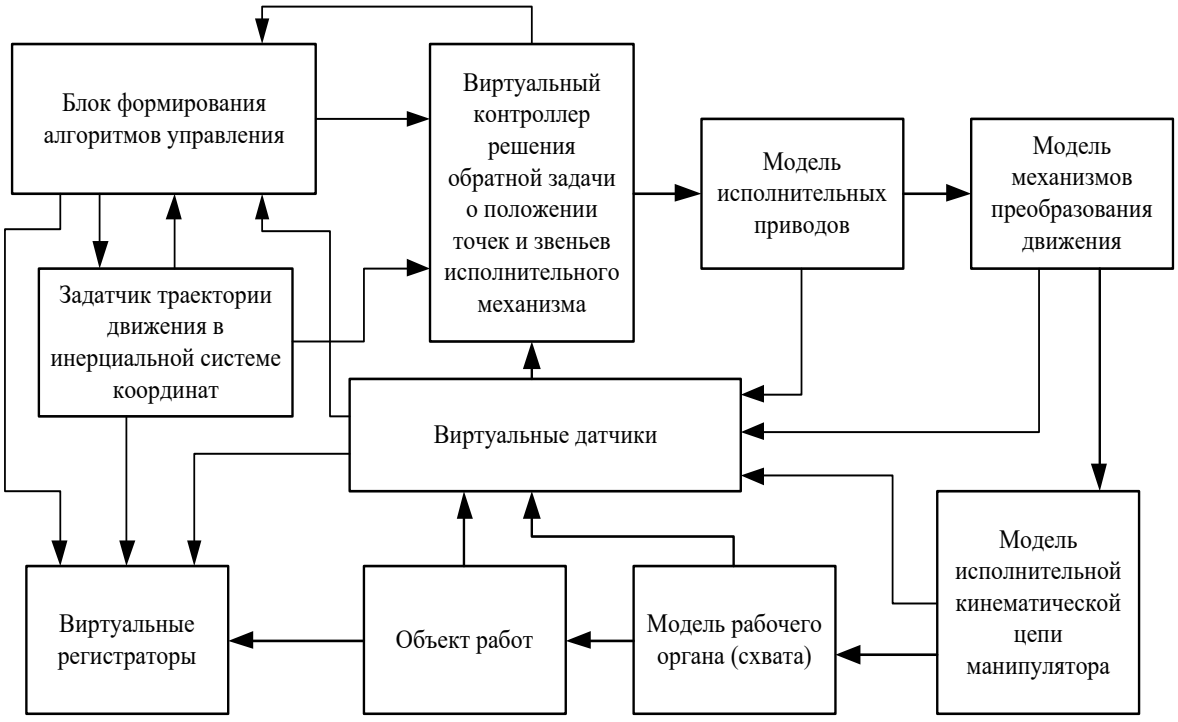


Рис. 4.1. Структурная схема модели исполнительной системы робота

Представленная структура позволит выполнить всесторонний анализ, как исполнительной системы, так и реализации различных алгоритмов управления движением манипуляторов в процессе выполнения рабочих операций. Поскольку на данном этапе выполнения работы многие параметры исполнительной системы выбираются априорно, ограничимся исследованием ее работы при движении по некоторой траектории в процессе перемещения объекта работ с позиции взятия на позицию установки. В качестве примера построения модели используем автономную исполнительную систему манипулятора, кинематическая схема которого приведена на рис.4.2.

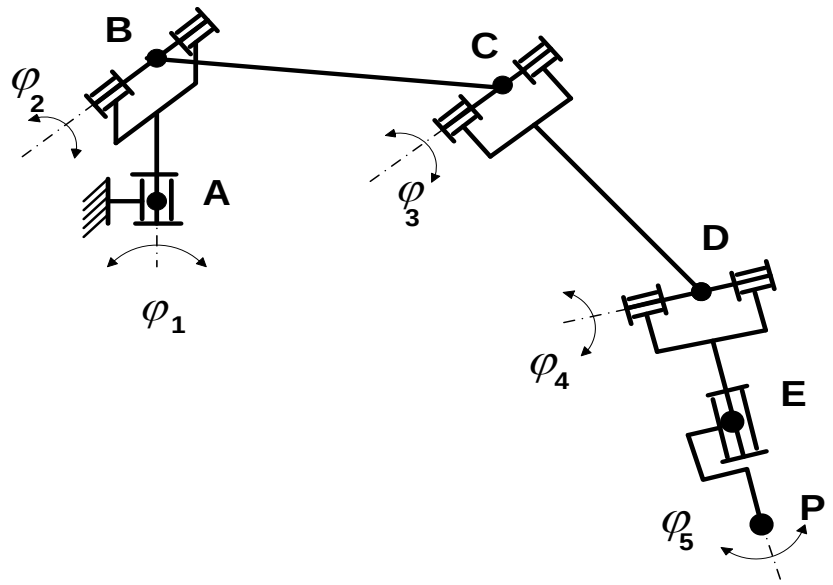


Рис. 4.2. Кинематическая схема манипулятора

При построении модели используем следующие блоки: World Frame, Solver Configuration, Mechanism Configuration, Solid, Revolute, Rigid Transform, Prismatic Joint, Transform Sensor,World Frame, Solver Configuration, Mechanism Configuration, которые являются обязательными при построении модели любого механизма. Они представляют собой неизменные точки основания (земли), неподвижные в абсолютном (инерциальном) пространстве. Движение отдельных частей механизма задаётся или определяется по отношению к системе координат, реализуемой этими блоками. На рис. 4.3. представлен вид подсистемы «Начало координат».

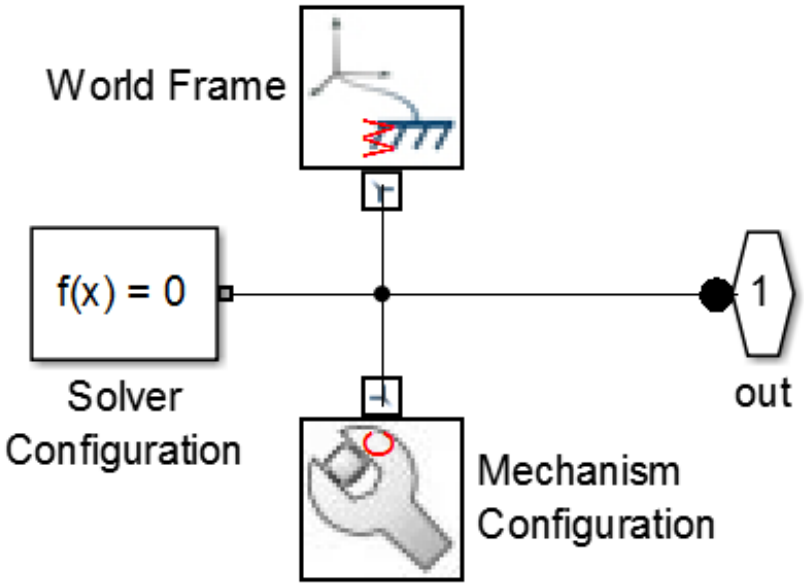


Рис. 4.3. Подсистема «Начало координат»

Блоки Revolute, Prismatic Joint, относящиеся к разделу Joints (сочленения), позволяют обеспечить возможность моделирования относительных движений тел, представленных отдельными блоками Solid, то есть необходимых степеней подвижности. Блок имеет два обязательных порта, с помощью которых он подсоединяется к двум блокам из раздела Body Elements. Порт, отмеченный индексом B (base - основной), предназначен для соединения с блоком Body, представляющим первое (основное) тело, порт с индексом F (follower- следующий) служит для подсоединения к следующему телу в связанной цепи тел, составляющих механизм. Solid - представляет отдельную часть механизма, рассматриваемую как твердое тело, движение которого моделируется. В окне настройки блока задаются масса, инерция, форма, размер и цвет объекта. Модель объекта можно импортировать из другой программы (например, «Компас»).

На рис. 4.4 представлен фрагмент построения модели из выше перечисленных блоков. Построение модели исполнительной кинематической цепи манипулятора производится в пространстве правой инерциальной системы координат XYZ. В состав модели входит 5 звеньев и 5 цилиндрических шарниров, при этом оси шарниров расположены вдоль осей Z относительных систем координат.

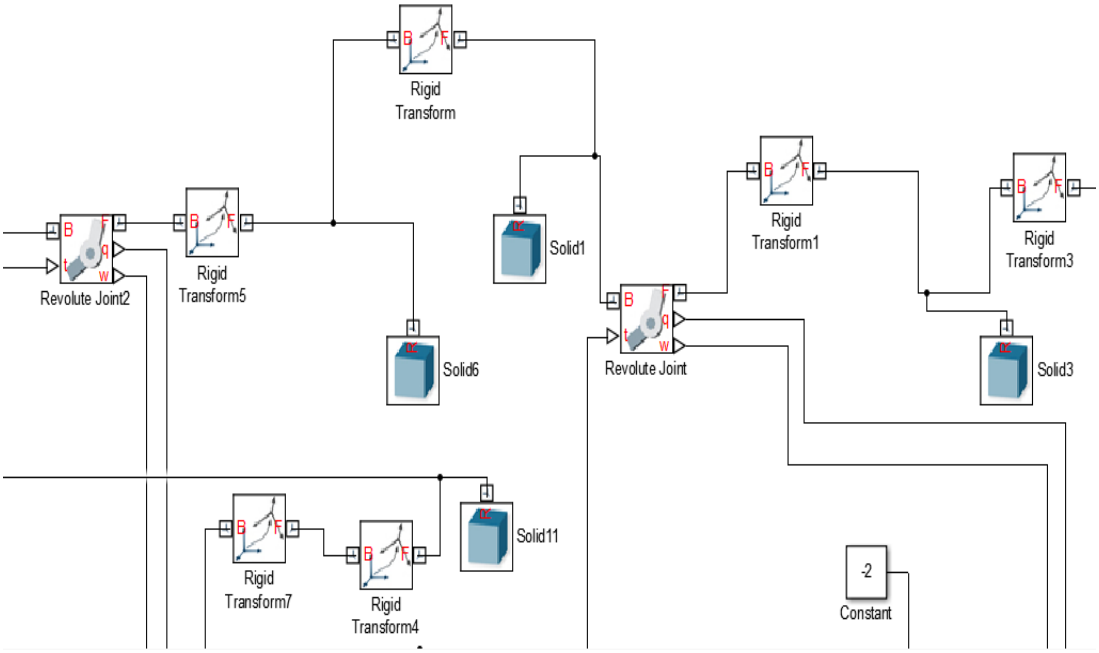


Рис. 4.4. Фрагмент построения модели

Величины масс звеньев примем в соответствии с выражением: $m_i = к \cdot m_г$, где m_i- масса i - го звена, считая от основания; к- коэффициент; $m_г$-грузоподъемность манипулятора. Значения коэффициента к равны 2; 6; 4,5;3 и 2 соответственно. На рис. 4.5 приведена модель обобщенной исполнительной кинематической цепи манипулятора, построенная в соответствии с изложенным выше.

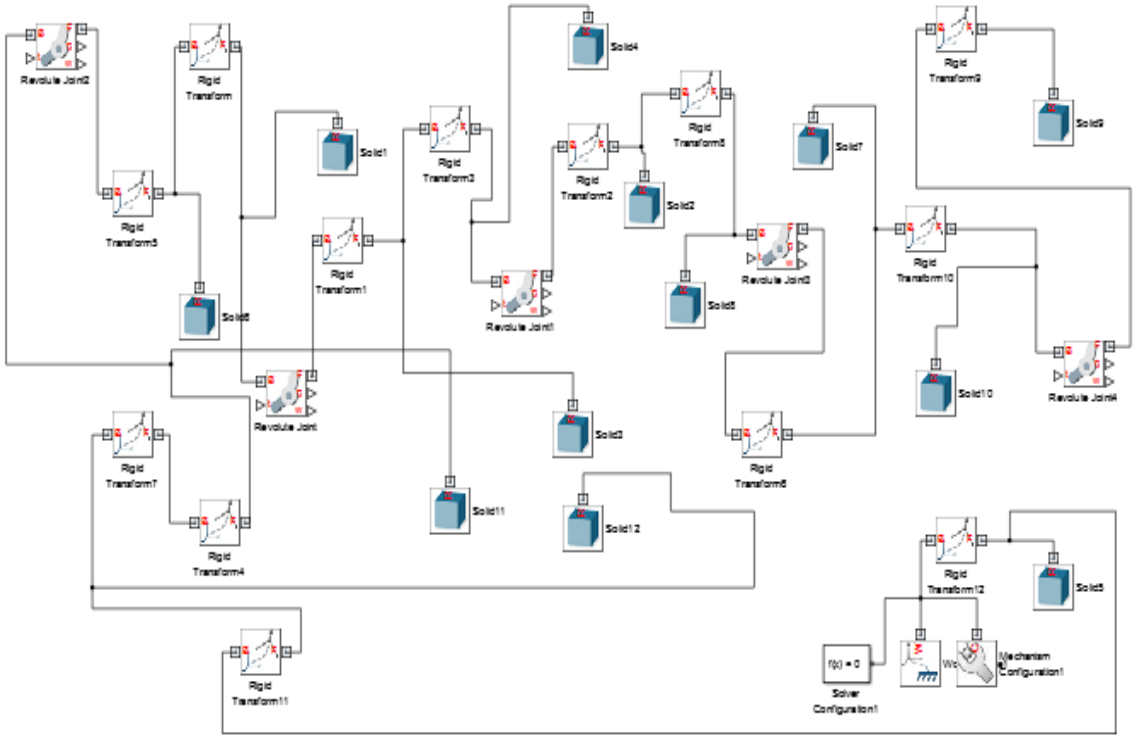


Рис. 4.5. Модель исполнительной кинематической цепи манипулятора

На рис. 4.6 представлена анимация модели обобщенной исполнительной кинематической цепи манипулятора.

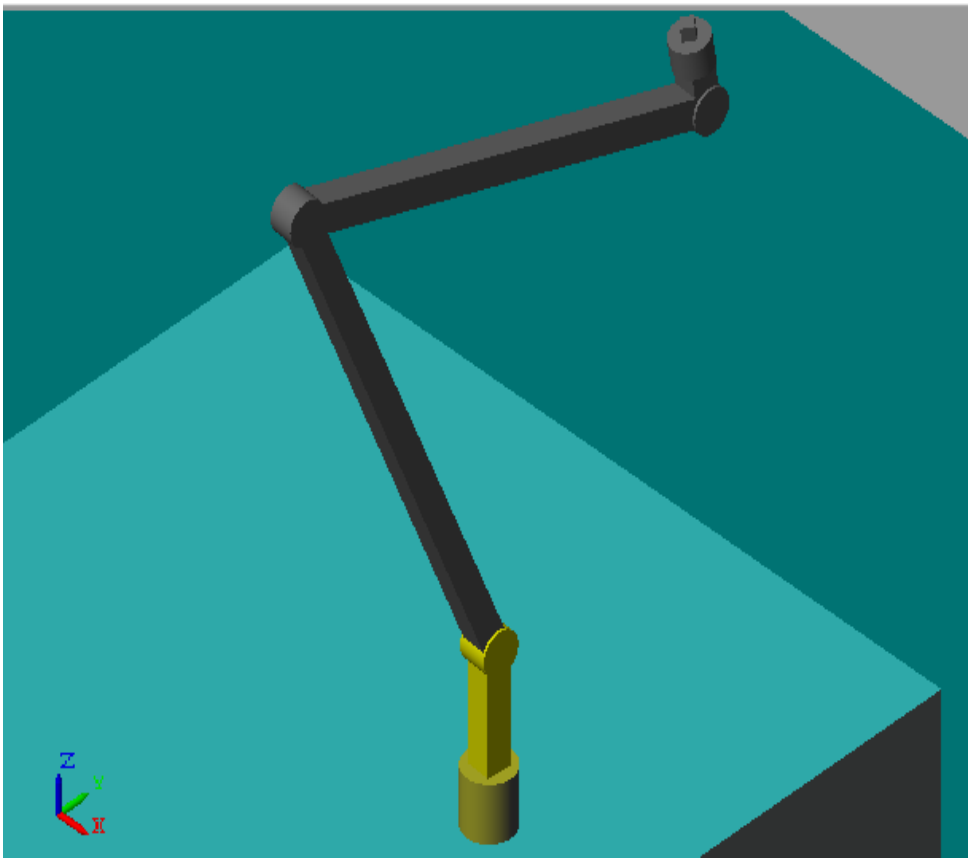


Рис. 4.6. Анимация модели исполнительной кинематической цепи манипулятора

В качестве рабочего органа манипуляторов выберем схват с плоскопараллельным движением губок, схема которого приведена на рис.4.7.

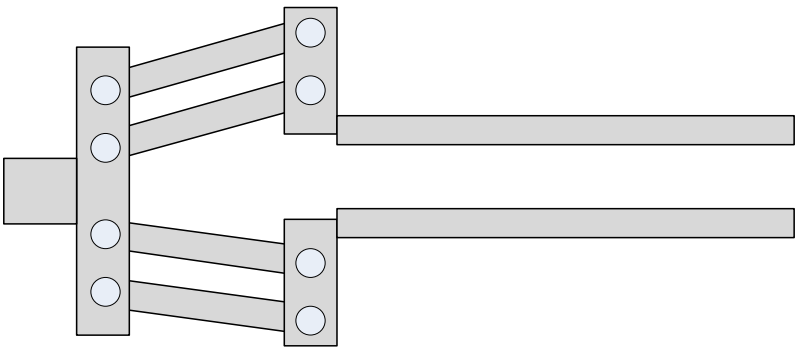


Рис. 4.7. Схема схвата

На рис. 4.8 представлена компьютерная модель механизма схвата, а на рис. 4.9 – ее анимация.

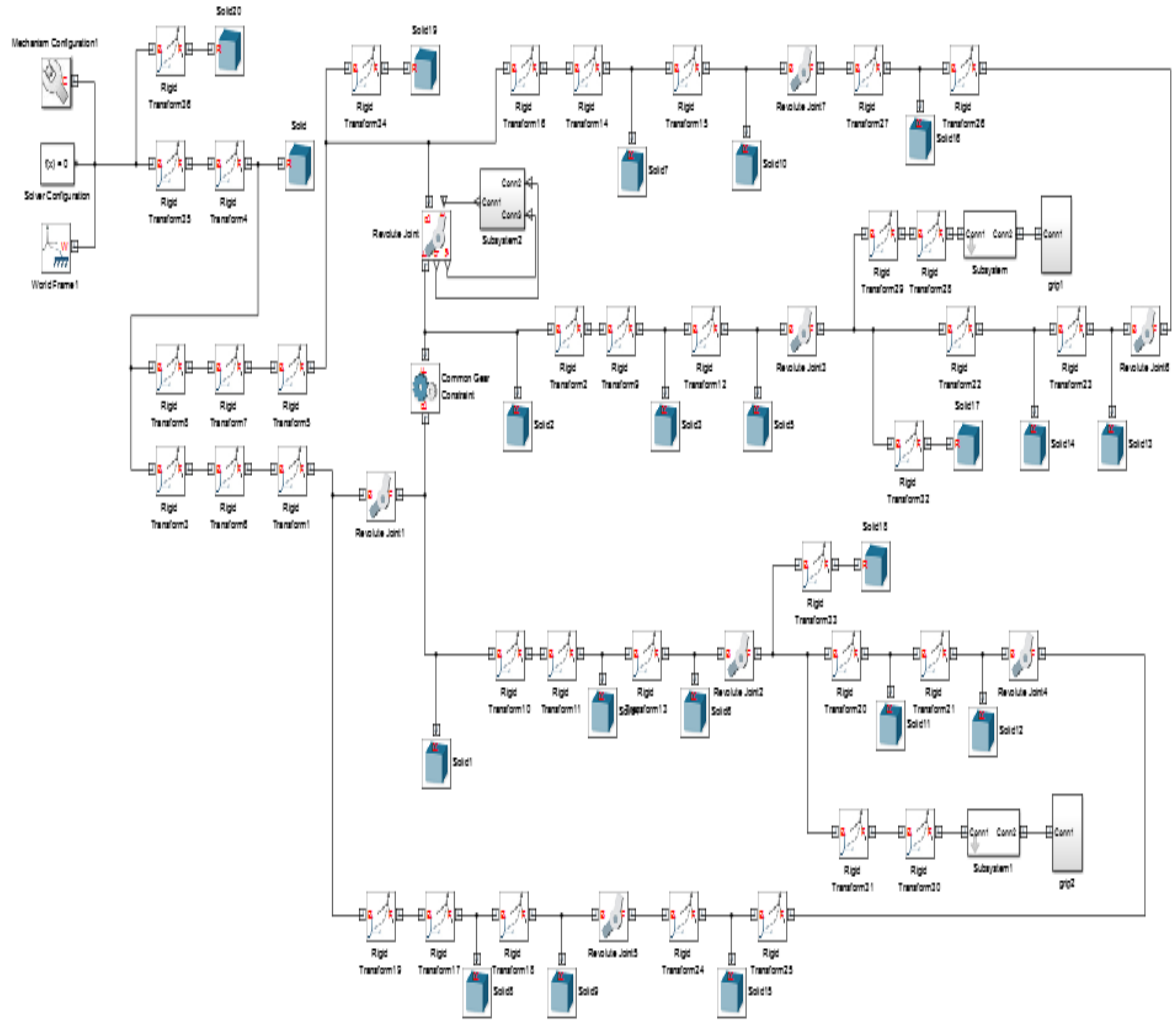


Рис. 4.8. Компьютерная модель механизма схвата

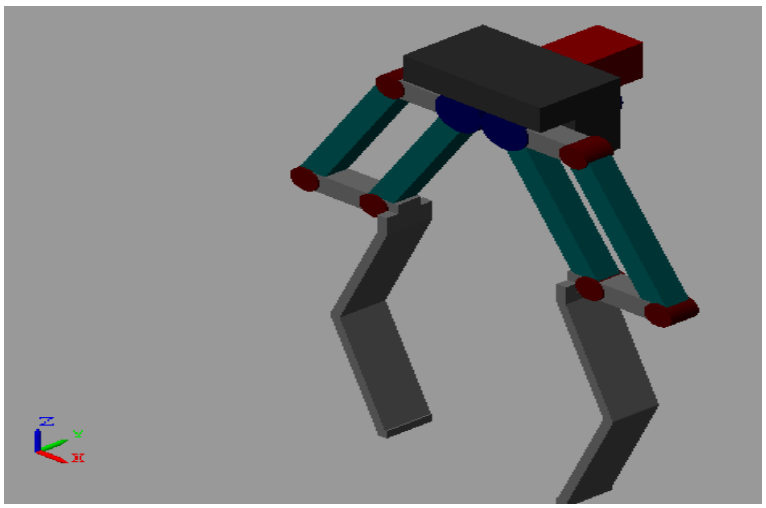


Рис. 4.9. Анимация модели механизма схвата

Процедура диагностирования объекта включает два этапа: проверку его работоспособности и поиск дефекта. Поэтому основной задачей технического диагностирования (ТД) является поддержание работоспособности объекта путем своевременного распознавания отказов и устранения причин их появления. По характеру взаимодействия объекта и технических средств можно выделить два метода ТД:

- функциональное диагностирование;
- тестовое диагностирование.

Первый метод основан на пассивном наблюдении за функционированием объекта и оценке его состояния по диагностическим признакам (например, уровень температуры, шумов или вибрации, величина потребляемой энергии, время выполнения цикла).

Второй метод предусматривает формирование специального воздействия, стимулирующего у объекта ответную реакцию, которая сравнивается с эталонной (активный эксперимент). Роль стимулирующего воздействия выполняют ступенчатые, импульсные, гармонические и другие сигналы.

В качестве диагностических показателей используются параметры динамических звеньев, коэффициенты уравнений, обобщенные параметры.

Типовой алгоритм системы поддержания работоспособности объекта (СПРО) имеет вид:

- сбор информации;
- оценка информации и выявление отклонений показателей от нормы;
- определение причины отклонения:
- принятие решения и выработка корректирующего воздействия (КВ);
- ввод КВ в систему с целью ликвидации отклонения.

Первые два этапа – операции контроля, третий – диагностирование.

Эксплуатируемый объект (система) подвержен как внезапным (случайным), так и постепенным (износ, старение) отказам. Если состояние объекта характеризовать обобщенным выходным параметром Пр, то в случае внезапного отказа $П_Р$ принимает лишь два значения: Пр = Пн (норма) или Пр = Пот (отказ) (рис. 4.10).

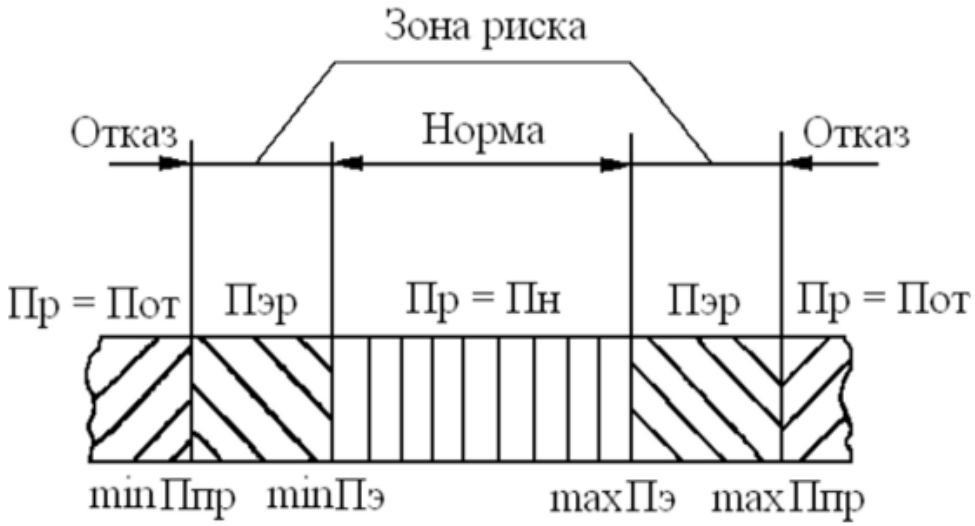


Рис. 4.10. Зоны работоспособности технической системы (объекта)

Пр – обобщенный показатель системы; Пэ – эталонное значение Пр; Пэр – то же в зоне риска; Ппр – предельное значение Пр; Пот – значение Пр в зоне отказа.

В качестве параметра Пр используют различные технические характеристики: температуру, размер объекта, величину износа узла (или инструмента), сигнал конечного выключателя и т. п. В случае постепенных отказов можно реализовать мероприятия по предотвращению отказа, если вовремя зафиксирован переход параметра Пр от нормы в зону риска. В информационной структуре системы поддержания работоспособности объекта (рис. 4.11) можно выделить следующие подсистемы:

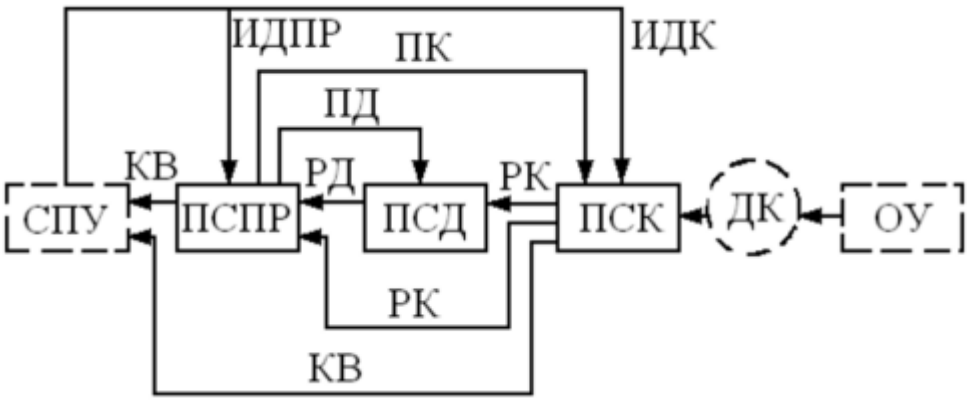


Рис. 4.11. Информационная структура системы поддержания работоспособности объекта

ПК,ПД - программы контроля и диагностирования, соответственно; РК, РД – результаты контроля и диагностирования; ИДК-исходные данные для контроля; ИДПР - исходные данные для принятия решений: контроля ПСК, диагностирования ПСД и принятия решений ПСПР.

Информация об объекте управления ОУ отдатчиков контроля ДК поступает на вход ПСК, которая обрабатывает ее, рассчитывает значения обобщенного параметра $П_Р$ и сравнивает их с эталонным. По результатам сравнения ПСК формирует сигнал об отклонении $П_Р$ от нормы, который подается в зависимости от ситуации в систему программного управления СПУ или в ПСПР. В случае угрозы аварийной ситуации СПУ вырабатывает блокировочный сигнал останова системы для ремонта. При отсутствии угрозы аварии ПСПР вырабатывает корректирующее воздействие КВ, которое передается в СПУ для осуществления подналадки системы.

Средства диагностики технического оборудования служат для фиксирования и измерения величины диагностических признаков (параметров). Для этого применяют приборы, приспособления и стенды сообразно характеру диагностических признаков и методам диагностики. Значительное место среди них занимают электроизмерительные приборы (вольтметры, амперметры, осциллографы и др.). Они широко применяются как для непосредственного измерения электрических величин (например, при диагностике систем зажигания и электрооборудования автомобиля), так и для измерения неэлектрических процессов (колебаний, нагрева, давления), преобразованных при помощи соответствующих датчиков в электрические величины. Для этой цели электрические измерительные приборы снабжают датчиками. При диагностике механизмов наиболее часто используют: датчики сопротивления, концевые, индукционные, оптические и фотоэлектрические датчики, при помощи которых можно измерять зазоры, люфты, относительные перемещения, скорость и частоту вращения проверяемых деталей; термосопротивления, термопары и биметаллические пластины для изме-

рения теплового состояния деталей; пьезоэлектрические и тензометрические датчики для замера колебательных процессов давления, биений, деформаций и др. Одно из положительных качеств электроизмерительных приборов - удобство получения информации, а также в перспективе возможность ее анализа при помощи счетно-решающих устройств. В зависимости от полноты и степени механизации технологических процессов диагностику можно проводить выборочно, только для контроля технического состояния отдельных сборочных единиц, или комплексно для проверки сложных агрегатов, таких как двигатель, и, наконец, комплексно для диагностики машины в целом. В первом случае используются для отдельных измерений такие диагностические приборы как стетоскопы, манометры, тахометры, вольтметры, амперметры, секундомеры, термометры и другие переносные приборы. Во втором случае приборы комбинируют в виде передвижных стендов, в третьем случае – ими комплектуют датчики и пульты управления стационарных стендов. Основными требованиями к средствам диагностики являются: обеспечение достаточной точности замеров, удобство и простота использования при минимальной затрате времени. Помимо различных приборов, индикаторов узкого назначения, в систему диагностических средств включают комплексы электронной аппаратуры. Эти комплексы могут состоять из датчиков – органов восприятия диагностических признаков, блоков измерительных приборов, блоков обработки информации в соответствии с заданными алгоритмами и, наконец, блоков хранения и выдачи информации в виде запоминающих устройств для преобразования информации в удобный для использования вид.

4.5. Испытания мехатронной системы металлорежущего станка

В качестве примера проведения испытаний мехатронных систем приведем фрагменты процесса испытаний вертикально фрезерного станка с ЧПУ, вид которого представлен на рис. 4.12.

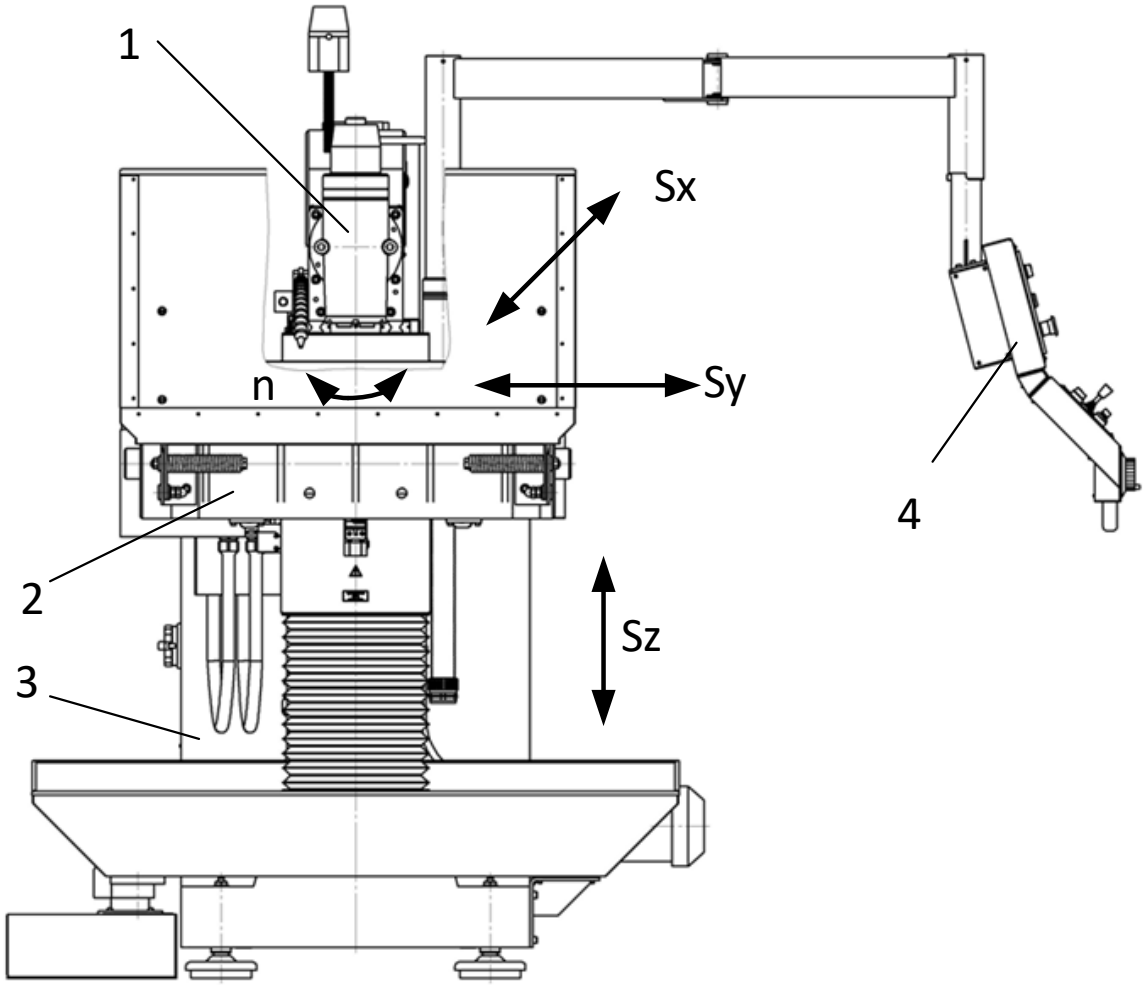


Рис. 4.12. Вид вертикально фрезерного станка с ЧПУ

Здесь обозначено: 1- шпиндельный узел: 2 – стол; 3 – станина; 4 – выносной пульт; n – частота вращения шпинделя; Sx- горизонтальное перемещение шпинделя; Sy – горизонтальное перемещение стола; Sz – вертикальное перемещение стола.

Испытание станка на холостом ходу

Проверку основных технических характеристик и испытание станка на холостом ходу проводится согласно таблице 4.2.

Таблица 4.2

Методы и результаты проверки

Что проверяется	Метод проверки	Результат проверки
1 Соответствие требованиям комплекта конструкторской документации	В процессе изготовления и приемки путем внешнего осмотра станка и его составных частей, сличения их с конструкторской документацией на станок и нормативно-техническими документами, указанными в документации и в настоящих технических условиях, и измерением размеров и других нормируемых параметров средствами и методами, обеспечивающими требуемую точность	Соответствие требованиям конструкторской документации на станок и нормативно-технической документации
2 Установка станка	Измерение проводить уровнем. Уровень рамный 200-0,02 устанавливать на середине стола параллельно и перпендикулярно его перемещению	Отклонение не более 0,04 мм/м
3 Разводка жгутов внутреннего монтажа	Внешним осмотром и сличением со схемой 49ХХХ.000.00.00.000Э3 и чертежом 49ХХХ.090.00.00.000СБ	Установка, закрепление, разводка и заделка соединений жгутов внутреннего и соединительного монтажа должны соответствовать требованиям схемы и чертежа
4 Наличие заземляющих винтов и знаков заземления по ГОСТ 21130	Визуально определить наличие заземляющих винтов и знаков заземления	Винты и знаки должны быть

5 Наличие и исправность цепи заземления	Измерением сопротивления между шиной заземления, находящейся в электрошкафу 49XXX.061.00.00.000, и перечисленными ниже составными частями станка, на которых установлено электрооборудование и которые в результате пробоя изоляции могут оказаться под напряжением 42 В и выше: 1) суппортом; 2) станиной; 3) корпусом горизонтального шпинделя; 4) корпусом насоса центробежного; 5) корпусом гидростанции; 6) пультом управления. Перед началом проверки провода, подключенные к миллиоммметру, замкнуть накоротко и замерить их собственное сопротивление. Полученную величину собственного сопротивления при определении результата вычитать из замеренного. Измерение проводить миллиомметром Е6-18	Сопротивление не должно превышать 0,1 Ом для каждой проверяемой точки
6 Основные	Измерением: 1) штангенциркулем ШЦ III-400-01 – по п.п. 2, 4, 14, 16 и 26 таблицы 1.1; 2) штангенциркулем ШЦ III-800-01 – по п.п. 3, 5 и 14 таблицы 1.1; 3) линейкой 1000 – по п.п. 12, 13, 21 и 22 таблицы 1.1; 4) рулеткой ЗПК-2-5-АНП/1 – по п. 27 таблицы 1.1; 5) динамометром ДОСМ-3-2 – по п.п. 28 и 29 таблицы 1.1	Соответствие данным, указанным в настоящих технических условиях
7 Работа системы смазки	Наблюдением во время обкатки	Все точки смазки должны обеспечивать хороший доступ масла к смазываемым местам. Утечки не допускаются

8 Работа системы охлаждения	Наблюдением во время обкатки	Равномерная подача Течь из соединений не допускается
9 Работа органов управления	Пятикратным включением, переключением органов управления (кнопок, рукояток, переключателей и т.д.) на пульте станка	Утапливание кнопок, их возврат в исходное заданное положение переключателей должны осуществляться без заеданий и задержек, не должна происходить задержка в нажатом положении кнопок, не имеющих фиксации в этом положении
10 Соответствие действия органов управления символам, надписям и назначению	Включением, выключение и переключением органами управления всех движений и состояний станка	Действие органов управления должно соответствовать заданному движению подвижных органов или состоянию станка
11 Проверка частоты вращения шпинделя	В патроне шпинделя станка зажать оправку с центровым отверстием для измерения частоты вращения тахометром часовым специальным ТЧ-10-р. Сравнить показания тахометра с заданными потенциометром величинами частоты вращения в шести произвольных положениях, охватив весь диапазон регулирования	Допустимое отклонение частоты вращения шпинделя – не более 6 % (диапазон регулирования частоты вращения см п.п. 19 и 24 таблицы 1.1)

12 Проверка величин подач горизонтального и вертикального столов и корпуса горизонтального шпинделя	Включением перемещения горизонтального и вертикального столов и корпуса горизонтального шпинделя с заданными потенциометром величинами подач в шести произвольных положениях, охватив весь диапазон регулирования. Измерением секундомером СОПпр-2а-000 и линейкой 1000	Допустимое отклонение величин подач – не более 5 % (диапазон регулирования величин подач см. п.п. 15 и 17 таблицы 1.1)
13 Плавность, отсутствие рывков при перемещении столов и корпуса горизонтального шпинделя	Включением перемещения горизонтального и вертикального столов и корпуса горизонтального шпинделя	Перемещение столов и бабки горизонтального шпинделя должно быть плавным
14 Нагрев подшипников шпинделей	Измерением температуры вольтметром универсальным цифровым В7-27 в зоне передних подшипников шпинделя. Проверка проводится во время обкатки станка на холостом ходу не менее 30 минут на максимальных частотах вращения шпинделя при установившейся температуре	Избыточная температура на наружной поверхности бабки горизонтального шпинделя и корпусе головки вертикальной не должна превышать 55 °С
15 Напряжение радиопомех	По ГОСТ Р 51318.11 и ГОСТ Р 51320 измерителем радиопомех SMV 6,5 класса 1,0 фирмы RFT (Германия)	Не должно превышать значений п. 1.2.1
16 Электрическая прочность изоляции силовых цепей	Проверку проводить до начала отладочных работ с помощью универсальной пробойной установки УПУ-1М (или аналогичной, мощностью не менее 500 ВА) в следующей последовательности: 1) убедиться в наличии надежного заземления корпуса электрошкафа; 2) отключить кабель питающей электросети от вводных клемм ХТ1;	Пробоя и поверхностного перекрытия изоляции не должно быть. Положительные результаты испытания занести в соответствующие графы «Свидетельства о выходном контроле электрооборудования»

	3) соединить перемычками провода A, B и C на вводных клеммах XT1; 4) отключить силовые провода и разъемы управления от блоков питания и преобразователей приводов подач и шпинделя и все разъемы от УЧПУ; 5) отключить провода от двигателей насосов СОЖ и гидростанции; 6) отключить RS-фильтры от двигателей СОЖ и гидростанции; 7) отключить провода от трансформатора TV1; 8) установить перемычки на силовых контактах пускателей и включить автоматические выключатели; 9) подключить испытательное напряжение между корпусом электрошкафа и проводом A на вводной клемме XT1. С помощью универсальной пробойной установки постепенно поднимать напряжение, начиная с нуля, до 1500 В. Выдержать изоляцию при этом напряжении в течении 1 мин, а затем плавно снизить до нуля. Отключить установку. При положительном результате испытания восстановить схему, при отрицательном – отыскать место пробоя, устранить неисправность и повторить испытание. Аналогично проверить кабели двигателей	
17 Сопротивление изоляции	Измерением мегаомметром М4100/3 при напряжении 500 В. Считывание показаний проводить при установившейся стрелки прибора. Измерение проводить в следующей последовательности: 1) подготовить схему по п. 16; 2) установить перемычки в зажимах цепей управления (XT4, XT8);	Не менее 1 МОм Положительные результаты испытания занести в соответствующие графы «Свидетельства о выходном контроле электрооборудования»

	3) отключить общие провода (1, 2, 10) от шины заземления; 4) замерить сопротивление изоляции), подключая выводы мегомметра: – между зажимами силовых цепей и шиной заземления шкафа; – между зажимами цепей управления и шиной заземления шкафа; – между зажимами силовых цепей и зажимами цепей управления. При положительном результате испытания восстановить схему, при отрицательном – отыскать место пробоя, устранить неисправность и повторить испытание.	
18 Наличие специального замка с вынимающимся ключом и предупреждающего знака на двери электрошкафа	Визуально определить наличие замка и знака	Замок и знак должны быть
19 Надежность действия защитных устройств и блокировок	1) Останов станка в аварийных ситуациях: – действие аварийной кнопки «Стоп»; – действие аварийного ограничения хода; – авария преобразователей; – перегрузка электродвигателей; – визуальная проверка токов уставки автоматических выключателей. 2) Блокировка запуска цикла, если оси не отреферированы. 3) Блокировка вращения шпинделя, если инструмент не зажат.	Станок останавливается, самозапуск станка после восстановления не происходит, на экране – соответствующее сообщение. Не действуют кнопки ускоренной подачи и запуска цикла. Разжатый шпиндель не запускается, разжим не действует при вращении шпинделя.

Испытание станка под нагрузкой должно соответствовать таблице 4.3.

Таблица 4.3

Что проверяется	Метод проверки	Результат проверки
1 Испытание станка под нагрузкой	При нагрузке станка образца-изделия в соответствии с режимами, указанными в таблице 4.3, горизонтальным и вертикальными шпинделями. Контроль частоты вращения шпинделя проводится тахометром часовым специальным ТЧ-10-р. Измерение момента проводится персональным компьютером, используя программу «COMBIVIS 5»	Безотказность работы Уменьшение частоты вращения шпинделя под максимальной нагрузкой должно быть не более 10 %. При этом момент на электродвигателе шпинделя не должен превышать его номинального значения
2 Октавные и корректированный уровни звуковой мощности (L_P; L_{PA}), уровень звукового давления (L), уровень звука и эквивалентный уровень звука (L_A)	Точным импульсным шумомером 00024 по методике согласно ГОСТ Р 51402 и ГОСТ ИСО 230-5 при работе станка на типовых режимах в соответствии с таблицей 4.3	Не должны превышать значений, указанных в таблице
3 Уровни вибрации на рабочем месте	По ГОСТ 12.1.012. Проверяются акустическим комплексом ВШВ-003 при работе станка на типовых режимах, приведенных в таблице 4.3	Не должны превышать значений, указанных в таблице

Примечание: 1. Работа станка при силовом испытании должна продолжаться каждым шпинделем не менее 30 мин.

2. При силовых испытаниях режимы резания обеспечивают максимальную нагрузку привода.

Проверка точности станка (некоторые показатели).

Общие требования к условиям испытания станка на точность, методам и средствам измерения точности должны соответствовать ГОСТ 8 и ГОСТ 26016, схемы и способы измерений геометрических параметров – ГОСТ 22267.

Плоскостность рабочей поверхности стола:

1) горизонтального;

2) вертикального.

Средства измерения: линейка поверочная специальная, головка 2 ИГ.

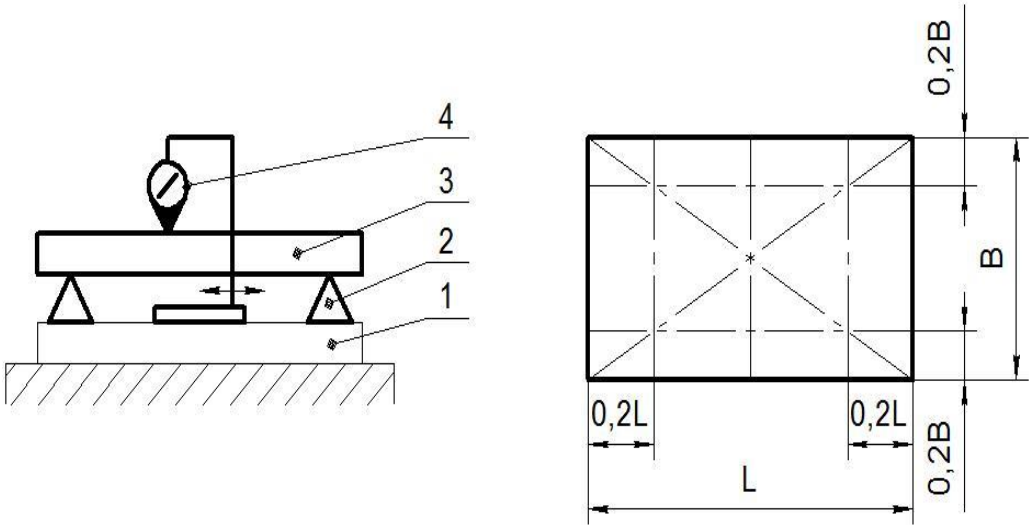


Рис. 4.13. Схема измерения

Допуск:1) 16 мкм на длине 600 мм; 2) 20 мкм. Выпуклость не допускается.

Проведение измерения

На проверяемую поверхность стола 1 в двух точках заданного сечения установить две опоры 2, на которые рабочей поверхностью положить поверочную линейку 3 так, чтобы расстояние от проверяемой поверхности до рабочей поверхности линейки у ее концов были равны.

Головку 4 установить на проверяемую поверхность так, чтобы ее измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей. Головку перемещать по проверяемой поверхности вдоль линейки.

Измерения проводить в двух продольных, трех поперечных и двух диагональных сечениях. Отклонение от плоскостности равно наибольшей алгебраической разности показаний головки во всех сечениях.

Параллельность рабочей поверхности вертикального стола траектории его продольного и вертикального перемещений.

Средства измерения: линейка поверочная специальная, головка 2 ИГ.

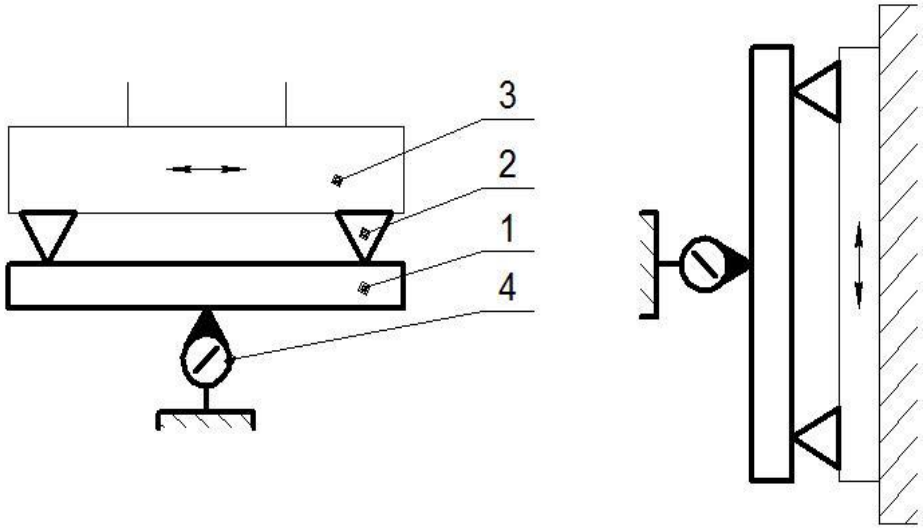


Рис. 4.14. Схема измерения

Допуск:16 мкм на дине 400 мм. Наклон верхней кромки стола в сторону от станины не допускается.

Проведение измерения

Суппорт установить в среднее положение в вертикальной плоскости при проверке параллельности траектории продольного перемещения, и вертикальный стол установить в среднее положение в горизонтальной плоскости при проверке параллельности траектории вертикального перемещения. Поверочную линейку 1 установить на опорах 2 на середине перемещаемого стола 3 вдоль направления его перемещения так, чтобы расстояние от плоскости стола до рабочей поверхности

линейки у ее концов были равны. Головку 4 установить на неподвижной части станка так, чтобы ее измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей. Стол с линейкой перемещать на всю длину хода. Отклонение от параллельности проверяемой поверхности вертикального стола траектории его перемещения равно наибольшей алгебраической разности показаний на всей длине хода. В этом случае результаты измерения будут включать в себя отклонение от прямолинейности и параллельности траектории перемещения.

Параллельность рабочей поверхности горизонтального стола траектории его продольного перемещения

Средства измерения: линейка поверочная специальная, головка 2 ИГ.

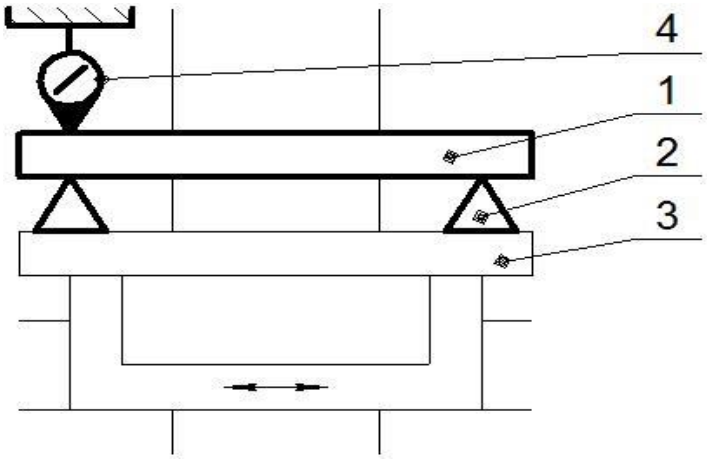


Рис. 4.15. Схема измерения

Допуск:16 мкм на дине 400 мм.

Проведение измерения

Суппорт установить в среднее положение в вертикальной плоскости.

Поверочную линейку 1 установить на опорах 2 на середине перемещаемого стола 3 вдоль направления его перемещения так, чтобы расстояния от плоскости стола до рабочей поверхности линейки у ее концов были равны. Головку 4 установить на неподвижной части станка так, чтобы ее измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей. Стол с линейкой перемещать на

заданную длину хода. Отклонение от параллельности проверяемой поверхности горизонтального стола траектории его продольного перемещения равно наибольшей алгебраической разности показаний головки на всей длине хода. В этом случае результаты измерения будут включать в себя отклонение от прямолинейности и параллельности траектории перемещения.

Параллельность рабочей поверхности горизонтального стола траектории перемещения корпуса горизонтального шпинделя

Средства измерения: линейка поверочная ЛЧ-0-320, головка 2 ИГ.

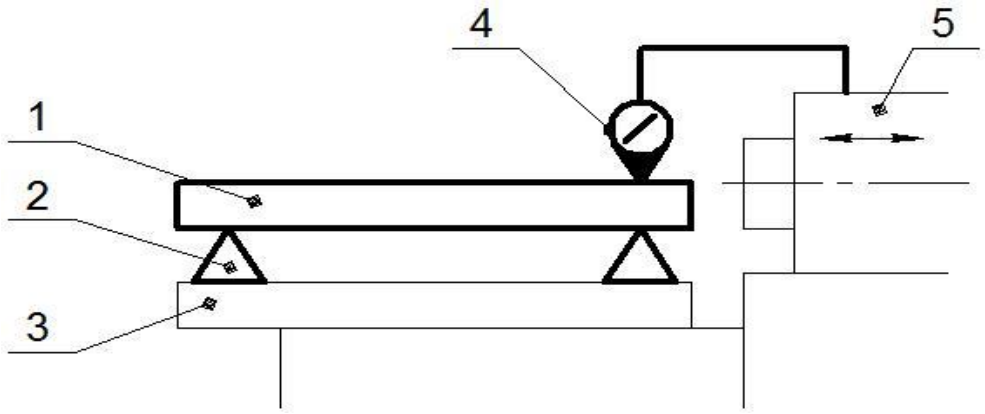


Рис. 4.16. Схема измерения

Допуск:12мкм. Наклон верхней кромки стола в сторону от станины не допускается.

Проведение измерения

Горизонтальный стол установить в среднее положение в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Поверочную линейку 1 установить на опорах 2 на проверяемую поверхность горизонтального стола 3 вдоль направления перемещения корпуса горизонтального шпинделя так, чтобы расстояния от плоскости стола до рабочей поверхности линейки у ее концов были равны. Головку 4 установить на корпус горизонтального шпинделя 5 так, чтобы ее измерительный наконечник касался рабочей поверхности линейки и был перпендикулярен ей.

Корпус горизонтального шпинделя перемещать на всю длину хода. Отклонение от параллельности проверяемой поверхности горизонтального стола траектории перемещения корпуса горизонтального

шпинделя равно наибольшей алгебраической разности показаний головки на длине хода. В этом случае результаты измерения будут включать в себя отклонение от прямолинейности и параллельности траектории перемещения.

Параллельность боковых сторон направляющего паза вертикального стола и горизонтального стола траектории продольного перемещения

Средства измерения: индикатор мод. V253 фирма «TESA» (Швейцария), цена деления 2 мкм.

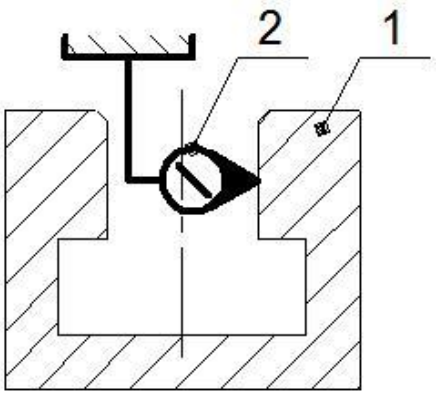


Рис. 4.17. Схема измерения

Допуск:16 мкм на дине 400 мм.

Проведение измерения

Индикатор 2 установить на корпусе горизонтального шпинделя так, чтобы его измерительный наконечник касался проверяемой поверхности. Стол 1 перемещают на заданную длину. Параллельность измеряют по обеим боковым сторонам направляющего паза стола. Отклонение от параллельности траектории перемещения равно наибольшей алгебраической разности показаний индикатора на всей длине перемещения. Примечание. Для вертикального стола допускается проверять только нижнюю сторону паза.

Радиальное биение конического отверстия шпинделя:

1) горизонтального:

– у торца шпинделя;

– на длине 150 мм от торца шпинделя;

2) вертикального:

– у торца шпинделя;

– на длине 150 мм от торца шпинделя.

Средства измерения: головка 1 ИГ, оправка специальная контрольная цилиндрическая с радиальным биением не более 0,001 мм.

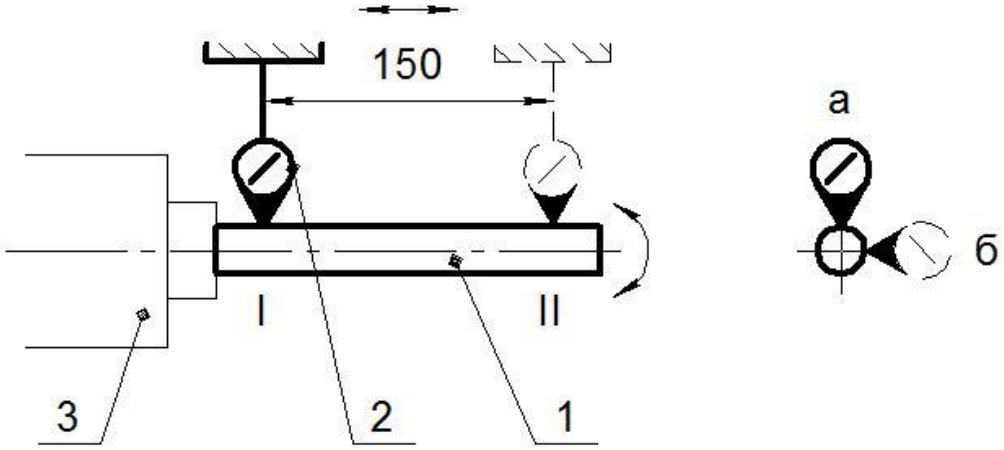


Рис. 4.18. Схема измерения

Допуск: 1) 6 мкм – 10 мкм; 2) 6 мкм – 10 мкм.

Проведение измерения

В коническое отверстие шпинделя 3 установить контрольную оправку 1. Головку 2 установить на неподвижной части станка так, чтобы ее измерительный наконечник касался образующей контрольной оправки и был перпендикулярен ее оси. При измерении шпиндель поворачивать не менее чем на два оборота. Для исключения из результатов измерения влияния неправильной посадки хвостовика контрольной оправки в отверстии шпинделя измерения в сечениях I и II проводить четыре раза. После каждого измерения оправку поворачивать вокруг оси вращения на 90°. При каждом измерении фиксировать показания головки с плоскостью а и б, по которым определяют наибольшую алгебраическую разность.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите виды испытаний промышленных роботов.

2. Какие требования предъявляются к условиям проведения испытаний промышленных роботов?

3. Какие параметры измеряются при проведении испытаний промышленных роботов?

4. Какие параметры измеряются при проведении испытаний мехатронных систем?

5. Какие средства измерения используются при проведении испытаний роботов и мехатронных систем?

6. Как проверяют погрешность позиционирования робота?

7. Как проверяют жесткость конструкции робота?

8. Как проверяют грузоподъемность робота?

9. Как проверяют быстродействие робота?

10. Как проверяют проходимость мобильных роботов?

11. Как оценивается неравномерность движения узлов робота?

12. Как измеряются динамические характеристики робота?

13. Назовите особенности испытаний мехатронных систем.

14. Чем обусловлены ошибки в мехатронных модулях движения?

15. Назовите методы определения ошибок мехатронного модуля движения.

16.Назовите методы диагностирования мехатронных и робототехнических систем.

17. Какова роль моделирования в диагностике мехатронных и робототехнических систем?

18. Приведите структурную схему модели исполнительной системы робота.

19. Назовите основную задачу технического диагностирования.

20. Приведите информационную структуру системы поддержания работоспособности объекта.

21. Какие датчики используются при диагностировании механизмов?

22. Назовите зоны работоспособности диагностируемой системы.

23. Приведите пример схемы определения параметра точности металлорежущего станка.

Глава 5. ЭКСПЛУАТАЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

5.1. Эксплуатация роботов в производственных системах

Промышленные роботы могут быть эффективно применены в условиях производства с различной серийностью для автоматизации вспомогательных и основных технологических операций.

Массовое производство с постоянным объектом выпуска предполагает применение высокопроизводительного специального основного технологического оборудования, объединенного автоматическими транспортно-загрузочными механизмами периодического действия, что в комплексе представляет собой автоматические линии. При создании таких линий стремятся обеспечить минимальный цикл работы. Жесткие автоматические линии отличаются высокой производительностью и широко применяются в подшипниковой промышленности, автомобилестроении, тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, производстве изделий бытовой техники и т. д. Так как эти линии нельзя использовать при смене объекта производства, то они должны окупаться за период эксплуатации. Главные требования, предъявляемые к основному и вспомогательному оборудованию, - высокая производительность и надежность при длительной эксплуатации и высокий уровень автоматизации выполняемых операций. Надежность и ресурс основного технологического оборудования, вспомогательных устройств и средств автоматизации ограничены сроком выпуска массовой продукции. Средства автоматизации не обязательно должны быть переналаживаемыми и функционально взаимозаменяемыми, что определяет сравнительную простоту их конструкций.

Однако и в массовом производстве возрастающие темпы технического прогресса обусловливают сравнительно частое изменение конструкций и свойств выпускаемых изделий, что, в свою очередь, вызывает необходимость в переналадке или изменении структуры действующей автоматической линии, замене оборудования и средств автоматизации и т. д. Таким образом, срок эксплуатации жесткой автомати-

ческой линии, ориентированной на выпуск конкретной продукции, сокращается. Это вызывает необходимость широкого применения ПР в массовом производстве.

Применение ПР различного функционального назначения позволяет быстро комплектовать комплексные автоматические линии, в состав которых входит разнородное технологическое оборудование, исключает необходимость создания в каждом конкретном случае специальных транспортных средств, позволяет быстро переналаживать автоматические линии, а также комплектовать и пускать их в эксплуатацию в более сжатые сроки.

Крупносерийное производство характеризуется ограниченным сроком морального старения выпускаемого изделия. Подготовка такого производства должна осуществляться в короткие сроки, так как выпускаемая продукция изготовляется в течение ограниченного времени. Основные требования, предъявляемые к основному и вспомогательному оборудованию, - высокая производительность, надежность, переналаживаемость и возможность перекомпоновки сравнительно легкими способами. Снижение стоимости подготовки производства и себестоимости продукции прямо зависит от соблюдения этих условий.

Перечисленным требованиям вполне удовлетворяет автоматическое и полуавтоматическое обрабатывающее оборудование (прежде всего агрегатные станки и станки с ЧПУ), которое с помощью ПР можно объединить в автоматические линии с гибкой связью. Объединение ПР с высокоавтоматизированным оборудованием в предметные робототехнические комплексы позволит решить задачу создания комплексно-автоматизированных участков и линий с гибкой связью, обеспечить их переналадку, а при необходимости - изменение структуры и переукомплектование.

Среднесерийное многономенклатурное производство характеризуется частой сменой и повторяемостью партий выпускаемых изделий, а также небольшой длительностью выпуска деталей одного типа (от двух-трех смен до нескольких недель). Проблема комплексной автоматизации среднесерийного многономенклатурного производства наибо-

лее эффективно может быть решена на основе создания типовых роботизированных комплексов (РК) различного технологического назначения, в которых ПР осуществляет единичное или групповое обслуживание оборудования (роботизированных позиций). Такие РК должны обеспечивать выполнение наиболее распространенных в машиностроении операций, включая заготовительные и сборочные. Конструктивно-технологические параметры РК должны быть таковы, чтобы можно было объединять их в гибкие производственные системы, построенные на основе методов групповой технологии. Разработка типовых РК для обработки наиболее распространенных деталей машиностроения и выполнения широкой номенклатуры операций позволяет комплектовать автоматизированные участки производства и автоматические линии различных типов, создавая сложные производственные системы, дифференцированные по назначению, составу выполняемых операций и уровню автоматизации процессов обработки и управления.

Мелкосерийное производство, требующее переналадки за время смены, высоких производительности труда и степени автоматизации производственных процессов, находится в настоящее время на наиболее низком уровне. Повышение технико-экономических показателей этого производства предполагается путем широкого применения оборудования с ЧПУ, которое должно быть объединено в участки либо по функциональному признаку (однородные станки), либо по технологическому принципу (обеспечение последовательного технологического маршрута обработки). Перспективно применение РК на основе многооперационных станков с ЧПУ с высоким уровнем концентрации и совмещения операций. Методы групповой технологии позволяют и в мелкосерийном производстве в ряде случаев организовать обработку укрупненных партий однотипных деталей. Основной структурной единицей автоматизированных гибких производственных систем и при мелкосерийном производстве должны стать РК оборудование - робот, программируемые по первой детали методом обучения; такое решение обеспечит рентабельность обработки деталей с партией запуска *5-10 шт.*

Структура. Понятие роботизированная технологическая система (РТС) распространяется на все структурные производственные подразделения, в состав которых в качестве средств автоматизации входят ПР, в том числе на роботизированные комплексы, участки, линии и цехи. Роботизированный комплекс (РК) является основной структурной единицей РТС любой сложности. РК - автономно действующая совокупность технологических средств производства, включающая набор основного технологического и вспомогательного оборудования (в том числе один или несколько ПР, которые выполняют технологические или вспомогательные операции) и обеспечивающая полностью автоматизированный цикл работы внутри комплекса и связь его с входными и выходными потоками остального производства. Необходимо различать роботизированные технологические комплексы (РТК), где ПР выполняет вспомогательные операции типа "взять - перенести - положить", и роботизированные производственные комплексы (РПК), где ПР выполняет основные операции технологического процесса (сборку, сварку, окраску и т. п.). РК может быть образован на основе одного ПР, обеспечивающего индивидуальное или групповое обслуживание состыкованного с ним оборудования или законченный цикл обработки изделия (например, сварки) на одной роботизированной позиции, а также на базе нескольких ПР, выполняющих взаимосвязанные или взаимно дополняющие операции.

Создание гибких производственных систем с применением ПР требует решения комплекса задач, связанных с размещением оборудования и (если это требуется) его модернизации для стыковки с ПР, с выбором ПР и других транспортных средств, а также вспомогательных устройств, с выбором или разработкой средств контроля, информации и управления и т. п. Любая сложная производственная система представляет собой совокупность объектов, связанных причинно-следственной зависимостью так, что их функции, производимые ими действия и выполняемые над ними операции должны приводить к выпуску продукции определенного качества в надлежащем количестве и за установленное время. Оптимальная система отличается максимальной

производительностью при минимальных затратах. В условиях среднесерийного многономенклатурного производства оптимальными могут быть только гибкие производственные системы, обладающие свойством относительной адаптации - способностью приспосабливаться к изменениям внутри и вне системы, сохраняя при этом производительность, близкую к максимальной.

По структуре каждую производственную систему можно представить как совокупность основных компонентов.

Подсистема обработки (формообразования) деталей включает в себя серийные или специально разработанные модели основного технологического оборудования, целесообразность применения которых определяется требованиями конкретного производственного процесса, уровнем концентрации и совмещения операций и требуемой степенью автоматизации переходов обработки. В ряде случаев комплектуется ПР, выполняющими основные технологические операции.

Подсистема потока (транспортирования) деталей осуществляет складирование, внутрицеховое и межстаночное транспортирование деталей и заготовок, а также установку, снятие, переориентацию (если потребуется) и фиксацию деталей при обслуживании основного технологического оборудования.

В состав подсистемы потока деталей (заготовок) входят автоматизированные склады, роботы различных конструкций, конвейеры, тележки и другие средства автоматизации транспортно-складских операций. При выборе или разработке транспортных средств необходимо согласовывать их действия с общезаводскими и цеховыми средствами транспортирования заготовок, полуфабрикатов и готовых деталей; правильно выбирать тип и емкость накопительных устройств, комплектующих РК, а также способ ориентации, комплектации и фиксации заготовок (деталей) на начальной позиции РК.

Подсистема потока инструмента и приспособлений обеспечивает комплектацию, наладку, доставку и смену вспомогательной оснастки и приспособлений, формообразующего и измерительного инструмента в подсистемах обработки и контроля, а также захватных устройств и инструмента, для ПР. При создании автоматизированных

участков (линий) целесообразно устанавливать на всех РК унифицированные устройства (магазины), допускающие автоматическую смену и закрепление инструментов, приспособлений и захватных устройств (для ПР). Подача инструмента, приспособлений и захватных устройств может осуществляться общей подсистемой потока деталей. При этом становится возможным комплектовать запускаемую партию заготовок набором приспособлений и инструментов, необходимых для ее обработки. Установка инструментов в унифицированных по форме и размерам оправках (блоках) позволяет применять ПР, обслуживающие поток деталей, для выполнения операций смены инструмента на станках.

Подсистема контроля качества продукции предназначена для контроля производства с целью получения заданных показателей качества.

Подсистема управления и информации осуществляет управление и взаимосвязь между основным и вспомогательным оборудованием, транспортно-загрузочными устройствами и складом; контроль и диагностику работы оборудования, в том числе фиксацию отказов и простоев; сбор и распределение информации о местонахождении партий заготовок и деталей, а также о степени укомплектования оснасткой, приспособлениями, формообразующим и мерительным инструментом; расчет последовательности обработки партий деталей на станках; учет изделий, заготовок, полуфабрикатов, материалов, комплектующих изделий и узлов, а также оперативную оценку степени заполнения склада; выдачу информации диспетчеру и прочие операции, связанные с планированием, организацией производства и управлением другими подсистемами.

Вспомогательная подсистема поддерживает работоспособность сложной производственной системы в целом. В ее функции входят обеспечение энергопотока, уборка отходов производства, материальное обеспечение и т. д.

Перечисленные подсистемы взаимосвязаны, поэтому конкретное организационное и конструктивно-технологическое решение по одной из них предъявляет, как правило, определенные требования к остальным. Таким образом, создаются сложные производственные системы,

различающиеся назначением, сложностью структуры, степенью автоматизации основных и вспомогательных операций и управления, дифференцированные по уровню организации причинно-следственных зависимостей внутри подсистем и между ними.

Так как основная цель - экономия рабочей силы и повышение производительности труда, т. е. увеличение объема выпускаемой продукции, приходящейся на одного работника, то характер и степень автоматизации должны быть оправданы экономически и в то же время должна быть продемонстрирована возможность наращивания и совершенствования всего комплекса в целом.

При создании автоматизированных участков и производств для их постепенного превращения в оптимальные гибкие производственные системы, характеризующиеся постоянным снижением участия человека в их работе и управлении, необходимо обеспечить работоспособность и надежность; возможность стыковки оборудования различного технологического назначения и широкого варьирования транспортно-загрузочных схем; гибкость и возможность наращивания функций подсистемы управления и информации; обеспечение адаптации производственного комплекса к изменению условий производства; возможность совершенствования и расширения автоматизированного участка.

Применительно к структуре участка эти показатели могут быть обеспечены агрегатно-модульным построением его основных функциональных подсистем (обработки, транспортирования) и иерархической системой управления и информации. Необходимая гибкость транспортно-загрузочных схем может быть достигнута применением роботизированных комплексов, которые могут рассматриваться как основные структурные единицы при агрегатном построении автоматизированных участков.

Основой агрегатного построения, как известно, является наличие определенных структурных единиц, способных состыковываться между собой с помощью связующих звеньев. Применительно к участкам связующими звеньями таких единиц должны служить подсистема управления и информации, транспортно-складская система, система

автоматической переналадки (если она имеется). Связь между станком и ПР может носить индивидуальный характер ввиду возможного разнообразия обслуживаемого оборудования. Обеспечение индивидуальных связей внутри РК достигается применением ПР. Для возможности стыковки РК между собой требуется унификация их приемных позиций, транспортных тар, спутников, конструктивных элементов устройств непрерывного транспортирования, выходных элементов систем управления и информации.

Состав и структура РТС определяются содержанием производственного процесса, который формируется на основе следующих показателей: конструктивно-технологических параметров детали (или номенклатуры деталей); заданной годовой программы выпуска; состава технологического оборудования; организации подсистем обработки, потока деталей и инструмента, контроля качества продукции, управления и информации, а также вспомогательной подсистемы, включающей службы ремонта и техники безопасности. На рис. 5.1 показан характер внутренних связей между основными составляющими производственного процесса.

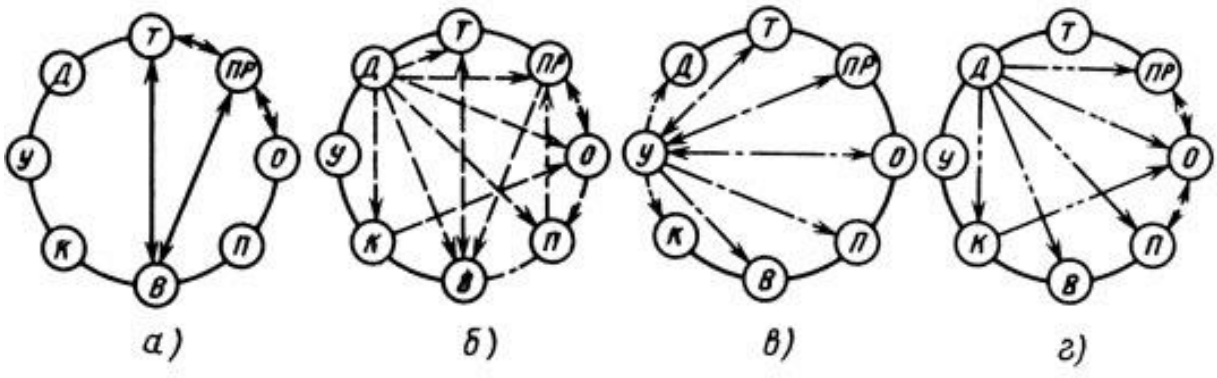


Рис. 5.1. Внутренние связи между основными составляющими элементами производственного процесса в роботизированной производственной системе: *а - планировочные; б - конструктивные; в - информационные; г - технологические; О - технологическое оборудование; ПР - промышленный робот; Д - деталь; П - оснастка технологического оборудования (приспособления и устройства для базирования и закрепления детали); В - вспомогательное оборудование комплекса для подачи деталей и инструмента на загрузочные позиции, ориентации, отвода изделий и т. п (тары, ориентирующие магазины, роликовые конвейеры, питатели); К - средства контроля; У - средства управления; Т - входные и выходные транспортные связи комплекса*

В зависимости от назначения РК, состава комплектующего оборудования и характера организации производства задачи, связанные с созданием комплексов, могут быть различными. На рис. 5.2 приведен пример организации РТК станок - робот.

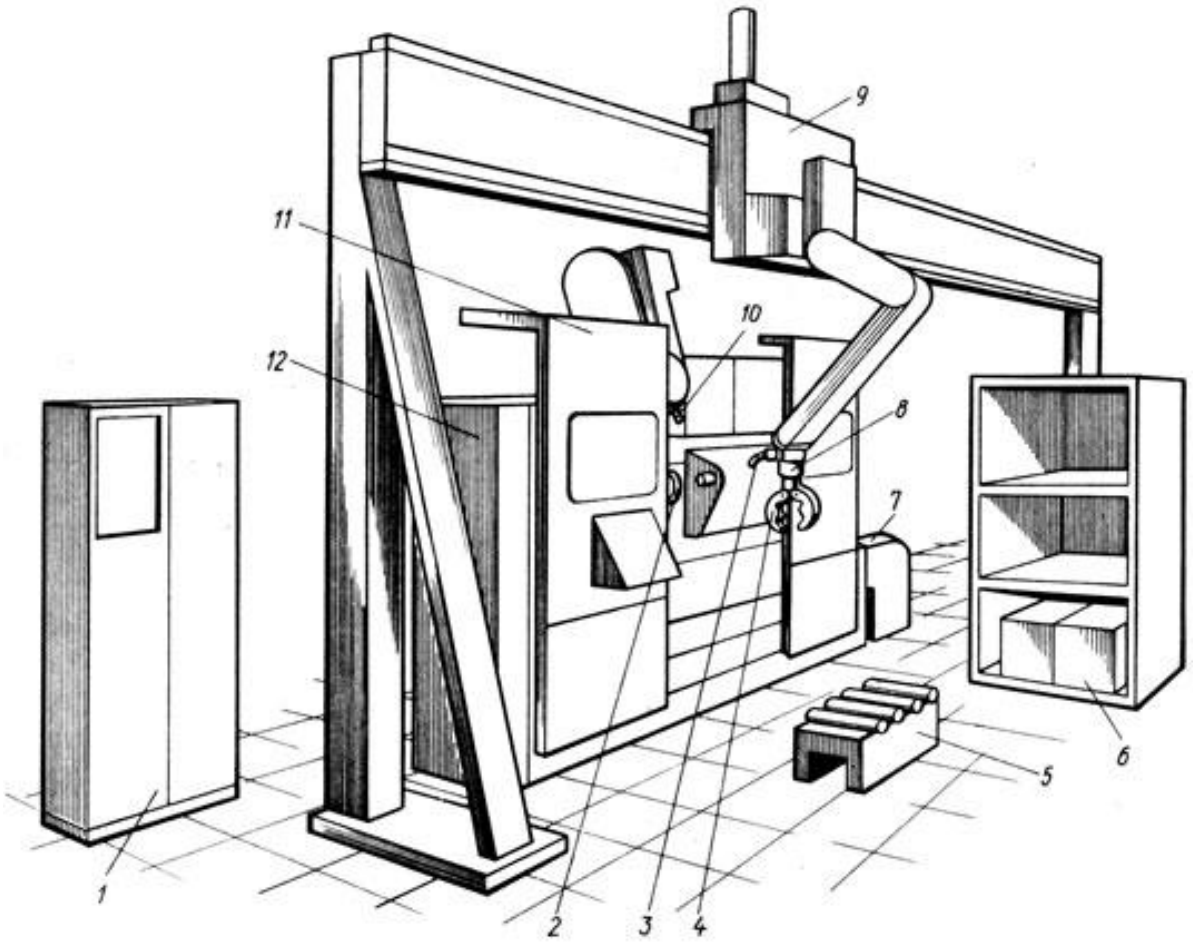


Рис. 5.2. Структура роботизированного технологического комплекса станок робот:
1 - блок управления роботом и станком; 2 - автоматические зажимные и базирующие приспособления станка; 3 - устройство очистки баз деталей и зажимных приспособлений станка от грязи и стружки; 4 - захватное устройство робота, оснащенное средствами опознавания заготовок, контроля их размеров и правильности установки заготовок в рабочей зоне станка; 5 - переналаживаемые -ориентирующие магазины для деталей; 6 - ячейки автоматизированного склада; 7 - конвейер для уборки стружки; 8 - блок автоматической смены захватных устройств; 9 - робот; 10 - головка с режущим инструментом для автоматической смены инструмента, оснащенная устройствами дробления стружки, контроля затупления и поломки инструмента; 11 - автоматизированное ограждение рабочей зоны стенка; 12 – станок

Эффективное использование средств робототехники па промышленных предприятиях в значительной мере определяется четкой организацией эксплуатации ПР. Под эксплуатацией ПР понимают совокупность действий по транспортировке, хранению, подготовке и использованию по назначению ПР, а также их техническому обслуживанию и текущему ремонту.

5.2. Эксплуатация роботов в транспортно-накопительных системах автоматизированных производств

Эффективность производственной системы в целом определяется не только качеством технологического оборудования, но и качеством процессов (подсистем), обеспечивающих производство, в частности – производственной логистикой. Завод может быть оснащен совершенными станками, но несвоевременная доставка к станку заготовок, оснастки, инструмента приведет к срыву производственного задания и снижению эффективности производственной системы.

О роли производственной логистики говорят следующие данные: на крупных европейских производственных предприятиях, в среднем 87% производственного времени затрачивается на внутрицеховую логистику, в которой задействовано 25% производственного персонала и 55% производственных площадей. В 2018 году 17% европейский фабрик уже применяли системы автоматизации внутрицеховой логистики, а к 2023 году таких предприятий будет уже 35%. На текущий момент, наиболее распространенным принципом организации производства остается конвейерная сборка и роботизированные системы внутрицеховой логистики активно внедряются для обеспечения конвейера инструментом, заготовками, сборочными единицами и т.п. Но роботизированные системы внутрицеховой логистики позволяют реализовать и новые принципы организации и управления технологическими процессами – гибкие производственные системы. Именно роботизированные транспортно-накопительные системы позволяют осуществлять прием, накопление, транспортирование, выдачу заготовок, полуфабрикатов, инструмента, технологической оснастки и готовых изделий в ГПС для обеспечения ее наиболее эффективного функционирования.

К роботизированным транспортно-накопительным системам предъявляются следующие требования:

1. *Масштабируемость.* При загрузке производственного оборудования на 35% сразу внедрять логистическую систему, способную обеспечить 100% загрузку экономически не целесообразно. Вы получите еще одну производственную систему, у которой КИМ (коэффициент использования производственных мощностей) будет далек от идеального. Поэтому система должна позволять поэтапное наращивание производительности без существенного изменения топологии цеха и, желательно, без проведения капитальных строительно-монтажных работ.

2. *Логистическая система должна быть автоматической*, т.е. не требовать участия человека-оператора и перенастраиваться под производственные задания по командам от автоматизированных систем управления производством. Адаптация к конкретному технологическому процессу, или производственному оборудованию должна осуществляться заменой оснастки. В системе должны быть предусмотрены сценарии работы как в рамках регулярного технологического процесса, так и в рамках аварийных ситуаций. Т.е. при возникновении аварийной ситуации, система должна попытаться разрешить ее без остановки технологического процесса.

3.*Способность системы строить цифровую модель технологического процесса*, которая будет использоваться вышестоящими системами управления для формирования производственного плана.

Для автоматизации внутрицеховой логистики применяются различные технические решения – от безлюдных складов до транспортных роботов для автоматизации перемещения деталей, материалов, инструмента. Наиболее универсальным решением, обладающим достаточной гибкостью для встраивания в уже существующий технологический процесс, выступат транспортные роботы – мобильные роботы, предназначенные для перемещения на своей платформе физических объектов (определение по ГОСТ Р 60.0.0.2 – 2016). Транспортные роботы можно классифицировать по функциональности:

1. Роботы-тягачи – транспортные роботы, предназначенные для транспортировки различных грузов на тележках и оснащённые специальным зацепом (штоком) для автоматического сцепления с транспортируемой тележкой (рис.5.3)



Рис. 5.3. Роботы-тягачи на линии сборки автомобилей

2. Универсальные мобильные роботы – транспортные роботы, функциональность которых определяется установленной на них оснасткой. Могут оснащаться как роботом-манипулятором, так и различной подъемной, поворотной и подъемно-поворотной оснасткой, адаптированной под определенный технологический процесс (Рис.5.4).



Рис. 5.4. Универсальные мобильные роботы

Типичным представителем этой серии является универсальный мобильный робот M100, способный перевозить 75 кг (оснастка + груз) на платформе или тянуть тележку весом до 200 кг. Типичной оснасткой для данного робота выступает рольганг с электроприводом, позволяющий подавать, или снимать с конвейера различные грузы, но могут применяться и другие виды оснастки, вплоть до установки робота-манипулятора. Особенностью универсальных мобильных роботов Geek+ является навигация SLAM, позволяющая свободно перемещаться в сложной производственной среде и объезжать возникающие препятствия, например, выставленный на маршруте движения поддон.

3. Роботы-погрузчики. Как правило, представляют из себя стандартные форклифтеры и ричтраки, оснащенные автоматической системой управления, но представлены и моделями на специально разработанной мобильной платформе (Рис.5.5). Роботы-погрузчики серии CC представляют из себя стандартные самоходные погрузчики Linde, которые оснащаются системой лазерной навигации. Система управления позволяет роботам-погрузчикам работать в помещениях с людьми, перемещать паллеты и другие грузы, и размещать их на стеллажах с высокой точностью (+10 мм). В модельной линейке представлены как роботы - форклифтеры, так и роботы-ричтраки, грузоподъемностью до 2-х тонн и высотой подъема до 2,9 метра.

4.



Рис. 5.5. Робот-погрузчик

Компания Casun также производит робот-паллетоперевозчик CA-BY1000 на специально разработанной компактной мобильной платформе. Робот оснащен системами лазерной и инерциальной навигации и, несмотря на компактные размеры, сравнимые с ручной гидравлической тележкой, может транспортировать грузы на паллетах весом до 1000 кг.

4. Специализированные роботы – транспортные роботы, специально разработанные под определенный технологический процесс.

Любое производство уникально, поэтому, несмотря на широкую номенклатуру транспортных роботов, производимых серийно, существует потребность в роботах, специально разработанных под определенный технологический процесс. Компания Casun производит специализированные роботы для электронной промышленности (доставка компонентов на линии монтажа печатных плат), автомобильной промышленности (транспортный робот большой грузоподъемности для сборочной линии) и других отраслей промышленности. Для создания специальных транспортных роботов используется модульная платформа, хотя некоторые модели разрабатываются под задачу клиента с нуля. Нужно понимать, что транспортные роботы являются частью роботизированной системы, ее исполнительными устройствами, которая также включает в себя автоматизированную систему управления роботизированной системой (АСУ), подсистему передачи данных, станции заряда АКБ роботов, элементы системы позиционирования (магнитные ленты, QR-code, отражатели для лазерных датчиков).

Внутрицеховые склады являются неотъемлемой частью внутрицеховой логистики и служат для обеспечения производственного технологического процесса комплектующими, инструментом и оснасткой, а также хранения готовой продукции и незавершенного производства. Автоматические склады позволяют осуществлять адресное хранение и выдачу единиц хранения, обеспечивая высокую плотность хранения, скорость и точность загрузки/выгрузки и могут применяться для автоматизации инструментально-раздаточных кладовых, цеховых складов материалов, деталей и сборочных единиц, а также складов готовой продукции. Но важно не только компактно хранить и быстро находить нужную единицу хранения, но и своевременно доставлять ее к соответствующему технологическому оборудованию, поэтому воз-

можность и способ интеграции автоматического склада с внутрицеховой транспортной системой является значимой характеристикой автоматического склада. На рис.5.6 представлен вид горизонтального карусельного склада.

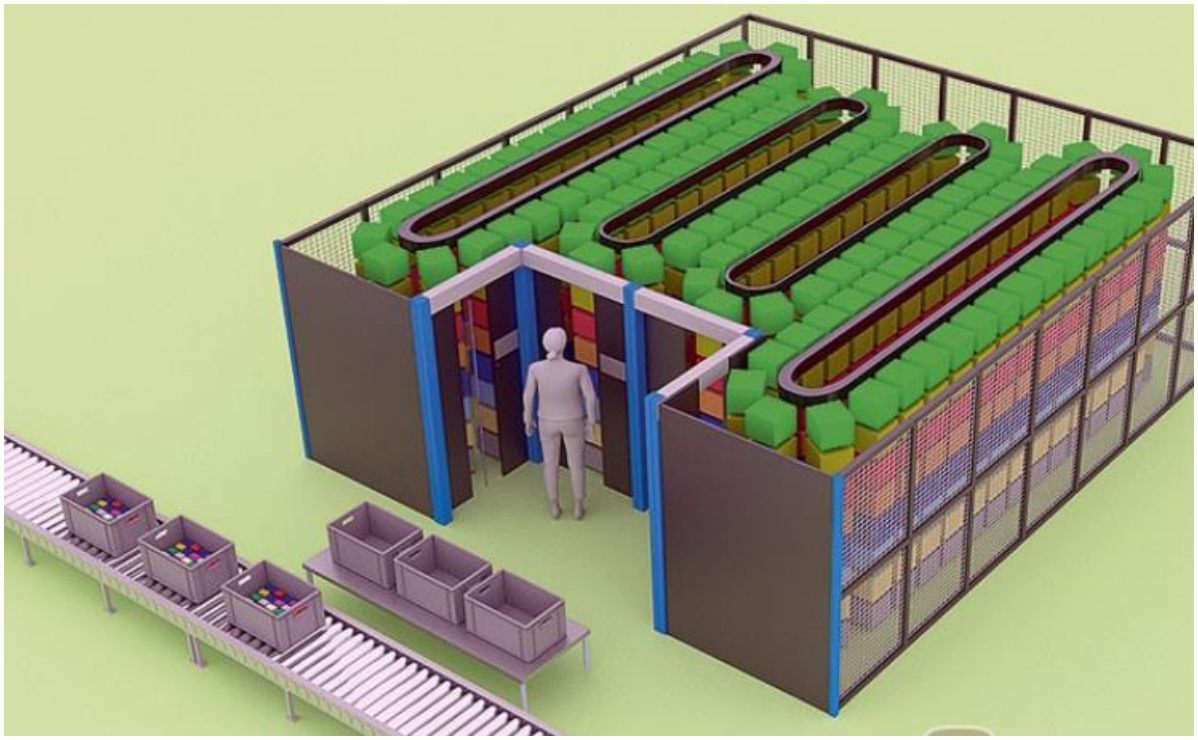


Рис. 5.6. Вид горизонтального карусельного склада

Карусельные системы предназначены для хранения и выдачи мелких единиц хранения – метизов, деталей, инструмента и оснастки и т.п. Хранение в таких системах осуществляется в пластиковых контейнерах, размещенных на полках (вертикальная карусель), либо в ячейках стеллажей (горизонтальная карусель). Полки/стеллажи, в свою очередь закреплены на карусельном механизме, перемещающем полку/стеллаж с нужной единицей хранения к окну выдачи, одновременно перемещая остальные полки/стеллажи, либо по вертикали (вертикальная карусель), либо по горизонтали (горизонтальная карусель). Автоматическая выгрузка единиц хранения в таких системах не предусмотрена, поэтому интеграция с внутрицеховой роботизированной транспортной системой затруднительна, но может осуществляться с участием человека, перекладывающего единицы хранения на транспортный робот.

Лифтовые системы предназначены для хранения и выдачи единиц хранения как в лотках, так и на паллетах и полках (длинномеры и плитные материалы). Единицы хранения размещаются и подаются к окну выдачи на полках стеллажей (несущие полки) с помощью экстрактора - подъемного механизма (лифта), оснащенного специальными захватами для полок. В отличии от карусельных систем хранения нужная полка подается к окну выдачи без перемещения других полок. Лифтовые системы получили широкое распространение на предприятиях машиностроения, для хранения металлических листов, труб, профиля. Хранение длинномеров и плитных материалов осуществляется в кассетах – специальных несущих полках. Некоторые модели лифтовых систем, предназначенных для хранения грузов на поддонах, или хранения плитных материалов, могут оснащаться автоматизированными системами загрузки/выгрузки - таким образом, возможна интеграция лифтовых систем с внутрицеховой роботизированной транспортной системой.

Шаттл-системы предназначены для хранения и выдачи единиц хранения в лотках, коробах или на паллетах. Лотки, или паллеты размещаются на стеллажах, а функцию их загрузки/выгрузки выполняют грузовые автоматические тележки – шаттлы. Шаттлы перемещаются по рельсам, закрепленным на стеллажной системе, а для загрузки/выгрузки лотков (паллет) применяется специальный механизм, закрепленный на шаттле – экстрактор. Шаттл-системы обладают высокой эффективностью – шаттл оперирует одним поддоном, или лотком/коробом, в отличии от карусельных или лифтовых систем, оперирующих полками, или целыми стеллажами, что не требует выполнять дополнительную операцию – отбор с полки/стеллажа нужного груза и обеспечивает хорошую возможность интеграции с транспортными роботами. Кроме того, шаттлы перемещаются с высокой скоростью – до 5 м/с, обеспечивающую высокую производительность системы.

В качестве альтернативы лифтовым и карусельным система хранения может применяться **роботизированный склад**, широко применяемый для комплектации заказов на складах интернет-магазинов. В данном решении, хранение осуществляется в ячейках мобильных стеллажей, а загрузка/выгрузка на станциях комплектации (Рис.5.7).



Рис. 5.7. Склад с роботом-штабелером

Перемещение стеллажей осуществляется мобильными роботами P-серии. Конфигурация мобильных стеллажей позволяет организовать как мелкоячеистое хранение, так и хранение крупногабаритных грузов на поддонах. Грузоподъемность мобильных роботов – до 1000 кг. Интеграция с транспортной внутрицеховой системой, для грузов, размещаемых в ячейках стеллажей, осуществляется с участием человека, перекладывающего на станции комплектации грузы из ячеек стеллажей на транспортные роботы, а для грузов, размещаемых на поддонах, может осуществляться автоматическая интеграция.

Еще одним решением для организации роботизированного склада являются роботы-погрузчики, описанные в предыдущей статье, посвященной внутрицеховым роботизированным транспортным системам РТНС. Такие роботы могут применяться для размещения на хранение и выдачу с хранения крупногабаритных грузов как на поддонах, так и с применением других видов тары. Стоит отметить, что роботы, применяемые в составе роботизированного склада, могут выполнять и функцию внутрицехового транспорта, доставляя единицы хранения к основному технологическому оборудованию.

5.3. Техническое обслуживание мехатронных и робототехнических систем

Эффективное использование мехатронных и робототехнических в значительной мере определяется четкой организацией их эксплуатации. Под эксплуатацией понимают совокупность действий по транспортировке, хранению, подготовке и использованию по назначению технических средств, а также их техническому обслуживанию и текущему ремонту. Сегодня мехатронные модули и системы находят широкое применение в следующих областях:

- станкостроение и оборудование для автоматизации технологических процессов;
- робототехника (промышленная и специальная);
- авиационная, космическая и военная техника;
- автомобилестроение (например, антиблокировочные системы тормозов, системы стабилизации движения автомобиля и автоматической парковки);
- нетрадиционные транспортные средства (электровелосипеды, грузовые тележки, электророллеры, инвалидные коляски);
- офисная техника (например, копировальные и факсимильные аппараты);
- элементы вычислительной техники (например, принтеры, плоттеры, дисководы);
- медицинское оборудование (реабилитационное, клиническое, сервисное);
- бытовая техника (стиральные, швейные, посудомоечные и другие машины);
- микромашины (для медицины, биотехнологии, средств связи и телекоммуникации);
- контрольно-измерительные устройства и машины;
- фото- и видеотехника;
- тренажеры для подготовки пилотов и операторов;
- шоу-индустрия (системы звукового и светового оформления) и др.

Очевидно, что для каждой из перечисленных областей присуще свои специфические особенности эксплуатации мехатронных модулей и систем. В тоже время можно выделить некоторые общие положения

эксплуатации и обслуживания рассматриваемых мехатронных и робототехнических систем.

Техническое обслуживание (ТО) – это комплекс организационно-технических мероприятий, обеспечивающих поддержание исправности и работоспособности ПР при подготовке и использовании их по прямому назначению. ТО является одним из этапов технической эксплуатации, главная задача которого–поддержание надежности работы изделия. Эта задача решается путем выбора оптимальной периодичности профилактических работ и быстрого восстановления его работоспособности для обеспечения требуемой вероятности исправной работы в произвольный момент времени. Не менее важной задачей ТО является организация и проведение технических мероприятий, благодаря которым параметры и характеристики изделия в течение всего периода эксплуатации будут находиться в требуемых по техническим условиям (ТУ) пределах. Профилактические работы занимают особое место в системе ТО и направлены на предупреждение преждевременного изнашивания, повреждений и отказов. Отказы предупреждают регулированием параметров элементов в пределах предусмотренного при проектировании диапазона, а также заменой элементов, у которых износ или рабочие характеристики близки к предельно допустимым. Конечная цель профилактики – окончательное исключение ремонта или выполнение его только при повреждениях, полученных в результате аварии.

При проведении профилактических работ с целью уточнения объема ремонта определяют техническое состояние ПР. Для этого производят контрольные замеры параметров и сравнение их с номинальными значениями, указанными в формуляре или в инструкции по эксплуатации. При несоответствии хотя бы одного из параметров номинальному значению ПР считается неисправным. В этом случае определяют причину неисправности и принимают меры для ее устранения. Объем планового ТО определяется при проектировании изделия и уточняется в период эксплуатации. Объем непланового (текущего) ТО определить заранее невозможно. Поэтому сокращение общей трудоемкости ТО достигается более тщательным выполнением профилактических работ и выбором их оптимальной периодичности. Это, в свою очередь, снижает вероятность появления повреждений и отказов, а значит уменьшает трудоемкость непланового ТО и затраты на него. Однако следует помнить, что основные материальные затраты на ТО

определяются необходимостью содержания высококвалифицированных специалистов.

Для сокращения затрат на ТО, составляющих основную часть эксплуатационных расходов, в современных автоматизированных системах предусматривается встроенная система автоматизированного контроля, которая может не только обнаружить отказы, но и выявить их причины. Такая система контроля позволяет оценить правильность функционирования и техническое состояние изделия в любой момент времени при участии менее квалифицированного персонала.

В перечень работ по ТО входят осмотр, контроль технического состояния ПР и системы управления, чистка, промывка и смазка узлов ПР, регулировка его отдельных систем, замена отдельных износившихся деталей и вышедших из строя элементов системы управления, чистка контактов элементов системы управления, проверка и наладка приводов и системы управления, а также работы по устранению неисправностей.

В комплекс работ по ежедневному обслуживанию входят проверки: визуальная; отсутствия вибрации ПР и отдельных его элементов; уровня шума механизмов ПР и мехатронных модулей; отсутствия нагрева подшипников; показаний манометров гидросистем; работы смазочных систем по маслоуказателям; отсутствия ударов в механизмах ПР и системах; плавности перемещения исполнительных механизмов и отсутствия рывков при реверсировании; отсутствия утечки масла; наличия и исправности защитных устройств, предохранительных щитков и кожухов; надежности захватных устройств, индикации и сигнализации системы управления. Помимо проверок оператор ежедневно протирает и очищает ПР, смазывает места и механизмы, требующие ежедневной смазки.

Одним из признаков изношенности подвижных сопрягаемых и вращающихся деталей в мехатронных модулях движения и ПР является наличие в масле продуктов износа. Интенсивность нарастания содержания металла в масле в функции времени характеризует скорость износа сопряженных деталей. Для определения этой зависимости через равные промежутки времени из гидросистемы ПР отбирают пробы масла' и определяют концентрацию металла в них. По данным измерения определяется степень износа. На практике для определения состава масла наиболее часто применяют спектрометр МФС-3, спектрограф

ИСП-30, а также фотоколориметр ФЭК-М. При отсутствии специальной аппаратуры чистота масла проверяется по цвету и форм пятна от капли масла, наносимого на фильтровальную бумагу. Черный цвет пятна указывает на недопустимое количество механических примесей. Измерение давления, расхода и утечек рабочей жидкости наиболее часто выполняется при диагностирований гидропривода ПР. Снижение давления и расхода рабочей жидкости в гидросистеме свидетельствует об износе деталей насоса, повышенных утечках жидкости и неправильной регулировке гидропривода. Признаком нарушения нормальной работы гидропривода может быть и повышенное давление. Давление в гидросистемах контролируется различными типами манометров и преобразователей давления. Серийно выпускаются пьезоэлектрические преобразователи ЛХ600, ЛХ604, ЛХ608 и др. При стендовых испытание их применяют манометры М1М, в которых измеряемое давление рабочей жидкости преобразуется в пропорциональный по величине электрический ток, подводимый к электрическому показывающему или регистрирующему прибору. Для измерения подачи рабочей жидкости применяют расходомеры, основанные на эффекте Кармана, а также струйные, электромагнитные, ультразвуковые, тахометрические и др. Диагностирование систем управления ПР осуществляется по параметрам сигналов в контрольных точках электрических схем либо по периодическим проверкам функционирования с помощью специальных тестовых программ.

В организации технического обслуживания ПР важное место занимает обеспечение техники безопасности. При неправильном использовании и обслуживании роботы могут представлять опасность для работающих в том же помещении людей и оборудования. Установлено, что при регулярном техническом обслуживании роботы отличаются высокой степенью безопасности. Техническое обслуживание позволяет обнаружить незначительные повреждения, которые могут привести к несчастному случаю. Например, при малейшем повреждении гидравлического шланга может произойти утечка рабочей жидкости в виде струи высокого напора, которая может травмировать находящихся поблизости рабочих, если они не защищены в соответствии с требованиями технической безопасности. Могут возникнуть и более серьезные осложнения, приводящие к отказу комплекса, если допуска-

ется корродирование деталей системы управления. Даже при техническом обслуживании не исключается вероятность повреждений. В целях повышения безопасности применяют чувствительный к давлению настил, отключающий робот, если в его рабочую зону входит человек. Иногда вокруг ПР развешиваются тонкие пластиковые ленты, выполняющие роль занавеса и затрудняющие доступ к роботу. Для предотвращения опасных ситуаций используют щиты, ограждения, аварийные сигналы и предусматривают отключение самого робота. С этой же целью роботы оснащаются чувствительными устройствами, обнаруживающими факт нарушения границы зоны обслуживания, после чего следует запрет на любые действия ПР. Иногда рука робота жестко фиксируется в определенном положении механическим приспособлением. Это повышает безопасность в тех случаях, когда рабочий находится в рабочей зоне ПР, выполняя его техническое обслуживание.

5.4. Эксплуатация мехатронных и робототехнических систем

К эксплуатации мехатронных систем, ПР и созданных на их основе РТК может допускаться только персонал, прошедший специальное обучение по безопасному обслуживанию со сдачей экзамена специальной комиссии. Перед допуском на обслуживание РТК персонал должен получить вводный инструктаж, а в процессе работы строго руководствоваться инструкцией по безопасности труда. Вводный инструктаж проводится для ознакомления со специфическими особенностями данного производства, включая потенциально опасные участки, которые могут проявиться при нарушении требований безопасности труда. Обращается особое внимание на возможность появления опасностей при выполнении технологического процесса, на опасные зоны работающего оборудования, оградительные устройства и правила пользования ими, на необходимость перед началом работы убедиться в исправности и нормальном функционировании оборудования. Инструктаж должен сопровождаться показом безопасных методов и приемов работы. При изменении технологического процесса работы оборудования или в других случаях изменения условий труда для обслуживающего персонала должен проводиться внеочередной инструктаж.

Эксплуатация ПР и РТК должна проводиться в строгом соответствии с эксплуатационной документацией. Согласно ГОСТ 2.601–2013 эксплуатационными называются документы, предназначенные для

изучения изделия и правил его эксплуатации. В комплект эксплуатационных документов входят: техническое описание; инструкция по эксплуатации; инструкция по ТО; инструкция по монтажу, пуску, регулированию и обкатке на месте применения (сокращенно инструкция по монтажу); формуляр или паспорт; ведомости одиночного, ремонтного и группового комплектов ЗИПа; ведомость эксплуатационных документов. Техническое описание и инструкция по эксплуатации объединяются в один документ и предназначаются для следующих целей: изучения конструкции, принципа действия и правил эксплуатации ПР; изучения правил техники безопасности; руководства при обнаружении и устранении неисправностей и отказов; руководства при регулировочных и наладочных работах силами обслуживающего персонала; руководства при проведении ТО в процессе эксплуатации и при длительном бездействии.

В инструкции по ТО указываются меры безопасности, порядок и правила ТО для различных условии эксплуатации. Большое внимание уделяется видам ТО, их периодичности; приводится перечень основных проверок для оценки технического состояния ПР, которые следует выполнять после каждого вида ТО.

Основной раздел инструкции по монтажу содержит требования по монтажу, регулировке, наладке и вводу в действие ПР в период монтажных и наладочных работ, а также в период приемо-сдаточных испытаний. В инструкции излагаются также меры предосторожности и правила пожарной безопасности при выполнении работ, даются указания по проведению технических мероприятий при транспортировании, установке и хранении ПР на месте эксплуатации.

Формуляром называется документ, в котором приводятся гарантированные заводом-изготовителем основные параметры и технические характеристики ПР и отражаются сведения по его техническому использованию, обслуживанию и ремонту за весь период эксплуатации. Например, по мере технического использования ПР в формуляр заносятся сведения о замене и восстановлении деталей, о наработке ПР с начала эксплуатации, о моменте возникновения неисправностей и отказов. В формуляре записываются способы отыскания и устранения неисправностей и затраченное на них время. Формуляр является единственным из эксплуатационных документов, в котором отражаются все

изменения, происходящие с ПР в процессе эксплуатации. По этой причине формуляр всегда хранится совместно с изделием.

Паспорт предназначен для тех же целей, что и формуляр. Он выпускается для мехатронных и робототехнических систем, гидравлических, пневматических и электрических устройств и приборов, поставляемых по ТУ.

Ведомости ЗИПа являются документами, определяющими номенклатуру, необходимое количество, назначение и укладку запасных частей, инструмента, принадлежностей и материалов, необходимых для обеспечения и восстановления работоспособности ПР в течение всего периода эксплуатации, включая заводской средний ремонт с выводом ПР из эксплуатации.

Ведомость эксплуатационных документов содержит перечень документов с указанием мест их укладки.

Перед первоначальным включением устройства в работу обслуживающий персонал должен тщательно изучить основной эксплуатационный документ – техническое описание и инструкцию по эксплуатации. Особо внимательно необходимо изучить разделы, касающиеся пультов управления оператора и мер безопасности при эксплуатации ПР. Основными причинами возникновения аварийных ситуаций могут явиться: неправильные (непредусмотренные) движения ПР; ошибочные действия оператора при обслуживании ПР, работающего в автоматическом режиме (в том числе появление человека в рабочем пространстве ПР, ошибки в программировании и т. п.); отсутствие четкой информации оператору о ситуации в рабочей зоне ПР, параметрах движения ПР и причинах, возникающих на РТК неполадок. Таким образом, для обеспечения безопасности труда при эксплуатации ПР и РТК наряду с использованием специальных технических средств необходимо применять соответствующие приемы и методы проведения работ, а также строго соблюдать регламентированные режимы эксплуатации ПР.

Неполадки и аварийные ситуации, которые возникают в процессе эксплуатации ПР, должны ежемесячно регистрироваться оператором или наладчиком в специальном журнале.

Перед началом работы оператор должен убедиться в исправном состоянии основного и вспомогательного технологического оборудования, средств обеспечения безопасности, в отсутствии посторонних лиц и предметов в рабочем пространстве ПР.

Для обеспечения движений ПР в соответствии с требованиями технологического процесса необходимо произвести ввод программы. Непосредственному программированию предшествует разработка алгоритма функционирования управляющей программы. Этот алгоритм формируется с учетом специфики конкретного технологического процесса и оборудования. В указанном алгоритме определяется последовательность использования всей требуемой для функционирования ПР информации, включая очередность выполнения отдельных операций и длительность их реализации. Помимо этого, в алгоритме предусматривается информация, необходимая для обеспечения взаимодействия ПР с оборудованием. Особенности программирования ПР в значительной степени определяются их назначением. Так, управляющая программа ПР, выполняющего окрасочные, сварочные и другие аналогичные работы, представляет собой не разветвляемую последовательность выполняемых операций, которая запоминается в режиме обучения. Управляющая программа ПР, обслуживающего металлорежущие станки, в значительной степени определяется как его конструкцией, так и числом единиц оборудования. Управляющая программа промышленных роботов набирается непосредственно с пульта оператора путем нажатия соответствующих кнопок. Контроль правильности набора осуществляется по цифровому дисплею. Если программа набрана верно, нажимается кнопка ЗП (запись) и производится загрузка программы в ячейку ОЗУ с выбранным адресом. Ввод последующей команды производится аналогично. В робототехнике широкое используется программирование методом обучения. Процесс обучения подразделяется на следующие виды:

- обучение ПР с целью формирования кадров управляющей программы. Производится путем задания оператором рабочих движений ПР, при которых положение рабочего органа определяется показаниями датчиков положений звеньев ПР;

- обучение ПР адаптивным формам поведения. Осуществляется путем ввода алгоритмов коррекции управляющих программ при изменении внешних условий, либо ввода в память данных о положении и характеристиках объектов внешней среды.

Системы обучения следует подразделять на три класса:

А – простейший, обучение производится путем ввода в память устройства программного управления последовательности состоянии

ПР и технологических команд. Возможно наличие линейной интерполяции, средства организации адаптивной работы ПР отсутствуют. Точность рабочих движений ПР соответствует точности движения в процессе обучения. При изменении размеров или ориентации рабочего органа ПР требуется переобучение ПР;

В – расширенный, средства класса А дополняются средствами редактирования исходной формы управляющей программы, линейной, круговой (и возможно других типов) интерполяции и средствами обратного преобразования координат для ПР непрямоугольной кинематической схемы. Обучение производится путем организации движений в системе координат объектов внешней среды с использованием обратного преобразования координат. Допускается использование средств трансляции исходной формы управляющей программы в рабочую форму вне режима реального времени после окончания процесса обучения и до включения рабочего режима. Изменение размеров или ориентации рабочего органа ПР не требует переобучения ПР;

С –высший, обучение производится комбинированным методом и обеспечивает получение адаптивной управляющей программы в виде последовательности операторов и команд условных переходов в системе команд ЭВМ устройства программного управления и соответствующих структур данных, содержащих все необходимые числовые параметры и операции для выполнения рабочих движений и контрольных действий ПР с адаптацией к неизвестным параметрам рабочего процесса. Точность рабочих движений ПР соответствует точности работы его системы управления, определяемой ТУ на ПР. Использование специальных видов интерполяции, преобразований координат и трансляции обеспечивает повышение производительности обучения по сравнению с системой класса А.

Обучение с целью последующего воспроизведения роботом рабочей программы является наиболее распространенным методом управления промышленными роботами. Программирование обучением выполняется за несколько шагов:

– обучение робота в медленном режиме при ручном управлении для выполнения технологической операции и запись углов суставов робота с целью повторного воспроизведения движения;

– корректировка и воспроизведение обученного движения;

– если обученное движение правильно, робот приступает к выполнению повторяющихся операций с заданной скоростью.

Обучение робота может проводиться в системе координат сочленений **joint,** мировой системы координат **world** или координат рабочего органа **tool**, путем непосредственного ввода численных значений координат обученной точки либо с использованием режима пульта.

В последнем случае робот выводится в нужную позицию и текущие координаты запоминаются. Для обычной точки запоминаются координаты **X,Y,Z, o, a, t,** а для прецизионной точки- $\mathbf{q}^1$, $\mathbf{q}^2$, $\mathbf{q}^3$, $\mathbf{q}^4$, $\mathbf{q}^5$, $\mathbf{q}^6$.

При обучении робота следует помнить, что в случаях, когда требуется сохранить ориентацию инструмента относительно рабочей поверхности, необходимо применять обучение в системе координат **world** или **tool.** Обучение в системе **world** можно применить, если, рабочая поверхность параллельна плоскости XY мировой системы координат. При этом следует учитывать, что положение системы **world** может быть перемещено на эту плоскость с помощью инструкции BASE. При обучении схват манипулятора движется вдоль осей повернутой базовой системы координат, относительно которой будут запоминаться координаты обученной точки. При использовании точек, запомненных относительно смещенной базовой системы координат, в управляющей программе необходимо указать величину смещения базовой системы координат с помощью инструкции BASE X,Y,Z.

При обучении в системе координат инструмента необходимо обеспечить желаемую ориентацию системы **tool** относительно рабочей плоскости, после чего схват манипулятора будет двигаться вдоль осей системы **tool,** а координаты точки будут запоминаться в мировой системе координат **world.** Данный метод применяется в случае более сложного расположения рабочей поверхности либо, когда требуется сохранить ориентацию инструмента на всей траектории движения. В более общих случаях используется одновременно обучение во всех трех системах координат. Если при обучении использовалась инструкция BASE, то данная инструкция должна быть также применена и в управляющей программе.

В процессе эксплуатации в мехатронных и робототехнических устройствах периодически возникают различного рода неисправности. Многие современные модели имеют весьма сложное схемное построение, и зачастую процесс отыскания в них неисправностей бывает таким же сложным и очень трудоемким, что требует от специалиста,

осуществляющего ремонт, хороших знаний и навыков работы. Ремонт изделий в основном осуществляется в соответствии с общими принципами ремонта модулей, блоков и самого оборудования, но следует иметь в виду, что есть и характерные отличия, связанные с технологией изготовления, спецификой использования, условиями эксплуатации мехатронных составляющих. Процедура ремонта любого технического объекта может быть представлена в виде последовательности мероприятий, основными из которых являются:

• установление факта неработоспособности;

• определение отказавшего блока (модуля);

• выявление неисправных элементов в вышедшем из строя блоке (модуле);

• восстановление вышедших из строя блоков (модулей);

• контроль работоспособности устройства;

• регулировка устройства.

Неисправности могут быть вызваны различными факторами. Их можно разделить на механические и электрические.

Механические неисправности связаны с поломкой или повреждением элементов различных кинематических схем привода, загрузки носителей информации, галетных или кнопочных переключателей, механизмов настройки и многих других.

Электрические неисправности вызываются выходом из строя тех или иных элементов электрической принципиальной схемы, а также дефектами монтажа. Большинство механических неисправностей и в ряде случаев – электрических выявляются при проведении визуального осмотра аппаратуры. Визуальным осмотром определяют качество монтажа, отсутствие обрывов в печатных дорожках и проводниках, качество паек (холодные пайки), а также контролируют соответствие номиналов резисторов и емкостей конденсаторов (рабочих напряжений) требованиям принципиальных схем. Часто при визуальном осмотре выявляются обуглившиеся резисторы, вздутые электролитические конденсаторы, наличие подтеков пропиточного материала в трансформаторах, механические повреждения в керамических конденсаторах и др. О наличии электрических неисправностей в аппаратуре могут свидетельствовать запахи от перегретых обмоток трансформаторов, дросселей, резисторов, изменение тона звуковых колебаний, вызванных работой трансформатора (гул с частотой 50 Гц). При проведении визу-

ального осмотра необходимо вручную проверять качество крепления механических узлов (трансформаторов, дросселей, переключателей электрических конденсаторов, переменных и полупеременных резисторов и др.).

После проведения ремонта проводится контроль работоспособности оборудования, который заключается в проверке нескольких технических параметров (например, проверяется, регулируется резкость и яркость изображения телевизионного приемника устройства видеоконтрольного и т. д.). Если контроль работоспособности объекта дал положительные результаты, то проводится регулировка. Практика показывает, что найти причину неисправности в современном оборудовании, комплексе часто бывает значительно сложнее, чем устранить ее. Знание наиболее распространенных практических методов поиска места отказа позволит провести ремонт с наименьшими затратами времени и средств.

Описание моделей объектов ремонта. Процесс поиска неисправностей в устройствах представляет собой совокупность элементарных проверок, т. е. физических экспериментов над ремонтируемым устройством, целью которых является изучение его реакции на некоторое воздействие. Выявить неисправность можно только в том случае если существует такое тестовое воздействие, реакция на которое у работоспособного и неработоспособного устройств различна. В общем случае может существовать несколько элементарных проверок, позволяющих выявить определенное техническое состояние устройства. Они различаются множеством контрольных точек, видом и последовательностью выходных тестовых воздействий. Разнообразие перечисленных возможностей вызывает необходимость разработки процесса поиска неисправностей в устройстве. Первый этап предполагает наличие некоторого описания ремонтируемого устройства и его поведения в работоспособном и неработоспособном состояниях. Описание в аналитической, векторной, графической или табличной форме называют *математической моделью ремонтируемого устройства.* Любое электронное устройство характеризуется зависимостью множества выходных параметров Y – {Y^ от множества входных $X = \{X_k\}$ и внутренних $A = \{A_J\}$ переменных. Поведение модели устройства в общем случае зависит от времени *t.*

$$Y = F(X, A). \quad (5.1)$$

Такая запись представляет собой систему передаточных функций работоспособного устройства. Неисправность, возникшая в устройстве, приводит к искажению передаточных функций, характеризуемых множеством моделей неработоспособного объекта:

$$Y = F(X, A^i > т), \quad (5.2)$$

где $i = 1, 2, 3, ..., m$ – номера неисправных состояний.

Часто в явном виде задается только модель (1) работоспособного устройства, а модели (2) подлежат разработке. Для большинства сложных устройств обычно не удается составить модель (2), используя только внешние узлы – основные входы и выходы. Поэтому эта система уравнений должна включать описание внутренних, электрических и временных зависимостей, выявленных на расширенном множестве функциональных узлов. Обозначим множество всех допустимых элементарных проверок ремонтируемого устройства P = {P}. Допустимыми будем считать все физически осуществимые элементарные проверки при поиске неисправностей. Каждая проверка характеризуется значением *X* воздействия, подаваемого на ремонтируемое устройство, составом контрольных точек и значением реакций устройства на эти воздействия. Число возможных результатов проверки определяется числом контрольных точек в устройстве и числом воздействий на него. Ответные реакции на входные воздействия Xj соответственно для работоспособного и неработоспособного устройств определяются следующими уравнениями:

$$R = F(A). \quad (5.3)$$

Элементарные проверки позволяют обнаруживать любое состояние из множества неработоспособных состояний устройства, если найдется хотя бы одна проверка P, для которой ответные реакции у работоспособного R и неработоспособного P. устройств различны, т. е. P не равно R. Для разработки процедуры поиска неисправностей необходимо получить множество реакций для всех допустимых элементарных проверок P и выбрать те проверки из множества {P}, которые позволяют различить все состояния из множества технических состояний устройства S. Процесс поиска неисправности при этом требует глубокого анализа результатов измерений большого числа вычислительных операций и многократного сравнения их результатов. Ввиду сложности аналитические методы разработки этого процесса нашли применение в тех случаях, когда устройства по схемным решениям просты и мощность

множества технических состояний ограничена (например, только с одиночными неисправностями), а элементарные проверки проводятся с помощью однотипных входных воздействий. Более проста, наглядна и удобна при анализе и разработке процедуры поиска неисправностей табличная модель устройства. Очевидно, что достоверно обнаруживать неисправности в устройствах помогает множество элементарных проверок. Одна из задач оптимизации этого процесса состоит в сокращении числа элементарных проверок, обеспечивающих требуемую глубину поиска неисправностей.

Требования безопасности при обслуживании и эксплуатации мехатронных и робототехнических систем изложены в ГОСТ Р 60.1.2.2-2016/ИСО 10218-2:2011. При разработке ПР и средств защиты лиц и обслуживающего персонала должны учитываться специфические свойства ПР, связанные с особенностями конструкции, выполняемых функций, динамики и алгоритмов управления перемещением рабочих органов. Средства защиты должны быть разработаны с учетом необходимости нахождения обслуживающего персонала в рабочем пространстве ПР при его включении, программировании, контроле и обслуживании, при этом должна быть учтена возможность возникновения опасной ситуации, связанной с несогласованностью работы ПР и сопряженного с ним оборудования. Способ защиты лиц и обслуживающего персонала должен быть выбран с учетом анализа конструкции ПР, методов его программирования и обслуживания. Перед выбором способа защиты должны быть определены вредные производственные факторы и оценен риск (степень риска) возникновения опасной ситуации.

Обеспечение безопасности лиц и обслуживающего персонала должно основываться на следующих принципах:

- во время производственного процесса не допускается нахождение лиц и обслуживающего персонала в рабочем пространстве;

- во время программирования, контроля, обслуживания и в других случаях, требующих нахождения обслуживающего персонала в рабочем пространстве ПР, вероятность возникновения опасной ситуации должна быть минимальной.

Для обеспечения выполнения этих принципов могут быть реализованы следующие мероприятия:

- ограничение рабочего пространства с помощью физических барьеров, защитных ограждений, в том числе с блокировками, а также использование устройств обнаружения;

- организация рабочих мест обслуживающего персонала таким образом, чтобы все работы по наладке и обслуживанию ПР производились вне рабочего пространства;

- внедрение дополнительных мер защиты обслуживающего персонала, разрабатываемых в зависимости от конструктивных особенностей ПР и необходимых для обеспечения безопасности в случаях, когда нахождение обслуживающего персонала в рабочем пространстве не может быть полностью исключено.

Вопросы для самопроверки

1. Охарактеризуйте структуры автоматизированных производств в зависимости от серийности выпускаемой продукции.
2. Объясните структуру роботизированных комплексов.
3. Охарактеризуйте структуру гибкой производственной системы.
4. Какие требования предъявляются к роботизированным транспортно-накопительным системам?
5. Приведите примеры устройства роботизированных складов.
6. В чем заключается техническое обслуживание роботов и мехатронных систем?
7. То входит в перечень работ по ТО?
8. Виды организации эксплуатации оборудования.
9. Назовите признаки изношенности деталей.
10. Назовите признаки изношенности элементов пневмо и гидропривода.
11. Назовите признаки изношенности элементов электропривода.
12. Назовите признаки изношенности системы управления.
13. Назовите состав эксплуатационных документов.
14. Регламент работ перед пуском оборудования.
15. Как формируется управляющая программа для робота и мехатронной системы?
16. Как осуществляется обучение робота?
17. Назовите классы систем обучения роботов.
18. Что является моделью ремонтируемого изделия?
19. Назовите основные требования безопасного обслуживания мехатронных и робототехнических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы построения исполнительных устройств роботов и мехатронных модулей, их информационных и управляющих устройств; структура роботизированных технологических центров. Проанализированы организация и проведение монтажных работ робототехнических и мехатронных систем, включая механическую часть, устройств пневмо- и гидросистем, устройств управления и электрооборудования, роботизированных технологических комплексов. Представлены основы наладки механических устройств промышленных роботов и мехатронных систем и их компонентов, параметрическая настройка регуляторов тока, скорости и положения в электроприводах роботов и мехатронных систем, в том числе по компьютерным моделям, пример наладки мехатронной системы металлорежущего станка и мехатронной системы лазерного технологического комплекса. Описаны также методы и средства испытаний и диагностики роботов и мехатронных систем, основы их эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монтаж, наладка, эксплуатация и ремонт промышленных роботов. Малахов М. В., Нейбергер Н. А., Сидорин Г. Н. – М.: Металлургия, 1989. 224 с.

2. Введение в мехатронику: Уч. пособие / Грабченко А.И., Клепиков В.Б., Доброскок В.Л., Крыжный Г.К., Анищенко Н.В., Кутовой Ю.Н., Пшеничников Д.А., Гаращенко Я.Н. – Х.: НТУ "ХПИ", 2014. – 274 с. 3. Сырямкин В.И. Информационные устройства и системы в робототехнике и мехатронике: учеб. пособие. (Серия: Интеллектуальные технические системы). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. – 524 с.

4. Бастрон, А.В. Монтаж электрооборудования и средств автоматизации: учеб. пособие. Часть 1. – 2-е изд., испр. и доп. / А.В. Бастрон, А.В. Чебодаев, А.Г. Черных; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 291 с.

5. Таугер В. М. Конструирование мехатронных модулей : учеб. пособие. - Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – 336 с.

6. Сибикин М.Ю. Технологическое оборудование. Металлорежущие станки : учебник М. : ФОРУМ, 2017. - 448 с.

7. Феофанов, А.Н. Техническое обслуживание, ремонт и испытание мехатронных систем [Текст] : учебник : для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальности "Мехатроника и мобильная робототехника (по отраслям)" / А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина. - Москва: Академия, 2018. – 302с.

8. Науменко, А. П. Введение в техническую диагностику и неразрушающий контроль : учеб. пособие / А. П. Науменко ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – 152 с. : ил.

9. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : URSS, 2019. – 240 с.

10. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Введ. 1982-01-01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 24 с.

11. ГОСТ20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. Введ. 1991-01-01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 11 с.

12. Глебов, Н. А. Надежность и диагностика устройств управления робототехническими и мехатронными системами : учеб. пособие для студентов специальностей "Роботы и робототехн. системы" и "Мехатроника" направления "Мехатроника и робототехника" / Н. А. Глебов ; М-во образования Рос. Федерации, Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т). - Новочеркасск : ЮРГТУ, 2004. - 91 с.

13. Схиртладзе А. Г., Новиков В. Ю. Технологическое оборудование машиностроительных производств. – М.: Высш. шк., 2009.

14. ГОСТ Р 60.1.2.2-2016/ИСО 10218-2:2011 Роботы и робототехнические устройства. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция. Требования по безопасности для промышленных роботов. М. : Стандартинформ, 2020. – 70 с.

15. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник в 3-х т. Т.3: Проектирование станочных систем /Под общей ред. А.С. Проникова – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана; Изд-во МГТУ «Станкин», 2000.

16. М.А. Босинзон. Автоматизированные мехатронные модули линейных и вращательных перемещений./ Журнал «Приводная техника» №1,2002.с.10-19.

17. Умнов, В.П. Построение и моделирование манипуляционных исполнительных систем многофункциональных роботизированных технологических центров: учебное пособие / В. П. Умнов - Владимир: ВлГУ, 2016. – 118с.

18. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение : учебное пособие / Подураев Ю.В.. – Саратов : Ай Пи Ар Медиа, 2019. – 256 с.

19. Приводы серии CSD-DH/ Инструкция по эксплуатации БТКУ. 435121-001.001ИМ1. – С. Петербург, 2014. - 88с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе _____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.11 ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА МЕХАТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Технической механики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Волков Е.Б.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

Лекция 1. Общие понятия об информационной поддержке мехатронных производств 7
1.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий 9
1.2. Системный подход к информационной поддержке сложных систем: анализ, синтез, моделирование, оптимизация [2, 3] 14
Контрольные вопросы 27

Лекция 2. Машиностроительные и металлообрабатывающие производства 29
2.1. Гибкие автоматизированные системы и производства 30
2.2. Автоматизированные линии 38
2.3. Гибкие производственные системы механообрабатывающего производства 50
Контрольные вопросы 53

Лекция 3. Введение в процесс проектирования мехатронных систем 55
3.1. Основные принципы проектирования 56
3.2. Схема процесса проектирования 60
3.3. Системный подход к проектированию 67
Контрольные вопросы 76

Лекция 4. Системы автоматизированного проектирования в машиностроении 78
4.1. Общая характеристика систем автоматизированного проектирования 78
4.2. Структура и разновидности систем автоматизированного проектирования 113
4.3. Программные системы проектирования (примеры программ) [3] 116
Контрольные вопросы 124

Лекция 5. Интегрированный подход к разработке мехатронных систем 125
5.1. Системы PDM 126

5.2. Метод обмена данными 129
5.3. Тенденции в развитии интегрированных систем [10, 11] . . . 132
Контрольные вопросы 133

Лекция 6. Концептуальное проектирование и модернизация мехатронных систем 135
6.1. Основные положения 135
6.2. Инструментальные средства концептуального проектирования и модернизации систем 139
Контрольные вопросы 148

Лекция 7. Информационная поддержка жизненного цикла мехатронных систем 150
7.1. CALS-технологии (основные понятия) [1, 3] 150
7.2. STEP-стандарты [5] 158
7.3. Организация в STEP информационных обменов [1] 160
7.4. Проблемы практического использования CALS-технологий 162
Контрольные вопросы 165

Лекция 8. Основные прикладные методы и средства построения интегрированных мехатронных систем 167
8.1. Формирование общих проектных решений [3, 12, 13] 167
8.2. Построение модели процесса разработки мехатронных систем 170
Контрольные вопросы 188

Лекция 9. Автоматизированные системы управления мехатронными производствами [1, 3, 18] 190
9.1. Автоматизация управления предприятиями (АСУП) 190
9.2. Автоматизация управления технологическими процессами (АСУТП) 192
9.3. Информационные логистические системы 194
9.4. Автоматизированные системы делопроизводства 197
Контрольные вопросы 198

Заключение 200

Библиографический список 201

ВВЕДЕНИЕ

Информационная поддержка процессов создания и эксплуатации мехатронных (сложных) производств базируется на широком классе универсальных автоматизированных систем, предназначенных для использования на всех этапах жизненного цикла изделий (ЖЦИ). На этапах проектирования и подготовки производства используются интегрированные САПР – CAD, CAM, CAE, PDM, CAPP и др.; на этапа производства и реализации изделий – SCADA, CNC, MRP, ERP, MES и др.; на этапе эксплуатации и утилизации изделий – CRM, SQSM, MES.

Мировой опыт промышленного производства сложных изделий на современном уровне свидетельствует, что их создание невозможно без использования информационных систем поддержки производственных процессов. Такая поддержка получила название CALS (русская аббревиатура КСПИ) – Continuous Acquisition and Lifecycle Support (компьютерное сопровождение и поддержка жизненного цикла изделий). Данная система поддержки производственных процессов призвана заменить традиционную технологию создания и эксплуатации производственных процессов, которая отличается фрагментарным использованием автоматизированных систем. Она допускает дублирование и несогласованность данных, возможность рассмотрения недостаточно перспективных вариантов производственных процессов, в то время как лучший вариант остается нерассмотренным. При этом возможно недостаточно эффективное использование знаний, накопленных в процессе создания и эксплуатации производственных процессов [19].

Основное назначение CALS-технологий – обеспечение единого информационного пространства (ЕИП) и технологий для предоставления необходимой информации в нужное время, в нужном виде, в конкретном месте любому из участников жизненного цикла (ЖЦ) производственного процесса.

CALS-технологии развиваются прежде всего на базе САПР (на стадии создания мехатронных систем), хотя при этом рассматриваются также вопросы моделирования приложений: на начальных этапах моделирования сложных слабоструктурированных приложений используются методы функционального (IDEF0) и информационного (IDEF1X) моделирования систем и методы объективного моделирования на базе среды UML.

Информационная поддержка производственных процессов на стадии их эксплуатации осуществляется за счет применения автоматизированных систем управления мехатронными производствами (АСУП, АСУТП, логистических систем, автоматизированных систем делопроизводства).

Для успешного применения современных информационных технологий в промышленности и других отраслях народного хозяйства необходимо иметь квалифицированные кадры, знающие и умеющие использовать информационные технологии создания и эксплуатации сложных систем различного назначения.

Данный курс лекций направлен на базовую подготовку таких специалистов.

Курс лекций «Информационная поддержка мехатронных комплексов и производств» предназначен в первую очередь для бакалавров и магистров по направлению подготовки 15.03.06 – Мехатроника и робототехника, а также других технических направлений и специальностей, связанных с созданием и управлением сложными техническими системами.

В основу данных лекций положен опыт преподавания информационных технологий (отраженных в учебниках, монографиях и публикациях в научно-технических журналах) в ряде ведущих университетов России – МГТУ им. Н.Э. Баумана, МГТУ «Станкин», УГАТУ (г. Уфа), МИРЭА и других.

Курс содержит 9 лекций, в которых отражены отдельные аспекты информационной поддержки сложных мехатронных систем и производств.

Авторы выражают благодарность рецензентам и всем коллегам за советы и рекомендации при обсуждении материала лекций.

Лекция 1
ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКЕ МЕХАТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Современные производства сложной техники являются базой инновационной экономики, основанной для создания и производства наукоемких изделий, конкурентоспособных на мировых рынках.

Сложные производства базируются на согласованной работе многих предприятий. В свою очередь успешная производственная деятельность на каждом отдельном предприятии осуществляется с помощью автоматизированных систем управления производством и предполагает необходимость информационного взаимодействия этих систем. Такое же информационное взаимодействие должно существовать и между отдельными предприятиями при выпуске сложной продукции.

Мехатронная производственная система, представляющая единый комплекс электромеханических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта, является научной и технической базой для создания современного производства сложной техники и физико-технических систем и процессов различного назначения с принципиально новыми функциями и свойствами.

Для обеспечения согласованной работы мехатронных производственных систем создается соответствующая информационная поддержка между элементами производственной системы по всей цепочке жизненного цикла промышленных изделий:

маркетинг > проектирование > подготовка производства > производство > реализация > эксплуатация > утилизация.

Форма, характер, содержание и назначение информационной поддержки различаются на каждом этапе жизненного цикла изделий. Кроме того, для взаимодействия автоматизированных систем разных предприятий нужна унификация не только формы, но и содержания проектной, технологической, эксплуатационной и другой информации о совместно производимой продукции.

Информационная поддержка сложных мехатронных производств на стадиях проектирования и управления действующими производствами обеспечивается за счет:

– стандартизации структуры проектной, технологической и эксплуатационной документации, а также языков ее представления;

– создания единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников жизненного цикла изделия, в котором предусмотрено хранение, обработка и передача информации в объединенных компьютерных средах, а также обеспечен оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте;

– создания интегрированных компьютеризированных производств и охватывающей их интегрированной автоматизированной информационной системы;

– применения технологии представления данных об изделии (набора методов для представления в электронном виде данных об изделии, относящихся к отдельным процессам жизненного цикла изделия);

– использования автоматизированных систем, называемых системами управления данными об изделии (проектными данными) – PDM (Product Data Management);

– набора методов информационного обеспечения реструктуризации и реинжиниринга производственных процессов (и бизнес-процессов) в целях повышения их эффективности.

В данном курсе лекций основное внимание будет уделено вопросам информационной поддержки методов проектирования и автоматизации управления предприятиями и технологическими процессами.

1.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий

Достижение поставленных целей на современных предприятиях, выпускающих сложные промышленные изделия, оказывается невозможным без широкого использования автоматизированных систем (АС), основанных на применении компьютеров и предназначенных для создания, переработки и использования всей необходимой информации о свойствах изделий и сопровождающих процессов. Специфика задач, решаемых на различных этапах жизненного цикла изделий, обусловливает разнообразие применяемых АС.

Все задачи, решаемые и выполняемые в процессе разработки и производства продукции, называются жизненным циклом (ЖЦ) промышленной продукции (изделий) (product life cycle). Основные этапы жизненного цикла промышленной продукции представлены на рис. 1.1. К ним относятся этапы проектирования, технологической подготовки производства (ТПП), производства, реализации продукции, эксплуатации и утилизации [1].

Этапы жизненного цикла для информационных систем или программного обеспечения (ПО) могут отличаться от приведенных на рис. 1.1.

На всех этапах жизненного цикла изделий имеются свои целевые установки. При этом участники жизненного цикла стремятся достичь поставленных целей с максимальной эффективностью. На этапах проектирования, ТПП и производства нужно обеспечить выполнение технического задания (ТЗ) при заданной степени надежности изделия и минимизации материальных и временных затрат, что необходимо для достижения успеха в конкурентной борьбе в условиях рыночной экономики.

Под эффективностью понимают не только снижение себестоимости продукции и сокращение сроков проектирования и производства, но и обеспечение удобства освоения и снижение затрат на будущую эксплуатацию изделий. Особую важность требование удобства эксплуатации имеет для сложной техники, например в таких отраслях, как авиа- или автомобилестроение.

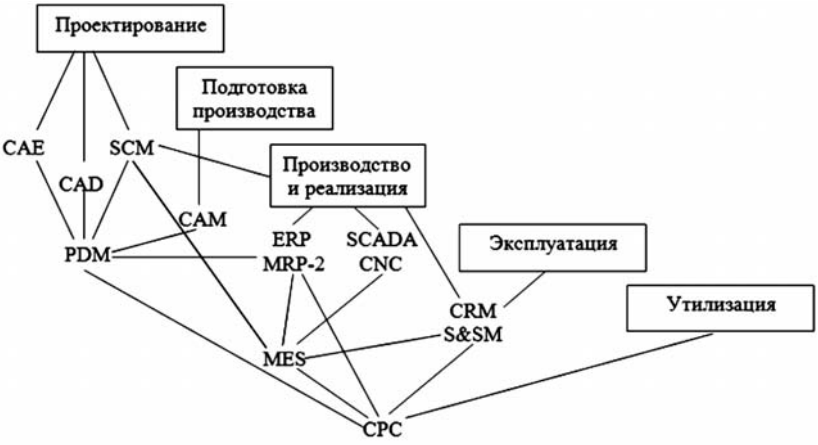


Рис. 1.1. Этапы жизненного цикла промышленных изделий и системы их автоматизации

Основные типы АС с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий указаны на рис. 1.1:

– CAE – Computer Aided Engineering (автоматизированные расчеты и анализ);

– CAD – Computer Aided Design (автоматизированное проектирование);

– CAM–$5omputer Aided Manufacturing (автоматизированная технологическая подготовка производства);

– PDM – Product Data Management (управление проектными данными);

– ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);

– MRP-2 – Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производства);

– MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);

– SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок);

– CRM–$5ustomer Relationship Management (управление взаимоотношениями с заказчиками);

– SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);

– CNC–$5omputer Numerical Control (компьютерное числовое управление);

– S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием);

– CPC–$5ollaborative Product Commerce (совместный электронный бизнес);

– PLM – Product Lifecycle Management (управление жизненным циклом изделий).

Современные САПР (или система CAE/CAD), обеспечивающие сквозное проектирование сложных изделий или, по крайней мере, выполняющие большинство проектных процедур, имеют многомодульную структуру. Модули различаются своей ориентацией на те или иные проектные задачи применительно к тем или иным типам устройств и конструкций. При этом возникают естественные проблемы, связанные с построением общих баз данных, с выбором протоколов, форматов данных и интерфейсов разнородных подсистем, с организацией совместного использования модулей при групповой работе. Эти проблемы усугубляются на предприятиях, производящих сложные изделия, в частности, с механическими и радиоэлектронными подсистемами, поскольку САПР машиностроения и радиоэлектроники до недавнего времени развивались самостоятельно, в отрыве друг от друга.

Для решения проблем совместного функционирования компонентов САПР различного назначения разрабатываются системы управления проектными данными – системы PDM. Они либо входят в состав модулей конкретной САПР, либо имеют самостоятельное значение и могут работать совместно с разными САПР.

Уже на этапе проектирования требуются услуги системы SCM, иногда называемой системой управления поставками комплектующих (Component Supplier Management), которая на этапе производства обеспечивает поставки необходимых материалов и комплектующих.

АСТПП, составляющие основу системы CAM, выполняют синтез технологических процессов и программ для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), выбор технологического оборудования, инструмента, оснастки, расчет норм времени и т. п. Модули систем CAM обычно входят в состав развитых САПР, и потому интегрированные САПР часто называют системами CAE/CAD/CAM/PDM.

Функции управления на промышленных предприятиях выполняются автоматизированными системами на нескольких иерархических уровнях. Автоматизацию управления на верхних уровнях от корпорации (производственных объединений предприятий) до цеха осуществляют АСУП, классифицируемые как системы ERP или MRP-2.

Наиболее известные системы ERP выполняют различные бизнес-функции, связанные с планированием производства, закупками, сбытом продукции, анализом перспектив маркетинга, управлением финансами, персоналом, складским хозяйством, учетом основных фондов и т. п. Системы MRP-2 ориентированы главным образом на бизнес-функции, непосредственно связанные с производством.

АСУТП контролируют и используют данные, характеризующие состояние технологического оборудования и протекание технологических процессов. Именно их чаще всего называют системами промышленной автоматизации.

Для выполнения диспетчерских функций (сбора и обработки данных о состоянии оборудования и технологических процессов) и разработки программного обеспечения для встроенного оборудования в состав АСУТП вводят систему SCADA. Для непосредственного программного управления технологическим оборудованием используют системы CNC на базе контроллеров (специализированных компьютеров, называемых промышленными), встроенных в технологическое оборудование.

На этапе реализации продукции выполняются функции управления отношениями с заказчиками и покупателями, проводится анализ рыночной ситуации, определяются перспективы спроса на планируемые к выпуску изделия. Эти задачи решаются

с помощью системы CRM. Маркетинговые функции иногда возлагаются на систему S&SM, которая, кроме того, служит для решения проблем обслуживания.

На этапе эксплуатации применяются специализированные компьютерные системы, предназначенные для ремонта, контроля, диагностики эксплуатируемых систем. Обслуживающий персонал использует интерактивные учебные пособия и технические руководства, а также средства для дистанционного консультирования при поиске неисправностей, программы для автоматизированного заказа деталей взамен отказавших.

Следует отметить, что функции некоторых автоматизированных систем часто перекрываются. В частности, это относится к системам ERP и MRP-2. Управление маркетингом может быть поручено как системе ERP, так и системе CRM или S&SM.

На решение оперативных задач управления проектированием, производством и маркетингом ориентированы системы MES. Они близки по некоторым выполняемым функциям к системам ERP, PDM, SCM, S&SM и отличаются от них именно оперативностью, принятием решений в реальном времени, причем большое значение придается оптимизации этих решений с учетом текущей информации о состоянии оборудования и процессов.

Перечисленные автоматизированные системы могут работать автономно, что в настоящее время обычно и происходит. Однако эффективность автоматизации будет заметно выше, если данные, генерируемые в одной из систем, будут доступны в других системах, поскольку принимаемые в них решения станут более обоснованными.

Чтобы достичь должного уровня взаимодействия промышленных автоматизированных систем, требуется создание единого информационного пространства не только на отдельных предприятиях, но и, что более важно, в рамках объединения предприятий (системы CPC или PLM – Product Lifecycle Management).

Единое информационное пространство обеспечивается благодаря унификации как формы, так и содержания информации о конкретных изделиях на различных этапах их жизненного цикла. Унификация формы достигается использованием стандартных

форматов и языков представления информации в межпрограммных обменах и при документировании, т. е. применением так называемых CALS (Continious Acquisition and Lifecycle Support) – технологий, которые будут рассмотрены ниже.

Более подробно основные функции, проектные процедуры и программное обеспечение АС различных этапов жизненного цикла промышленных изделий (см. рис. 1.1) будут описаны в последующих лекциях.

1.2. Системный подход к информационной поддержке сложных систем: анализ, синтез, моделирование, оптимизация [2, 3]

Системный подход

Системный подход является общим подходом, выражающим основные идеи и принципы, используемые при создании и управлении сложными техническими системами. Системный подход включает в себя самостоятельные математические дисциплины, такие как «Системный анализ» и «Теория систем».

В широком смысле системный анализ – это дисциплина, занимающаяся проблемами принятия решений, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы. Системный анализ возник в связи с необходимостью вести исследования междисциплинарного характера при создании сложных систем (технических, экономических, экологических). Основы системного анализа лежат в дисциплинах, занимающихся проблемами принятия решений, – теории исследования операций и общей теории управления.

В узком смысле системный анализ включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей (группировка связей по характерным принципам), определение свойств (атрибутов) системы, анализ влияния внешней среды и разработку системы управления.

В отличие от системного анализа теория систем носит прикладной характер, ориентированный на решение конкретных прикладных задач.

В технике дисциплину, в которой исследуются сложные технические системы и их проектирование, чаще всего называют «Системотехникой» (вместо «Теория систем» и «Системный анализ»). Предметом системотехники являются, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, а во-вторых, методы их проектирования и исследования.

Следуя [3], рассмотрим ряд основных понятий и терминов системотехники.

Система – множество элементов, находящихся в отношениях и связях между собой.

Элемент – такая часть системы, представление о которой нецелесообразно подвергать при проектировании дальнейшему членению.

Сложная система – система, характеризуемая большим числом элементов и, что наиболее важно, большим числом взаимосвязей элементов. Сложность системы определяется также видом взаимосвязей элементов, свойствами целенаправленности, целостности, членимости, иерархичности, многоаспектности. Очевидно, что современные автоматизированные информационные системы и, в частности, САПР являются сложными в силу наличия у них перечисленных свойств и признаков.

Подсистема – часть системы (подмножество элементов и их взаимосвязей), которая имеет свойства системы.

Надсистема – система, по отношению к которой рассматриваемая система является подсистемой.

Структура – отображение совокупности элементов системы и их взаимосвязей; понятие структуры отличается от понятия самой системы также тем, что при описании структуры принимают во внимание лишь типы элементов и связей без конкретизации значений их параметров.

Параметр – величина, выражающая свойство или системы, или ее части, или влияющей на систему среды. Обычно в моделях

систем в качестве параметров рассматривают величины, не изменяющиеся в процессе исследования системы. Параметры подразделяют на внешние, внутренние и выходные, выражающие свойства элементов системы, самой системы, внешней среды соответственно. Векторы внутренних, выходных и внешних параметров далее обозначены $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$, $Y = (y_1, y_2, \ldots, y_m)$, $Q = (q_1, q_2, \ldots, q_k)$ соответственно.

Фазовая переменная – величина, характеризующая энергетическое или информационное наполнение элемента или подсистемы.

Состояние – совокупность значений фазовых переменных, зафиксированных в одной временной точке процесса функционирования (событие).

Поведение (динамика) системы – изменение состояния системы в процессе функционирования.

Система без последействия – ее поведение при $t > t_0$ определяется заданием состояния в момент t_0 и вектором внешних воздействий $Q(t)$. В системах с последействием, кроме того, нужно знать предысторию поведения, т. е. состояния системы в моменты, предшествующие t_0.

Вектор переменных V, характеризующих состояние (вектор переменных состояния), – неизбыточное множество фазовых переменных, задание значений которых в некоторый момент времени полностью определяет поведение системы в дальнейшем (в автономных системах без последействия).

Пространство состояний – множество возможных значений вектора переменных состояния.

Фазовая траектория – представление процесса (зависимости $V(t)$) в виде последовательности точек в пространстве состояний.

К характеристикам сложных систем, как сказано выше, часто относят следующие понятия.

Целенаправленность – свойство искусственной системы, выражающее назначение системы. Это свойство необходимо для оценки эффективности вариантов системы.

Целостность – свойство системы, характеризующее взаимосвязанность элементов и наличие зависимости выходных пара-

метров от параметров элементов, при этом большинство выходных параметров не является простым повторением или суммой параметров элементов.

Иерархичность – свойство сложной системы, выражающее возможность и целесообразность ее иерархического описания, т. е. представления в виде нескольких уровней, между компонентами которых имеются отношения целое-часть.

В качестве примера сложной системы рассмотрим «Компьютер».

Компьютер является сложной системой в силу наличия у него большого числа элементов, разнообразных связей между элементами и подсистемами, свойств целенаправленности, целостности, иерархичности. К подсистемам компьютера относятся процессор (процессоры), оперативная память, кэш-память, шины, устройства ввода-вывода. В качестве надсистемы могут выступать вычислительная сеть, автоматизированная и (или) организационная система, к которым принадлежит компьютер. Внутренние параметры – времена выполнения арифметических операций, чтения (записи) в накопителях, пропускная способность шин и др. Выходные параметры – производительность компьютера, емкость оперативной и внешней памяти, себестоимость, время наработки на отказ и др. Внешние параметры – напряжение питания сети и его стабильность, температура окружающей среды и др.

Анализ, синтез, моделирование и оптимизация систем

Изучение сложных систем опирается на методы анализа, синтеза, моделирования и оптимизации систем.

Составными частями системотехники являются следующие основные разделы:

– иерархическая структура системы;

– анализ и моделирование систем;

– синтез и оптимизация систем.

Необходимость иерархической организации в технических системах – следствие их сложности, когда централизованная

обработка информации либо просто невозможна, либо требует такой затраты времени (или средств), которая недопустима по техническим условиям. Основная задача иерархической организации – распределение функций обработки информации и принятия решений между отдельными элементами системы.

Представление о производственной системе расчленяют на иерархические уровни. На верхнем уровне используются только самые общие черты и особенности производственной системы. На следующих – степень подробности описания возрастает (при этом рассматриваются уже отдельные блоки системы с учетом их взаимодействия), что позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности.

Для большинства приложений характерны следующие иерархические уровни:

– ***системный уровень***, на котором решаются наиболее общие задачи проектирования систем, машин и процессов; результаты проектирования представляют в виде структурных схем, генеральных планов, схем размещения оборудования и т. д.;

– ***макроуровень***, на котором исследуются отдельные устройства, узлы машин и приборов; результаты представляют в виде функциональных, принципиальных и кинематических схем, сборочных чертежей и т. д.;

– ***микроуровень***, на котором проектируют отдельные детали и элементы машин и приборов.

В каждом приложении число выделяемых уровней и их наименований может быть различным (в радиотехнике, вычислительной технике, машиностроении и т. п.). В машиностроении имеются уровни деталей, узлов, машин и комплексов.

В широком смысле ***анализ*** – это изучение конкретных фактов, вскрытие тонкой структуры явления (системы). ***Синтез*** – объединение различных факторов, построение структуры системы, развитие того или иного процесса, установление его связи с другими явлениями с учетом их взаимной обусловленности.

Основная задача научного анализа – выделить реальные взаимодействия (зависимости) материальных объектов из

множества мысленно допустимых и сформулировать принципы их отбора. Описание этих принципов отбора (в терминах и переменных, которые наиболее полно характеризуют изучаемый предмет) является предметом ***моделирования*** процессов (систем).

Моделирование имеет две четкие различимые задачи:

– создание моделей сложных систем (в англоязычном написании – modelind);

– анализ свойств систем на основе исследования их моделей (simulation).

Моделирование можно разделить на аналитическое и физическое. К аналитическому моделированию относятся математическое и имитационное моделирование, геометрическое, а также виртуальное моделирование. Физическое моделирование реализует физическую модель объекта (например, технология быстрого прототипирования – rapid prototyping).

В данной лекции рассмотрим только математическое и имитационное моделирование. Остальные виды моделирования будут рассмотрены в последующих лекциях.

Построение математических моделей является основой всего системного анализа. Это – центральный этап исследования или проектирования любой системы. От качества модели зависит судьба всего последующего анализа.

В качестве примера рассмотрим модель, которая используется для оптимизации некоторых действий.

Модель динамического процесса описывается дифференциальным уравнением вида

$$\dot{\chi} = f(x,t,u), \tag{1.1}$$

где вектор функции $U(t, x)$ называется управлением;

$x = (x_1, x_2, \ldots x_n)$ – вектор состояния системы.

Управление $U(t, x)$ выбирается из условия достижения некоторой цели. Весьма распространенный класс задач с помощью модели (1.1) можно описать следующим образом: за время T перевести систему из состояния

$$x(0) = x_0 \tag{1.2}$$

в состояние

$$x(T) = x_T \tag{1.3}$$

так, чтобы целевая функция $F(x,t,u)$ была минимальной, т. е.

$$\int_0^T F(x,t,u)dt \to \min. \tag{1.4}$$

Ограничения (1.2), (1.3) и целевую функцию (1.4) мы не включаем в понятие модели (1.1) (для одной и той же модели могут ставиться разные задачи).

Потребность и точность выбираемой или составляемой математической модели должны находиться в соответствии с требуемым качеством решения задачи. Излишняя подробность модели приводит к неоправданному увеличению машинного времени, недостающая – к неправильному результату. Весьма желательна проверка адекватности принятой модели.

Применение математических моделей для исследования и проектирования сложных систем связано с рядом принципиальных трудностей:

– отсутствие законченной постановки задачи исследования при незаконченном процессе познания объекта моделирования;

– сложные и трудные математические процедуры применения аналитических методов решения проблемных задача;

– необходимость изучать новые ситуации в сложных системах, о которых мало что известно;

– невозможность введения в изучаемую систему новых компонентов и т. д.

Для решения подобных задач мало наличие доброкачественной модели, необходима также надежная исходная информация. Но и информации еще не достаточно. Необходим определенный сервис. Так, система моделей должна быть доступна исследователю, варианты расчетов должны проходить достаточно быстро, должна хорошо функционировать система визуализации результатов. Должен быть предельно облегчен ввод новой информации, переход к новым вариантам расчета и т. д. Другими словами,

должна быть создана специальная «имитационная система». Отсюда следует, что «имитационная система – это совокупность моделей, имитирующих протекание изучаемого процесса, объединенная со специальной системой вспомогательных программ и информационной базой, позволяющих достаточно просто и оперативно развивать варианты расчетов. Имитационной системе присуща определенная архитектура, и она должна быть снабжена четкими продуктами ее использования» [2]. Имитационные системы могут быть успешно использованы в сложных задачах оптимизации.

Имитационное моделирование (ИМ) предполагает проведение численных экспериментов с математическими моделями, описывающими поведение систем, с привлечением для этого ЭВМ. Таким образом, имитационная модель представляет собой машинный аналог сложной системы, она позволяет заменить эксперимент с реальной системой экспериментом с математической моделью этой системы в ЭВМ. Поэтому ИМ так широко применяется для проектирования сложных объектов и для изучения сложных систем, особенно в тех случаях, когда реальный эксперимент слишком дорог или вообще невозможен.

Имитационное моделирование позволяет использовать как точную количественную информацию, так и информацию, полученную от экспертов с учетом оценок, суждений и различных эвристик. В этом состоит главное преимущество ИМ перед математическими моделями.

Имитационную модель сложной системы (СС) можно использовать при решении задач в следующих случаях:

– если не существует законченной постановки задачи исследования – идет процесс познания объекта моделирования; имитационная модель служит средством изучения явления;

– если аналитические методы имеются, но математические процедуры столь сложны и трудоемки, то имитационное моделирование дает более простой способ решения задачи;

– когда кроме оценки влияния параметров СС желательно наблюдение за поведением компонентов СС в течение определенного периода;

– если имитационное моделирование оказывается единственным способом исследования сложной системы из-за невозможности наблюдения явлений в реальных условиях;

– когда необходимо контролировать протекание процессов в СС путем замедления или ускорения явлений в ходе имитации;

– при подготовке специалистов и освоении новой техники, когда наимитационной модели обеспечивается возможность приобретения необходимых навыков в эксплуатации новой техники;

– когда изучаются новые ситуации в СС, о которых мало что известно или не известно ничего; в этом случае имитация служит для предварительной проверки новых стратегий и правил принятия решений перед проведением экспериментов на реальной системе;

– когда особое значение имеет последовательность событий в проектируемой СС и модель используется для предсказания «узких» мест в функционировании системы и других трудностей, появляющихся в поведении СС при введении в нее новых компонентов.

Недостатки ИМ: разработка хорошего ИМ часто обходится дороже создания математической модели и требует больших временных затрат; ИМ не может точно отражать реальную сложную систему (быть полностью адекватной сложной системе).

На рис. 1.2 показаны основные этапы имитационного моделирования.

Создание системы начинается с выбора ее структуры. Под структурой в общем случае принято понимать вид элементов, из которых состоит объект, и отношений между элементами. Так, завод как объект состоит из цехов, отделов, служб и т. д. Структура объекта может быть различной в зависимости от назначения объекта.

Синтез объекта (производственного процесса) в значительной степени определяет потребительские свойства будущей продукции. Следует отметить, что анализ и синтез непрерывно связаны друг с другом, так как анализ позволяет получить необходимую информацию для целенаправленного выполнения процедур синтеза в итерационном процессе разработки производственного процесса.

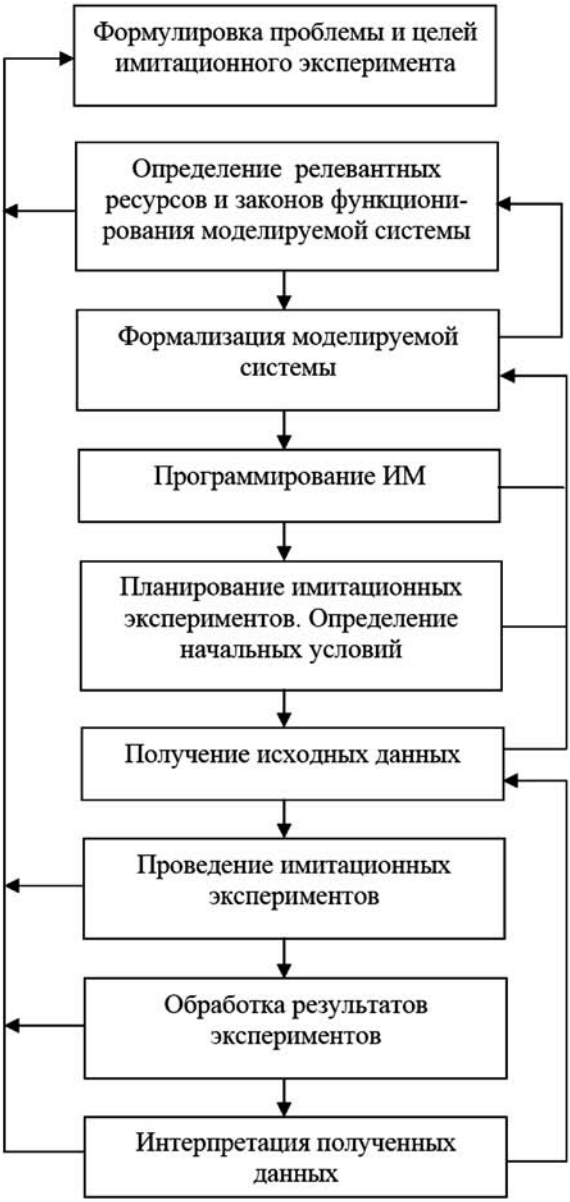


Рис. 1.2. Этапы имитационного моделирования

Синтез, как и анализ, подразделяется на две задачи:

– синтез структуры производственных процессов (систем) – *структурный синтез*;

– выбор численных значений параметров элементов систем – *параметрический синтез*.

Задача структурного синтеза формулируется в системотехнике как задача принятия решения (ЗПР). Ее суть заключается в выборе решения среди множества возможных решений и ограничивающих условий. Принятие решения охватывает широкий круг задач и процедур – от выбора вариантов в конечных и обозримых множествах до задач творческого характера, не имеющих формальных способов решения.

Задачи синтеза структур объектов относятся к наиболее трудно формализуемым. Существует ряд общих подходов к постановке этих задач, однако практическая реализация большинства из них не очевидна. Именно по этой причине структурный синтез, как правило, выполняют в интерактивном режиме при решающей роли инженера-разработчика, а ЭВМ играет вспомогательную роль: выполнение отдельных расчетов, предоставление необходимых справочных данных, фиксация промежуточных и окончательных данных. Имеются лишь отдельные примеры успешной автоматизации структурного синтеза технологических процессов и управляющих программ для механообработки в машиностроении, проектирования печатных плат и кристаллов БИС и некоторые другие. В целом постановки и методы решения задач структурного синтеза в связи с трудностями формализации не достигли степени обобщения и детализации, свойственной математическому обеспечению процессов анализа. Достигнутая степень обобщения выражается в установленной типичной последовательности действий и видов описания при их использовании в САПР. Большое значение для развития подсистем синтеза в САПР имеют разработка и унификация языков представления описаний (спецификаций).

Создание системы (производственного процесса) всегда начинается со *структурного синтеза*, который определяет общий облик будущей системы (одну из конструкций механизма, схему

технологического процесса). Но эти конструкции и схемы выбирают в параметрическом виде, т. е. без указания числовых значений параметров элементов. Поэтому нужно задать или рассчитать значения этих параметров, т. е. выполнить *параметрический синтез*. Примерами результатов параметрического синтеза могут служить, например, рабочие режимы (параметры) технологических операций производственного процесса.

В случае если по результатам анализа проектное решение признается неокончательным, то начинается процесс последовательных приближений к приемлемому варианту проекта. Во многих приложениях для этого удобно варьировать значения параметров элементов, т. е. использовать параметрический синтез на базе многовариантного анализа. При этом задача параметрического синтеза при неизменной структуре объекта может быть сформулирована как задача параметрической оптимизации (или просто оптимизации). Если параметрический синтез не приводит к успеху, то повторяют процедуру структурного синтеза (корректируют или перебирают структуру объекта).

Следуя [3], рассмотрим постановку задач параметрического и структурного синтеза.

Базовая задача параметрического синтеза (приведенная к задаче оптимизации) ставится как задача математического программирования:

$$\begin{gathered} extr\, F(X), \\ X \in Dx \\ Dx = \left\{ X \,/\, y(X) > 0,\ \ \psi(X) = 0 \right\}, \end{gathered} \tag{1.5}$$

где $F(X)$ – целевая функция; X – вектор управляемых (проектных) параметров; $y(X)$ и $\psi(X)$ – функции ограничения; Dx – допустимая область в пространстве управляемых параметров.

Запись (1.5) интерпретируется как задача поиска экстремума целевой функции путем варьирования управляемых параметров в пределах допустимой области. Таким образом, для выполнения расчета номинальных значений параметров необходимо,

во-первых, сформулировать задачу в виде (1.5), во-вторых, решить задачу поиска экстремума $F(X)$.

Базовая задача структурного синтеза формулируется как *задача принятия решения* (ЗПР) следующим образом:

$$ЗПР = \langle A, Y, Мод., П \rangle, \qquad (1.6)$$

где A – множество альтернатив проектного решения; $Y = (y_1, y_2, ..., y_m)$ – множество критериев (выходных параметров), по которым оценивается соответствие альтернативы поставленным целям; $Мод$: $A \rightarrow Y$ – модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев; $П$ – решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многокритериальной ситуации.

В свою очередь, каждой альтернативе конкретного приложения можно поставить в соответствие значение упорядоченного множества (набора) атрибутов $X = x_1, x_2, ..., x_n$, характеризующих свойство альтернативы. Множество X называют *записью* (в теории баз данных), *фреймом* (в искусственном интеллекте) или *хромосомой* (в генетических алгоритмах).

Во многих случаях удается построить в виде алгоритма математическую модель, позволяющую по заданному множеству X и заданной структуре объекта рассчитать вектор критериев Y. Такие модели получаются автоматически в программах анализа типа Spice Adams или ПА-9 для объектов, исследуемых на макроуровне. Для построения таких моделей можно использовать методы планирования экспериментов или подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей.

Если же математическая модель $A \rightarrow Y$ остается неизвестной, то ее создают на основе *экспертных систем*. В [3] описано большое число методов, входящих в состав математического обеспечения анализа и синтеза проектных решений.

Математический аппарат для каждого из иерархических уровней проектирования имеет свои особенности. На *микроуровне* типичные математические модели представлены дифференциальными уравнениями в частных производных вместе с краевыми условиями (такие модели называются распределенными).

Объектами исследования здесь являются поля различных физических величин (напряжений, температур, скоростей и т. д.).

Моделями *макроуровня* (*сосредоточенными* моделями) являются системы алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений.

Моделями *системного* уровня моделирования сложных объектов (типа сложных производственных систем) является аппарат теории массового обслуживания, сетей Петри или имитационного моделирования.

Постановки и методы решения задач *структурного синтеза* относятся к наиболее трудно формализуемым и выполняются, как правило, в интерактивном режиме инженером-разработчиком. Процесс формального описания структурного синтеза (как было отмечено выше) часто сводится к задаче принятия решения или генетическим методам и алгоритмам.

Процедуры *параметрического синтеза* выполняются либо человеком в процессе многовариантного анализа (в интерактивном режиме), либо решаются на базе формальных методов оптимизации (как было описано выше). В последнем случае находят применение несколько постановок задач оптимизации в виде (1.5).

Последние достижения анализа и синтеза сложных производственных систем, базирующихся на принципах использования современных информационных технологий и программных комплексов, будут рассмотрены в последующих лекциях, посвященных проектированию и управлению производственными процессами.

Контрольные вопросы

1. Форма, характер, содержание и назначение информационной поддержки мехатронных производств.

2. Дайте характеристику этапов жизненного цикла промышленных изделий.

3. Назовите основные типы автоматизированных систем (АС) с их привязкой к тем или иным этапам жизненного цикла изделий.

4. Дайте определение «сквозного проектирования» сложных изделий и возникающих при этом проблем.

5. Дайте краткое определение АСТПП, АСУП и АСУТП.

6. Дайте определение понятия «Системный подход» в широком и узком смыслах.

7. Опишите основные понятия и термины системотехники (не цитируя дословно текст лекции).

8. Назовите признаки, присущие сложной системе, приведите собственный пример сложной системы.

9. Обоснуйте необходимость иерархической организации в сложных технических системах, укажите иерархические уровни производственных систем.

10. Укажите основные части (разделы) системотехники, назначение и задачи анализа и моделирования систем.

11. Опишите суть (основное содержание) аналитического и физического моделирования.

12. Обоснуйте необходимость применения математических моделей для исследования и проектирования сложных систем (принципиальные трудности моделирования).

13. Укажите требования, предъявляемые к математическим моделям (на примере имитационной модели).

14. Опишите основное назначение и область применения имитационного моделирования.

15. Основная задача синтеза и оптимизации сложных систем (структурный и параметрический синтез).

16. Порядок создания сложных систем (производственных процессов), постановка задачи параметрического и структурного синтеза.

Лекция 2
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ И МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЕ ПРОИЗВОДСТВА

Металлургия, химическая промышленность, машиностроение и металлообработка являются взаимосвязанными базовыми производствами обрабатывающей отрасли промышленности. Машиностроение во многом определяет состояние производственного потенциала страны, являясь базой технического перевооружения всего общественного производства. Удельный вес продукции машиностроения и металлообработки в общем объеме промышленного производства в России составляет около 20 %.

Основными видами промышленного производства являются следующие производства: одиночное, мелкосерийное, серийное и крупносерийное, массовое, а также непрерывное и дискретное. Под дискретным производством понимается изготовление продукта, проходящего через конечное число технологических и сборочных операций. Непрерывное производство подразумевает изготовление продукта, претерпевающего непрерывные изменения, в результате которых заготовка превращается в готовую деталь. Вид производства оказывает существенное влияние на структуру, систему управления и стоимость продукции (эффективность), технологических процессов данных производств. Кроме того, вид производства определяет необходимый уровень гибкости производства. Под гибкостью производства понимается способность быстро и без существенных затрат труда и средств перестраиваться на изготовление новой или модернизированной продукции и на новые технологические процессы с новой их организацией. По сути дела, речь идет о новых организационных формах решения стратегических задач развития производства, его интенсификации

при ограниченных трудовых, материальных и энергетических ресурсов. Решения таких задач возможно только при условии полной автоматизации машиностроительного производства за счет создания комплексно автоматизированных производств, эффективность которых в первую очередь зависит от гибкости и степени интегрированности их структурных составляющих.

Высшей формой развития комплексно-автоматизированных производств являются гибкие производственные системы (ГПС) и гибкие автоматизированные производства (ГАП) [4].

2.1. Гибкие автоматизированные системы и производства

Такие производства позволяют быстро переходить на выпуск новой продукции, осуществлять ее модернизацию, совершенствовать технологию производства, прежде всего путем смены управляющих программ. Антиподом ГПС и ГАП в отношении гибкости являются автоматические линии (АЛ) с так называемой жесткой автоматизацией. Эффективность АЛ и ГПС зависит от видов производств (рис. 2.1).

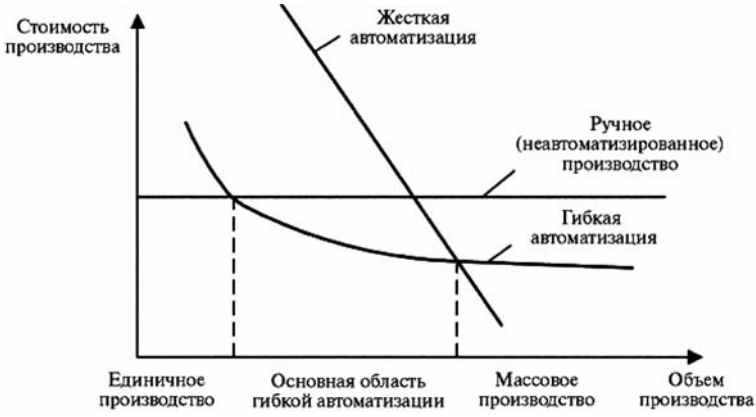


Рис. 2.1. Зависимость стоимости продукции от объема ее выпуска для различных видов производства [5]

Типовой состав ГАП в наиболее полном виде состоит из двух частей, приведенных на рис. 2.2:

– гибкая производственная система (ГПС), которая непосредственно реализует технологический процесс изготовления изделий;

– автоматизированные системы проектирования, подлежащих изготовлению изделий и технологической подготовки их производства, реализуемые с помощью показанных в нижней части рисунка автоматизированных рабочих мест (АРМ).

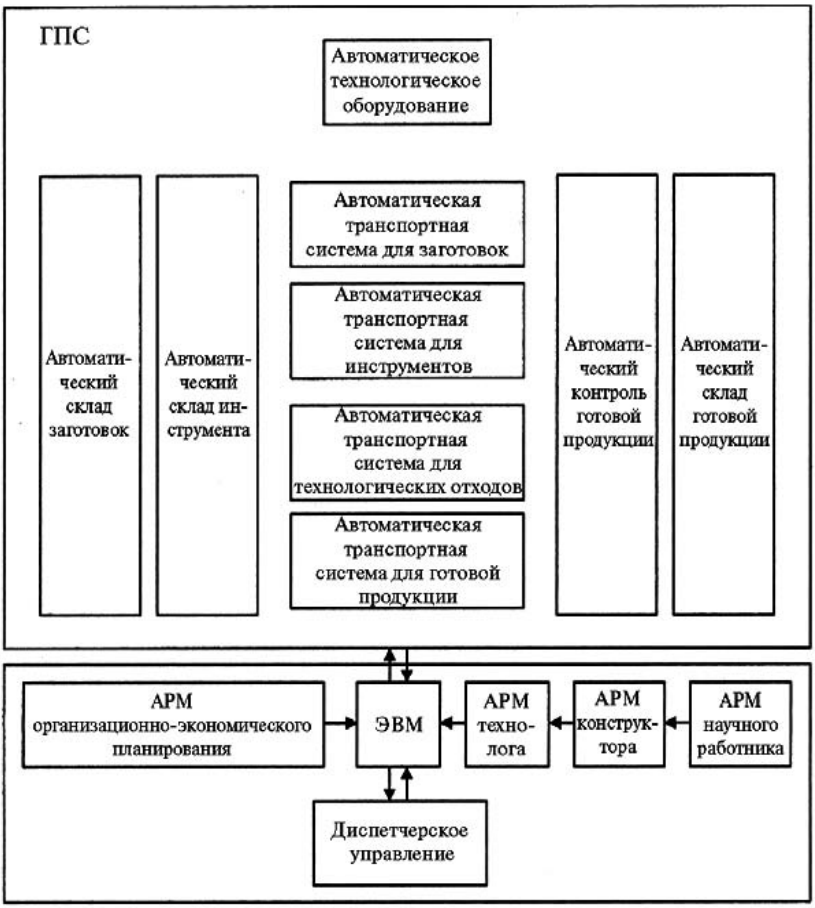


Рис. 2.2. Состав гибкого автоматизированного производства [5]

Части объединены общей автоматизированной системой управления (АСУ) на базе локальной компьютерной сети.

Предел, к которому стремится процесс гибкой автоматизации производства, можно кратко определить так:

– автоматическое производство изделий сколь угодно малыми партиями;

– себестоимость и производительность, близкие к достигнутым в современном массовом производстве;

– практически безлюдное производство – количество работающих, по сравнению с существующим, меньше на два порядка;

– комплексная автоматизация всех частей производства, включая технологические процессы, подготовку производства, разработку документации на выпускаемые изделия, планирование и управление производства в целом.

Таким образом, в максимально полном исполнении ГАП на его вход поступают технические задания на очередное изделие, а на выходе – готовая продукция. Весь процесс может происходить непрерывно на основе машинных носителей информации, т. е. без бумажной документации.

Для мелкосерийного производства степень его гибкости характеризуется количеством типов изделий, которые могут изготавливаться путем смены только программ. Типичные значения этой величины для современных ГАП металлообработки – десятки типов деталей и сотни их модификаций.

В мире внедрение гибкой автоматизации связывают со следующими конкретными достоинствами:

– повышение конкурентоспособности продукции (за счет более быстрой сменяемости выпускаемых изделий, повышения их качества, экономии ресурсов и труда);

– рост производительности;

– стабилизация производства и ускорение оборачиваемости капитала;

– повышение эффективности использования рабочей силы;

– создание новых технологических процессов и производств.

Основной принцип построения гибких производств – компоновка их из комплектно поставляемых унифицированных модулей. В соответствии с составом ГАП, показанным на рис. 2.2,

основными такими модулями являются технологические модули-ячейки, модули транспортные (в том числе на базе транспортных навесных и напольных роботов), складские (в том числе с роботами-штамбелерами), модули контроля качества продукции и технической диагностики оборудования. Последние модули образуют систему автоматического контроля качества, без которой невозможна автоматическая работа всего комплекса. В задачи таких систем входят собственно измерение контролируемых параметров, регистрация результатов этих измерений, визуализация их на терминалах, подача управляющих воздействий в системы управления оборудованием, когда по этим параметрам необходима автоматическая корректировка технологических процессов (например, в случае адаптивного управления станками, учитывающего износ инструмента, изменение размеров заготовок и т. п.). Примером оборудования, используемого в системах автоматического контроля ГАП, являются робототехнические контрольно-измерительные машины.

В ГПС, входящих в состав ГАП (см. рис. 2.2), используют прогрессивное оборудование для перемещения материала, управления станками, формообразования, а также для перспективных методов обработки. Степень необходимой гибкости системы зависит главным образом от объема производства и разнообразия деталей. Так, фирма Comau (США) изготовляет станки для обработки 3…40 деталей в час; на одной линии обрабатывается до 40 разнообразных деталей.

ГПС позволяют преодолеть трудности, связанные с производством групп деталей среднего объема. Эти системы объединяют станки с ЧПУ и автоматическое оборудование для перемещения материала. Система в целом и сам процесс обработки управляются с ЭВМ.

ГПС состоит из нескольких обрабатывающих модулей с ЧПУ; средств для транспортировки палет, размещения зажимов и хранения на участке; централизованного устройства управления движением палет и обрабатывающих операций; различных систем для контроля, наладки инструмента и коррекции, удаления стружки, промывки и продувки.

ГПС, по сравнению со специализированными станочными линиями, легко настраиваются на изменение номенклатуры деталей; новые детали можно обрабатывать при минимальных затратах времени и стоимости необходимого специализированного оборудования.

Основные преимущества ГПС – мгновенная реакция на потребности рынка сбыта, снижение затрат на производство деталей за счет сокращения времени, экономии площади и уменьшения капиталовложений, а также экономия за счет отказа от поступления запчастей извне. Способность обрабатывать детали различной конфигурации позволяет изготовителю осуществлять массовое производство за счет сочетания операций при изготовлении малых и средних партий деталей. Возможность обработки деталей произвольного ассортимента исключает необходимость складирования деталей в ожидании переналадки системы, в результате чего снижаются запасы промежуточных продуктов, потребность в площадях и обеспечивается гибкость планирования производства. Кроме того, к преимуществам ГПС следует отнести и то, что если один участок (или модуль с ЧУ) имеет отклонение от заданного режима работы, то это не влечет за собой отключения всей системы, так как операции неработоспособного модуля распределяются между оставшимися роботами. В результате темп производства снижается, но оно не останавливается. При использовании ГПС имеется возможность экономии производственных площадей за счет исключения специализированного оборудования, сокращения потребности в рабочей силе и снижения степени зависимости от операторов, улучшения условий труда и техники безопасности.

К преимуществам ГПС, по сравнению с обрабатывающими центрами, можно отнести:

– повышение коэффициента использования станков и возможность использования высокопроизводительных рабочих устройств (многошпиндельных головок);

– управление процессами от ЭВМ, обеспечивающее максимальную производительность или максимальный ассортимент обрабатываемых деталей;

– сокращение производственных площадей на 25…30 %;

– сокращение заделов (для некоторых операций и полное их исключение);

– возможность улучшения условий труда, снижение шума.

Чтобы обеспечить оборудованием производство групп деталей без дополнительных капиталовложений (на приобретение специализированного оборудования), фирма Comau запатентовала ГПС, основанную на следующих концепциях использования:

– специальные автономные модули ЧПУ, каждый из которых предназначен для конкретного типа обработки. Специализированный характер таких модулей снижает капиталовложения, упрощает и оптимизирует обработку (обрабатывающий центр, наоборот, представляет собой технический компромисс);

– модульный транспорт между станками;

– стандартизированные палеты; базирование и зажим специальными приспособлениями;

– оборудование модульной конструкции.

Примерами станочных модулей с ЧПУ являются фрезерный модуль MILL, модуль для сверления и нарезания резьбы метчиком DRILL-INDEX, модуль смены многошпиндельной головки MULTIFLEX (MFX), многоцелевой модуль MULTI-STORE (MSR), многоцелевой модуль с наклоняемым шпинделем MULTI-STORE-TILTING, токарный модуль TURN-INDEX.

Фрезерный модуль MILL имеет горизонтально обрабатывающее устройство с ЧПУ, шпиндель и подвижную стойку; движение по осям X, Y и Z обеспечивается антифрикционными направляющими плоского типа, приводимыми в действие серводвигателями; точность позиционирования по осям X и Y составляет ±0,05 мм по всей длине перемещения (для оси Z ± 0,03 мм). Фрезерная головка приводится в действие двигателем постоянного тока мощностью 1,5 кВт через двухскоростную коробку передач.

Модуль для сверления и нарезания резьбы содержит индивидуальный привод для шестипозиционной горизонтальной поворотной головки. Стойка движется по осям X и Y, перемещение по осям X, Y и Z обеспечивается плоскими направляющими, приводимыми в действие серводвигателем. Точность позиционирования

по осям X, Y и Z ±0,05 мм по всей длине хода. Шестипозиционная поворотная револьверная головка приводится в действие двигателем с постоянным крутящим моментом; двигатель постоянного тока мощностью 11 кВт (имеется три скорости). Модуль оснащен инфракрасным датчиком для контроля инструмента.

Модуль TAP-INDEX оснащен шестипозиционной поворотной револьверной головкой, установленной на подвижной стойке. Время смены инструмента 3 с. Точность позиционирования осей X, Y и Z ± 0,1 мм. Двигатель постоянного тока с постоянным крутящим моментом мощностью 5 кВт приводит в действие горизонтальный шпиндель, стандартная коробка передач обеспечивает две скорости. Инфракрасный датчик контролирует износ инструмента.

Модуль смены многошпиндельной головки MULTI-FLEX состоит из устройства для горизонтальной обработки с направляющими и ЧПУ; мощность привода шпинделя 11 кВт. На передней поверхности направляющих расположены установочные и зажимные устройства, а также устройство соединения привода шпиндельной головки. Горизонтальные механизмы барабанного типа емкостью до 6 головок располагаются по обе стороны направляющего устройства. При работе направляющих контроллер ЧПУ подает команду следующей (по последовательности операций) головке для поворота в положение загрузки. Второй барабан получает команду на поворот свободного гнезда в положение разгрузки. При возврате направляющих обе головки (в рабочем положении и положении ожидания) разжимаются и двигаются горизонтально. Затем головки зажимаются, приводится в действие привод, и цикл повторяется. Важно отметить, что головки из магазина могут использоваться произвольно, что позволит главной ЭВМ оптимизировать рабочую загрузку системы в целом. Модуль может использовать щуп; если используется поворотный стол и палета, которые могут поворачиваться на 180 °C, то зондирование производится щупом с несколькими головками, управляемыми от ЭВМ. Размер головки 600 × 600 мм.

Многоцелевой модуль MULTI-STORE состоит из обрабатывающего модуля с ЧПУ с подвижной стойкой и горизонтального

шпинделя с гидравлической балансировкой. Имеется автоматическая система смены инструмента с магазином емкостью 30 инструментов; время смены от 6 до 9 с. Движение по осям X, Y и Z осуществляется с помощью роликовых направляющих плоского типа, точность позиционирования ± 0,015 мм по всей длине перемещения обеспечивается прецизионными шариковыми парами. Система управления позиционированием использует позиционный преобразователь типа индуктосина, который после фиксирования оси зажимается во избежание сдвига. Шпиндель приводится в действие двигателем постоянного тока мощностью 11 кВт с коробкой передач на 2 скорости. Постоянная температура обеспечивается масляной системой охлаждения.

Транспортная система. В каждой ГПС существует, по крайней мере, один загрузочно-разгрузочный участок. В зависимости от вида обработки детали это может быть загрузочно-перегрузочно-разгрузочный участок, который включает в себя автоматические электромеханические затяжные устройства (горизонтальные и вертикальные), зажимающие деталь в палете; верхний специальный зажим (универсальный для большей части деталей); нижнюю стандартную часть палеты (общую для всех деталей стандартного перемещения). Все палеты транспортируются через систему с помощью рольганга модульного исполнения с цепным приводом. На каждом рабочем участке палеты устанавливаются, идентифицируются и получают от ЭВМ команду о направлении дальнейшего движения. Если участок занят или на нем выполняется операция, ЭВМ подает команду палете о перемещении к другому модулю или об обратном движении и возвращении на этот участок через какой-то период времени. Гидравлическая перемещающаяся штанга подает палету к возвращающемуся столу обрабатывающего модуля или отводит от него.

Контроль и управление ГПС. ГПС обычно имеет два основных уровня ЧПУ. При каждом обрабатывающем модуле система ЧПУ типа CNC или PCNC подает на станок команду о выборе требуемого инструмента с учетом последовательности обработки и вспомогательных функций. Второй уровень включает одну или две ЭВМ-супервизора. На этом уровне обеспечивается

координация всех модулей в системе. При введении в систему для обработки новой детали ЭВМ-супервизор проверяет наличие соответствующей программы по этой детали и наличие требуемых инструментов; если ЭВМ определяет, что система не может обрабатывать новую деталь, то деталь и ее палета не получают доступа в систему.

После установки детали в систему ЭВМ-супервизор оптимизирует прохождение детали по системе. Палета останавливается и опознается на каждом участке. Если модуль на ее пути занят или не работает, палета получает команду пропустить, обойти модуль и пройти механообработку на последующих модулях или повторно пройти весь путь и вернуться к этому модулю позже. ЭВМ-супервизор также управляет сменой инструментов в модуле, временем их работы и режимом. Составляются и регулярно печатаются отчеты, выводимые на дисплей, информируя оператора о необходимости замены инструмента. Если емкость магазина позволяет, ЭВМ разрешает использовать инструмент для заранее установленного числа циклов, а затем заменяет его запасным. Кроме того, ЭВМ-супервизор может контролировать и выдавать информацию о выпуске продукции, использовании станка, продолжительности работы, времени простоя и результатах контроля.

2.2. Автоматизированные линии

В качестве примера рассмотрим несколько автоматизированных линий заготовительного производства, по своим характеристикам приближающихся к ГПС кузнечно-прессового производства. Автоматизированная линия горячей штамповки показана на рис. 2.3 [4]. Линия предназначена для получения крупных изделий из крупнотоннажных слитков, производство которых в настоящее время хорошо освоено промышленностью. Линия содержит печь *1* для нагрева крупнотоннажных слитков; автоматизированный ковочный комплекс, состоящий из ковочного пресса *3* и двух манипуляторов *2* с интегрированной системой управления; пресс-ножницы *4* с выдвижным столом для

разделения поковок на мерные длины; печь *5* для нагрева поковок мерной длины для ковки на радиально-ковочной машине *6* с манипуляторами *2*; печь *7* для подогрева длинномерных поковок перед разделением их на заготовки мерной длины на пресс-ножницах *8*; весы *9* для взвешивания заготовок; кольцевую печь *10* для нагрева заготовок перед предварительной штамповкой на заготовительном прессе *11*; печь *12* для нагрева заготовок перед штамповкой на прессе *13* для изотермической штамповки. Линия работает под управлением автоматизированной системы управления *15* и содержит два накопителя *14*, которые выполняют роль буферного устройства.

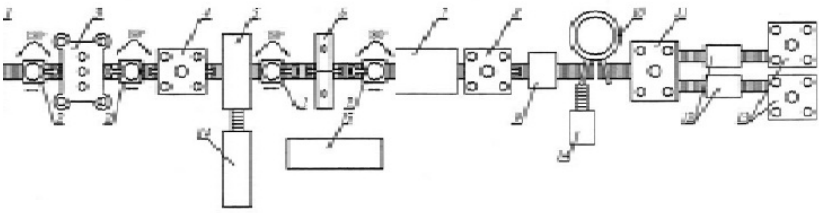


Рис. 2.3. Линия горячей штамповки:
1 – печь для нагрева крупных слитков; *2* – манипуляторы;
3 – ковочный пресс; *4* – пресс-ножницы для разделения поковок;
5 – печь для нагрева поковок; *6* – радиально-ковочная машина;
7 – печь для нагрева поковок перед резкой; *8* – пресс-ножницы; *9* – весы;
10 – кольцевая печь для нагрева заготовок; *11* – заготовительный пресс для штамповки; *12* – проходная печь; *13* – пресс для изотермической штамповки; *14* – накопитель; *15* – пульт управления

Автоматизированный ковочный комплекс (АКК), входящий в линию, предназначен для ковки крупных слитков на заданный размер. Режимы ковки обеспечивают равномерную «проработку» металла по объему поковки. В соответствии с заказом на пресс-ножницах осуществляют разделение поковки на мерные длины для последующей их ковки на радиально-ковочной машине (РКМ). Режим обжатий на РКМ выбирается из условия получения заданной длины поковки, которая в дальнейшем разделяется на пресс-ножницах на конечное число мерных заготовок

(с учетом удаления концевых остатков). Масса мерных заготовок контролируется на весах, установленных в линии. На заготовительном прессе используется фасонный инструмент для «проработки» центральной части заготовок, которая может быть недостаточно хорошо «проработана» на АКК и РКМ. Далее фасонные заготовки поступают на пресс для изотермической штамповки.

АКК и РКМ оборудованы поворотными манипуляторами, которые могут перемещаться вдоль оси линии. Два накопителя, оборудованные около пресс-ножниц, позволяют в случае необходимости разрывать непрерывный технологический поток и использовать только отдельные участки линии. Пресс-ножницы оборудованы датчиками для измерения размеров поковок, позволяющими получать мерные заготовки одинаковой массы (в случае колебания размеров поковок). Линия сконструирована на базе достаточно хорошо отработанного оборудования для отдельных технологических переделов, прошедшего апробацию в промышленности.

Автоматизированная линия изотермического прессования представлена на рис. 2.4 [4]. Линия содержит печь *I* для нагрева заготовок, на выходе которой установлены датчики *1* температуры; многопозиционное скальпирующее устройство *II* для зачистки поверхности заготовки перед прессованием, снабженное датчиками *2* размеров заготовки и датчиками *3* и *4*, определяющими состояние поверхности заготовки на входе и выходе; универсальный гидравлический пресс *III* для прямого и обратного методов прессования, оборудованный датчиками температуры *5* и *7*, контролирующими температуру прессуемого изделия на выходе из очка матрицы, датчиками *6* скорости движения и положения пресс-штемпеля; электроподогревающее устройство *IV* для дополнительного подогрева прессуемого изделия до температуры закалки, снабженное датчиками *7* и *9* температуры на его входе и выходе; закалочное устройство *V*, обеспечивающее скорость охлаждения, необходимую для закалки изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов, снабженное на входе датчиками *8* для определения габаритных размеров прессуемых изделий; правильное устройство *VI* со сканирующим датчиком *10* качества

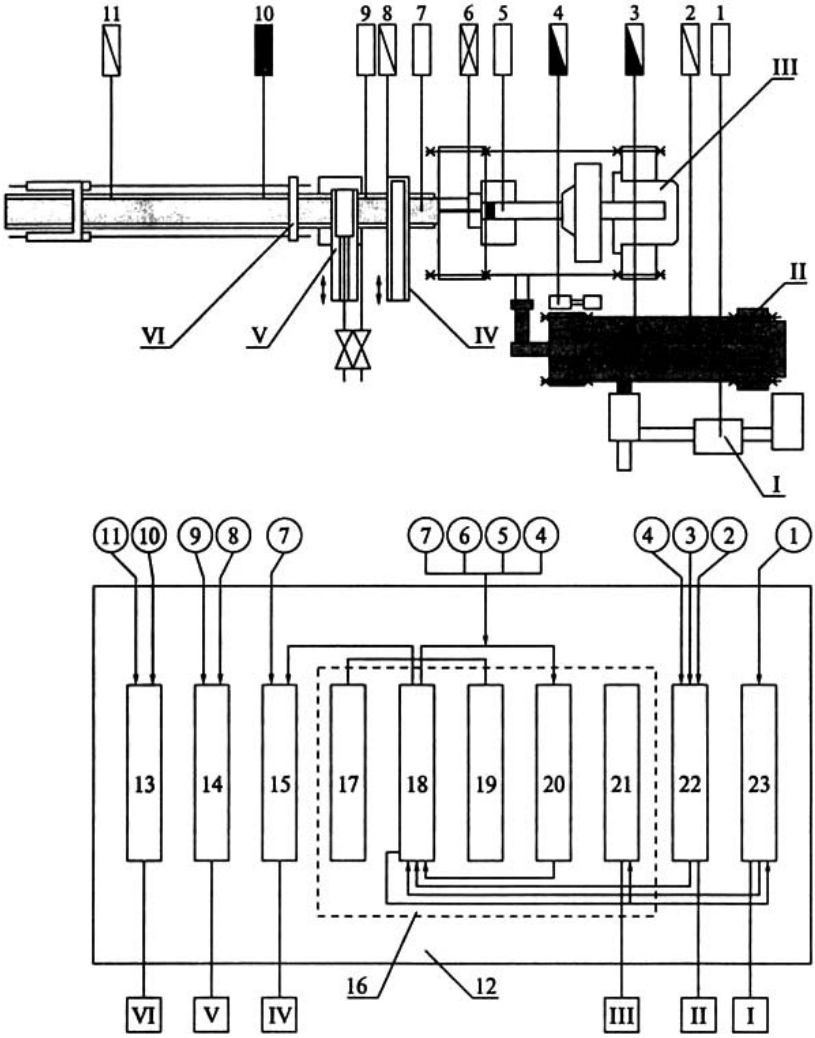


Рис. 2.4. Схема автоматизированной линии изотермического прессования

изделий и датчиками *II*, определяющими размеры элементов прессуемых изделий сложной конфигурации.

Техническая характеристика механического оборудования линии приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Техническая характеристика механического оборудования линии

Характеристика	Единица измерения	Величина
Печь для нагрева заготовки		
– температура нагрева	°С	До 500
– время нагрева	с	120
Многопозиционное скальпирующее устройство		
– номинальное усилие	МН	8
– диаметр заготовок	м	0,2…0,5
– длина заготовок	м	0,4…1,0
– скорость рабочего хода главного плунжера	мм/с	до 50
– привод скальпирующего устройства		НАС
– рабочее давление жидкости	МПа	32
– допустимая несоосность заготовок на матрицы при скальпировании	мм	1,0
Универсальный горизонтальный гидравлический пресс для прямого и обратного прессования		
– номинальное усилие	МН	50
– количество ступеней усилия		3
– I ступень	МН	18
– II ступень	МН	32
– III ступень	МН	50
– скорость рабочего хода:		
с плавным регулированием скорости	мм/с	0,1…10,0
со стабилизацией	мм/с	0,1…20,0
– длина контейнера	м	1,2
– внутренний диаметр втулок контейнера	м	0,42 0,36 0,31 0,27 0,225
высота пресс-остатка:		
– минимальная	м	0,04
– максимальная	м	0,2
давление рабочей жидкости	МПа	32
привод		НАС
Правильно-растяжное устройство		
– номинальное усилие	МН	7
– длина профилей	м	3,0…28,0

Стол пресса оборудован нагревательным и закалочным устройствами, а также устройством для резки изделий (на рис. 2.4 устройство не показано).

Технические показатели линии могут быть изменены в зависимости от применяемого оборудования. Управление технологической линией осуществляется системой управления *12*, которая состоит из блока *13* управления правильно-растяжным устройством, блока *14* управления закалочным устройством, блока *15* управления электроподогревательным устройством. Кроме того, система управления содержит блок *16* управления прессом, который, в свою очередь, состоит из блока *17* адаптации, блока *18* моделирования, блока *19* анализатора текущей ситуации, блока *20* управления градиентным нагревом заготовки в контейнере пресса и блока *21* управления исполнительными органами пресса. Управление скальпирующим устройством и температурой нагрева заготовки перед прессованием осуществляется соответственно блоками *22* и *23*.

Отличительная особенность системы управления – согласованное двухступенчатое регулирование температуры прессуемого изделия путем управления как скоростью движения пресс-штемпеля, так и дополнительным подогревом прессуемого изделия в электроподогревающем устройстве (перед закалкой), установленном на выходе пресса.

Линия работает следующим образом. Перед началом прессования в автоматизированную систему управления линией вводят основные технологические параметры для прессования конкретного изделия. Затем нагретая в печи *I* до определенной температуры заготовка поступает на многопозиционное скальпирующее устройство *II*, где осуществляют зачистку поверхности заготовки (при этом толщина снимаемого слоя металла зависит от размеров и состояния поверхности заготовки). Качество зачищенной поверхности контролирует датчик *4*. Далее зачищенная заготовка поступает на пресс *III*. В процессе прессования результаты измерения температуры поверхности изделия датчиком *7* начинают поступать в блок *19* анализатора текущей ситуации. Исходя из результатов измерений (после их фильтрации и прогнозирования

величины температуры на последующие моменты времени) анализатор текущей ситуации определяет момент, когда продолжение прессования с прежней скоростью может привести к нарушению одной из границ изотермического интервала. В этом случае анализатор устанавливает признак изменения скорости. По этому признаку блок *18* моделирования определяет требуемую скорость прессования на основании текущей оценки параметра, связывающего изменение скорости прессования с изменением температуры выходящего изделия. Вычисленную скорость подают на вход регулятора, поддерживающего заданную величину скорости, воздействуя на исполнительные органы пресса. По окончании теплового переходного процесса, вызванного изменением скорости, блок *17* адаптации корректирует параметр температурно-скоростной зависимости процесса в соответствии с рассогласованием между измеренным и предсказанным значениями температуры. При расчете скорости прессования могут использоваться результаты измерения положения и скорости пресс-штемпеля, что позволяет сделать более гибким алгоритм адаптивного управления. Изделие, выходящее из пресса, поступает в электроподогревающее устройство *IV*, в котором осуществляют (в случае необходимости) дополнительный подогрев прессуемого изделия до температуры закалки, кроме того, благодаря этому устройству продляется зона высокой температуры металла изделия.

Далее прессуемое изделие поступает в закалочное устройство *V*. Для предотвращения деформации закалку изделия осуществляют в процессе прессования под нагрузкой.

По окончании прессования и закалки задний конец прессуемого изделия закрепляют в неподвижной траверсе правильно-растяжного устройства *VI* и осуществляют правку изделия растяжением. Процесс правки (величина растяжения, скоростной, режим правки) контролирует блок *13* управления правильным устройством.

Таким образом, в непрерывном потоке на одном автоматизированном технологическом комплексе осуществляют все основные технологические операции по производству изделий

сложной конфигурации из высокопрочных алюминиевых сплавов, а после небольших изменений и для производства изделий из малолегированных алюминиевых сплавов и тяжелых цветных металлов.

На базе линии изотермического прессования ОАО «Уралмаш» разработан автоматизированный технологический комплекс на базе универсального пресса усилием 50 МН, предназначенный для производства сплошных профилей периодического и постоянного по длине сечений с диаметром описанной окружности до 350 мм.

В состав комплекса входят устройство для зачистки поверхности литых заготовок (скальпирующее устройство) с комплексом автоматики и механизации, горизонтальный гидравлический пресс усилием 50 МН, приемный стол пресса с приводом и устройством для вытягивания отпрессованного изделия из мундштука пресса, устройство для резки изделий на столе пресса, перекладчик отпрессованной продукции с приемного стола пресса на транспортер-холодильник, устройство съема и накопления изделий, автоматизированная система управления температурно-скоростными режимами прессования.

Система управления обеспечивает следующие режимы прессования: изотермическое прессование профилей постоянного сечения; программное изменение скорости прессования для профилей периодического сечения; прессование профилей периодического сечения с постоянной скоростью; программное изменение скорости прессования профилей постоянного сечения. Диапазон изменения и регулирования скорости движения пресс-штемпеля от 0,1 до 10 мм/с, погрешность – 5 %.

Приемный стол пресса – роликовый с приводными роликами. Длина прессуемых профилей: максимальная – 16 м, минимальная – 4,5 м. Устройство для резки изделий на приемном столе пресса обеспечивает резку изделий и пучка изделий. Резке подвергается профиль с диаметром описанной окружности до 350 мм и максимальной толщиной 60 мм. Допустимый диаметр описанной окружности пучка профилей – 250 мм, количество профилей в пучке 1…4 шт.

Комплекс обслуживают три человека: один – на пульте управления, один – на входной стороне комплекса (обслуживает работу индукционной печи и скальпирующего устройства, обеспечивает подачу заготовок и уборку отходов скальпирования), один – осуществляет смену инструмента, уборку партий профилей из накопителя.

Автоматизированные комплексы и линии изотермического прессования позволяют ликвидировать ряд трудоемких технологических операций (повторный нагрев изделий под закалку, закалку изделий, ряд транспортных и подготовительных операций), осуществлять закалку длинномерных изделий определенного сортамента без создания дорогостоящих крупногабаритных закалочных устройств, снизить трудоемкость процесса на 9…10 чел·ч на одну тонну годной продукции; сократить на 350…500 кВт·ч расход электроэнергии на одну тонну изделий; повысить выход годной продукции (за счет снижения отходов) на 2…4 %, что, например, для прутково-профильного пресса усилием 50 МН (при производительности 9000 тонн в год) составит около 300 тонн в год; повысить производительность процесса на 50…60 кг годных изделий в час (за счет повышения скорости прессования); сократить производственные площади; сократить на 2…3 человека обслуживающий персонал; повысить равномерность механических свойств и качество поверхности по всей длине прессуемого изделия за счет изотермического режима прессования и предварительной зачистки поверхности заготовок в многопозиционном скальпирующем устройстве; решить проблему адаптации системы управления скоростью прессования к изменяющимся условиям прессования длинномерных изделий сложной конфигурации.

Описанные выше автоматизированная линия и комплекс изотермического прессования защищены пятью авторскими свидетельствами и патентами ФРГ, Японии, Италии, Турции и Индии.

Схема линии по производству крупногабаритных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов, разработанная ОАО «Уралмаш», показана на рис. 2.5. В состав линии входит следующее уникальное оборудование. Мощный горизонтальный

гидравлический многоцилиндровый пресс, предназначенный для прессования прямым и обратным способами крупногабаритных изделий из алюминиевых сплавов.

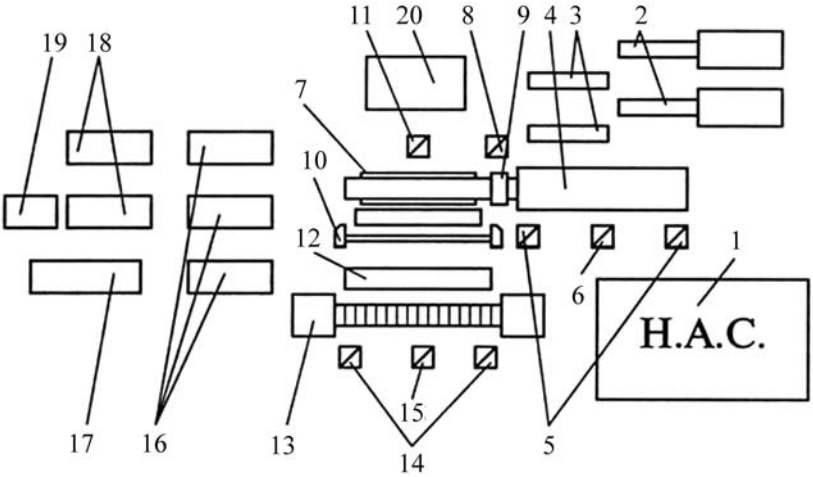


Рис. 2.5. Линия по производству длинномерных крупногабаритных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов:
1 – насосно-аккумуляторная станция; *2* – печи для нагрева слитков; *3* – устройство для зачистки слитков; *4* – горизонтальный гидравлический пресс; *5* – датчики температуры на входе и выходе пресса; *6* – датчик скорости движения пресс-штемпеля; *7* – закалочное устройство на столе пресса; *8* – датчик температуры на входе в закалочное устройство; *9* – подогревающее устройство на столе пресса; *10* – машина для обрезки концов; *11* – датчик качества прессуемых изделий; *12* – стеллаж; *13* – правильно-растяжная машина; *14* – датчик перемещения захватов машины; *15* – датчик для определения деформаций; *16* – горизонтальные агрегаты для закалки крупногабаритных изделий; *17* – ролико-правильная машина; *18* – печи для отжига и старения крупногабаритных изделий; *19* – установки ультразвукового контроля; *20* – центральный пульт автоматизированной системы управления линией прессования

Технические возможности пресса позволяют прессовать изделия с законцовками. Контейнер выполнен удлиненным с повышенным отношением длины контейнера к диаметру рабочей

втулки. Пресс оборудован устройствами для зачистки слитков перед прессованием, стоящими в линии подачи слитков от печи к прессу. Привод пресса, помимо насосно-аккумуляторной станции, оснащен также и индивидуальной насосной установкой с насосами переменной производительности. Схемой предусмотрено подключение любой группы рабочих цилиндров как к насосам, так и к насосно-аккумуляторной станции. На входе и выходе пресса установлены пирометрические бесконтактные датчики температуры для регистрации температуры слитков и прессуемого изделия на выходе из очка матрицы. Скорость движения и положение пресс-штемпеля замеряются с помощью дифференциально-индуктивных датчиков. По своим эксплуатационным характеристикам эти датчики превосходят известные фотоэлектрические датчики, применяемые в локальных регуляторах скорости движения пресс-штемпеля.

Предусмотрена возможность регулировки скорости рабочего хода пресс-штемпеля управляемыми дросселями или насосами переменной производительности. В выходной части пресса имеются приемный стол специальной конструкции, холодильник и пилы для обрезки концов отпрессованных изделий. Все операции от выдачи слитка из печи до получения изделия механизированы.

Правильно-растяжная машина (ПРМ) для правки и упрочнения длинномерных изделий из алюминиевых сплавов состоит из двух тянущих выкрутных головок одинакового исполнения, каждая из которых снабжена индивидуальным масляным приводом. Основанием машины служат станина и опорные балки, установленные и закрепленные на фундаменте. Боковые балки служат опорой и направляющими для проставок. Машина снабжена датчиками скорости и положения тянущих головок, а также сканирующим датчиком деформации отдельных частей пресс-изделия.

Далее в линии установлены горизонтальные агрегаты для закалки крупногабаритных изделий, печи для отжига и старения крупногабаритных изделий, участок ультразвукового контроля и роликоправильная машина.

Технологический процесс производства длинномерных изделий выглядит следующим образом. Слиток, нагретый в печи *2* до температуры, превышающей на 10…15 °С температуру прессования, после зачистки поверхности на устройстве *3* поступает на пресс *4*. На прессе обеспечиваются изотермические условия прессования, после чего часть изделий закаляется непосредственно на столе пресса в закалочном устройстве *7*. После закалки эта часть изделий, после обрези концов на машине *10*, поступает на ПРМ *13*. Контроль данной части изделий производится в потоке. Основная же часть изделий после прессования и обрези концов поступает на термообработку в агрегатах *16* и *18*, а затем на правку на роликовой *17* и протяжной *13* машинах. После этого изделия проходят ультразвуковой контроль на установках *19*.

Работа линии координируется автоматизированной системой управления, охватывающей основные технологические операции, такие как нагрев слитков перед прессованием, процесс прессования на гидравлическом прессе, термообработку и правку изделий на растяжной правильной машине. Для части изделий предусмотрен контроль их качества (точность размеров, сплошность, механические свойства) после каждой технологической операции.

Температурный режим нагрева слитков перед прессованием назначается в зависимости от размеров слитков, их химического состава и фактических механических свойств, определяемых в процессе прессования первого слитка. Система управления осуществляет контроль над режимом нагрева.

Известно, что однородность механических свойств по всей длине длинномерных прессуемых изделий имеет место в условиях изотермического прессования, когда обеспечивается постоянство температуры металла на выходе из очка матрицы по всей длине прессуемого изделия. Одновременно достигается и максимальная производительность процесса, что весьма важно при производстве длинномерных изделий.

Система управления процессом прессования призвана обеспечить изотермические условия прессования за счет регулирования скорости движения пресс-штемпеля в процессе прессования.

2.3. Гибкие производственные системы механообрабатывающего производства

Анализ производства большинства промышленно развитых стран показал, что 80…90 % всех деталей, изготавливаемых в настоящее время на станках, целесообразнее получать используя гибкие производственные системы (ГПС или входящие в состав ГПС гибкие производственные модули). Следует иметь в виду, что стоимость программного и аппаратного обеспечения производственного оборудования всей ГПС составляет около 75 % ее стоимости, остальные 25 % стоимости ГПС приходятся на транспортное и другое вспомогательное оборудование. В качестве примера рассмотрим ГПС фирмы Vought (США), предназначенную для механической обработки деталей фюзеляжа американского бомбардировщика B1B. ГПС, поставленная фирмой Cincinnati Milacron (США), включает в себя восемь идентичных горизонтальных обрабатывающих центров с ЧПУ, связанных при помощи транспортной сети из четырех автоматических транспортных тележек с двумя управляемыми от ЭВМ координатно-измерительными машинами; автоматическую станцию мойки и сушки; два карусельных накопителя плит-спутников и автоматическую систему сбора стружки (рис. 2.6).

Станочное оборудование ГПС состоит из восьми горизонтальных обрабатывающих центров HC-20 фирмы Cincinnati Milacron (США), предназначенных для контурного фрезерования, сверления, растачивания, развертывания и нарезания резьбы. Они имеют магазин емкостью 30 инструментов, в котором хранится набор инструментов для обработки на любом из восьми станков. Каждый станок имеет устройство автоматической смены плит-спутников челночного типа с позицией промежуточного хранения. На плитах-спутниках имеются многоместные приспособления для установки различных деталей на одну плиту.

Четырехкоординатные станки могут обрабатывать заготовки размерами 800 × 800 × 900 мм и массой до 2270 кг из черных и цветных металлов. Имеется автоматический конвейер для

отвода стружки, измерительное устройство для установки нулей отсчета, устройство обнаружения поломки инструмента и система адаптивного управления крутящим моментом на шпинделе. Обрабатывающие центры оснащены системами ЧПУ типа CNC Acramatic 900, каждая из которых связана с центральной ЭВМ (DNC).

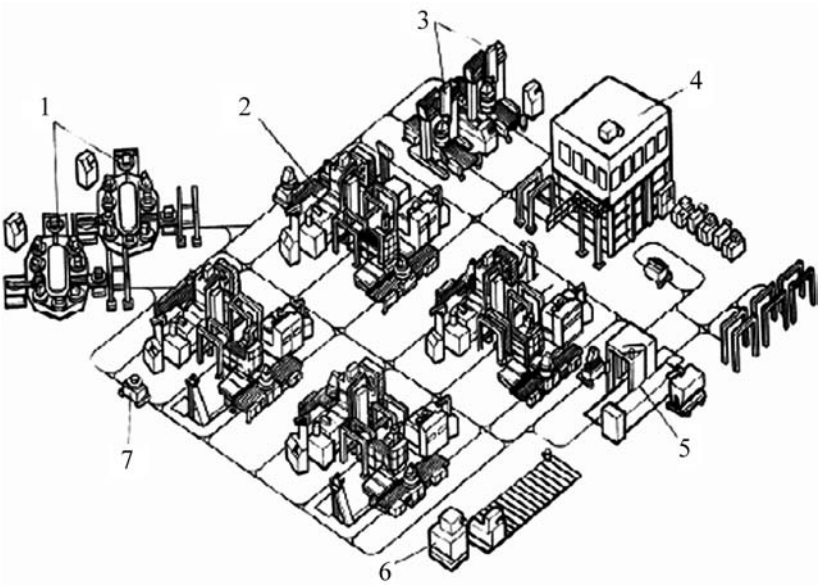


Рис. 2.6. Планировка гибкой производственной системы фирмы Vought: *1* – позиция загрузки-выгрузки; *2* – обрабатывающие центры; *3* – координационно-измерительные машины; *4* – комната с управляющей ЭВМ; *5* – автоматическая моечная станция; *6* – автоматическая система сбора стружки; *7* – направляемые по проводам тележки

Две координатно-измерительные машины производят автоматический контроль обработанных деталей. Данные цикла измерений детали передаются по системе обратной связи на соответствующий станок для автоматической регулировки смещения инструментов. Измерительные машины связаны с системой DNC, циклом измерения управляет центральная ЭВМ. Работу ГПС и других безлюдных систем затрудняет удаление стружки.

Фирма Vought (США) пытается решить эту проблему с помощью автоматической системы сбора стружки и СОЖ, расположенной под полом. Двухпоточная система связана со всеми станками, разделяет стружку черных и цветных металлов, удаляет сгустки масла из СОЖ. Система имеет автоматический самоочищающийся всасывающий фильтр (т. е. в нем не используется сменная фильтровальная бумага), оборудована воздушной системой сушки с электрическим подогревом и конвейером для доставки стружки черных и цветных металлов в различные контейнеры, которые затем транспортируются на автоматических транспортных тележках. Химический состав СОЖ контролируется. Детали и заготовки загружаются и снимаются вручную с двух десятиместных карусельных накопителей, которые в пределах ГПС обслуживаются четырьмя направляемыми по проводам транспортными тележками.

Всей ГПС управляет система DNC с помощью ЭВМ. Последовательность обработки деталей в ГПС задается оператором в соответствии с ежедневным производственным заданием. Его решения учитываются в производственном плане предприятия с помощью системы обратной связи.

Фирма Grumman (США) использует интегрированную ячейку для фрезерования и сверления отверстий в деталях сложного профиля и листовом алюминии, которые применяются в конструкции обшивок, панелей, обтекателей и дверей. До внедрения ячейки эти детали обрабатывались вручную с использованием зажимных приспособлений. Центральный элемент ячейки – робот IRE-60 фирмы ASEA. Ячейка включает в себя также пять основных элементов с программным управлением: контейнер, рабочий стапель для установки и закрепления детали, систему автоматической смены инструмента и контроля (рис. 2.7).

В заключение отметим, что в механообработке металлов достигнуты значительные успехи в разработке новых режущих материалов и приводов для металлорежущих станков, в результате чего значительно сократилось основное машинное время на обработку каждой заготовки.

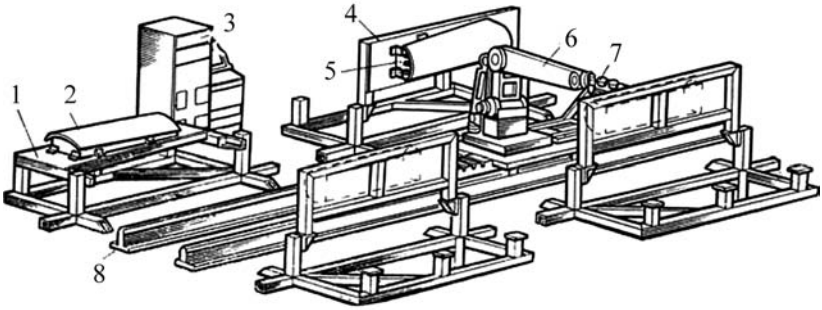


Рис. 2.7. Схема интегральной роботизированной ячейки:
1 – позиция загрузки; *2* – обрабатываемая деталь; *3* – блок управления; *4* – позиция обработки; *5* – оснастка; *6* – робот; *7* – робот для смены инструмента; 8 – рельсы для перемещения робота

Много нерешенных проблем существует в области разработки систем крепления, включая системы переналадки приспособлений для крепления инструментов и др. Ведутся дальнейшие работы в области сенсорной техники, систем автоматической регулировки и управления процессами производства. Особое внимание уделяется созданию универсальных и надежных систем распознавания дефектов износа и поломки инструментов. Для большинства металлообрабатывающих предприятий основой развития гибкого производства и снижения затрат на обработку является модульная технология.

Контрольные вопросы

1. Укажите основные виды промышленного производства.
2. Дайте определение и описание ГПС.
3. Дайте определение и описание ГАП.
4. Дайте определение АЛ.
5. Проведите сравнительный анализ ГПС, ГАП и АЛ для различных видов производств.
6. Опишите назначение и структуру автоматизированной линии горячей штамповки.

7. Опишите назначение и структуру автоматизированной линии изотермического прессования.

8. Сформулируйте назначение пресса изотермической штамповки в составе автоматизированной линии горячей штамповки.

9. Сформулируйте принципы изотермического прессования.

10. Сформулируйте принципы системы управления изотермическим прессованием.

11. Опишите функциональное назначение устройств управления линии изотермического прессования.

12. Опишите работу линии изотермического прессования.

13. Укажите технико-экономические характеристики изотермического прессования.

14. Опишите работу линии по производству длинномерных крупногабаритных изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов.

15. Опишите планировку гибкой производственной системы Vought.

16. Дайте технико-экономическую характеристику гибкой производственной системы Vought.

Лекция 3
ВВЕДЕНИЕ В ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Проектирование технического объекта – создание, преобразование и представление в принятой форме образца этого, еще не существующего, объекта. Образ объекта может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться с помощью некоторых алгоритмов в процессе взаимодействия с ЭВМ.

Инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности в некоторых технических объектах. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий сведения, достаточные для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть проект – окончательное описание объекта.

Проектирование предполагает выполнение комплекса работ исследовательского, расчетного и конструктивного характера.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека с ЭВМ, называется *автоматизированным*. Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой *систему автоматизированного проектирования* – CAD (Computer Aided Design в англоязычной терминологии).

Имеется несколько типов проектов: технические, организационные, экономические, социальные и смешанные. Однако процесс проектирования имеет две особенности: во-первых, состав и последовательность его этапов не зависит от целевого назначения проекта, во-вторых, логика процесса проектирования инвариантна к способу проектирования – традиционному или автоматизированному.

Кроме того, для подходов к проектированию сложных мехатронных систем характерны:

– структуризация процесса проектирования (декомпозиция проектных задач и документации);

– итерационный характер проектирования;

– типизация и унификация проектных решений и средств проектирования;

– информационная поддержка (в том или ином виде) на всех этапах процесса проектирования;

– соблюдение основных принципов проектирования.

3.1. Основные принципы проектирования

При решении задач проектирования руководствуются рядом основных принципов.

Последовательность и итерационность. Последовательность заключается в строгой очередности выполнения этапов проектирования механизма или машины, а итерационность – в корректировках проектных решений, полученных на предыдущих этапах проектирования.

Модульный принцип проектирования состоит в максимально возможном использовании однотипных узлов (или элементов узлов) при проектировании семейства машин различного целевого назначения. Сложные системы необходимо проектировать так, чтобы поведение одной части системы оказывало минимальное воздействие на остальную систему. Этот принцип базируется на активном использовании компьютерной техники и применяется тогда, когда уже имеется достаточно четкое представление о семействе проектируемых машин.

Применение модульного принципа при проектировании одного механизма или одной машины бессмысленно и невозможно. Только в случае разработки семейства машин и использовании при этом ограниченного числа готовых узлов последние становятся модулями. Модули являются следствием принятого технического решения, ибо в принципе проектировать можно так, что

узлы одного назначения не будут даже отдаленно похожи друг на друга.

Различают модули *производственные* (применяемые без каких-либо изменений в машинах различного целевого назначения), *технологические* (отличающиеся в основном технологией изготовления и незначительными конструкторскими изменениями, относящимися, как правило, к местам крепления узлов, например: правый-левый, верхний-нижний, передний-задний и т. п.) и *конструкционные* (имеющие конструкционное подобие, но различные размеры).

Современное техническое обеспечение САПР позволяет легко получать зеркальные изображения узлов (технологические модули) с минимальными затратами труда и времени. Несколько сложнее получить конструкционные модули, так как при их проектировании необходимо одновременно выполнять требования соблюдения размерных рядов и максимально возможной унификации.

При использовании модульного принципа проектирования на уровне принятия концепции должен быть решен вопрос о критерии целесообразности его применения для проектируемого семейства машин. Модули, используемые в последующих разработках, переходят в категорию унифицированных узлов.

Принцип унификации связан с применением в семействе проектируемых механизмов или машин унифицированных сборочных единиц (узлов, подузлов, агрегатов), деталей (оригинальных и стандартных), комплектующих. Как показывает опыт автоматизированного проектирования, применение типовых унифицированных деталей нецелесообразно. Значительно выгоднее иметь большое количество макрусов и существенные заделы в банках данных по модификациям и унифицированным узлам, что позволяет избегать излишней детализации конструкторских разработок. Информацию об унифицированных деталях, узлах и системах целесообразно хранить на микрофишах систематизированно по группам.

Принцип соответствия выбора номенклатуры и значений выходных характеристик целевому назначению проектируемой

машины или механизма. Чем ответственнее проектируемый объект, тем большее число выходных характеристик и параметров объекта регламентируется и тем более жесткие требования к ним предъявляются. Например, вероятность безотказной работы станков принимается в пределах 0,95–0,99, а самолетов – 0,999 99.

Другой пример. Число установленных и проверяемых выходных параметров точности станка при высоких требованиях к точности обрабатываемых деталей может достигать 20–30, в то время как для станков нормальной точности достаточно регламентировать 8–10 показателей. Основная цель регламентации выходных параметров станка – обеспечить погрешность обработки, которая находилась бы в установленных пределах в течение всего периода его эксплуатации.

Во всех случаях проектировщику необходимо помнить, что соответствие выходных характеристик механизма или машины их целевому назначению в первую очередь определяет общая компоновка, принимаемая на концептуальном уровне.

Принцип компромиссов. Проектирование – это непрерывная цепь компромиссов, которые приходится принимать на всех стадиях создания механизма или машины. Например, стремление к увеличению частоты вращения шпиндельных узлов всегда приводит к увеличению тепловыделения в опорах, которое не может превышать определенного уровня, и принятие окончательного решения всегда требует компромисса.

Улучшение любой технической характеристики машины (скорости, грузоподъемности, точности, надежности, производительности и др.) неизбежно вызывает увеличение ее стоимости, трудоемкости изготовления, часто требует другого уровня обслуживания и повышения культуры эксплуатации, что всегда приводит к компромиссным решениям.

Тенденция современных машиностроительных производств к концентрации операций постоянно требует от проектировщика решения задачи рационального сочетания технологических возможностей и усложнения конструкций оборудования. Избыточность технологических возможностей может быть не оправдана экономически.

Увеличение надежности машины почти всегда сопровождается ее усложнением и удорожанием. Выбор опор и направляющих, обеспечивающих незначительный износ, применение новых материалов, специальных покрытий, смазок, термообработки повышают трудоемкость изготовления и стоимость машины. Далеко не всегда ясно, *что* экономически целесообразнее – удорожать механизм или машину изначально либо совершенствовать систему обслуживания и ремонта в период эксплуатации. Компромисс заключается в обеспечении в первую очередь надежности наиболее ответственных деталей и узлов машины.

Принцип преемственности. Практически любые механизмы и машины являются продуктом эволюции, и в них всегда имеются элементы, детали и узлы, разработанные ранее. Соблюдение преемственности является одним из эффективных путей снижения затрат и сокращения сроков создания машины.

Хорошо отработанные элементы и узлы нет нужды заменять, и в одной машине прекрасно могут сосуществовать «новое» и «старое». Изыскание новых принципов построения механизмов и машин не является, как правило, задачей конструирования. *Суть проектирования – обеспечение требуемых характеристик машины, а не погоня за оригинальностью*. Преемственность определяется самой логикой последовательного развития машин. Модернизация, систематическое совершенствование позволяют поддерживать показатели выпускаемых машин на уровне постоянно возрастающих требований в течение определенного времени без коренной переработки конструкции. Например, ведущие автомобильные фирмы выпускают принципиально новую модель только раз в 8–10 лет.

Вопрос заключается в том, как *наиболее рационально сочетать новое со старым*. Это зависит как от качества отработки отдельных проектных решений (стоит ли заменить), так и от уровня технологической подготовки производства (можем ли заменить). На этом пути существуют две основные опасности: консерватизм, влекущий за собой добровольный отказ от творческого поиска и приводящий к необъективной критике новых решений и отказу от них, и психологическая инерция, ослабляющая

самоконтроль, в результате чего конструктору очень трудно отрешиться от своего решения, так как он находится в плену идеи.

Преемственность при проектировании имеет несколько аспектов:

– приверженность фирм к определенным, отработанным годами решениям (в области компоновки, конструкции узлов, дизайна и т. п.). Это то, что определяет «почерк» фирм, и они весьма неохотно расстаются со своими традиционными решениями, часто связанными с «ноу-хау» и даже иногда носящими названия фирм;

– индивидуализация конструкций механизмов и машин не должна распространяться на все элементы и узлы. Модули могут и должны использоваться для различных моделей;

– конструктивная преемственность дает возможность увеличить эффективность разработки за счет использования модулей и унифицированных элементов и узлов;

– степень заимствования определяется на концептуальном уровне и зависит от возможности принятия своих и чужих технических решений в неизменном или модифицированном виде, реальных возможностей проектировщика, определяемых квалификацией, сроками и другими обстоятельствами.

Работающая сложная система неизбежно оказывается результатом работающей простой системы. Сложная система, разработанная на бумаге от начала и до конца, как правило, никогда не работает, и ее невозможно заставить работать. Всегда надо начинать с работающей простой системы.

3.2. Схема процесса проектирования

Стадии проектирования – наиболее крупные части проектирования процесса, развивающегося во времени. В общем случае выделяются стадии научно-исследовательских работ (НИР), эскизного проекта или опытно-конструкторских работ, технического, рабочего проектов, испытаний опытных образцов или опытных партий. Стадию НИР иногда называют предпроектными

исследованиями, или стадией технического предложения. Очевидно, что по мере перехода от стадии к стадии степень подробности и тщательность проработки проекта возрастают. Рабочий проект должен быть вполне достаточным для изготовления опытных или серийных образцов. Близким к определению стадии, но менее четко оговоренным понятием является понятие этапа проектирования.

Стадии (этапы) проектирования подразделяют на составные части, называемые ***проектными процедурами***. Примерами проектных процедур могут служить подготовка деталировочных чертежей, анализ кинематики, моделирование переходного процесса, оптимизация параметров и другие проектные задачи.

В свою очередь, проектные процедуры можно расчленить на более мелкие компоненты, называемые ***проектными операциями***. Например, при анализе прочности детали сеточными методами могут быть построены сетки, произведены выбор или расчет внешних воздействий, собственно моделирование полей напряжений и деформаций, представление результатов моделирования в графической и текстовой формах. Проектирование сводится к выполнению некоторых последовательностей проектных процедур – ***маршрутов проектирования***.

На рис. 3.1 показана укрупненная схема процесса проектирования.

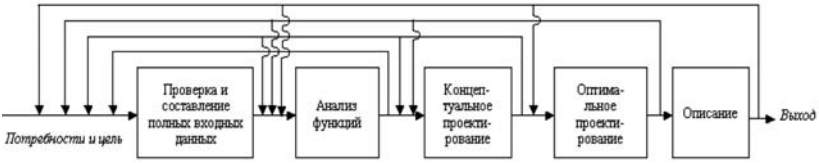


Рис. 3.1. Укрупненная схема процесса проектирования

Техническая разработка системы начинается с определения нужд потенциального пользователя разрабатываемой системы. Часто оказывается, что пользователь желает иметь систему, выполняющую данную работу, однако испытывает трудности при количественной формулировке своих потребностей и целей.

Поэтому у инженера и пользователя возникает дополнительная задача количественного воплощения целей системы так, чтобы была определена содержательная совокупность целевых функционалов для последующей разработки (проверка и составление полных входных данных).

Коль скоро потребности и цели системы определены, необходимо дать количественное описание функций, которые должны выполнять система и любая требуемая подсистема. Эта процедура называется анализом функций. Его цель состоит в выборе функций, или операций, которые должны быть проведены для выполнения задачи, требуемой от разрабатываемой системы. Эти функции становятся затем целями низшего уровня для разработки подсистем. Определение функций по своей природе носит качественный характер. Однако коль скоро функция или операция определена, она должна быть описана в количественных терминах. Например, если операцию нужно провести быстро, необходимо оговорить допустимое время.

Следующий шаг, показанный на рис. 3.1, является одним из наиболее трудных этапов в технической разработке системы и, конечно, самым трудным шагом для аналитического описания. Концептуальное проектирование, как видно из названия, состоит в определении концепций, или основных конфигураций системы, которые могут удовлетворить целям системы. На этом шаге желательно оставить концепции по возможности в общем виде, с тем чтобы не исключить кандидатуры систем, которые могут оказаться эффективными. Например, если операция, подлежащая выполнению, есть продвижение летательного аппарата над поверхностью Земли, то концептуальные проекты могут включать в себя проектирование колес, направляющих, стоек и воздушной подушки. На этом этапе процесса проектирования важно определить границы приемлемых значений параметров, описывающих систему. Для параметров проектирования в пределах этих значений система должна уметь выполнять функции, определенные на предыдущем шаге.

Пусть мы имеем дело с оптимальным проектом, для которого целью является выбор неопределенных параметров, введенных

на предыдущем шаге (оптимальное проектирование). Эти параметры должны быть в пределах, определяемых технологическими ограничениями и назначением системы. Критерием выбора параметров системы является максимизация стоимости системы или минимизация меры затрат. Следует особо отметить, что математически точный оптимум может оказаться недостижимым и, следовательно, служить лишь ориентиром. Однако методы выбора параметров системы должны обладать таким свойством, что если оптимум существует, то при достаточном терпении и заданном машинном времени он должен быть в пределе достижим.

То что является последним шагом в модели технической разработки системы на рис. 3.1 (описание оптимальной системы), в действительности оказывается промежуточным шагом. До тех пор пока процедура проектирования системы не станет исключительно эффективной, система, предложенная группой разработчиков, не будет удовлетворять заказчика. Получив результаты одного прохождения через процедуру проектирования системы, заказчик, вероятно, вспомнит некоторые ограничения, которые он забыл описать и которые оптимальная система нарушает. Проектировщик также может найти привлекательные решения, которых он ранее не видел. Он опять-таки в большей мере, чем заказчик, вспомнит технологические ограничения, которые он забыл описать и которые оптимальная система нарушает. Наконец, заказчик, несомненно, решит, что неплохо бы уменьшить на малую величину уровни качества системы, если это приведет к экономии денег.

На следующем шаге процедуры каждый участник группы должен сделать глубокий вдох и вернуться к работе, вооруженный добытыми с трудом новыми знаниями. Именно с этой целью указаны все каналы обратной связи в модели на рис. 3.1. Эта итеративная процедура продолжается до тех пор, пока заказчик не решит, что предлагаемая система является той, в которой он действительно нуждается. Это будет еще одно решение, принимаемое человеком, но математически не запрограммированное.

Основные стадии и процедуры процесса проектирования показаны на рис. 3.2. Разделение процесса проектирования на последовательные стадии (этапы) является в известной степени

условным, поскольку в процессе проектирования пересматриваются и уточняются ранее принятые решения.

Прокомментируем основные стадии проектирования. ***Техническое задание*** (ТЗ) обосновывает те новые качества, которыми должен обладать проектируемый объект, и является наряду с техническим предложением итогом предпроектной подготовки. ТЗ устанавливает основное назначение объекта, обосновывает целесообразность его создания и регламентирует все основные технические характеристики (требования).

В процессе подготовки ТЗ разрабатывается основная концепция проектирования. Разработкой концепции занимается небольшая по численности группа проектантов высшей квалификации.

Техническое предложение формулирует принятую концепцию, уточняя и развивая техническое задание. Оно состоит из совокупности конструкторских документов, необходимых для дальнейшего проектирования. Техническое предложение обеспечивает и уточняет технические характеристики проектируемой машины и диапазоны эксплуатационных нагрузок и скоростей. На этом этапе выбирают окончательный вариант компоновки машины, ее узлов и агрегатов, пользуясь результатами анализа, синтеза и оптимизации вариантов компоновок, и разрабатывают принципиальные схемы машины: кинематическую, гидравлическую, пневматическую, электрическую и др., а также принимают тип и характеристики системы управления, определяют общие габаритные размеры.

Техническое предложение дает полное представление о компоновке и возможностях проектируемых механизмов или машин.

Эскизный проект содержит предварительную конструкторскую проработку всех основных узлов и является развитием технического предложения. Он базируется на анализе различных конструкторских решений, результатах расчетов, оптимизации важнейших параметров и характеристик машины.

При конструировании машины, ее узлов и систем следует максимально использовать стандартные и унифицированные детали, механизмы и элементы, что удешевляет проектируемую машину.

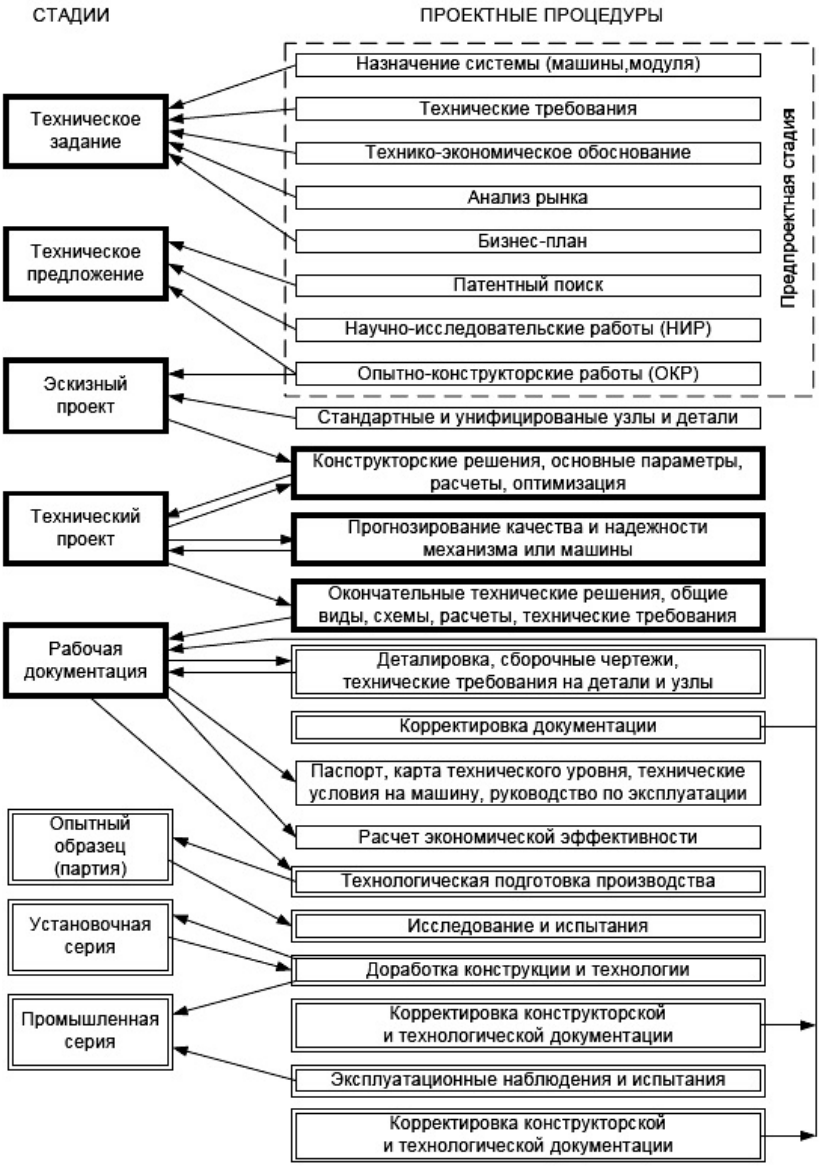


Рис. 3.2. Стадии и процедуры процесса проектирования

Каждое конструкторское решение должно быть обосновано результатами расчетов, рассмотрено с точки зрения обеспечения качества и надежности функционирования проектируемой машины, технологичности изготовления и сборки, удобства эксплуатации, ремонтопригодности и т. д.

Технический проект включает в себя окончательную конструкторскую проработку всех узлов, чертежей, схем машины и ее общих видов. На этом этапе производят все виды уточненных и поверочных расчетов, оптимизируют необходимые параметры узлов и систем машины, окончательно определяют ее эффективность; прогнозируют выходные характеристики и оценивают надежность машины с учетом вероятностной природы режимов ее эксплуатации. Проект должен содержать все исходные данные, необходимые для разработки комплекта технической документации на проектируемый механизм или машину, его согласовывают и утверждают в установленном порядке.

Рабочая документация – завершающий этап проектирования. Он включает в себя разработку рабочих чертежей всех оригинальных деталей и простановку технических требований на их изготовление, составление технологической документации, корректировки (в случае необходимости) технического проекта, составление спецификаций оригинальных и покупных комплектующих деталей, формирование паспорта машины, карты технического уровня, инструкции по эксплуатации и ряда других документов. Рабочая документация должна содержать все данные, необходимые для изготовления проектируемого механизма или машины. Выпуск рабочей документации существенно упрощается при применении САПР.

После завершения разработки комплекта рабочей документации осуществляются ***технологическая подготовка производства*** и последующие этапы изготовления и отладки спроектированной машины. В ряде случаев для сокращения сроков выпуска новой техники технологическую подготовку производства начинают заранее до завершения выпуска комплекта рабочей документации. Применение техники CAD/CAM значительно сокращает сроки подготовки производства.

3.3. Системный подход к проектированию

В лекции 1 было отмечено, что наиболее общим подходом к проектированию мехатронных систем является системный подход. В системотехнике можно выделить три подхода к процессу проектирования: структурный, блочно-иерархический и объектно-ориентированный.

Блочно-иерархический подход к проектированию использует идеи декомпозиции описания сложных систем на иерархические уровни, вводит понятие стиля проектирования, устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

В лекции 1 отмечено, что для большинства приложений характерны три иерархических уровня: *системный*, *макроуровень* и *микроуровень*. В каждом – приложение наименований уровней и их число может быть различным (в радиотехнике, вычислительной технике, машиностроении и т. д.). Например, в машиностроении имеются уровни: деталей, узлов, машин и комплексов машин.

В зависимости от последовательности решения задач иерархических уровней различают ***нисходящее***, ***восходящее*** и ***смешанное*** проектирование (стили проектирования).

Восходящее проектирование предполагает решение задач от нижних уровней к верхним. ***Нисходящее*** проектирование – от верхних к нижним. ***Смешанный стиль*** имеет элементы как восходящего, так и нисходящего проектирования. В большинстве случаев для сложных систем предпочтение отдают нисходящему проектированию, но часто используют и смешанное.

Неопределенность и нечеткость исходных данных при нисходящем проектировании (так как еще не спроектированы компоненты) или исходных требований при восходящем проектировании (поскольку техническое задание имеется на всю систему, а не на ее части) обусловливают необходимость прогнозирования недостающих данных с последующим их уточнением, т. е. последовательного приближения к окончательному решению (итерационность проектирования).

Наряду с декомпозицией описаний на иерархические уровни применяют разделение представлений о проектируемых объектах на аспекты.

Аспект описания (страта) – описание системы или ее части с некоторой оговоренной точки зрения, определяемой функциональными, физическими или иного типа отношениями между свойствами и элементами.

Различают ***функциональный***, ***информационный***, ***структурный*** и ***поведенческий*** (процессный) ***аспекты***.

Функциональное описание относят к функциям системы и чаще всего представляют его функциональными схемами.

Информационное описание включает в себя основные понятия предметной области (сущности), словесное пояснение или числовые значения характеристик (атрибутов) используемых объектов, а также описание связей между этими понятиями и характеристиками. Информационные модели можно представлять графически (графы, диаграммы *сущность – отношение*), в виде таблиц или списков.

Структурное описание относится к морфологии системы, характеризует составные части системы и их межсоединения и может быть представлено структурными схемами, а также различного рода конструкторской документацией.

Поведенческое описание характеризует процессы функционирования (алгоритмы) системы и (или) технологические процессы создания системы.

Иногда аспекты описаний связывают с подсистемами, функционирование которых основано на различных физических процессах.

Отметим, что в общем случае выделение страт может быть неоднозначным. Так, помимо указанного подхода очевидна целесообразность выделения таких аспектов проектирования, как *функциональное* (разработка принципов действия, структурных, функциональных, принципиальных схем), *конструкторское* (определение форм и пространственного расположения компонентов изделий), *алгоритмическое* (разработка алгоритмов и программного обеспечения) и *технологическое* (разработка технологических процессов) проектирование систем. Примерами страт в случае САПР могут служить также рассматриваемые далее виды обеспечения автоматизированного проектирования.

Структурный подход к проектированию требует синтезацию вариантов системы из компонентов (блоков, модулей) и оценку этих вариантов (предварительно спрогнозировав характеристики компонентов). Он основан на идее алгоритмической декомпозиции (по методу «сверху-вниз»), где каждый блок (модуль) системы выполняет один из этапов общего процесса проектирования. Таким образом, представление о проектируемой системе расчленяется на отдельные блоки (модули), являющиеся частями алгоритма функционирования системы.

Структурный подход включает в себя создание структуры проектируемой системы и расчет ее параметров. Эти две части подхода называют *структурным и параметрическим синтезом* системы (как это было сказано в лекции 1). Задачи структурного синтеза относятся к задачам проектирования, наиболее сложным с точки зрения возможности их формализации.

Результатом структурного синтеза должны быть или перечень типов элементов вместе с таблицей соединений, или схема расположения элементов с указанием их типа, или эскизный чертеж, или схема алгоритма и т. п. Структурный синтез обычно осуществляется по блочно-иерархическому принципу. Это означает, что синтезируется не вся сложная система целиком, а на каждом уровне проектирования синтезируется определенный уровень системы – структурная схема (элементы изображения устройств), далее функциональная схема и конструкции устройств (элементы, блоки), затем более мелкие функциональные и конструктивные единицы. Такой подход существенно упрощает решение задачи синтеза.

Параметрический синтез систем обычно реализуют с помощью методов и алгоритмов оптимизации. Однако для непрерывных систем (когда управляемые параметры непрерывны и могут принимать любые значения в пределах непрерывной допускаемой области) и для дискретных систем (с дискретными внутренними параметрами) методы оптимизации имеют существенное отличие. Задачи дискретной оптимизации относятся к задачам дискретного математического программирования.

Задачи дискретного программирования считаются более трудными для решения, чем задачи математического программирования с непрерывными параметрами.

Сложность решения задач синтеза систем естественно отождествлять со сложностью производственных систем. Для поддержки концептуального проектирования сложных плохо структурированных систем наиболее перспективными являются генетические методы оптимизации, экспертные системы и CASE-системы, которые будут рассмотрены в последующих лекциях.

Объектно-ориентированный подход рассматривает сложную систему как совокупность взаимодействующих друг с другом объектов, каждый из которых является экземпляром отдельного класса. Такой подход наиболее перспективен при проектировании и моделировании сложных систем.

При структурном подходе жизненный цикл разработки сложной системы складывается из этапов анализа, проектирования, программирования, тестирования и сопровождения, которые выполняются последовательно. Главным недостатком такого подхода является последовательность выполнения этапов. Например, программирование можно начать только по завершении анализа и проектирования. Это приводит к большим потерям времени, не позволяет быстро разрабатывать прототипы программной системы. Этот подход не согласуется с интерактивным характером разработки программной системы, поскольку на последних этапах может выясниться необходимость внесения изменений в решения, принятые на предыдущих этапах (см. лекцию 1).

В целом структурному подходу присущи следующие недостатки [6]:

– трудоемкость внесения изменений;

– большой объем документации по проекту;

– серьезные ограничения возможностей сборки системы из готовых компонентов;

– сложность переноса на другие платформы.

Стремление избавиться от недостатков структурного подхода, базирующегося на системном анализе, привело к возникновению объектно-ориентированного анализа (ООА). В ООА такие понятия, как система, структура, состояние, иерархия, событие,

сущность, пришедшие из системотехники, были дополнены новыми понятиями, такими как *домен, класс, объект, атрибут, наследственность, инкапсуляция, полиморфизм* и др.

Долгое время объектно-ориентированный подход (ООП) (на базе ООА) развивался почти исключительно программистами, хотя в начале он предназначался для моделирования (проектирования) сложных систем и использовался в языке моделирования Simula-67. Своеобразным итогом многолетнего развития объектно-ориентированного программирования можно считать появление «унифицированного языка моделирования» UML (Unified Modeling Language).

Только в последние годы ООП стал востребованным в своей первоначальной области – моделировании. Для его реализации наиболее известны пакеты Simulink и Stateflow, работающие вместе с Matlab.

Рассмотрим несколько основополагающих понятий объектно-ориентированного анализа (ООА): ***сущность, связь, атрибут***.

Под *сущностью* (entity) понимается произвольное множество реальных или абстрактных объектов, каждый из которых обладает одинаковыми свойствами и характеристиками. В этом случае каждый рассматриваемый объект может являться экземпляром одной и только одной сущности, должен иметь уникальное имя или идентификатор, а также отличаться от других экземпляров данной сущности. Примерами сущностей могут быть: предприятие, фирма, цех, банк, клиент банка, технология, компьютер, рейс. Каждая из сущностей может рассматриваться с различной степенью детализации, что определяется конкретной постановкой задачи.

Связь (relationship) определяется как отношение или некоторая ассоциация между отдельными сущностями. Примером связей могут быть родственные отношения типа «отец – сын» или производственные отношения «начальник – подчиненный». Другой тип связей задается отношениями «иметь в собственности», «обладать свойством» или «быть частью».

Атрибут – это каждая отдельная характеристика, которая является общей для всех возможных экземпляров объекта.

Атрибутами являются такие характеристики, как высота, температура, регистрационный номер или положение предметов в реальном мире.

Чтобы обратиться к атрибуту, пишут <имя объекта>, <имя атрибута>, как например:

– самолет, размах крыла;

– листопрокатный стан, 1500;

– аудитория, лекционная.

Фундаментальными понятиями объектно-ориентированного подхода являются понятия *объекта*, *класса*, *домена*. *Объекты* – конкретные предметы, а также абстрактные и реальные сущности в реальном мире, а точнее, в интересующей разработчика предметной области. Например, объектами могут быть: студент, кафедра, университет. Объект обладает индивидуальностью и поведением, имеет атрибуты, значение которых определяют его состояние. Так, конкретный студент, сдавая экзамен, может оказаться в состоянии, когда его ответы не удовлетворяют экзаменатора, а его «поведение» в этом случае заключается в «дополнительной подготовке к экзамену».

Класс – это абстрактная совокупность объектов, которые имеют общий набор свойств и обладают одинаковым поведением. Понятие класса впервые было введено в язык UML. Объекты и классы обладают характерными свойствами, которые активно используются при объектно-ориентированном подходе и во многом определяют его преимущество. К важной особенности классов относится возможность их организации в виде некоторой иерархической структуры.

Домен – отдельная предметная область, «населенная» набором объектов, которые ведут себя в соответствии с правилами домена. Большие домены разбивают на подсистемы.

Основными принципами объектно-ориентированного подхода являются: *наследование*, *инкапсуляция* и *полиморфизм*.

Наследование – первый принцип, в соответствии с которым знание о более общей категории разрешается применять для более частной категории. Наследование тесно связано с иерархией классов, которая определяет, какие классы следует считать

наиболее абстрактными и общими по отношению к другим классам. При этом если родительский класс (предок) обладает фиксированным набором свойств и поведением, то производный от него класс (потомок) должен содержать этот же набор свойств и поведение, а также дополнительные свойства, которые будут характеризовать уникальность полученного таким образом класса. В качестве примера можно привести общий класс «Автомобиль», а в качестве производных классов рассмотреть «Легковой автомобиль», «Легковой автомобиль производства BMW», «Конкретную модель BMW». Наследование, позволяющее создавать иерархию классов, является эффективным средством внесения изменений и дополнений в программы проектируемых систем.

Инкапсуляция – это сокрытие отдельных деталей внутреннего устройства классов от внешних по отношению к нему объектов или пользователей. Объекты можно считать самостоятельными сущностями, отделенными от внешнего мира. Для того чтобы объект произвел некоторое действие, ему извне необходимо послать сообщение, которое инициирует выполнение нужного действия. Инкапсуляция позволяет изменять реализацию любого класса объектов без опасения, что это вызовет нежелательные побочные эффекты в программной системе. Тем самым упрощается процесс исправления ошибок и модификацию программ.

Полиморфизм – это свойство некоторых объектов принимать различные внешние формы в зависимости от обстоятельств. Применительно к объектно-ориентированному программированию (ООП) полиморфизм означает, что действия, выполняемые одноименными методами, могут отличаться в зависимости от того, к какому из классов относится тот или иной метод [7]. Рассмотрим, например, три объекта соответствующих классов: «Студент», «Водитель», «Фигурист». Для каждого из них можно определить операцию учиться. Однако результат выполнения этой операции будет отличаться для каждого из рассмотренных объектов.

Методология ООП оказала влияние на процесс разработки программ. *Процедурно-ориентированная декомпозиция* программ уступила место *объектно-ориентированной декомпозиции*, при которой отдельными структурными единицами программы стали

являться не процедуры и функции, а классы и объекты с соответствующими свойствами и методами (действиями). Программа стала *событийно-управляемой* и перестала быть последовательностью предопределенных на этапе кодирования действий. При разработке современных приложений каждая программа представляет собой бесконечный цикл ожидания некоторых заранее определенных событий. При этом инициаторами событий могут быть другие программы или пользователи.

При использовании методологии ООП написание программного кода может быть отделено от процесса проектирования структуры программы. До начала программирования классов, их свойств и методов необходимо определить, чем же являются сами эти классы. Более того, нужно дать ответы на такие вопросы, как: сколько и каких классов необходимо определить для решения поставленной задачи, какие свойства и методы необходимы для придания классам необходимого поведения, а также установить взаимодействие между классами. Таким образом, анализ предметной области решаемой задачи необходимо проводить до начала написания программы.

Жизненный цикл объектно-ориентированной разработки программных систем содержит несколько этапов, но в отличие от структурного подхода в нем нет строгой последовательности их выполнения. Процесс носит принципиально итерационный характер, что значительно упрощает написание программ [6].

Разработка начинается с этапа исследования (объектно-ориентированного анализа). Здесь предъявляются требования к системе. Затем осуществляется анализ предметной области, в ходе которого определяются классы и объекты, которые составляют словарь предметной области.

После исследования начинается объектно-ориентированное проектирование, в ходе которого детализируются классы и объекты, полученные на этапе анализа. При этом могут вводиться новые классы и объекты, если это потребуется. В результате проектирования должна быть создана детальная модель системы, составлены спецификации объектов, классов и отношений, достаточных для программирования.

Для разработки программных систем используются инструментальные средства CASE-систем, такие как SADT – Structured Analysis and Design Technique, IDEF – Integrated DEFinition и UML. Эти средства будут рассмотрены в последующих лекциях.

В отличие от процедурно-ориентированного подхода к программированию, в объектно-ориентированном подходе к моделированию и проектированию реальных физических систем различного назначения полиморфизмом называется возможность использования вместо объектов одного декларированного класса объектов другого класса, называемого замещающим, совместного с первым. Совместимость классов означает, что либо замещающий класс является потомком декларированного класса, либо декларирован интерфейс, а замещающий класс реализует этот интерфейс. Таким образом, можно выделить «совместимость по наследованию» и «совместимость по интерфейсу». Под интерфейсом в объектно-ориентированном моделировании (ООМ) следует понимать некоторую совокупность видимых компонентов объекта, т. е. для блока (на структурной схеме объекта) – это внешние переменные и видимые извне процедуры и функции. Таким образом, если блок (замещающего класса) содержит совокупность видимых компонентов с теми же именами, что в декларации интерфейса, и с совместимыми типами, то блок реализует этот интерфейс. Каждый блок неявно задает определенный интерфейс – совокупность всех своих внешних компонентов [8].

Особенность процесса разработки современных сложных систем состоит в том, что центр тяжести работ смещается от программирования к более ранним этапам – анализу и проектированию.

Рассмотрим основные преимущества объектно-ориентированного подхода [6]:

– *распараллеливание работ* (программирование и тестирование отдельных компонентов системы возможно до завершения проектирования, возможность внесения изменений и дополнений без переработки проекта);

– *гибкость архитектуры и переносимость* (в клиент-серверной системе объекты могут размещаться как на местах клиента,

так и на сервере. Возможность реализации классов на компьютерах различного типа, а фиксированный интерфейс каждого класса обеспечивает правильность функционирования системы);

– *возможность повторного использования программных компонентов* (библиотеки классов позволяют значительно снизить объем программирования новых приложений);

– *естественность описания* (использования естественного языка описания предметной области, легко выделяются объекты и связи между ними) [6].

Основные недостатки объектно-ориентированного подхода [6]:

– объектно-ориентированная декомпозиция заметно отличается от алгоритмической, что влечет за собой необходимость преодоления психологических трудностей и дополнительные расходы на обучение новой методике и языку программирования;

– основные недостатки объектно-ориентированного подхода лежат в области программирования: активное динамическое создание и удаление новых объектов (что широко используется в объектно-ориентированных языках);

– многочисленность методов и их излишние вызовы (для доступа к многим атрибутам объектов используются специальные методы).

Однако надо иметь в виду, что при использовании традиционных технологий некоторые результаты можно получить и при сравнительно небольших затратах, но на определенной стадии наступает насыщение, когда даже значительные дополнительные затраты не приводят к существенному повышению эффективности.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «проектирование».

2. Дайте развернутую характеристику подходов к проектированию сложных технических систем.

3. Сформулируйте основные принципы проектирования.

4. Опишите укрупненную схему процесса проектирования сложных систем.

5. Назовите основные стадии и процедуры процесса проектирования.

6. Прокомментируйте содержание основных стадий процесса проектирования.

7. Прокомментируйте содержание основных процедур процесса проектирования.

8. Опишите назначение и порядок проведения предпроектной стадии проектирования.

9. Опишите блочно-иерархический подход к проектированию сложных систем (стили проектирования, аспекты описания).

10. Дайте характеристику структурному подходу к проектированию сложных систем (две части структурного подхода).

11. Укажите основные недостатки структурного подхода к проектированию.

12. Сформулируйте основные принципы необходимости объектно-ориентированного подхода к проектированию сложных систем.

13. Рассмотрите основные понятия объектно-ориентированного анализа (ООА).

14. Опишите фундаментальные понятия объектно-ориентированного подхода.

15. Сформулируйте основные принципы объектно-ориентированного подхода.

16. Укажите основные преимущества и недостатки объектно-ориентированного подхода.

Лекция 4
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В лекции 1 (п. 1.1) было сказано, что в состав развитых машиностроительных систем автоматизированного проектирования (САПР) на этапах проектирования и подготовки производства входят в качестве составляющих системы CAD, CAE и CAM.

4.1. Общая характеристика систем автоматизированного проектирования

Рассмотрим основные функции автоматизированных систем CAD, CAE и CAM на этапах проектирования и подготовки производства.

CAD – автоматизированное проектирование – представляет собой компьютерную технологию для облегчения создания, изменения, анализа и оптимизации проектов. Наиболее важным компонентом CAD являются системы автоматизированной разработки рабочих чертежей и системы геометрического моделирования. Кроме того, CAD используется для оптимизации и анализа, имеет программы для анализа допусков, расчета массинерциальных свойств, моделирования методом конечных элементов и визуализации результатов анализа.

CAM – автоматизированное производство – это компьютерная технология для планирования, управления и контроля операций производства через прямой и косвенный интерфейс с производственными ресурсами предприятия. CAM используется для числового программирования управления станками с ЧПУ

и роботами, работающими на гибких автоматизированных участках. В задачах планирования производства CAM стыкуется с автоматизированной системой *MRP* и *ERP* через систему *PDM* (*MRP – material requirement planning* – планирование технических требований к материалам).

CAE – автоматизированное конструирование – это компьютерная технология для анализа геометрии деталей, моделирования и изучения поведения изделий для усовершенствования и оптимизации их конструкций. Средства CAE могут осуществлять множество различных вариантов анализа (кинематические расчеты, динамический анализ, расчет напряжений методом конечных элементов – *FEM – finite-element method*). Метод FEM рассчитывает теплообмен, распределение магнитных полей, потоков жидкости и другие задачи с непрерывными средами. Для применения метода FEM необходима аналитическая модель объекта подходящего уровня.

CAE наиболее эффективно используется на стадии анализа и оптимизации конструкции.

Функции CAD-систем

Функции CAD-систем в машиностроении подразделяют на функции двумерного и трехмерного проектирования. К функциям *2D* относят черчение, оформление конструкторской документации; к функциям *3D* – получение трехмерных геометрических моделей, метрические расчеты, реалистичную визуализацию, взаимное преобразование *2D*- и *3D*-моделей. В ряде систем предусмотрено также выполнение процедур, называемых процедурами позиционирования. К ним относят компоновку и размещение оборудования, проведение соединительных трасс.

Среди CAD-систем различают системы нижнего, среднего и верхнего уровней. Первые из них иногда называют «легкими» системами, они ориентированы преимущественно на *2D*-графику, сравнительно дешевы, основной аппаратной платформой для их использования являются персональные ЭВМ. Системы верхнего уровня, называемые также «тяжелыми», дороги,

более универсальны, ориентированы на геометрическое твердотельное и поверхностное *3D*-моделирование, оформление чертежной документации в них обычно осуществляется с помощью предварительной разработки трехмерных геометрических моделей. Системы среднего уровня по своим возможностям занимают промежуточное положение между «легкими» и «тяжелыми».

К важным характеристикам CAD-систем относятся параметризация и ассоциативность. Параметризация подразумевает использование геометрических моделей в параметрической форме, т. е. при представлении части или всех параметров объекта не константами, а переменными. Параметрическая модель, находящаяся в базе данных, легко адаптируется к разным конкретным реализациям и поэтому может использоваться во многих конкретных проектах. При этом появляется возможность включения параметрической модели детали в модель сборочного узла с автоматическим определением размеров детали, диктуемых пространственными ограничениями. Эти ограничения в виде математических зависимостей между частью параметров сборки отражают ассоциативность моделей.

Параметризация и ассоциативность играют важную роль при проектировании конструкций узлов и блоков, состоящих из большого числа деталей. Действительно, изменение размеров одних деталей оказывает влияние на размеры и расположение других. Благодаря параметризации и ассоциативности изменения, сделанные конструктором в одной части сборки, автоматически переносятся в другие части, вызывая изменения соответствующих геометрических параметров в этих частях.

CAD-системы геометрического моделирования делятся на *каркасные*, *поверхностные*, *твердотельные* и *немногообразные* [9].

Каркасное моделирование (wireframe modeling systems) представляют форму тела в виде набора характеризующих ее линий и конечных точек. Визуальная модель представляет собой каркасный чертеж формы, а соответствующее математическое описание представляет набор уравнений кривых, координат точек и сведений о связности кривых и точек (принадлежность точек

к конкретным кривым, а также пересечение кривых друг другом). Однако эта модель не содержит сведений о внутренних и внешних поверхностях объекта, что не позволяет рассчитать массу объекта.

В *системах поверхностного моделирования* (surface modeling systems) математическое описание визуальной модели включает в себя не только сведения о характеристических линиях и их конечных точек, как в каркасном моделировании, но и данные о поверхностях. При работе с отображаемой на экране моделью изменяются уравнения поверхностей, кривых и координат конечных точек. Существует три стандартных метода создания поверхностей в системах поверхностного моделирования:

– интерполяция входных точек;
– интерполяция криволинейных сеток;
– трансляция и вращение заданной кривой.

Системы твердотельного моделирования (solid modeling systems) предназначены для работы с объектами, состоящими из замкнутого объема или монолита (solid). Системы линий и поверхностей должны образовывать замкнутый объем, т. е. объем тела полностью заполнен материалом. Математическое описание объекта, созданного в системе твердотельного моделирования, содержит сведения, по которым система может определить, где находится какая-либо точка: внутри объекта, снаружи него или на его границе.

Немногообразные системы моделирования (nonmanifold modeling systems) позволяют использовать каркасные, поверхностные, твердотельные и сотовые (а также другие немногообразные) модели одновременно в одной и той же системе моделирования, расширяя диапазон доступных моделей сверх возможностей любой из упомянутых систем. К сожалению, обычные системы геометрического моделирования (каркасные, поверхностные, твердотельные) не поддерживают моделирование немногообразных моделей.

Более подробно системы геометрического моделирования описаны в [9].

Функции CAM-систем

Основные функции CAM-систем: разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки, генерация постпроцессоров для конкретных типов оборудования с ЧПУ, расчет норм времени обработки.

Другая важная функция CAM – программирование роботов, которые могут работать в гибких производственных системах и на автоматизированных участках. Еще одна важная функция CAM состоит в автоматизации *технологической подготовки производства* (Computer Aided Process Planning – CAPP). Автоматизация технологической подготовки производства связывает проектирование и производство и позволяет достигнуть полную интеграцию CAD и CAM.

CAPP составляет основу CAM и выполняет синтез технологических процессов и программ для оборудования с ЧПУ, а также выбор оборудования, оснастки, инструмента, расчет норм времени и т. п.

Технология подготовки производства (CAPP) заключается в выборе технологических процессов и их параметров, а также оборудования для реализации этих процессов. Технологическую подготовку можно определить также, как составление подробных технологических инструкций для станка или сборщика агрегата, изделий.

Автоматизированный подход к подготовке производства реализуется в виде *модифицированного подхода* (variant approach) или *генеративного подхода* (generative approach).

Модифицированный подход называется так потому, что он является модификацией неавтоматизированного (традиционного) планирования производства, выполняемого вручную: технолог пользуется не только своей памятью, но и памятью компьютера. Другими словами, рабочий журнал технолога хранится в компьютерном файле.

Типичный технологический план производства подобной детали может автоматически извлекаться из такого файла после описания анализируемой детали в соответствии с определенной системой кодирования. Выбранный план производства может редактироваться в интерактивном режиме; в него вносятся поправки, соответствующие специфике конкретной детали. Таким образом, модифицированный подход требует наличия базы данных со стандартными планами производства для каждого семейства деталей. Такой план должен содержать все инструкции, которые будут входить в план производства любой детали из данного семейства. Детали классифицируются по семействам на основании концепции групповой технологии. Согласно этой концепции каждой детали присваивается код, зависящий от ее элементов, после чего детали группируются в семейства в соответствии с присвоенными кодами. О групповой технологии будет рассказано в другом разделе.

Итак, модифицированный подход к разработке плана производства выражается в следующем. Технологическая подготовка производства новой детали начинается с кодирования ее особенностей, что эквивалентно описанию детали на языке группой технологии. Затем деталь может быть отнесена к какому-либо семейству на основании ее кода, после чего из базы данных извлекается стандартный план производства для деталей этого семейства. В плане содержатся общие инструкции по производству любых деталей семейства, поэтому может потребоваться его редактирование для получения плана нужной детали.

Редактирование осуществляется средствами компьютерной системы. Часто изменения оказываются незначительными, потому что новый план представляет собой лишь небольшую модификацию стандартного. Благодаря этому на этапе подготовки плана экономится время, а готовые планы оказываются гораздо более последовательными, чем разрабатываемые вручную.

Если деталь нельзя отнести к одному из существующих семейств, технолог может разработать новый стандартный план производства в интерактивном режиме.

Генеративный подход (generative approach) состоит в том, что технологический план вырабатывается автоматически на основании технических требований к детали. В технические требования должны включаться подробные сведения о материале, особенностях обработки и предлагаемых методиках проверки, а также графическое изображение формы детали.

На первом этапе разработки плана производства новой детали при генеративном подходе технические требования вводятся в компьютерную систему. В идеале они должны считываться непосредственно из базы данных САПР. Для этого необходимо, чтобы автоматизированная система технологической подготовки могла распознавать элементы детали, требующие машинной обработки, такие как отверстия, пазы и выемки.

Реализация первого этапа значительно упрощается, если при моделировании детали используется объектно-ориентированный подход. Однако даже конструктивные элементы, используемые в системе объектно-ориентированного моделирования, могут потребовать преобразования к элементам, которые могут быть изготовлены машинной обработкой.

Некоторые конструктивные элементы однозначно сопоставляются с технологическими, тогда как преобразования других представляют собой не совсем обычную процедуру. Кроме того, информации об элементах, вообще говоря, недостаточно для технологической подготовки производства. Например, большинство моделей CAD не содержат сведений о допусках и материалах, и их приходится вводить вручную. При этом схема кодирования должна определять все геометрические элементы и их параметры, в частности положение, размеры и допуски. Закодированные данные сопровождаются информацией в текстовом формате. Наконец, система должна иметь сведения о форме заготовки.

На втором этапе закодированные данные и текстовая информация преобразуются в подробный технологический план производства детали. На этом этапе определяется оптимальная последовательность операций и условия их выполнения. К условиям относятся используемые инструменты, крепления, измерительные приборы, зажимы, схемы подачи и скорости обработки. Для

построения столь подробного плана производства детали произвольной сложности требуется большая база данных и сложная логическая система.

Этап технологической подготовки производства в основном сводится к решению следующих задач [1]:

– разработка технологий изготовления изделий, инструментов, приспособлений и т. д. на основе их геометрических моделей, полученных на этапе проектирования (CAD);

– подготовка программ для технологического оборудования (станков, прессов, прокатных станов и др.) с ЧПУ по спроектированным технологиям.

Программные среды, с помощью которых решаются задачи этого этапа, можно объединить в две группы. К первой из них следует отнести программные комплексы, специально разработанные для выполнения всего цикла или определенных процедур технологической подготовки производства. Среди данной группы программного обеспечения можно выделить ADEM, ArtCAM, EdgeCAM и некоторые разработки российских фирм: КОМПАС, АВТОПРОЕКТ (Аскон) – проектирование технологических процессов механообработки, штамповки, сборки, термообработки; FLEX ТехноПро (Топ Системы) – проектирование технологии механообработки, сборки, сварки, пайки, нанесения покрытий, штамповки, ковки, термообработки; СИТЕП ЛШ – листовая штамповка; TECHCARD (Интермех) – комплексная система автоматизации технологической подготовки производства; ТехноПро (Вектор) – универсальная система автоматизации технологического проектирования; SprutCAM, СПРУТ-ТП (СПРУТ-Технологии) – система автоматизированного проектирования технологических процессов и др.

Другую группу программного обеспечения составляют программные системы сквозного проектирования и технологической подготовки производства: CATIA, EUCLID3, Unigraphics, Pro/Engineer, CADDS и др.

Контроль качества управляющих программ выполняют специальные программы, например такие, как NC Simul, NC Formater и др.

В производстве машиностроительных и части приборостроительных изделий используют технологии, в основе которых лежат различные физические процессы: механообработка, электроэрозионная обработка, литье металлов и пластмасс и др.

В автоматизированных системах сквозного проектирования и подготовки производства наиболее часто реализованы следующие виды механообработки: 2,5-, 3- и 5-координатное фрезерование, токарная обработка, сверление, нарезание резьбы и др.; имеется возможность моделировать движение инструмента и снятие материала во время черновой и чистовой обработки поверхности изделия. Например, в простейшем варианте 2- и 2,5-координатной обработки поверхностей: контурная обработка, фрезерование призм и тел вращения, выборка карманов с возможностью движения «в одну сторону», зигзаг, спираль, а также нарезание резьбы и снятие фасок. В модулях 3- и 5-координатного фрезерования программных систем сквозного проектирования и технологической подготовки производства реализованы практически все возможные способы обработки поверхностей изделий, например такие, как фрезерование поверхности с управлением угла наклона инструмента, шлифующее резание с возможностью обдувки и др.

При выполнении различных видов механообработки используется общая база данных для поддержки связи между геометрической моделью обрабатываемой детали и управляющей программой для станка с ЧПУ, где проходы инструмента создают по геометрии модели. Изменение геометрии отражается в управляющей программе. Траектория движения инструмента создается интерактивно по поверхности модели изделия, благодаря чему технологи получают возможность визуально наблюдать на экране монитора имитацию процесса удаления стружки, контролировать зарезы и быстро вносить изменения в циклы обработки.

С помощью специальных функций автоматически вычисляется объем, который необходимо удалить из заготовки при обработке изделия.

В системах сквозного проектирования и технологической подготовки производства различных фирм-разработчиков реализо-

ваны свои подходы к организации программ, свои алгоритмы и методы. Более подробно эти подходы реализованы в системах верхнего уровня САПР, например в системе EUCLID3 фирмы EADS MATRA DATA VISION (Франция), которая воплотила многолетний опыт специалистов различных отраслей и считается одной из лучших в мире. В [1] описаны основные положения проектирования технологий фрезерной и токарной обработки.

Практика показывает, что предприятия по-разному подходят к созданию своих интегрированных информационных систем, предназначенных для комплексного решения задач автоматизации конструирования, инженерного анализа и технологической подготовки производства. Во многих случаях на рабочих местах конструкторов и технологов устанавливаются программные среды различных фирм-разработчиков. В этих условиях вопросы организации обмена информацией становятся актуальными. Известно, что обмен без потерь информации достигается при наличии единой базы данных для различных подсистем. Этим выгодно отличаются комплексные системы сквозного проектирования и подготовки производства верхнего уровня. В тех случаях, когда на рабочих местах устанавливаются программные среды различных фирм, организация обмена информацией ложится на самих пользователей. Поэтому важно, чтобы для таких программ были разработаны соответствующие интерфейсы с необходимой полнотой реализации форматов (CALS-технологии).

При подготовке производства также широко используется *групповая технология проектирования и подготовки производства*.

Групповая технология – это группировка задач, в основном подобных друг другу, позволяющая найти общее их решение, сэкономив тем самым время и усилия.

Это всеобъемлющее определение можно конкретизировать, определив область его применения. Суть групповой технологии состоит в создании базы данных подобных деталей, проектов и технологий и использовании этой базы для внедрения общей процедуры проектирования и производства таких деталей. Детали объединяются в семейства по конструктивному подобию

(например, по схожести форм) и по технологическому подобию (например, по необходимым операциям, таким как фрезерование или сверление).

Групповая технология широко используется для упрощения продвижения продуктов на производстве. Выделение деталей с общими технологическими параметрами позволяет разработать эффективные планы производства, выделяя для каждого семейства одну ячейку плана. Таким образом, упрощаются технологические маршруты, сокращаются временные затраты на передачу материалов между станками и длительность производственных циклов.

Более того, поскольку подобные детали производятся на одних и тех же станках, часто сокращаются и временные затраты на настройку станков. Может использоваться специальное технологическое оснащение. В предыдущем разделе отмечалось, что коды групповой технологии используются для выбора существующих планов в автоматизированной технологической подготовке производства.

Инженерам-технологам не приходится разрабатывать планы с нуля для каждой новой детали – вместо этого они могут обращаться к планам производства аналогичных деталей и изменять их в соответствии с техническими требованиями к новым деталям.

Концепция групповой технологии дает преимущества и на этапе проектирования. С ее помощью часто удается устранить избыточное разнообразие деталей, предоставив конструкторам возможность осуществлять поиск по семействам деталей. Часто конструкторы просто не знают о наличии аналогичных проектов среди текущих разработок. Обычно это бывает связано с тем, что система нумерации деталей не дает им достаточной информации. В таких случаях возникает тенденция к дублированию деталей с незначительными изменениями, не имеющими отношения к назначению деталей. Избыток деталей приводит к быстрому увеличению количества бумаг, а также к расходам заготовок.

В процессе разработки технических изделий широкое применение находят их физические прототипы [9].

Быстрое прототипирование и изготовление (БПИ) – это способ физического моделирования для получения физического прототипа конструкции, например детали (физический объект), – широко используется на стадии анализа проекта (детали) по окончании концептуального проектирования.

В своей основе процессы быстрого прототипирования и изготовления (БПИ) (*rapid prototyping and manufacturing*) состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготовляемого объекта из полимерных материалов (или за счет спекания твердых частиц и порошка лучом лазера); послойное наложение этих сечений и комбинация слоев. Поэтому для создания физического объекта требуются только данные о его поперечных сечениях. Процессы БПИ являются безынструментальными – позволяют создавать физический объект без использования инструментов (по сравнению, например, со станками с ЧПУ).

Данные о поперечных сечениях изделия можно получить, используя объемные 3*D*-чертежи деталей, полученных методами геометрического (например, твердотельного) моделирования.

Методы БПИ [9, с. 379–412]

1. Стереолитография.
2. Отверждение на твердом основании.
3. Избирательное лазерное спекание.
4. Трехмерная печать.
5. Ламинирование.
6. Моделирование методом наплавления.

Кратко рассмотрим все перечисленные методы.

Стереолитография. Метод основан на избирательном отверждении поверхностного слоя фотополимера и построении трехмерных объектов из последовательно наложенных слоев.

Процесс изготовления детали протекает и следующим образом (рис. 4.1):

1. Фоточувствительный полимер, затвердевающий на свету, поддерживается в жидком состоянии.

2. На толщину одного слоя ниже поверхности жидкого полимера помещается платформа, способная двигаться в вертикальном направлении.

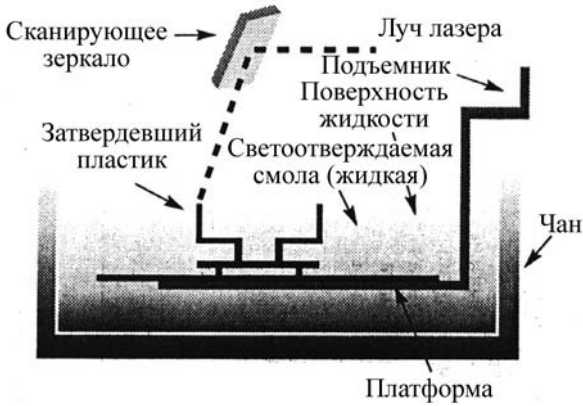


Рис. 4.1. Процесс стереолитографии

3. Ультрафиолетовый лазер сканирует слой полимера над платформой, отверждая полимер по форме соответствующего поперечного сечения. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.

4. Платформа опускается в ванну с полимером на толщину одного слоя, давая полимеру растечься по поверхности детали для начала нового слоя.

5. Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет наращен верхний слой детали.

6. Для полного затвердевания детали выполняется окончательное отверждение. Этот шаг необходим, поскольку в каждом слое могут еще оставаться жидкие участки. Так как лазерный луч имеет конечные размеры, сканирование каждого слоя аналогично закрашиванию некоторой фигуры тонкой цветной ручкой.

Габаритные размеры ванн 500×500×500 мм. Толщина слоев составляет 50…150 мкм. Точность моделей 0,1 мм.

Отверждение на твердом основании (*solid ground curing* – SGC). В этом случае каждый слой отверждается путем экспонирования ультрафиолетовой лампой, а не сканирования лазерным лучом. Таким образом, все точки слоя затвердевают одновременно и окончательного отверждения не требуется. Типичный

процесс отверждения на твердом основании имеет место в системе *Solider* от *Cubatal Israel*, работа которой происходит следующим образом:

1. По данным геометрической модели детали и желаемой толщине слоя рассчитывается поперечное сечение каждого слоя.

2. Для каждого слоя изготавливается оптическая маска по форме соответствующего поперечного сечения.

3. После выравнивания (рис. 4.2, *а*) платформа покрывается тонким слоем жидкого фотополимера (рис. 4.2, *б*).

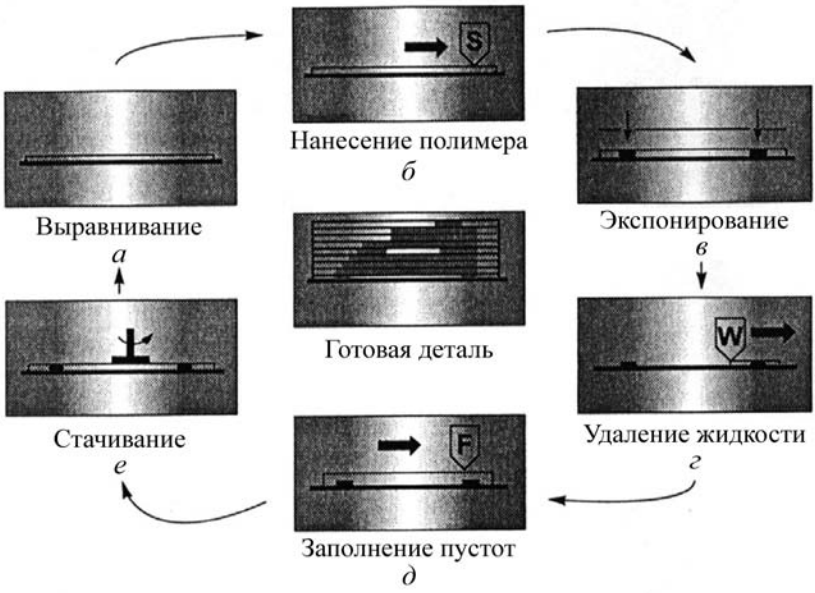


Рис. 4.2. Система Solider

4. Над поверхностью жидкой пластмассы помещается маска, соответствующая текущему слою, и пластмасса экспонируется светом мощной ультрафиолетовой лампы (рис. 4.2, *в*). Обратите внимание, что процесс начинается с маски, соответствующей нижнему слою.

5. Оставшаяся жидкость удаляется с изделия аэродинамическим *wiper* [ˈwaipə] – очистителем (рис. 4.2, *г*).

6. Изделие покрывается слоем жидкого воска, который заполняет пустоты (рис. 4.2, *д*). Затем к воску прикладывается холодная пластина, и он затвердевает.

7. Слой стачивается до желаемой толщины с помощью шлифовального диска (рис. 4.2, *е*).

8. Готовая часть изделия покрывается тонким слоем жидкого полимера, и шаги 4–7 повторяются для каждого последующего слоя, пока не будет обработан самый верхний слой.

9. Воск расплавляется и удаляется из готовой детали.

Главным преимуществом метода отверждения на твердом основании по сравнению с методом стереолитографии является отсутствие необходимости в поддерживающих структурах. Это обусловлено тем, что пустоты заполняются воском. Кроме того, благодаря использованию света лампы вместо лазерного луча, исключается операция окончательного отверждения. Хотя отверждение на твердом основании позволяет изготавливать детали с большей точностью, чем стереолитография, процесс этот весьма сложен.

Избирательное лазерное спекание. Процесс изготовления детали путем избирательного лазерного спекания, разработанный фирмой DTM (США), протекает следующим образом (рис. 4.3):

1. Цилиндрическая заготовка помещается на высоте, необходимой для того, чтобы на нее можно было осадить слой порошкового материала желаемой толщины. Порошковый материал, используемый для изготовления прототипа, поступает из подающего цилиндра и наносится выравнивающим валиком.

2. Слой порошка избирательно сканируется и нагревается лучом лазера, вследствие чего частицы слипаются между собой. Просканированные частицы порошка образуют требуемое поперечное сечение. Обратите внимание, что этот процесс начинается с нижнего поперечного сечения детали.

3. Цилиндрическая заготовка опускается на толщину одного слоя для нанесения нового слоя порошка.

4. Луч лазера сканирует новый слой порошка, склеивая его с предыдущим и формируя следующее поперечное сечение.

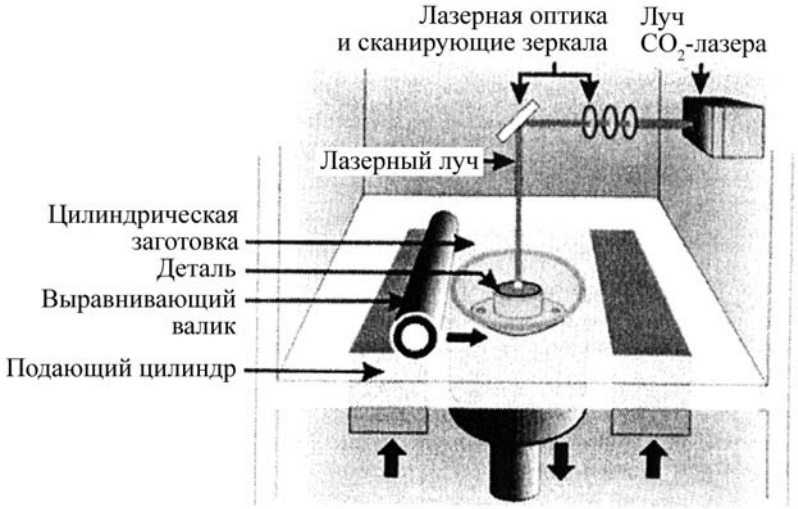


Рис. 4.3. Избирательное лазерное спекание

5. Шаги 3 и 4 повторяются до тех пор, пока не будет создан самый верхний слой детали.

6. Для некоторых материалов может понадобиться окончательное отверждение.

Поддерживающая структура не требуется, потому что пустоты каждого слоя заполняются необработанным порошком. Более того, в качестве материала для процесса избирательного спекания потенциально может использоваться любой плавкий порошок, даже металлический, если лазер обладает достаточной мощностью.

На практике для металлических порошков, частицы которых покрыты термопластическим связующим материалом, используется косвенное спекание. Под лучом лазера связующий материал расправляется и свободно связывает частицы металлического порошка, образуя желаемую форму, которая называется *зеленой деталью* (*green part*). В этом случае достаточно, чтобы мощности лазера хватало для расплавления связующего материала.

Затем зеленая часть подвергается обработке в печи, в ходе которой связующий материал выжигается, а частицы металлического

порошка связываются за счет обычных механизмов спекания. Получившаяся деталь носит название *коричневой детали* (*brown part*). Без дальнейшей обработки деталь будет довольно пористой из-за наличия пустот, которые ранее занимали частицы связующего материала. Чтобы снизить пористость, в печь помещается еще один материал – инфильтрант. Этот металл расплавляется при рабочей температуре печи и проникает в поры детали за счет капиллярного эффекта. Данный метод используется для изготовления форм для литья непосредственно по их геометрическим моделям. Ресурса таких форм достаточно для изготовления от 2 500 до 10 000 деталей-прототипов.

Трехмерная печать. Разработанный в Массачусетском технологическом институте процесс трехмерной печати был назван так из-за своей схожести с печатью на струйном принтере. В трехмерной печати вместо чернил используется жидкое связующее вещество. Процесс трехмерной печати происходит следующим образом (рис. 4.4):

1. Платформа располагается на высоте, необходимой для того, чтобы можно было нанести на нее слой керамического порошка надлежащей толщины.

2. Нанесенный слой керамического порошка избирательно сканируется печатающей головкой, из которой поступает жидкое связующее вещество, вызывающее прилипание частиц друг к другу. Отсканированные печатающей головкой частицы образуют требуемую форму поперечного сечения. Обратите внимание, что этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения.

3. Платформа опускается на одну толщину слоя, позволяя нанести следующий слой порошка.

4. Новый слой сканируется, образуя следующее поперечное сечение и склеиваясь с предыдущим слоем.

5. Шаги 3 и 4 повторяются, пока не будет создан верхний слой детали.

6. Для отверждения детали проводится последующая тепловая обработка.

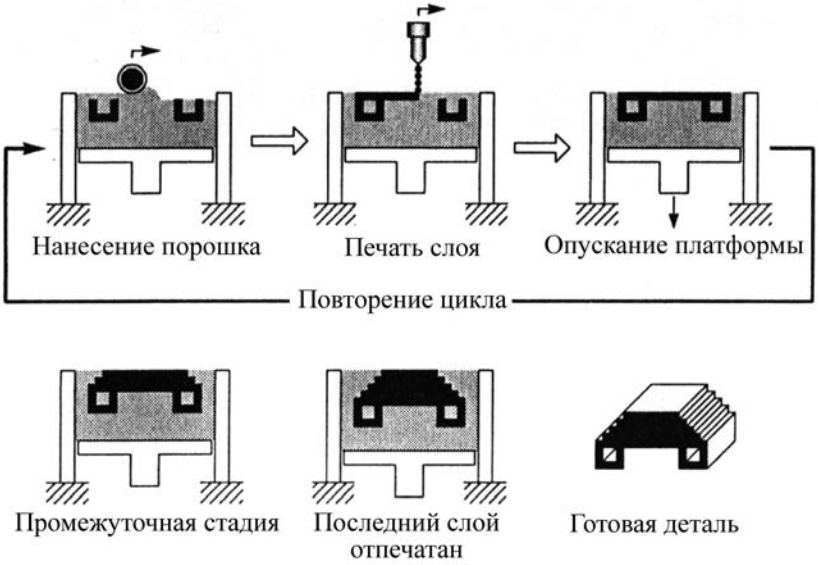


Рис. 4.4. Трехмерная печать

С помощью трехмерной печати было бы удобно изготавливать формы для литья, поскольку форма изготавливается как цельная деталь, состоящая из оболочки и полостей, и положение полостей относительно оболочки можно было бы задавать точно. Однако формы для литья, изготовленные путем современной трехмерной печати, имеют невысокое качество поверхности.

Ламинирование (*laminated object manufacturing* – LOM). Коммерциализированной фирмой *Helisys* деталь изготавливается путем ламинирования и лазерной резки материалов, поступающих в листовом виде. Слипание листов происходит за счет наличия термоадгезивного покрытия. Процесс протекает следующим образом (рис. 4.5):

1. Каждый лист приклеивается к заготовке с помощью нагрева и давления, образуя очередной слой. Листовой материал подается в виде непрерывного рулона с одной стороны машины и принимается с противоположной стороны. Температуру и давление,

необходимые для ламинирования, обеспечивает нагретый валик. Обратите внимание на то, что, когда к стопке приклеивается следующий лист, платформа опускается на толщину одного листа.

2. После того как слой (лист) приклеен, он сканируется лазером вдоль контура текущего поперечного сечения. Обычно для этой цели используется лазер на углекислом газе мощностью 25 или 50 Вт. Как и в других процессах, этот шаг начинается с нижнего поперечного сечения. Обратите внимание, что здесь сканирование производится только по контурам. Это делает данный процесс более эффективным, чем процессы, требующие растрового сканирования.

3. Области слоя, выходящие за пределы контуров, штрихуются лазером, т. е. рассекаются на маленькие кусочки, называемые *черепичками* (*tiles*), для последующего удаления, когда деталь будет закончена.

4. Шаги 1–3 повторяются до тех пор, пока не будет наклеен и вырезан верхний слой детали.

5. После того как все слои будут готовы, внутри блока поддерживающего материала окажется готовая деталь. Этот материал затем разматывается на кусочки вдоль линий лазерной штриховки.

6. Готовую деталь можно покрыть герметиком, чтобы предохранить ее от влажности.

Наличие поддерживающего материала вокруг детали имеет свои преимущества и недостатки. Прежде всего, оно исключает необходимость во внешних поддерживающих структурах. При изготовлении детали внутри блока поддерживающего материала, имеющего определенную форму, геометрия всей структуры стабилизирована и соответственно ей не грозит перекос под собственным весом. Более того, нам не приходится беспокоиться об изолированных «островках», которые часто образуются, когда твердое тело, спроектированное в CAD-системе, рассекается на слои.

Иными словами, ламинирование позволяет избежать создания специальных подпорок, которые точно фиксировали бы эти «островки» в пространстве, пока в процессе изготовления не будут созданы «мосты» к оставшимся частям детали. Однако удаление лишнего материала по окончании изготовления детали является непростой задачей.

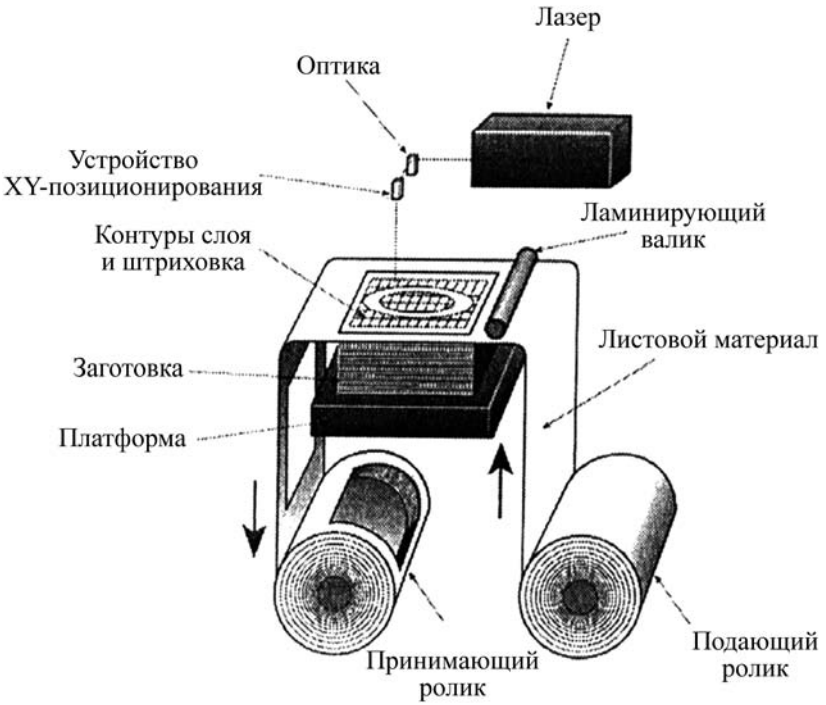


Рис. 4.5. Процесс ламинирования

Чтобы удалить только излишки, а хрупкие части детали при этом не сломать, необходимо бережно очистить ее вручную. Кроме того, полую структуру с замкнутыми поверхностями невозможно изготовить в виде единой части, поскольку в этом случае излишки материала невозможно будет извлечь изнутри. Сложность удаления ненужного материала характерна для любой части с узкими перемычками, внутренними полостями с ограниченным доступом, слепыми отверстиями и т. п. Далее большая часть материала, расходуемая при ламинировании, идет не на саму деталь, а остается неиспользованной в рулоне или образует поддерживающие структуры, которые будут удалены после изготовления. Это может быть весьма расточительно, если применяются более дорогостоящие материалы, чем бумага.

Помимо преимуществ и недостатков процесс ламинирования имеет следующие характеристики:

Это субтрактивный, а не аддитивный процесс, т. е. для создания слоя с требуемым поперечным сечением материал удаляется, а не добавляется. Во всех прочих процессах БПИ слои образуются путем добавления материала. Таким образом, потенциально ламинирование является самой быстрой технологией изготовления деталей с большим отношением объема к площади поверхности.

Детали образуются перемежающимися слоями материала и клейкого вещества. Соответственно, многие из их физических свойств являются неоднородными и анизотропнымим.

Потенциальная точность процесса изготовления ламинированных объектов высока. В нем может использоваться сколь угодно тонкий листовой материал, что позволяет достичь хорошей разрешающей способности в направлении наращивания деталей. В действительности изготовить тонкий однородный листовой материал несложно, и усадка при ламинировании не представляет проблемы, поскольку контуры вырезаются после того, как происходит усадка.

Хотя процесс потенциально применим ко многим материалам, включая пластики, композиты и металлы, наиболее популярным на сегодняшний день является бумажное ламинирование.

Габариты изделия достигают размера 800 × 560 × 500 мм. Масса до 20 кг. Температура горячего валика – 70…400 °С. Сила прижатия валика до 180 кН. Толщина материала 0,076…0,2 мм.

Моделирование методом наплавления (*fused-deposition modeling* – FDM). В процессе наплавления коммерциализированной фирмой *Stratasys* каждый слой формируется путем выдавливания термопластичного материала, находящегося в жидком состоянии (рис. 4.6). Температура выдавливаемого материала незначительно превышает его температуру затвердевания (аналогичная ситуация при создании надписей на торте шоколадным кремом). Деталь изготавливается путем последовательного наплавления слоев. Этот процесс относительно прост, но его применение ограничено термопластичными материалами.

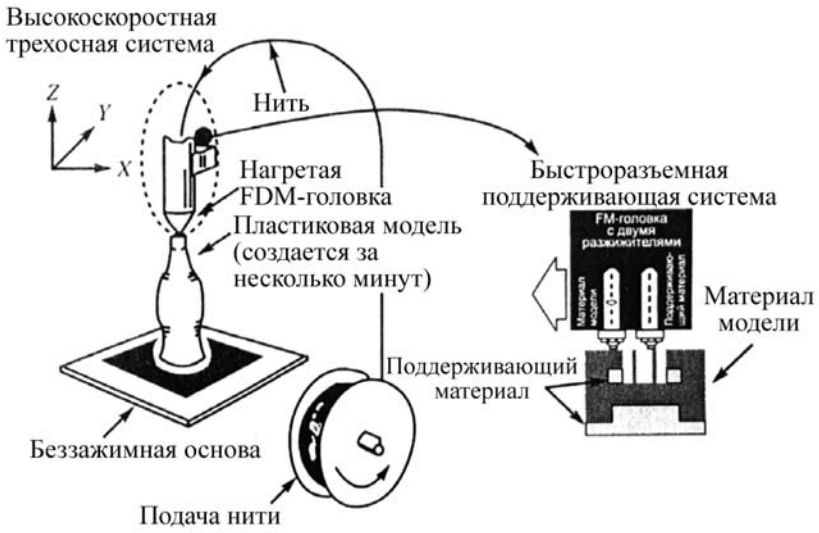


Рис. 4.6. Моделирование методом наплавления
(с разрешения Stratasys, Inc.)

Функции CAE-систем

CAE-системы наиболее эффективно используются на стадии анализа и оптимизации конструкций и технологических процессов.

Функции CAE-систем довольно разнообразны, так как связаны с проектными процедурами анализа, моделирования, оптимизации проектных решений. В состав машиностроительных CAE-систем прежде всего включают программы для выполнения следующих процедур:

– моделирование полей физических величин, в том числе анализ прочности, который чаще всего выполняется в соответствии с МКЭ;

– расчет состояний моделируемых объектов и переходных процессов в них средствами макроуровня;

– имитационное моделирование сложных производственных систем на основе моделей массового обслуживания и сетей Петри.

Основными частями программ анализа с помощью МКЭ являются библиотеки конечных элементов, препроцессор, решатель и постпроцессор.

Библиотеки конечных элементов содержат их модели – матрицы жесткости. Очевидно, что модели конечных элементов будут различными для разных задач (анализ упругих или пластических деформаций, моделирование полей температур, электрических потенциалов и т. п.), разных форм конечных элементов (например, в двумерном случае – треугольные или четырехугольные элементы), разных наборов координатных функций.

Исходные данные для препроцессора – геометрическая модель объекта, чаще всего получаемая из подсистемы конструирования. Основная функция препроцессора – представление исследуемой среды (детали) в сеточном виде, т. е. в виде множества конечных элементов.

Решатель – программа, которая ассемблирует (собирает) модели отдельных конечных элементов в общую систему алгебраических уравнений и решает эту систему одним из методов разреженных матриц.

Постпроцессор служит для визуализации результатов решений в удобной для пользователя форме. В машиностроительных САПР это графическая форма. Пользователь может видеть исходную (до нагружения) и деформированную формы детали, в которых палитра цветов или интенсивность свечения характеризуют значения фазовой переменной.

CAE-системы позволили создать новые методы визуализации результатов компьютерного моделирования отдельных прототипов и целых производств [9].

Дело в том, что прогресс автоматизированной разработки привнес новую парадигму в проектирование и анализ. Прежде всего, системы геометрического моделирования настолько продвинулись вперед за последнее десятилетие, что современные CAD-системы способны обрабатывать модели деталей и агрегатов самой сложной геометрии и конструкции. Агрегат можно отображать, оценивать и модифицировать как единое целое, а его движение имитировать так же, как это делается с физическим прототипом.

Еще одно достижение – это анализ по методу конечных элементов. Он мог бы стать средством виртуальной оценки надежности и технических характеристик продукта, если бы его вычислительную эффективность можно было улучшить до такой степени, чтобы выводить результаты в реальном времени. С его помощью можно было бы предсказывать механические свойства и характеристики (напряжения, прогиб, вибрация, температура, давление в сложных деталях) так, как если бы они измерялись посредством различных экспериментов.

Более того, производители CAD-систем в настоящий момент пытаются объединить геометрическое моделирование с методом конечных элементов. Такая интеграция обеспечила бы непрерывное течение цикла проектирования и анализа. Метод конечных элементов использовался бы изначально в процессе проектирования для принятия конструкторских решений, что позволило бы сэкономить время и затраты, связанные с перепроектированием.

Все эти тенденции привели к возникновению новой инженерной дисциплины – *виртуальная инженерия* (*virtual engineering*).

Виртуальная инженерия – это имитационный метод, помогающий инженерам в принятии решений и управлении. Виртуальная среда представляет собой вычислительную структуру, позволяющую точно имитировать геометрические и физические свойства реальных систем. Виртуальная инженерия включает в себя имитацию различных видов инженерной деятельности, таких, как машинная обработка, сборка, управление производственными линиями, осмотр и оценка, а также процесс проектирования.

Таким образом, виртуальная инженерия может охватывать весь цикл разработки и производства продукта. После того как смоделирована деталь, имитируется ее машинная обработка и сборка. Затем, также с помощью имитации, собранный прототип тестируется, и в его конструкцию вносятся необходимые изменения. Когда прототип одобрен, имитируется производственная система и ее функционирование. Прогнозируется также себестоимость и график поставок. В результате этих имитаций

получается оптимизированный конечный прототип и производственные процедуры, на основе которых затем реализуется физическая система.

Виртуальная инженерия дает совершенно новый подход к инженерным задачам. Использование имитации устранит необходимость в дорогостоящих физических прототипах и физических экспериментах. Время разработки коренным образом сократится, появится возможность проверить большее количество альтернативных вариантов конструкции, повысится качество конечного продукта. Виртуальная инженерия обеспечит также превосходный интерфейс для клиента, позволяя ему заранее увидеть трехмерную модель продукта и запросить конструктивные изменения. Можно будет построить прототип продукта, который недоступен, слишком опасен или слишком дорог для того, чтобы создавать его в реальности. Такая возможность будет неоценима в автомобильной и авиационной промышленности, где физические макеты стоят дорого, время разработки велико, продукты крайне сложны и требуется глубокая обратная связь от клиентов.

Основными компонентами виртуальной инженерии являются: *виртуальное проектирование, цифровая имитация, виртуальное прототипирование* и *виртуальный завод*. Виртуальное проектирование выполняется с помощью устройств виртуальной реальности. Цифровая имитация позволяет проверять и оценивать работу продукта без использования физических прототипов. В процессе виртуального прототипирования строится компьютерный прототип, имеющий ту же геометрию и физическое поведение, что и реальный продукт. Виртуальный завод – это имитация заводской производственной линии. Ниже следует описание каждой из этих составляющих.

Виртуальное проектирование выполняется в виртуальной среде с использованием технологий виртуальной реальности. Виртуальное проектирование сосредоточивается на альтернативном пользовательском интерфейсе для процесса проектирования. Используя технологии виртуальной реальности, конструкторы могут погрузиться в виртуальную среду, создавать компоненты, модифицировать их, управлять различными

устройствами и взаимодействовать с виртуальными объектами в процессе конструкторской деятельности. Конструкторы могут видеть стереоскопическое изображение виртуальных объектов и слышать пространственный реалистичный звук. Эти изображения и звук возникают, когда рука конструктора движет виртуальной рукой и пальцем. Прикосновение к виртуальному объекту ощущается конструктором в виде обратной связи. Тем самым замысел конструктора эффективно воплощается в проекте и проверяется функциональное поведение конструкции.

Основная цель виртуального проектирования – позволить конструктору действовать интуитивным и естественным образом. В системах геометрического моделирования, даже при том что современные CAD-системы предоставляют изощренные средства моделирования, взаимодействие конструктора с моделью небезгранично. Возможности обзора ограничиваются изображением, спроектированным на монитор, а возможности ввода информации от конструктора – точечными манипуляциями с мышью.

Таким образом, в рамках CAD-технологии сегодняшнего дня конструктор является «одноглазым и однопалым». Более естественное взаимодействие, обеспечиваемое технологиями виртуальной реальности, дало бы конструктору большую свободу и позволило бы ему повысить креативность при создании модели. Вторая цель виртуального проектирования – на ранних стадиях проектирования учесть точку зрения потенциального пользователя продукции.

В процессе проектирования могут быть в полной мере оценены такие качества, как доступность и управляемость. Третья цель – учесть при проектировании опыт экспертов в сборке или манипулировании деталями. Этот опыт сложен и трудно формализуем, но система виртуального проектирования может пролить свет на положение пользователя, его взаимодействие с объектами и последовательность операций сборки.

Виртуальное проектирование потребует совершенно иного подхода к моделированию трехмерной геометрии. Например, меню и кнопки можно заменить технологией распознавания речи

или жестов. Если конструктор захочет изменить размеры модели, то, вместо того чтобы указать на нее, конструктор сможет взять ее в руки и растянуть. В связи с процессом виртуального проектирования непременно возникнут новые методы проектирования и схемы моделирования.

Цифровая имитация используется для проверки процессов, так как машинные операции необходимо тщательно проверить, прежде чем начинать реальную работу. Если в управляющем коде имеется ошибка, это может привести к серьезной поломке станка. Используя цифровую имитацию, пользователь перед началом работы имеет возможность проверить траекторию перемещения инструмента станка с ЧПУ, щупа координатно-измерительной машины или руки робота. Например, процессом машинной обработки можно управлять графически, как если бы это делалось на реальном станке: виртуальный станок с ЧПУ, читая стандартные инструкции, будет выполнять всю обработку в реальном времени, включая перемещение инструментов, принадлежностей, укладчиков и деталей. Непрерывный контроль за снятием материала позволяет пользователю выявлять ситуации, приводящие к вибрации и поломке инструмента, появлению выбоин и зарубок. С помощью имитации пользователь может также спрогнозировать столкновения между инструментом и приспособлением или деталью.

Визуализация также помогает инженерам лучше понять систему. Она позволяет легко уяснить идею конструкции и заранее проверить ее эксплуатационные качества. В настоящее время для этой цели используется главным образом кинематическая имитация твердых тел. Имитация моделей более высокого уровня – жидкостей, человеческих существ и сложных сред – требует моделирования физических эффектов, включая эффекты динамики, вибрации, акустики и деформации. Однако сложные имитации с использованием виртуальных прототипов могут осуществить проверку рабочих характеристик системы быстрее и с меньшими затратами.

Виртуальным прототипированием (*virtual prototyping*) называют построение прототипа агрегата из геометрических моделей его отдельных частей. Виртуальный прототип называют

иногда *цифровым макетом* (*digital mockup*) или *предварительной цифровой сборкой* (*digital preassembly*). Системы цифрового прототипирования позволяют визуализировать процесс сборки и проверять осуществимость предлагаемых агрегатов в рамках имеющихся производственных ограничений. Путем сборки виртуального прототипа можно выявить конструктивные просчеты и внести изменения в проект, чтобы реальную сборку можно было выполнить с первой попытки.

Основная функция виртуального прототипирования заключается в том, чтобы установить, осуществима ли операция сборки. Система проверяет сопряжение деталей в контексте сборочных ограничений и требований к допускам. Функции обнаружения столкновений указывают на мешающие друг другу детали. Проверяется также последовательность сборки и траектории движения деталей. Кроме того, можно определить оптимальные траектории сборки. Передовые системы позволяют также проводить структурный и функциональный анализ виртуального прототипа, используя встроенное аналитическое программное обеспечение. Часто выполняется кинематическая и динамическая имитация прототипа.

Инженеры смогут основывать конструкторские решения на виртуальных прототипах. Оптимизация конструкции будет достигаться путем последовательного уточнения виртуального прототипа. С увеличением степени детальности виртуального прототипирования станет возможной более точная структурная и функциональная имитация. Идеальной ситуация станет тогда, когда виртуальный прототип будет иметь всю совокупность характеристик физического прототипа. Таким образом, со временем виртуальное прототипирование устранит необходимость в дорогих и трудоемких физических прототипах.

Виртуальный завод (*virtual factory*) – это смоделированная на компьютере полная производственная система. Виртуальный завод имитирует конструкции производственных участков, производственные процессы и складские системы. Кроме того, для него можно программировать автоматизированное заводское оборудование – роботы, конвейеры и станки.

Система моделирует и имитирует такие компоненты, как конвейеры, накопители, доки, производственные участки и процессы. Кроме того, система моделирует процедуры – маршруты, последовательности и слияния. После этого модель производства анализируется в терминах затрат на рабочую силу, инвентаризации, эксплуатационных расходов, затрат на обработку и длительностей цикла.

Такие возможности позволяют использовать виртуальный завод для планирования производства, включая оценку проектов производственных систем и сравнение альтернативных способов производства. Когда эта технология достигнет зрелости, с помощью виртуального завода можно будет сымитировать всю цепочку поставок, что позволит оценивать и оптимизировать весь процесс управления ресурсами и производством.

Итак, методы виртуальной инженерии предлагают совершенно новый подход к процессу проектирования, который позволяет оценить возможность производства различных вариантов конструкции (включая оценку качества сборки или эксплуатационную характеристику продукта) и оптимизировать производственный процесс (методом цифровой имитации), легко настроить продукт под требования заказчика, эффективно накопить обширную базу знаний, обеспечить основу для коллективной разработки проектов.

Рассмотрим аппаратуру, которая используется виртуальной инженерией. Виртуальная инженерия – чисто программная технология, и поэтому сама по себе не требует какого-либо специального оборудования. Однако для взаимодействия с пользователем необходимо оборудование виртуальной реальности. Это оборудование включает в себя устройства как ввода, так и вывода. Устройства вывода дают пользователю ощущения от виртуальной среды. Поскольку самый эффективный способ сенсорного восприятия – это зрение, главными компонентами систем виртуальной реальности являются устройства отображения. Эти устройства должны обеспечивать пользователю стереоскопический обзор.

Доступное в настоящий момент оборудование включает в себя головные дисплеи, бинокулярные всенаправленные мониторы,

дисплеи пространственного погружения и специальные очки. Звук и осязание обогащают ощущения от виртуальной реальности, когда они используются в совокупности со зрительной системой. Типичным примером звуковой аппаратуры могут служить наушники с пространственно расширенной звуковой системой. Аппаратура осязания – это приборы с силовой обратной связью. Популярными устройствами ввода являются системы распознавания речи, следящие системы и информационные перчатки.

Головные дисплеи. Головной дисплей – это устройство отображения с полным погружением. Шлем полностью закрывает глаза и позволяет смотреть только прямо перед собой. Небольшой экран, смонтированный перед глазом пользователя, дает стереоскопическое изображение. Прибор имеет встроенную следящую систему, благодаря которой изображение на дисплее меняется при изменении положения и ориентации головы пользователя. В настоящее время доступно более 40 моделей головных дисплеев. Среди них можно упомянуть FOHMD от CAE-Electronics и Looking Glass от Polhemus Lab.

Бинокулярные всенаправленные мониторы. Бинокулярный всенаправленный монитор – это механическая версия головного дисплея. Он состоит из дисплейной коробки, которая сбалансирована по весу на многозвенной стреле. Пользователь смотрит на дисплей, а движение его головы отслеживается через систему механических звеньев. Основным преимуществом бинокулярных всенаправленных мониторов перед головными дисплеями является быстрое и точное слежение. В продаже имеются бинокулярные всенаправленные мониторы *BOOM-2C* от *Fake Space Labs* (http://www.fakespace.com) и *Cyberface3* от LEEP.

Дисплеи пространственного погружения. В дисплеях пространственного погружения используется панорамный видеоэкран, окружающий пользователя, так что пользователь чувствует себя погруженным в виртуальную среду. Дисплеи пространственного погружения обеспечивают большое поле зрения и свободу передвижения в виртуальной среде. В университете штата Иллинойс (Чикаго) разработана четырехстенная система пространственного погружения *CAVE*. Приобрести систему

CAVE можно через фирму *Pyramid System*. Существуют большие куполообразные дисплеи пространственного погружения, такие как *Visionarium Graphics*, имеющий 8 м в диаметре. Фирма *Spitz Electrihorizen* построила дисплей пространственного погружения диаметром 8,5 м.

Шторные очки. Шторные очки – это недорогое устройство отображения. Пользователь надевает устройство, напоминающее очки, которое попеременно закрывает обзор то одному, то другому глазу. Монитор или другое устройство отображения, синхронизированное с очками, имеет в два раза большую частоту обновления и попеременно показывает картинку для левого и для правого глаза. В результате на экране монитора пользователь видит стереоскопическое изображение. Данное устройство может использоваться вместе с выпускаемыми в настоящий момент дисплеями, поэтому оно экономически выгодно. Однако оно не обеспечивает достаточного погружения для того, чтобы пользователь увидел реальную среду, так как поле зрения ограничено размерами монитора. В продаже имеются шторные очки *Crystal Eyes* от *Stereographics* и *SGS* от *Tektronicx*.

Устройства осязания. Устройство осязания дает ощущение физического прикосновения. Такое устройство позволяет пользователям почувствовать реальный объект через систему силовой обратной связи, создающую иллюзию работы с реальным материалом. Примером устройства осязания является джойстик с силовой обратной связью, через который пользователь ощущает силу реакции на рабочей руке. В продаже имеются джойстики *Haptic Mater* от *Nissho Electronics* и *BSP Joystick* от *AEA Technologies*.

Прибор *Phantom* фирмы *SensAble Technology* – это устройство осязания на базе карандаша, имеющее шесть степеней свободы. Более передовым типом устройства осязания является экзоскелет – сложная система механических звеньев, окружающая всю руку так, что каждый палец и сустав независимо получают силовую обратную связь. Он объединяет в себе информационную перчатку и устройство осязания. Примерами экзескелетов являются *The Exoskeletal Hand Master* от *Sarcos* и *Force ArmMaster* от *Exos*.

Следящие системы. Следящие устройства используют электромагнитную, ультразвуковую, оптическую или механическую систему для определения положения и ориентации отслеживаемого объекта. Следящее устройство может быть встроено в головной дисплей для отслеживания направления взгляда и положения головы или в информационную перчатку – для отслеживания положения руки. Следящее устройство можно также прикрепить на любую часть тела. В продаже имеются такие следящие системы, как *Flock of Birds* от *Ascension* и *ISOTRAK II* от *Polhemus* (http://www/polhemus.com).

Типичным примером следящих устройств с использованием ультразвуковой технологии могут служить *Head-tracker* от *Logitech* (http://www.logitech.com) и *GAMS* от *Transition State Corporation*. Механичекая система используется в устройствах *GyroEngine* от *Gyration*, *ADL-1* от *Shooting Star Technology* и *Wrightrack* от *Vidtronics*. Наконец, к устройствам с использованием оптической технологии относятся *GRD-1010* от *GEC Ferranti*, *DynaSight* от *Origin Instruments* и *RtPM* от *Spatial Positioning Systems*.

Информационные перчатки. Информационная перчатка имеет на каждом суставе пальцев руки датчики, измеряющие изгиб пальца. Положение руки в целом определяется следящей системой, прикрепленной к перчатке. Обычно информация, получаемая с перчатки, преобразуется в виртуальной среде снова в изображение, форма и положение которого динамически изменяются, следуя за движениями руки пользователя. В продаже имеются информационные перчатки *Dexterous Hand master* от *Exos*, *CyberGlove GG1801* от *Virex* и *DataGlove* от *Greenleaf Medical Systems*.

Примеры промышленного применения виртуальной инженерии

Самолет Boeing 777. Boeing 777 – это первый коммерческий самолет, успешно спроектированный безбумажным методом. Для разработки модели 777 корпорация *Boeing* организовала 238 межфункциональных групп проектирования и изготовления,

ответственных за конкретные продукты. Компания *Boeing* использовала CAD-систему *CATIA* от *Dassault/IBM* и разработала собственную систему предварительной компьютерной сборки *EPIC* (*Electronic Preassembly in Computer*). Перед сборкой первого самолета не было изготовлено ни одного физического прототипа, кроме макета носовой части (для проверки критической проводки). Виртуальное прототипирование позволило компании *Boeing* вовлечь в процесс проектирования самолета заказчиков и операторов (до линейных механиков). Виртуальное прототипирование было настолько успешным, что несоосность при монтаже левого крыла составила всего 0,03 мм.

Виртуальный прототип локомотивного двигателя фирмы GM. Подразделение *Electro-Motive* фирмы *General Motors* разработало локомотивный двигатель *GM16V265H* мощностью 6 300 л. с. путем так называемой «виртуальной разработки продукта» в сотрудничестве с *Unigraphics Solutions*. Все детали были представлены в виде трехмерных моделей, и последующий анализ, оптимизация конструкции и программирование станков с ЧПУ и приспособлений проводились для этих моделей. Моделирование позволило обеспечить поставку продукта в сжатые сроки: первый двигатель был построен через 18 месяцев после начала программы, в то время как обычно подобный процесс занимает более 36 месяцев. Это позволило также гораздо быстрее провести тесты надежности, что дало GM возможность удовлетворить более жесткие требования к надежности.

Дизайн интерьера салона автомобиля фирмы Chrysler. Дизайн интерьера салона автомобиля *Dodge Durango* 1998 г. был разработан методом виртуального проектирования. Член дизайнерской группы сидит в упрощенном макете салона автомобиля, состоящем только из сиденья, руля и педалей. Дизайнер, на котором надеты головной дисплей системы виртуальной реальности, информационные перчатки и датчики движений, рассматривает виртуальный прототип интерьера автомобиля (приборная доска, органы управления радиоприемника, бардачок и окна) и взаимодействует с ним. Виртуальный прототип позволяет легко вносить изменения в дизайн и оценивать обзор, доступность и эстетику.

Этот метод дает возможность быстро проверять различные варианты дизайна.

Поезд Metrocar 2000 в Стокгольме. *Metrocar* 2000 – это новая система общественного транспорта в Стокгольме, разработанная компанией *Adtranz Sweden*. Используя программу *dVISE* от *Division*, *Adtranz* сконструировала виртуальные прототипы поездов, включая полностью оснащенные интерьеры с текстурными сидениями, полами, рекламными плакатами и индикаторной панелью машиниста. Глядя на виртуальный прототип, зрители могут получить представление о масштабе, пространственных отношениях и эстетике дизайна. Это позволяет заказчику и инженеру на ранних стадиях проектирования знакомиться с дизайном продукта и вносить в него изменения.

Проектирование кораблей для Королевского военно-морского флота Великобритании. Морской директорат перспективных проектов Великобритании внедрил виртуальное проектирование в рамках своей новой программы разработки кораблей. С помощью программы *ENVISION* от *Deneb Robotics* методом имитации в интерактивном режиме был разработан квартердек для нового корабля. Имитация включала движение корабля (с шестью степенями свободы) и его влияние на работающее оборудование, людей на борту и условия освещения в каютах. Это моделирование позволило инженерам оценить проект и внести в него необходимые изменения.

В заключение отметим, что виртуальная инженерия – зарождающаяся технология. Она обладает достаточным потенциалом для того, чтобы стать значительной составляющей деятельности инженера, однако на сегодняшний день функциональность и возможности применения систем виртуальной инженерии ограничены. Чтобы виртуальная инженерия превратилась в развитую технологию, необходимо получить возможность полностью отразить функциональное поведение физических систем посредством компьютерной имитации. Обсудим некоторые связанные с этим проблемы.

Новые средства проектирования. Виртуальное проектирование представляет принципиальное иную среду для разработки.

В ней зрение является стереоскопическим, а взаимодействие с моделью конструкции осуществляется с помощью нескольких органов чувств. Эта новая среда открывает возможности для появления новых методов проектирования и подходов к моделированию. В ближайшем будущем конструктор будет иметь возможность взять объект в руки и растянуть его или создать и изменить модель с помощью одного только голоса. Новый подход к моделированию обеспечит более естественные и интуитивные способы создания моделей.

Моделирование процессов и физических объектов. В настоящее время возможности имитации сводятся главным образом к кинематике. Моделирование динамических, деформируемых и жидких систем обычно требует анализа методом конечных элементов, отнимающего большое количество вычислительных ресурсов. Чтобы это имело какую-то ценность в качестве средства виртуального проектирования, данный анализ необходимо производить в реальном времени, а чтобы стала возможной имитация в реальном времени, необходимо компактное и точное моделирование. Более того, модели должны содержать в себе информацию о своих физических свойствах и экспериментальные данные, демонстрирующие их физическое поведение.

Мера возможности производства. Производственные процессы различны, каждый имеет свои собственные уникальные характеристики. Таким образом, найти какую-то общую методику, определяющую возможности производства различных продуктов, представляется трудной задачей. Необходимы исследования определений возможности производства и методологии ее оценки. Помимо простого решения типа «да/нет» необходимо определить количественную меру возможности производства. Кроме того, оценку возможности производства необходимо трансформировать в оценку продолжительности производственных процессов и затрат.

Быстродействие системы. В настоящий момент качество визуализации и имитации сильно ограничивается недостаточным быстродействием системы. Благодаря экспоненциальному росту скорости обработки и прогрессу технологии распределенных

вычислений качество имитации улучшается. Однако быстродействие системы остается все еще слишком низким для полноценного виртуального проектирования. Для визуализации требуется детализированное трехмерное отображение и анимация с высокой частотой кадров. Оценка проекта включает в себя анализ динамических систем и оптимизации, требующих больших вычислительных ресурсов. Кроме того, для обеспечения коллективной разработки необходимо повысить скорость работы сетей, расширить полосу пропускания и увеличить число каналов.

Стандарт интерфейса данных. Виртуальное проектирование включает в себя взаимодействие различных пакетов прикладных программ. Моделирование детали обычно производится в CAD-системе, анализ – в программе анализа по методу конечных элементов, а компьютерная имитация – в интерактивной системе имитации производства. Для коллективной разработки необходимо, чтобы эти различные системы работали вместе. Стандартные интерфейсы баз данных и программного обеспечения являются ключом к виртуальному проектированию.

Открытая архитектура. Открытая архитектура придает системе масштабируемость. Системы виртуального проектирования необходимо объединять с имеющимися в настоящий момент инженерными системами для получения дополнительной функциональности или решения разнотипных задач. Открытая архитектура позволяет системе задействовать большой резерв инженерных ресурсов и находить разнообразные формы применения.

4.2. Структура и разновидности систем автоматизированного проектирования

Как и любая сложная система, САПР состоит из подсистем. Различают подсистемы проектирующие и обслуживающие.

Проектирующие подсистемы непосредственно выполняют проектные процедуры. Примерами проектирующих подсистем могут служить подсистемы геометрического трехмерного

моделирования механических объектов, изготовления конструкторской документации, схемотехнического анализа, трассировки соединений в печатных платах.

Обслуживающие подсистемы обеспечивают функционирование проектирующих подсистем, их совокупность часто называют системной средой (или оболочкой) САПР. Типичными обслуживающими подсистемами являются подсистемы управления проектными данными, подсистемы разработки и сопровождения программного обеспечения *CASE (Computer Aided Software Engineering),* обучающие подсистемы для освоения пользователями технологий, реализованных в САПР.

Структурирование САПР по различным аспектам обусловливает появление *видов обеспечения* САПР. Принято выделять семь видов обеспечения САПР:

– *техническое (ТО),* включающее различные аппаратные средства (ЭВМ, периферийные устройства, сетевое коммутационное оборудование, линии связи, измерительные средства);

– *математическое (МО),* объединяющее математические методы, модели и алгоритмы для выполнения проектирования;

– *программное*, представляемое компьютерными программами САПР;

– *информационное*, состоящее из базы данных, СУБД, а также включающее другие данные, используемые при проектировании (отметим, что вся совокупность используемых при проектировании данных называется информационным фондом САПР, а база данных вместе с СУБД носит название банка данных);

– *лингвистическое*, выражаемое языками общения между проектировщиками и ЭВМ, языками программирования и языками обмена данными между техническими средствами САПР;

– *методическое*, включающее различные методики проектирования; иногда к нему относят также математическое обеспечение;

– *организационное*, представляемое штатными расписаниями, должностными инструкциями и другими документами, регламентирующими работу проектного предприятия.

Классификацию САПР осуществляют по ряду признаков, например по приложению, целевому назначению, масштабам

(комплексности решаемых задач), характеру базовой подсистемы – ядра САПР.

По приложениям наиболее представительными и широко используемыми являются следующие группы САПР:

1. САПР для применения в отраслях общего машиностроения. Их часто называют машиностроительными САПР или системами *MCAD (Mechanical CAD).*

2. САПР для радиоэлектроники: системы *ECAD (Electronic CAD)* или *EDA (Electronic Design Automation).*

3. САПР в области архитектуры и строительства.

Кроме того, известно большое число специализированных САПР или выделяемых в указанных группах, или представляющих самостоятельную ветвь в классификации. Примерами таких систем являются САПР больших интегральных схем (БИС), САПР летательных аппаратов, САПР электрических машин и т. п.

По целевому назначению различают САПР, обеспечивающие разные аспекты (страты) проектирования. Так, в составе MCAD появляются рассмотренные выше CAE/CAD/CAM-системы.

По масштабам различают отдельные программно-методические комплексы (ПМК) САПР, например: комплекс анализа прочности механических изделий в соответствии с методом конечных элементов (МКЭ) или комплекс анализа электронных схем; системы ПМК; системы с уникальными архитектурами не только программного (*software*), но и технического (*hardware*) обеспечения.

По характеру базовой подсистемы различают следующие разновидности САПР:

1. САПР на базе подсистемы машинной графики и геометрического моделирования. Эти САПР ориентированы на приложения, где основной процедурой проектирования является конструирование, т. е. определение пространственных форм и взаимного расположения объектов. К этой группе систем относится большинство САПР в области машиностроения, построенных на базе графических ядер.

В настоящее время широко используются унифицированные графические ядра, применяемые более чем в одной САПР (ядра *Parasolid* фирмы *EDS Unigrafics* и *ACIS* фирмы *Integraph*).

2. САПР на базе СУБД. Они ориентированы на приложения, в которых при сравнительно несложных математических расчетах прорабатывается большой объем данных. Такие САПР преимущественно встречаются в технико-экономических приложениях, например при проектировании бизнес-планов, но они имеются также при проектировании объектов, подобных щитам управления в системах автоматики.

3. САПР на базе конкретного прикладного пакета. Фактически это автономно используемые ПМК, например имитационного моделирования производственных процессов, расчета прочности по МКЭ, синтеза и анализа систем автоматического управления и т. п. Часто такие САПР относятся к системам CAE. Примерами могут служить программы логического проектирования на базе языка VHDL, математические пакеты типа MathCAD.

4. Комплексные (интегрированные) САПР, состоящие из совокупности подсистем предыдущих видов. Характерными примерами комплексных САПР являются CAE/CAD/CAM-системы в машиностроении или САПР БИС. Так, САПР БИС включает в себя СУБД и подсистемы проектирования компонентов, принципиальных, логических и функциональных схем, топологии кристаллов, тестов для проверки годности изделий. Для управления столь сложными системами применяются специализированные *системные среды*.

4.3. Программные системы проектирования (примеры программ) [3]

К числу мировых лидеров в области CAD/CAM/CAE-систем верхнего уровня относятся системы *Unigrafics* (компания *EDS*), *CATIA* (*Dessault Systems*), *Pro/Engineer* (*PTC*). Продолжают использоваться также системы *I-DEAS* (*EDS*), *CADDS5* (*PTC*) и *EUCLID3* (*Matra Datavision*).

Вначале рассмотрим структуру ПО САПР и его функциональные возможности на примере комплекса программ *Pro/Engineer*.

Комплекс насчитывает несколько десятков программ (модулей), которые подразделены на группы программ конструкторского проектирования механических объектов, промышленного дизайна, функционального моделирования, технологического проектирования, обмена данными.

Базовые модули конструкторского проектирования (подсистема CAD) предназначены для твердотельного и поверхностного моделирования, синтеза конструкций из базовых элементов формы (БЭФ), поддержки параметризации и ассоциативности, проекционного черчения и разработки чертежей с простановкой размеров и допусков. Пользователь может пополнять библиотеку БЭФ оригинальными моделями. Синтез трехмерных модулей сложной формы возможен вытягиванием плоского контура по нормали к его плоскости, его протягиванием вдоль произвольной пространственной кривой, вращением контура вокруг заданной оси, натягиванием между несколькими заданными сечениями. Синтез сборок выполняется вызовом или ссылкой на библиотечные элементы, их модификацией, разработкой новых деталей. Детали сборки можно нужным образом ориентировать в пространстве. Далее следует ввести ассоциативные (сопрягающие) связи. Дополнительные модели конструкторского проектирования имеют более конкретную, но узкую специализацию. Примерами таких модулей могут служить модули конструирования панелей из композиционных материалов, разработки штампов и литейных пресс-форм, трубопроводных систем, сварных конструкций, разводки электрических кабелей и жгутов.

Модули функционального моделирования (подсистема CAE) используются как препроцессоры и постпроцессоры в программах конечно-элементного анализа (нанесение сетки конечных элементов, визуализация результатов анализа), для анализа теплового состояния конструкций, оценки виброустойчивости и др.

Основные модули технологического проектирования (подсистема CAM) служат для моделирования технологических процессов фрезерной, токарной, электроэрозионной обработки и для разработки постпроцессоров для систем управления оборудованием с ЧПУ.

Модули обмена данными (конверторы форматов данных) должны обеспечивать возможности импорта и экспорта данных в другие CAE/CAD/CAM-системы.

Система Unigraphics – универсальная система геометрического моделирования и конструкторско-технологического проектирования, в том числе разработки больших сборок, прочностных расчетов и подготовки конструкторской документации. Система многомодульная.

В конструкторской части (подсистема CAD) имеются средства для твердотельного конструирования, геометрического моделирования на основе сплайновых моделей поверхностей, создания чертежей по 3*D*-модели, проектирования сборок (в том числе с сотнями и тысячами компонентов) с учетом ассоциативности, анализа допусков и др.

В технологической части (подсистема CAM) предусмотрены разработка управляющих программ для токарной и электроэрозионной обработки, синтез и анализ траекторий инструмента при фрезерной трех- и пятикоординатной обработке, при проектировании пресс-форм, штампов и др. Для инженерного анализа (подсистема CAE) в систему включены модели прочностного анализа с использованием МКЭ с соответствующими пре- и постпроцессорами, кинематического и динамического анализа механизмов с определением сил, скоростей и ускорений, анализа процессов литья пластических масс.

Другая система верхнего уровня CATIA позволяет заказчику генерировать собственный вариант САПР сквозного проектирования – от создания концепции изделия до технологической поддержки производства и планирования производственных ресурсов. В системе реализовано поверхностное и твердотельное 3*D*-моделирование и оптимизация характеристик изделий. Возможны фотореалистичная визуализация, восстановление математической модели из материального макета. Система масштабируема. Предлагаются типовые конфигурации, в том числе варианты для полнофункционального сквозного проектирования сложных изделий и проектирования комплектующих на небольших и средних предприятиях. Аналогичные возможности реализованы и в других тяжелых САПР.

Значительно дешевле обходится приобретение САПР среднего уровня. В России получили распространение системы компаний *Autodesk, Solid Works Corporation, Топ Системы, Аскон, Интермех, Bee-Pitron* и некоторых других. Все эти системы ориентированы в первую очередь на платформу *Wintel*, как правило, имеют подсистемы: конструкторско-чертежную 2*D*, твердотельного 3*D*-моделирования, технологического проектирования, управления проектными данными, ряд подсистем инженерного анализа и расчета отдельных видов машиностроительных изделий, а также библиотеки типовых конструктивных решений. Широкое распространение в России и за рубежом получило ПО машиностроительных САПР компании *Autodesk*.

Линия современных программных систем конструкторского проектирования фирмы *Autodesk* включает ряд систем, среди которых наиболее развитыми следует считать системы *AutoCAD, Mechanical Desktop* и *Inventor*.

Система *Mechanical Desktop (MDT)* предназначена для параметрического 3*D*-моделирования, ассоциативного конструирования, распределенного проектирования в сети Интернет, оформления 2*D*-документации. Построена на графическом ядре *ACIS*. *Имеется управляющая программа CAD-менеджер со средствами настройки, конфигурирования и управления рабочими группами.*

Система *Inventor* предназначена для твердотельного параметрического проектирования, ориентирована на разработку больших сборок с сотнями и тысячами деталей, имеет развитую библиотеку стандартных элементов. В основе системы также лежит графическое ядро *ACIS*. Построение 3*D*-моделей возможно выдавливанием, вращением, по сечениям, по траекториям. Из 3*D*-модели можно получить 2*D*-чертежи и спецификации материалов. Поддерживается коллективная работа над проектом, в том числе в пределах одной и той же сборки. Предусмотрена автоматическая проверка кинематики, размеров детали с учетом положения соседних деталей в сборке. *Значительные удобства работы конструкторов обусловлены тем, что ассоциативные связи задаются не путем описания операций с параметрами и уравнений, а непосредственно определением формы и положения компонентов*.

В число продуктов *Autodesk* входит ряд других программ автоматизированного проектирования, в том числе *Autodesk Data Exchange* – набор конверторов для взаимного преобразования данных из форматов *DXF* и *SAT* (формат ядра *ACIS*) в такие форматы, как *STEP, IGES, VDA-FS*.

Ряд продуктов, интегрированных с программами проектирования компании *Autodesk*, создан компаниями, входящими в ассоциацию *Mechanical Applications Initiative* производителей прикладного ПО. Среди них следует отметить программу *Dynamic Designer Motion* (компания *Mechanical Dynamic*), предназначенную для расчетов динамики и кинематики механизмов (в том числе трехмерных). Элементами являются модели шарниров, пружин, сухого трения, ударных нагрузок.

Программа *Dynamic Designer Motion* имеет связи с группой программ конечно-элементного анализа *Cosmos*. Например, можно использовать программу *Cosmos/DesignSTAR* как автономно, так и в связке с программами *Inventor Solid Edge*, а программу *Cosmos/Works* – с программой *Solid Works*. С помощью этих программ проводят анализ деформированного состояния деталей, стационарных и нестационарных тепловых процессов, динамики жидкостей и газов, низкочастотных электромагнитных полей, определяют собственные частоты колебания конструкций.

Система твердотельного параметрического моделирования механических конструкций *Solid Works* (компания *Solid Works Corporation*) построена на графическом ядре *Parasolid*, разработанном в *Unigfaphics Solution*. Синтез конструкции начинается с построения опорного тела с помощью операций типа выдавливания, протягивания или вращения контура с последующим добавлением и (или) вычитанием тех или иных тел. Используется технология граничного моделирования (*B-representation*) с аналитическим или сплайновым описанием поверхностей. При проектировании сборок на основе БЭФ можно задавать различные условия взаимного расположения деталей, автоматически контролировать зазоры и отсутствие взаимопересечения деталей. Предусмотрены *IGES, DXF, DWG*-интерфейсы с другими системами.

Среди САПР среднего уровня наряду с продуктами зарубежных фирм неплохо зарекомендовали себя системы отечественных разработчиков – это, прежде всего, системы *Компас* (компания *Аскон*) и *T-Flex CAD* (*Топ Системы*).

В системе *Компас* для трехмерного твердотельного моделирования используется оригинальное графическое ядро. Синтез конструкций выполняется с помощью булевых операций над объемными примитивами, модели деталей формируются путем выдавливания или вращения контуров, построением по заданным сечениям. Возможно задание зависимостей между параметрами конструкции, расчет масс-инерционных характеристик. Разработка проектно-конструкторской документации, в том числе различных спецификаций, выполняется подсистемой *Компас-График*.

Имеются библиотеки с данными о типовых деталях и с графическими изображениями, а также программы специального назначения (проектирование тел вращения, пружин, металлоконструкций, трубопроводной арматуры, штамповой оснастки, выбора подшипников качения, раскроя листового материала и др.). Проектирование технологических процессов выполняется с помощью подсистемы *Компас-Автопроект*, программирование объемной обработки на станках с ЧПУ – с помощью подсистемы *ГЕММА-3D*. Ряд необходимых функций управления проектными данными возложено на подсистему *Компас-Менеджер*.

Подсистема трехмерного твердотельного моделирования *T-Flex CAD* 3*D* в САПР *T-Flex CAD* построена на базе ядра *Parasolid*. Реализована двунаправленная ассоциативность, т. е. изменение параметров чертежа автоматически вызывает изменение параметров модели, и наоборот. При проектировании сборок изменение размеров или положения одной детали ведет к корректировке положения других. Модель 3*D* может быть получена непосредственно по имеющемуся чертежу, или с помощью булевых операций, или путем выталкивания, протягивания, вращения профиля, лофтинга и т. п. Предусмотрен расчет масс-инерционных параметров.

В то же время можно по видам и разрезам трехмерной модели получить чертеж, для чего используется подсистема *T-Flex CAD*

3D SE. Для параметрического проектирования и оформления конструкторско-технологической документации служит подсистема *T-Flex CAD 2D*, для управления проектами и документооборотом – подсистема *T-Flex DOCs*. В подсистеме технологического проектирования *T-Flex/ТехноПро* выполняются синтез технологических процессов, расчет технологических размеров, выбор режущего и вспомогательного инструмента, формирование технологической документации, в том числе операционных и маршрутных технологических карт, ведомостей оснастки и материалов, карт контроля. Подготовка программ для станков с ЧПУ осуществляется в подсистеме *T-FlexЧПУ*. Кроме названных основных подсистем в состав *T-Flex CAD* включен ряд программ для инженерных расчетов деталей, проектирования штампов и пресс-форм.

В САПР *Cadmech 2000* белорусской компании *Интермех* входят программы *AVS* для выпуска конструкторской документации, *Techcard* для технологической подготовки производства, *LCAD* для планирования производственных цехов и участков и др. Для собственно конструкторского 3*D*-проектирования *Интермех* использует программы компании *Autodesk*.

Разработкой продуктов для САПР литейного производства занимается компания *Moldflow*, ее программы *Part Adviser* и *Mold Advisor* предназначены для моделирования процессов литья пластмасс.

Важное место в конструкторско-технологических САПР занимают программы технологической подготовки производства. Компания *Consistent Software* предлагает систему *TechnologiCS* для технологической подготовки дискретного производства. Эта система выполняет функции составления спецификаций, ведения дерева проекта и библиотеки чертежей, синтеза технологических процессов, выбора инструмента, расчета режимов резания, нормирования расхода материалов, ведения технологической документации. Система *SolidCAM* (*CADTech*), построенная, как и *Mechanical Desktop*, на ядре *ACIS*, служит для получения управляющих программ для токарной, 2,5- и 3-осевой фрезерной обработки на станках с ЧПУ. Система *ТЕХТРАН*

(*НИП «Информатика»*) включает модули токарной, фрезерной, электроэрозионной обработки.

Мировыми лидерами среди программ конечно-элементного анализа являются программно-методические комплексы *Nastran* и *Patran* (компания *MSC Software Corporation*) и *Ansys* (компания *Ansys Inc.*). Как правило, эти комплексы включают в себя ряд программ, родственных по математическому обеспечению, интерфейсам, общности некоторых используемых модулей. Эти программы различаются ориентацией на разные приложения, степенью специализации, ценой или выполняемой обслуживающей функцией. Например, в комплексе *Ansys* основные решающие модули позволяют выполнять анализ механической прочности, теплопроводности, динамики жидкостей и газов, акустических и электромагнитных полей. Во все варианты программ входят пре- и постпроцессоры, а также интерфейс с базой данных. Предусмотрен экспорт (импорт) данных между *Ansys* и ведущими комплексами геометрического моделирования и машинной графики.

Мировой лидер среди средств моделирования механических процессов на макроуровне путем решения СОДУ – программа *Adams*, а примером отечественных систем подобного назначения следует назвать программы *ПА*7 и *ПА*9. В САПР крупных предприятий обычно используют программы разных уровней. Связано это с тем, что более 80 % всех процедур конструирования можно выполнить на CAD-системах нижнего и среднего уровней, кроме того, «тяжелые» системы дороги. Поэтому предприятие приобретает лишь ограниченное число экземпляров (лицензий) программы верхнего уровня, а большинство клиентских рабочих мест обеспечивается экземплярами программ нижнего или среднего уровней. При этом возникает проблема обмена информацией между разнотипными CAD-системами. Она решается путем использования языков и форматов, принятых в *CALS*-технологиях, хотя для неискаженной передачи геометрических данных с помощью промежуточных унифицированных языков приходится преодолевать определенные трудности.

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику автоматизированным системам CAD/CAM/CAE.

2. Опишите функции CAD-систем (характеристики параметризации и ассоциативности, геометрическое моделирование).

3. Дайте характеристику основным функциям CAM-систем, включая автоматизацию технологической подготовки производства (CAPP).

4. Опишите модифицированный и генеративный подходы к CAPP.

5. Опишите групповую технологию проектирования и подготовки производства.

6. Обоснуйте необходимость физического моделирования в процессах проектирования (включая технологию быстрого прототипирования).

7. Дайте общую характеристику методам быстрого прототипирования и изготовления (БПИ).

8. Опишите методы стереолитографии, отверждения на твердом основании, избирательного лазерного спекания.

9. Опишите методы трехмерной печати, ламинирования, моделирования методом наплавки.

10. Дайте характеристику основным функциям CAE-систем и перспектив их развития применительно к разработке методов виртуальной инженерии.

11. Опишите структуру и функции виртуальной инженерии.

12. Укажите и опишите основные компоненты виртуальной инженерии.

13. Опишите основное оборудование виртуальной реальности (устройства ввода и вывода информации).

14. Опишите структуру и классификацию существующих САПР.

15. Дайте характеристику системам САПР верхнего уровня Unigrafics, CATIA, Pro/Engineer.

16. Дайте сравнительный анализ системам САПР среднего уровня.

Лекция 5
ИНТЕГРИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Наибольший успех при разработке сложных (мехатронных) систем может быть достигнут только в случае полной интеграции отдельных подсистем САПР. Поэтому в последние годы получили широкое распространение универсальные интегрированные CAD/CAM/CAE-системы, которые предназначены для комплексной автоматизации процессов проектирования, конструирования и производства различной продукции. Они входят в состав современных САПР. На практике применяется большое число интегрированных систем различных версий и конфигураций для решения конкретных задач проектирования. Такая ситуация порождает большие издержки проектирования, особенно если речь идет об участии большого количества исполнителей при проектировании сложных производственных систем.

Кроме того, в связи с большим объемом технических данных по мере разработки проекта возникает проблема переноса данных из одной системы в другую. Поэтому современные системы должны включать в свой состав программные пакеты, называемые системами управления данных в продуктах – PDM (product data management). Использование такой системы улучшает взаимодействие и повышает эффективность управления проектами. Универсальные CAD/CAM/CAE/PDM-системы обеспечивают следующие функции проектирования:

– трехмерное графическое моделирование;

– различные виды анализа и инженерных расчетов с использованием метода конечных элементов (МКЭ), моделирование кинематики и динамики механизмов и процессов;

– автоматизацию технологической подготовки производства;

– собственные или коммерческие СУБД;

– создание прикладных приложений концептуального проектирования и программного обеспечения сложных систем;

– управление данными проекта;

– обмен данными в различных графических форматах.

В качестве примера интегрированных САПР можно указать системы верхнего уровня: Catia, Unifraphics, Pro/Engineer, SolidWorks.

Далее рассмотрим программное обеспечение, позволяющее создавать и поддерживать интегрированные информационные среды для промышленных автоматизированных систем.

5.1. Системы PDM

Системы PDM предназначены преимущественно для информационного обеспечения проектирования – упорядочения информации о проекте, управление документами и документооборотом (включая спецификации и другие виды представления данных), обеспечения доступа к данным по различным атрибутам, навигации по иерархической структуре проекта. В ряде систем PDM поддерживают информационные связи не только внутри САПР, но и с производственной и маркетинговой документацией [1].

Если рассматривать ситуацию в динамике, то маркетинговые концепции должны передаваться в отдел планирования продуктов и в группу проектирования, которая взаимодействует с производственным отделом и группой поддержки. Сведения об обнаруженных проблемах возвращаются в отделы проектирования и производства. Сведения о продажах и проектах передаются поставщикам и партнерам. Данные о расходах обрабатывает бухгалтерия. Все эти виды деятельности тесно связаны друг с другом, поэтому изменения в содержании или состоянии проекта должны быть доступны всем участникам во избежание дорогостоящих ошибок.

Рассмотрим типичные для систем PDM основные функции [1, 3]:

1) поддержка интерактивной работы пользователя при создании моделей изделий (процессов), структурирование описаний

проектируемых объектов, предъявление пользователю этой иерархической структуры вместе с возможностями навигации по структуре (дереву изделия, проекта) и получение нужной информации по каждой указанной пользователем структурной компоненте;

2) управление конфигурацией изделия (процесса), ведение состава и контроль изменения изделия, сохранение истории проекта, классификация и кодификация изделий;

3) обеспечение целостности проектных данных при управлении версиями проекта и внесение изменений в проект (при изменении версии проекта сначала создается новая версия проекта, а изменения вносятся уже в эту новую версию; одна версия каждого объекта является текущей или активной версией; нельзя одновременно вносить изменения в один и тот же проект разным разработчикам);

4) управление документами и документооборотом, электронным архивом, поддержка классификаторов и справочников, автоматизированное составление спецификаций (в интегрированных САПР в документооборот входит большое число документов, связанных с процедурами маркетинга, планирования, администрирования и т. п.);

5) Использование полнофункциональных систем делопроизводства, разработанных независимо от конкретных PDM (ввод в оборот документов с помощью средств их автоматического распознавания и атрибутирования, поиск нужных данных, поддержка групповой работы над документами, разграничение прав доступа к документам, подготовка отчетов, маршрутизация документов, учет их движения, контроль исполнения предписанных документами действий, автоматическое уведомление соответствующих лиц, планирование работ, связанных с прохождением документов);

6) управление проектами (процессом проектирования) включает распределение основных и вспомогательных заданий и контроль их выполнения, выполнение проектных операций и процедур, пересылку документов и файлов конкретным пользователям, изменение статуса объекта, просмотр и утверждение инженерных проектов, внесение в них изменений и т. п.;

7) визуализация структуры изделия (проекта) в виде дерева, многооконное представление трехмерных изображений;

8) возможность подключения внешних систем;

9) использование криптографических средств и средств электронной подписи.

Интеграция данных на ранних этапах развития PDM связывалась только с организацией сквозного (параллельного) проектирования изделий и систем в рамках конкретной САПР. В настоящее время (как отмечалось выше) основным содержанием проблемы интеграции стало обеспечение интерфейса САПР с другими автоматизированными системами. Проблема решается с помощью поддержки типовых форматов, например путем конвертации данных из общепринятых форматов во внутренние представления конкретных САПР.

Примеры PDM

Первые известные PDM, созданные фирмами, разрабатывающими САПР или АСУП:

– iMAN (Unigrphics Solutions);
– Euclib Design Manager (Matra DataVision);
– Smar Team (Smart Solutions, Dessault Sysytems);
– Baan PDM (BAAN);
– Optegra и ProPDM (PTC);
– ENOVIA (IBM, Dessault Sysytems).

Дополнительные преимущества получены за счет совместного использования CATIA (Dessault Sysytems) и ENOVIA.

На роль PDM претендует система ведения архива технической документации и управления проектными данными Search (Интермех).

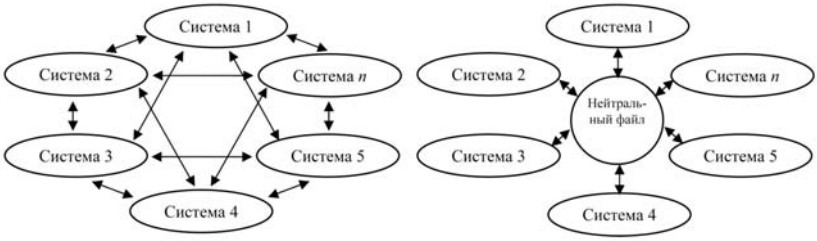
Другие примеры PDM:

– STEP Suite;
– Outdo CS PDM (Consistent Software);
– PartY Plus (Лоция Софт);
– Omega Production (СИКОР) может служить основой для интеграции САПР и АСУП.

5.2. Метод обмена данными

Когда две или более CAD/CAM/CAE-системы объединяются и связываются в единое приложение для совместного использования данных, часто возникает проблема обмена данными. Фактически всегда существует проблема (потребность) связать воедино несколько систем либо внутри одной организации, либо внешне, как в случае со смежниками (по проекту) или поставщиками компонентов. Для решения этой коммуникационной проблемы необходима возможность преобразовать данные технических требований одной системы в форму, понятную для других систем, и наоборот. Чтобы облегчить преобразование и не разрабатывать программы-конверторы для всех возможных пар САПР, было предложено несколько стандартных форматов для хранения данных технических требований. Вкратце рассмотрим типичные стандартные форматы.

Различные CAD/CAM/CAE-системы хранят данные технических требований в структурах разного вида, поэтому для переноса данных необходимо преобразовать данные технических требований одной системы в формат другой. Еще один конвертор (преобразователь) необходим для переноса данных между двумя системами в противоположном направлении. Следовательно, для каждой пары систем необходимо иметь два конвертора. Двунаправленные стрелки для каждой пары систем (рис. 5.1, *а*) предполагают наличие двух конверторов. Эти конверторы для каждой конкретной пары систем называются *прямыми конверторами* (*direct translators*). Если у нас есть n различных систем, нам необходимо разработать $n(n-1)$ конверторов, поскольку количество пар систем равно $n(n-1)/2$. Например, для обмена данными между 10 системами придется разработать 90 конверторов. Таким образом, метод прямого конвертирования непрактичен, так как требует разработки слишком большого количества конверторов при необходимости работать с множеством систем. Более того, добавление одной системы к n уже имеющимся потребует написания $2n$ дополнительных конверторов.



а) *б*)

Рис. 5.1. Два метода обмена данными между двумя различными системами

Однако обмен данными можно обеспечить, введя нейтральную структуру базы данных, называемую *нейтральным файлом* (*neutral file*), которая была бы независима от существующих САПР. Эта структура будет действовать как промежуточная точка коммуникации между различными структурами баз данных САПР (рис. 5.1, *б*).

Таким образом, в каждой системе будет своя пара конверторов для экспорта и импорта данных в этот нейтральный формат. Конвертор, преобразующий данные из собственного формата данной системы в нейтральный формат, называется *препроцессором* (*pre-processor*), а конвертор, выполняющий обратное преобразование, – *постпроцессором* (*post-processor*) (рис. 5.2). Соответственно в этом случае для обмена данными между *n* системами потребуется 2*n* конверторов и лишь два дополнительных конвертора необходимо будет добавить при введении новой системы.

Иными словами, этот косвенный метод свободен от присущего прямому методу недостатка, когда требовалось писать всевозрастающее количество программ. Это основная причина, по которой косвенный метод принят в качестве главного метода обмена данными между различными системами, несмотря на то что в сравнении с прямым методом у него имеются некоторые недостатки. В частности, прямые конверторы работают быстрее косвенных, и создаваемые ими файлы данных обычно имеют

меньший размер, чем нейтральные файлы, генерируемые косвенными конверторами. Файл данных в собственном формате конкретной системы обычно также оказывается меньше нейтрального файла из-за обобщенной природы последнего. Когда мы переносим данные технических требований через нейтральный файл, некоторая информация, как правило, теряется, особенно информация о топологическом дереве и ограничениях в системах параметрического моделирования.



Рис. 5.2. Обмен данными с использованием нейтрального файла

Известны три типичных формата нейтрального файла: IGES (*Initial Graphics Exchange Specification* – первоначальная спецификация обмена графическими данными), DXF (*Drawing Interchange Format* – формат обмена чертежами) и STEP (*Standard for Exchange of Product model data* – стандарт обмена данными о модели продукта). В настоящее время IGES является самым популярным форматом нейтрального файла, а формат DXF используется главным образом для обмена данными чертежей. STEP – это стандартный формат данных, используемый для хранения полной информации обо всем жизненном цикле продукта, включая проектирование, анализ, производство, контроль качества, испытания и обслуживание помимо обычных данных технических требований. В настоящее время CAD-системы, поддерживавшие формат IGES, ориентированы на переход к формату STEP.

В лекции 7 будут рассмотрены и другие способы организации информационных обменов.

5.3. Тенденции в развитии интегрированных систем [10, 11]

Сегодня информационная поддержка проектирования, конструирования и технологической подготовки сложных (мехатронных) производств, как правило, осуществляется с использованием преимущественно САПР верхнего уровня. Их выбор определяется способностью конкретных САПР решать поставленные перед производителем задачи.

Интегрированная CAD/CAM/CAE-система, дополненная средствами трехмерного проектирования и анализа, способными работать в распределенной компьютерной сети и удовлетворяющими принципам параллельного проектирования, определяет основную тенденцию ее развития.

Для дальнейшего развития интегрированных систем необходимо не только расширение функциональных возможностей системы проектирования, но и кардинального повышения производительности труда разработчиков, которая снижается в связи с возрастающим объемом обмена информацией между группами проектировщиков. Кроме того, требует решения еще одна проблема, связанная со сложностью переноса систем на другие платформы (например, с UNIX-платформы на платформу Wintel). Еще одна трудность возникает при необходимости ввести новый элемент в группу деталей, сохраненных в базе данных системы. Для этого соответствующая программная библиотека должна быть расширена, а затем перекомпилирована. Когда изменяются задачи проектирования, то проектировщики должны создавать новые прикладные подсистемы, не имея возможности применить разработанный ранее аппарат, аккумулирующий их «ноу-хау».

Поэтому предложенные в новых поколениях интегрированных систем их открытость и использование объектно-ориентированного проектирования (см. п. 3.3) направлены на преодоление некоторых указанных выше недостатков и ограничений.

Объектно-ориентированная модель определяется как электронная модель реального физического объекта, а не только как

представление его геометрии, и содержит не только геометрию объекта, но и все негеометрические его параметры, атрибуты и связи. Например, описание гидравлического пресса в виде «объекта» проектирования кроме размеров его конструктивных элементов будет содержать еще такие атрибуты, как «максимальное усилие», «величина давления в гидросистеме», «производительность» и «дата установки». В описание «объекта» также будут входить возможности его модификации, а также его отдельные компоненты, которые можно исследовать на прочность и надежность функционирования при различных эксплуатационных условиях.

Построенная на основе объектно-ориентированных моделей система CAD/CAM позволяет вводить описание объектов нового вида как подкласс более общего класса. Новый объект сможет наследовать не только атрибуты, но и методы преобразования уже известных объектов, что заодно существенно упрощает расширение базы данных конкретной системы и сокращает время проектирования объекта. В системы CAD/CAM/CAE закладываются возможности многократного повторного применения в разных проектах одних и тех же элементов конструкций и процессов.

Новая объектно-ориентированная архитектура открыта и обеспечивает широкое участие в совместном проектировании специалистов различных групп от заказчиков поставщиков комплектующих, до аналитиков и технологов.

Учитывая, что данные проекта – это самая ценная часть системы, то особенно тщательно должны быть разработаны все средства доступа к проектным данным и их обработки, обеспечивающие максимально высокую степень их непротиворечивости, защищенности и сохранности.

Возможность и направленность дальнейшего развития CAD/CAM/CAE-систем будут рассмотрены в лекции 7 «Информационная поддержка жизненного цикла мехатронных систем».

Контрольные вопросы

1. Дайте общую характеристику интегрированного подхода к разработке мехатронных систем.

2. Определите основное назначение систем PDM.

3. Опишите три первые (1–3) типичные функции PDM.

4. Опишите три следующие (4–6) типичные функции PDM.

5. Опишите три последние (7–9) типичные функции PDM.

6. Приведите примеры PDM.

7. Обоснуйте необходимость обмена данными между разными САПР.

8. Опишите метод прямого конвертирования обмена данными.

9. Опишите метод с использованием нейтрального файла обмена данными (косвенный метод).

10. Проведите сравнительный анализ двух методов обмена данными.

11. Опишите три типичных формата нейтрального файла.

12. Проведите сравнительный анализ трех типичных форматов нейтрального файла.

13. Опишите схему обмена данными с использованием нейтрального файла.

14. Перечислите дополнительные средства, необходимые для расширения функциональных возможностей CAD/CAM/CAE-систем.

15. Перечислите проблемы, которые необходимо решить для дальнейшего развития интегрированных CAD/CAM/CAE-систем.

16. Объяснить, почему открытость интегрированных систем и использование объектно-ориентированного проектирования направлены на дальнейшее развитие интегрированных систем.

Лекция 6
КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

6.1. Основные положения

Следуя [12], отметим, что проектирование – сложная итерационная процедура, содержащая множество неформальных решений. И тем не менее существует определенная последовательность проектных действий.

Первым этапом (часто говорят верхним уровнем) проектирования является разработка концепции изделия (концептуальное проектирование). Концепция изделия (процесса) – это система взглядов на будущее изделие (производственного процесса).

Концептуальное проектирование выполняют в процессе предпроектных исследований (см. рис. 3.2), когда формируется техническое задание (ТЗ), технические предложения и эскизный проект будущего изделия (производственного процесса).

Все выше сказанное относится и к процедуре модернизации (реинжинирингу) деятельности предприятия, на котором реализуется производственный процесс.

Предпроектные исследования предприятий, на которых создаются или модернизируются производственные процессы, проходят путем обследования этих предприятий. На основе результатов обследования строят модель, отражающую деятельность предприятия на данный момент (до модернизации). Такую модель называют «AsIs' (как есть). В процессе проектирования нового производственного процесса в качестве модели «AsIs' принимается ее ближайший прототип.

Далее путем изменения модели «AsIs' разрабатывают новую модель производственного процесса, которую называют моделью «ToBe» (как должно быть). Модель «ToBe» – это сложная модель, которая имеет несколько аспектов описания. В ее состав входят *функциональные*, *информационные*, *поведенческие* и *структурные* модели.

Функциональная модель системы описывает совокупность выполняемых системой функций. Она должна отвечать на следующие вопросы [12]: «Какие функции выполняет система?», «Какова структура функций?», «Что есть вход и выход функций?», «Что обеспечивает управление функцией?», «Как связаны функции и компоненты системы?», «Как избежать дублирования функций?». В функциональную структуру должны войти, как минимум, все функции, приведенные в ТЗ на систему.

Информационная модель отражает структуры данных – их состав и взаимосвязи.

Поведенческая модель описывает функционирование системы (процессов) как упорядоченную последовательность событий с одновременным описанием объектов, имеющих непосредственное отношение к процессу. В ней фигурируют такие категории, как состояние системы, событие, переход из одного состояния в другое, условия перехода, последовательность событий. Если функциональная модель позволяет ответить на вопрос: «Что делает система?», то поведенческая модель объясняет «Как система это делает». В основе поведенческого моделирования лежат модели имитационного моделирования систем массового обслуживания, сети Петри, методы конечного автомата.

Структурная модель характеризует совокупность элементов системы и их взаимосвязь, описывает морфологию (построение) системы.

Концептуально современный подход к созданию и информационному обеспечению сложных (мехатронных) производственных процессов и систем базируется на следующих общих положениях:

1. Основой разработки мехатронных систем служат методы *совмещенного* (*параллельного*) проектирования, предполагающие

совмещение во времени некоторых этапов проектирования, выполняемых последовательно при традиционном проектировании (например, последовательно выполняется разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы с последующей разработкой интерфейсных блоков).

2. Синергетический характер мехатронных систем проявляется в том, что составные части системы не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что образованная ими система начинает обладать новыми свойствами. При этом мехатронные системы, в отличие от традиционных, обладают меньшей структурной избыточностью и большей степенью интеграции. В результате повышается конструктивная компактность системы (вплоть до миниатюризации в микромашинах), улучшаются массогабаритные и динамические характеристики машин, упрощаются кинематические цепи. Возникают дополнительные возможности при проектировании мехатронных систем, наилучшим образом отвечающие требованиям заказчика. Функциональное, структурное и конструктивное объединение разных по физической природе элементов, связанных между собой аппаратными и программными интерфейсами – основа мехатронного подхода к процессу проектирования производственных процессов и систем.

3. Интегрированные мехатронные элементы выбираются разработчиком уже на стадии проектирования машины, а затем обеспечивается необходимая инженерная и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации машины. В этом радикальное отличие мехатронных машин от традиционных, когда зачастую пользователь был вынужден самостоятельно объединять в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие устройства различных изготовителей. Именно поэтому многие сложные комплексы (например, некоторые гибкие производственные системы в отечественном машиностроении) показали на практике низкую надежность и невысокую технико-экономическую эффективность.

4. Проектирование мехатронных систем базируется на идеях модульного конструирования, при котором из отдельных

многофункциональных модулей (механической, электронной, компьютерной частей системы) компонуются гибкие сложные системы модульной архитектуры.

5. В мехатронных системах наблюдается перераспределение функциональной нагрузки от аппаратных (например, электромеханических) модулей к информационным (компьютерным) модулям. При этом исключается многоступенчатое преобразование энергии и информации.

6. При проектировании мехатронных систем широко применяются методы *визуализации динамических процессов*, протекающих в системах, вплоть до использования систем *виртуальной реальности* при проектировании сложных технических систем.

7. Высокий уровень интеллектуализации мехатронных систем диктует необходимость проектирования интеллектуальных систем управления (для борьбы с неопределенностями, сопутствующими функционированию сложных динамических систем). При этом необходим обоснованный выбор интеллектуальных технологий при проектировании многоуровневых иерархических систем управления.

8. Использование концепции АКУ (аппарат конфигурируемого управления), у которой маневренность является приоритетной функцией. Ранее при создании машины сначала выполняли базовое проектирование (с точки зрения физики и механики), а затем в качестве подсистемы разрабатывали систему управления. Но оказалось, что можно спроектировать более эффективную машину, если еще на этапе базового проектирования заложить основы системы управления, используя принципы АКУ. При этом машина может реализовать свои функции только благодаря существованию системы управления. Таким способом можно добиться максимальной динамичности системы (машины). Устойчивость достигается благодаря наличию контуров управления. Концепция АКУ широко используется в самолетостроении.

9. Широкое использование «встроенных» систем (внедрение цифровых электронных блоков и микропроцессоров в мехатронные узлы машин и систем).

10. Бессенсорное управление – перенос функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства мехатронных систем.

Практическое воплощение данных принципов требует привлечения всех современных методов проектирования и поддержки функционирования сложных (мехатронных) систем.

6.2. Инструментальные средства концептуального проектирования и модернизации систем

В современных информационных технологиях важное место отводится инструментальным средствам и средам разработки и модернизации мехатронных систем (производственных процессов и систем). Эти технологии и среды образуют системы, называемые CASE-технологиями (или CASE-системами).

CASE-технологии [3, 11]

Аббревиатура CASE имеет двойное толкование, соответствующее двум направлениям использования CASE-технологий. Первое из них Computer Aided Software Engineering, что переводится как «автоматизированное проектирование программного обеспечения». Соответствующие CASE-технологии называют инструментальными средами разработки программного обеспечения (ПО). В этом случае CASE-технологии часто отождествляют с инструментальными средами разработки ПО, называемыми средами быстрой разработки приложений (RAD – Rapid Application Development). Примерами широко известных инструментальных сред RAD являются Delphi, Borland, C++, PowerSoft, СУБД (Oracle). Кроме того, используются специализированные средства (Tools). Эти текстовые и графические редакторы, электронные таблицы, User-пакеты и языки для создания приложений в составе CAD/CAM-систем и т. п. Наряду с самостоятельными

RAD-системами имеются и RAD-системы в составе САПР. Это прежде всего системы CAS.CADE фирмы Matra Datavision.

Второе направление, в котором используются CASE-технологии, – это поддержка концептуального проектирования сложных, слабоструктурированных систем – Computer Aided System Engineering. Далее CASE-технологии этого направления будем называть *системами CASE для концептуального проектирования*.

Среди систем CASE для концептуального проектирования различаются, описанные выше системы *функционального*, *информационного* и *поведенческого* проектирования. Наиболее известной методикой функционального проектирования сложных систем является методика SADT (Structured Analysis and Design Technique), предложенная в 1973 г. Р. Россом и впоследствии ставшая основой стандарта IDEF0 (Integrated DEFinition 0) – язык функционального проектирования. Для информационного моделирования использована методика инфологического (информационного) проектирования баз данных IDEF1X. Для поведенческого (динамического) моделирования используется методика IDEF3.

Процесс построения функциональных, информационных и поведенческих моделей автоматизируется за счет применения поддерживающих методологию IDEFсистем – BPWin, ERWin, OOWin, Design/IDEF и др. При этом в начале методом CASE-технологий строится модель процесса (As Is) – «как есть», а затем, после ее анализа и оптимизации с учетом использования современных интегрированных CAD/CAM/CAE/PDM-систем и вновь предложенных компонентов, – модель (To Be) – «как нужно».

Подсистему CASE в составе системной среды САПР можно рассматривать как специализированную САПР, в которой объектом проектирования являются новые версии подсистем САПР, в частности версии, адаптированные к требованиям конкретного заказчика.

Методика IDEF0, IDEF1X, IDEF3 [1, 3]

Рассмотрим кратко методологию SADT. Подход SADT относится к классу формальных методов, используемых при анализе

и разработке модели системы. SADT-модель предназначена для полного, точного и адекватного описания системы, имеющей конкретное назначение. Это назначение, называемое целью модели, вытекает из формального определения модели в SADT: «*М моделирует А, если М отвечает на вопросы относительно А*». Разработку SADT-модели начинают с формулировки вопросов, на которые модель должна дать ответы, т. е. формулируется цель моделирования. Далее дается точное определение границ моделируемой системы (модель точно устанавливает, что является и что не является субъектом моделирования). Ограничивая субъект, SADT-модель помогает сконцентрировать внимание на описываемой системе и позволяет избежать включение посторонних субъектов. Таким образом, SADT-модель должна иметь единственный субъект. Кроме того, SADT требует, чтобы модель рассматривалась все время с одной той же позиции. Эта позиция называется «точкой зрения» данной модели и однозначно определяет цель и субъект, например, конкретного технологического (производственного) процесса. Иногда только одна из множества возможных точек зрения может дать описание, удовлетворяющее цели модели. Например, для создания согласованной модели производственного процесса нужно встать на точку зрения главного инженера предприятия.

После того как определены субъект, цель и точка зрения модели, начинается первая интеграция процесса моделирования по методике SADT. Субъект определяет, что включить в модель, а что исключить из нее. Точка зрения диктует автору модели выбор нужной информации о субъекте и форму ее подачи. Цель становится критерием окончания моделирования. Конечным результатом этого процесса является набор тщательно взаимосвязанных описаний, начиная с описания самого верхнего уровня всей системы и заканчивая подробным описанием технологических операций производственного процесса.

Каждое из таких взаимосвязанных описаний называется диаграммой. Модель SADT можно представить в виде древовидной структуры диаграмм, где верхняя диаграмма является наиболее общей, а самые нижние наиболее детализированы. Ниже будут приведены примеры таких диаграмм.

Министерство обороны США (DoD) использовало методику SADT в качестве части своей программы ICAM–$5ntegrated Computer Aided Manufacturing (интеграция компьютерных и промышленных технологий) и назвала ее IDEF0 (Integrated DEFinition 0) – язык функционального моделирования.

IDEF0 – это более строгая реализация ранее предложенной методики SADT (*Structured Analysis and Design Technique*). Начиная с момента создания первой версии, методика успешно применялась для проектирования телефонных сетей, систем управления воздушными перевозками, производственных предприятий и др.

Описание объектов и процессов в IDEF0 выполняется в виде совокупности взаимосвязанных блоков (рис. 6.1), называемых блоками ICOM (*Input – Control – Output – Mechanism*), где *I* –вход, *C* – управление, *O* – выход, *M* –механизм.

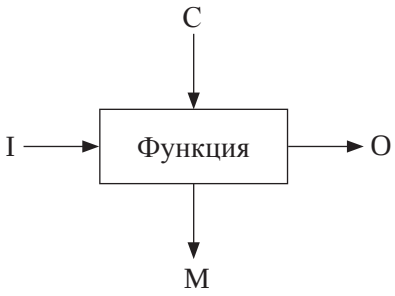


Рис. 6.1. Блок ICOM

Блоки представляют функции (работы), их названия выражаются глаголами или отглагольными существительными. Типичные примеры функций: планировать, разработать, классифицировать, измерить, изготовить, отредактировать, рассчитать, продать (или планирование, разработка, классификация, измерение, изготовление, редактирование, расчет, продажа). Число блоков на одном уровне иерархии – не более 6, иначе восприятие диаграмм будет затруднено. Число уровней иерархии не ограничено, но обычно – не более 5. Блоки в диаграммах IDEF0 связаны

дугами (стрелками), которые отображают множества объектов (данных). Управление (*control*) определяет условия выполнения. Примеры управления: требования, чертеж, стандарт, указания, план. Механизм (*mechanism*) выражает используемые средства, например: компьютер, САПР, оснастка, заказчик, фирма. Входы и выходы могут быть любыми объектами.

Пример диаграммы IDEF0 показан на рис. 6.2, где представлены функции, выполняемые на начальных этапах процесса реинжиниринга предприятия. На диаграмме показаны четыре этапа подготовки к реинжинирингу.

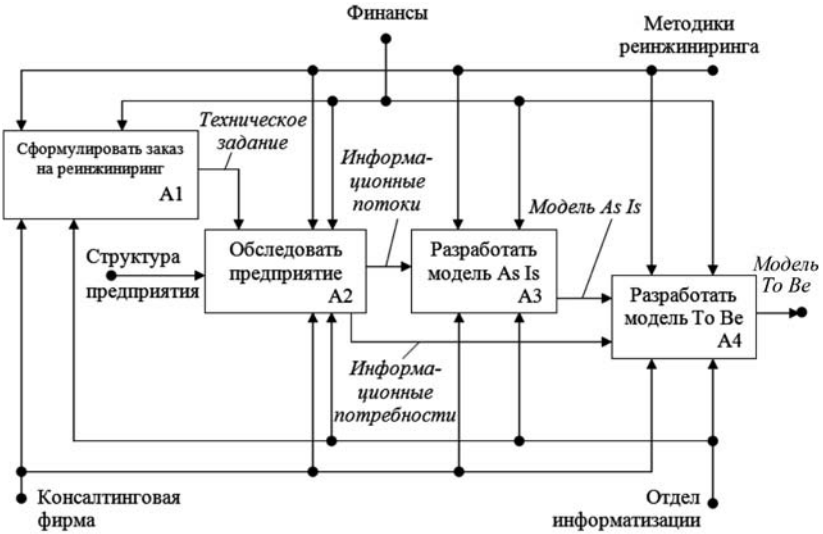


Рис. 6.2. Пример IDEF0-диаграммы

После формулировки заказа на перестройку процессов функционирования на базе информатизации управления производится обследование предприятия, выявляются его структура, информационные потоки между подразделениями, внешние информационные связи, степень компьютеризации, наличие вычислительной сети и т. п. На основании полученных данных составляется функциональная модель As Is и разрабатывается

модель To Be. Эта модель верхнего уровня далее конкретизируется, каждая из функций раскрывается более подробно на диаграммах следующих уровней.

Методика информационного проектирования приложений IDEF1X основана на построении информационных моделей приложений в виде диаграмм «сущность – связь». Для описания сущностей и отношений используется язык диаграмм.

Сущности в IDEF1X-диаграммах изображаются в виде прямоугольников, отношения – в виде стрелок. Отношения между сущностями в IDEF1X являются бинарными. Выделяют *идентифицирующие отношения* – связи типа «родитель – потомок», в которых потомок (зависимая сущность) однозначно определяется своей связью с родителем, и *неидентифицирующие отношения*, означающие, что у связанного этим отношением экземпляра одной сущности может быть (а может и не быть) соответствующий экземпляр второй сущности. Идентифицирующее отношение изображают на диаграмме сплошной линией между прямоугольниками связанных сущностей, неидентифицирующее – пунктирной линией. На дочернем конце линии должно быть утолщение (жирная точка). Мощность k связи – число экземпляров зависимой сущности, соответствующее одному экземпляру родительской сущности. Известное значение мощности может быть указано около утолщенного конца линии связи. При этом символ p означает $k \geq 1$, а символу z соответствует $k = 0$ или 1. Отсутствие символа интерпретируется как $k \geq 0$.

Различают также специфические и неспецифические отношения. *Неспецифические отношения* – это связи типа «многие ко многим», они обозначаются сплошной линией с утолщениями на обоих концах.

В отношениях «родитель – потомок» возможно наличие у потомка единственного родителя или нескольких родителей (ассоциативная связь). Выделяют также отношения категоризации (наследования), отражающие связи между некоторой общей сущностью и вариантами ее реализации (категориями). Примером категориальной связи является отношение «тип прибора – альтернативные варианты этого прибора».

Среди атрибутов различают ключевые и неключевые. Значение *ключевого атрибута* (*ключа*) однозначно идентифицирует экземпляр сущности. *Внешний ключ* – это атрибут (или атрибуты), входящий в ключ родителя и наследуемый потомком. На IDEF1X-диаграммах ключи записываются в верхней части прямоугольника сущности, причем внешние ключи помечают меткой FK (*Foreign Key*), неключевые атрибуты помещают в нижнюю часть прямоугольников. В идентифицирующих отношениях все ключи родителя входят и в ключи потомка, в неидентифицирующих – ключи родителя относятся к неключевым атрибутам потомка.

Между IDEF0 и IDEF1X-моделями одного и того же приложения существуют определенные связи. Так, стрелкам на IDEF0-диаграммах соответствуют атрибуты некоторых сущностей в IDEF1X-моделях, что нужно учитывать при построении информационных моделей.

Поведенческие аспекты приложений отражает методика IDEF3. Если методика IDEF0 связана с функциональными аспектами и позволяет отвечать на вопросы «Что делает система?», то в IDEF3 детализируются и конкретизируются IDEF0-функции и IDEF3-модель отвечает на вопросы «Как система это делает?». Язык IDEF3 – язык диаграмм, помогающий разработчику моделей наглядно представить моделируемые процессы. В IDEF3 входят два типа описаний: 1) процессно-ориентированные в виде последовательности операций; 2) объектно-ориентированные, выражаемые диаграммами перехода, характерными для конечно-автоматных моделей [3]. Программный продукт ProSim реализует методику IDEF3.

В заключение этого раздела рассмотрим все семейство стандартов IDEF. Применяемые в CASE-средствах разные методики и модели описывают различные свойства систем, важные, например, с точки зрения их автоматизации, а также позволяющие количественно оценить параметры проектов. Следует отметить, что спектр свойств систем различного назначения очень широк, и не все они к настоящему времени отражены в адекватных моделях. В то же время для класса информационных систем

организационного типа (*Management Information Systems* – MIS) адекватные модели разработаны и поддерживаются соответствующими средствами автоматизации.

Взаимная совокупность методик и моделей концептуального проектирования IDEF (*Integrated DEFinition*) разработана в США по программе *Integrated Computer Aided Manufacturing*. В настоящее время имеются методики функционального, информационного и поведенческого моделирования и проектирования, в которые входят IDEF-модели, приведенные ниже.

Название	**Назначение**
IDEF0	Функциональное моделирование *Function Modeling Method*
IDEF1 и **IDEF1X**	Информационное моделирование *Information and Data Modeling Method*
IDEF2	Поведенческое моделирование *Simulation Modeling Method*
IDEF3	Моделирование деятельности *Process Flow and Object Stale Description Capture Method*
IDEF4	Объектно-ориентированное проектирование *Object-oriented Design Method*
IDEF5	Систематизация объектов приложения *Ontology Description Capture Method*
IDEF6	Использование рационального опыта проектирования *Design Rational Capture Method*
IDEF8	Взаимодействие человека и системы *Human-System Interaction Design*
IDEF9	Учет условий и ограничений *Business Constraint Discovery*
IDEF14	Моделирование вычислительных сетей *Network Design*

IDEF0 реализует методику функционального моделирования сложных систем. Наиболее известной реализацией IDEF0 является методология SADT (*Structured Analysis and Design Technique*), предложенная в 1973 г. Д. Россом и впоследствии ставшая осно-

вой стандарта IDEF0. Эта методика рекомендуется для начальных стадий проектирования.

IDEF1X и **IDEF1** реализуют методики инфологического проектирования баз данных. В IDEF1X имеется ясный графический язык для описания объектов и отношений в приложениях, так называемый язык диаграмм «сущность – связь» (ERD – *Entry-Relations Diagrams*). Разработка информационной модели по IDEF1X выполняется в несколько этапов:

– выясняются цели проекта, составляется план сбора информации, при этом обычно исходные положения для информационной модели следуют из IDEF0-модели;

– выявляются и определяются основные сущности – элементы базы данных, в которых будут храниться эти системы;

– выявляются и определяются основные отношения, результаты представляются графически в виде так называемых ER-диаграмм;

– детализируются нестандартные отношения, определяются ключевые атрибуты сущностей; детализация отношений заключается в замене связей «многие ко многим» на связи «многие к одному» и «один ко многим»;

– определяются атрибуты сущностей.

IDEF2 и **IDEF3** реализуют поведенческое моделирование. Если методика IDEF0 связана с функциональными аспектами и позволяет отвечать на вопрос «Что делает система?», то в этих методиках детализируется ответ «Как система это делает». В основе поведенческого моделирования лежат модели и методы имитационного моделирования систем массового обслуживания, сети Петри, возможно применение модели конечного автомата, описывающей поведение системы как последовательности смен состояний.

Перечисленные методики относятся к так называемым структурным методам.

IDEF4 реализует объектно-ориентированный анализ больших систем. Он предоставляет пользователю графический язык для изображения классов, диаграмм наследования, таксономии методов.

IDEF5 направлен на представление онтологической информации приложения в удобном для пользователя виде. Для этого используются символические обозначения (дескрипторы) объектов, их ассоциаций, ситуаций и схемный язык описания отношений классификации, «часть-целое», перехода и т. п. В методике имеются правила связывания объектов (термов) в предложения и аксиомы интерпретации термов.

IDEF6 направлен на сохранение рационального опыта проектирования информационных систем, что способствует предотвращению структурных ошибок.

IDEF8 предназначен для проектирования диалогов человека и технической системы.

IDEF9 используется для анализа имеющихся условий и ограничений (в том числе физических, юридических, политических) и их влияния на принимаемые решения в процессе реинжиниринга.

IDEF14 предназначен для представления и анализа данных при проектировании вычислительных сетей на графическом языке с описанием конфигураций, очередей, сетевых компонентов, требований к надежности и т. п.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятия «концептуальное проектирование» (модели «As Is» и «To Be»).

2. Опишите функциональную и информационную модели производственного процесса (модели «To Be»).

3. Опишите поведенческую и структурную модели производственной системы.

4. Перечислите общие положения, на которых концептуально базируется современный подход к созданию и информационному обеспечению сложных процессов и систем.

5. Раскройте понятие «совмещенное (параллельное)» проектирование. Приведите пример.

6. В чем проявляется синергетический характер мехатронных систем?

7. Объясните причины широкого применения методов визуализации и использования «встроенных» систем при проектировании сложных систем.

8. Чем объясняется необходимость проектирования интеллектуальных систем управления сложными системами?

9. Раскройте двойное толкование аббревиатуры CASE.

10. Рассмотрите кратко методологию SADT.

11. Укажите основное назначение методик IDEF0, IDEF1X, IDEF3.

12. Опишите процесс построения функциональных моделей в процессе проектирования сложных систем (с использованием IDEF0-методики).

13. В чем состоит суть методики информационного проектирования сложных систем (приложений) IDEF1X?

14. Какие аспекты проектирования отражает методика IDEF3?

15. Охарактеризуйте все семейство стандартов IDEF.

16. Перечислите методики IDEF, относящиеся к структурным методам проектирования.

Лекция 7
ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Описанные выше методы IDEF задают единообразный подход к моделированию приложений, но не затрагивают проблем единообразного представления данных в процессах информационного обмена между разными компьютерными системами и приложениями. Необходимость решения этих проблем в интегрированных CAD/CAM/CAE-системах привела к появлению ряда унифицированных форматов представления данных в межкомпьютерных обменах, среди которых наиболее известными в машиностроении являются форматы IGES, DXF (см. раздел 5.2), EDIF в электронике и другие. Ограниченные возможности этих стандартов обусловили развитие работ в направлении полной информации обо всем жизненном цикле продукта, включая проектирование, анализ производства, контроль качества, испытание и обслуживание, помимо обычных данных технических требований, и привели к появлению формата STEP (Standard for Exchange jf Product data – стандарт обмена данными о модели продукта) в составе CALS-технологий.

7.1. CALS-технологии (основные понятия) [1, 3]

В настоящее время термин CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) как «Непрерывное сопровождение и информационная поддержка всех этапов жизненного цикла изделий (ЖЦ)». На русском языке понятию CALS соответствует ИПИ (информационная поддержка изделий) или КСПИ (компьютерное сопровождение и поддержка изделий).

Из этих определений следует, что CALS-технологиями называются технологии комплексной компьютеризации всех сфер промышленного производства, цель которых – унификация и стандартизация спецификаций промышленной продукции на всех этапах ее жизненного цикла (см. рис. 1.1). Основные спецификации представлены проектной, технологической, производственной, маркетинговой и эксплуатационной документацией. В CALS-системах предусмотрены хранение, обработка и передача информации в компьютерных средах, оперативный доступ к данным в нужное время и в нужном месте.

Стратегия CALS предполагает создание единого информационного пространства (ЕИП) для всех участников ЖЦ изделия. ЕИП предполагает представление всей информации об изделии в электронном виде и организацию совместного использования информации для всех участников ЖЦ изделия (в соответствии с правилами доступа).

Основные свойства ЕИП:

– информация предоставляется в электронном виде;

– охватывается вся информация об изделии, созданная всеми исполнителями на любом этапе ЖЦ;

– ЕИП выступает основным источником данных для исполнителей, предоставляя (в соответствии с правами доступа) нужную информацию в нужное время и в нужном виде;

– для интеграции информации в ЕИП используются только международные и отраслевые стандарты, поддерживаемые подавляющим большинством производителей прикладных систем;

– для создания ЕИП используются существующие на предприятиях программно-аппаратные средства; необходима адаптация этих систем к работе в рамках ЕИП.

Стратегия CALS предусматривает два этапа при переходе к ЕИП:

– автоматизация отдельных процессов (или этапов) ЖЦ изделия и представление данных на них в электронном виде;

– интеграция автоматизированных процессов и относящихся к ним данных, уже представленных в электронном виде, в рамках ЕИП.

CALS-технологии – это набор методов реализации стратегии CALS:

– технологии реинжиниринга бизнес-процессов – набор методов реструктуризации бизнес-процессов в целях повышения их эффективности;

– технологии представления данных об изделии в электронном виде – набор методов для представления в электронном виде данных об изделии, относящихся к отдельным процессам ЖЦ изделия. Эти данные являются информационными моделями, обеспечивающими автоматизацию отдельных процессов ЖЦ изделия. Технологии представления данных включают в себя также технологии перевода данных из бумажного в электронный вид (*E-commerce* – *E*-бизнес). Рассматриваемая группа CALS-технологий состоит из известных методов, реализованных в соответствующих автоматизированных системах;

– технологии интеграции данных об изделии в рамках ЕИП – набор методов для интеграции автоматизированных процессов ЖЦ и относящихся к ним данных, представленных в электронном виде, в рамках ЕИП; эти технологии реализуются с помощью класса автоматизированных систем, называемых системами управления данными об изделии (проектными данными) – PDM (*Product data Management*). Для реализации технологии PDM существуют специализированные программные средства, называемые PDM-системами. Пользователями PDM-систем являются конструкторы, технологи, а также сотрудники, работающие в других сферах производства и обслуживания – продажи, маркетинга, снабжения, финансов, сервиса, эксплуатации и т. п.

Главная задача создания и внедрения CALS-технологий – обеспечение единообразных описаний и интерпретации данных независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Структура проектной, технологической и эксплуатационной документации, языки ее представления должны быть стандартизованными. Тогда становится реальной успешная работа над общим проектом разных коллективов, разделенных во времени и пространстве и применяющих разные системы CAE/CAD/CAM. Одна и та же

конструкторская документация может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация – адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет существенно сократить и удешевить общий цикл проектирования и производства. Кроме того, упрощается эксплуатация систем.

CALS-технологии не отвергают существующие автоматизированные системы проектирования и управления, а являются средством их эффективного взаимодействия. Поэтому интеграция автоматизированных систем на современных предприятиях должна быть основана на CALS-технологиях. Внедрение их требует освоения имеющихся технологий и CALS-стандартов, развития моделей, методов и программ автоматизированного проектирования и управления. Важные проблемы, требующие решения при создании CALS-систем, – управление сложностью проектов и интеграция программного обеспечения, включая вопросы декомпозиции проектов, распараллеливания проектных работ, целостности данных, межпрограммных интерфейсов и др.

CALS-технологии зародились в 1980-е гг. в недрах военно-промышленного комплекса США в связи с их планами в области стратегической оборонной инициативы (СОИ). Поэтому не удивительно, что среди имеющихся CALS-стандартов фигурирует большое число стандартов и рекомендаций DoD (Министерства обороны США). Для реализации планов СОИ требовались совместные усилия многих промышленных компаний и предприятий в проектировании, производстве и логистической поддержке сложных изделий, а это означало необходимость унификации представления данных об изделиях. Было осознано, что для взаимодействия автоматизированных систем разных предприятий нужна унификация не только формы, но и содержания (семантики) проектной, технологической, эксплуатационной и другой информации о совместно производимой продукции. Другими словами, требовалось создание единой информационной среды взаимодействия всех крупнейших фирм американского военно-промышленного комплекса.

Оказалось, что это чрезвычайно сложная проблема, решение которой требует длительной и многосторонней проработки в масштабах, выходящих за пределы одной страны. Выяснилось также, что создание единой информационной среды требуется не только для уникальных программ типа СОИ, но и для производства любых сложных систем, в первую очередь военной техники, если ее производство основано на взаимодействии многих предприятий.

В связи с возникшими практическими потребностями рядом комиссий и комитетов в рамках международных организаций были начаты работы по созданию информационных технологий и взаимодействию предприятий и выражающих их международных стандартов. Например, в Международной организации стандартизации (*International Standard Organization* – ISO) этими вопросами ведает подкомитет SC4 комитета TC184. В SC4 имеется несколько рабочих групп, занимающихся конкретными сериями стандартов. В настоящее время в ведущих индустриальных странах мира созданы национальные органы, координирующие работу в области CALS-технологий. В международном масштабе развитием CALS помимо ISO занимаются и такие организации, как ICC (*International CALS-Congress*), EIA (*Electronics Industry Association*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) и др. В России в рамках Госстандарта создан технический комитет № 431 «CALS-технологии».

В 1990-х гг. разработан и к настоящему времени принят ряд серий международных стандартов, представляющих CALS-технологии, среди которых наиболее значимы стандарты ISO 10303 STEP (*Standard for Exchange of Product Data*). В контрактах, заключаемых на поставку зарубежным заказчикам военной техники, требования к изделиям и документации на них, как правило, формулируются с позиций международных CALS-стандартов и стандартов DoD (последние имеют префикс MIL).

Развитие CALS-технологий стимулирует образование виртуальных производств, при которых процесс создания спецификаций с информацией для программного управляемого технологического оборудования, достаточной для изготовления изделия,

может быть распределен во времени и пространстве между многими организационно автономными проектными организациями.

Ожидается, что успех на рынках сложной технической продукции будет немыслим вне CALS-технологий. Так, уже сегодня фирмы, предлагающие военную технику без электронной документации, выполненной в соответствии с CALS-стандартами, не имеют никаких шансов на успех в конкурентной борьбе.

Итак, CALS-технологии призваны, в конечном счете, повысить эффективность создания и использования сложной техники (в том числе мехатронных систем). В чем выражается повышение эффективности?

Во-первых, улучшается качество изделий за счет более полного учета имеющейся информации при проектировании и принятии управленческих решений. Так, обоснованность решений, принимаемых в автоматизированной системе управления предприятием (АСУП), будет выше, если лицо, принимающее решение, и соответствующие программы АСУП имеют оперативный доступ не только к базе данных АСУП, но и к базам данных других автоматизированных систем – системам автоматизированного проектирования (САПР), автоматизированной системе технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированной системе управления технологическими процессами (АСУТП), и, следовательно, могут оптимизировать планы работ, содержание заявок, распределение исполнителей, выделение финансов и т. п. При этом под оперативным доступом необходимо понимать не просто возможность считывания данных из баз данных, но и легкость их правильной интерпретации, т. е. согласованность по синтаксису и семантике с протоколами, принятыми в АСУП. То же относится и к другим системам, например, технологические подсистемы должны с необходимостью воспринимать и правильно интерпретировать данные, поступающие от подсистем автоматизированного конструирования. Последнего не так легко добиться, если основное предприятие и организации-смежники работают с разными автоматизированными системами.

Во-вторых, сокращаются материальные и временные затраты на проектирование и изготовление изделий. Применение

CALS-технологий позволяет существенно сократить объемы проектных работ, так как описания ранее выполненных удачных разработок компонентов и устройств, многих составных частей оборудования, машин и систем, проектировавшихся ранее, хранятся в базах данных сетевых серверов, доступных любому пользователю CALS-технологий. Доступность опять же обеспечивается согласованностью форматов, способов, руководств в разных частях общей интегрированной системы. Кроме того, появляются более широкие возможности для специализации предприятий, вплоть до создания виртуальных предприятий, что также способствует снижению затрат.

В-третьих, значительно снижаются затраты на эксплуатацию благодаря реализации функций интегрированной логистической поддержки. Существенно облегчается решение проблем ремонтопригодности, интеграции продукции в различного рода системы и среды, адаптации к меняющимся условиям эксплуатации и т. п.

По аналогии с САПР для CALS-технологий разработаны различные виды обеспечения их применения: *лингвистическое*, *информационное*, *программное*, *математическое*, *методическое*, *техническое* и *организационное*.

К ***лингвистическому обеспечению*** относятся языки и форматы данных о промышленных изделиях и процессах, используемые для представления и обмена информацией на этапах жизненного цикла изделий.

Информационное обеспечение составляют базы данных, в которых имеются сведения о промышленных изделиях, используемые разными системами в процессе проектирования, производства, эксплуатации и утилизации продукции. В состав информационного обеспечения входят также серии международных и национальных CALS-стандартов и спецификаций.

Программное обеспечение CALS представлено программными комплексами, предназначенными для поддержки единого информационного пространства этапов жизненного цикла изделий. Это, прежде всего, системы управления документами и документооборотом, управления проектными данными (PDM), взаимодействия предприятий в совместном электронном бизнесе

(CPC), подготовки интерактивных электронных технических руководств и некоторые другие.

Математическое обеспечение CALS включает методы и алгоритмы создания и использования моделей взаимодействия различных систем в CALS-технологиях. Среди этих методов в первую очередь следует назвать методы имитационного моделирования сложных систем, методы планирования процессов и распределения ресурсов.

Методическое обеспечение CALS представлено методиками выполнения таких процессов, как параллельное (совмещенное) проектирование и производство, структурирование сложных объектов, их функциональное и информационное моделирование, объектно-ориентированное проектирование, создание антологий приложений.

К ***техническому обеспечению*** CALS относят аппаратные средства получения, хранения, обработки и визуализации данных при информационном сопровождении изделий. Взаимодействие частей виртуальных предприятий, систем, поддерживающих разные этапы жизненного цикла изделий, происходит через линии передачи данных и сетевое коммутирующее оборудование. Однако используемые технические средства не являются специфическими для CALS, и поэтому вопросы технического обеспечения не рассматриваются.

Наконец, организационное обеспечение ***организационное обеспечение*** CALS представлено различного рода документами, совокупностью соглашений и инструкций, регламентирующих роли и обязанности участников жизненного цикла промышленных изделий.

За последний год появился целый ряд предприятий, которые активно занимаются изучением и применением CALS-технологий для решения конкретных производственных задач повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. К таким организациям относятся АВПК «Сухой», АНТК им. Туполева, ОАО «Туламашзавод», Конструкторское бюро приборостроения (г. Тула), корпорация «Компомаш», корпорация «Метран» и др. Разработкой конкретных применений CALS-технологий для

ряда областей промышленности занимается МГТУ «Станкин». Решением координационного совета РАН по техническим наукам от 12 февраля 2002 г. Институту конструкторско-технологической информатики РАН поручена координация работ по CALS (ИПИ)-технологиям.

7.2. STEP-стандарты [5]

Выше было отмечено, что для реализации CALS-технологий необходимо обеспечить единообразное описание и интерпретацию данных, независимо от места и времени их получения в общей системе, имеющей масштабы вплоть до глобальных. Это единообразие достигается за счет разработки системы CALS-стандартов, созданных под эгидой ISO (*International Standard Organization*) – международной организации стандартизации.

Центральное место в системе CALS-стандартов занимает ISO 10303 под названием STEP (*Standard for Exchange of Product Data* – стандарт для обмена данными о промышленных изделиях), определяющий средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех стадиях их ЖЦ. Для этого был разработан инвариантный к приложениям язык Express, введенный в STEP. Совокупность стандартов STEP составляет основу CALS-технологий.

В STEP используются следующие важные понятия:

AAM – *Application Activity Model* – функциональная модель IDEFO для определенного приложения;

ARM – *Application Requirements Model* – модель, представляющая данные с точки зрения пользователя. В частности, в этой модели данные могут быть выражены как средствами, типичными для приложения, так и с использованием синтаксиса языка Express;

AIM – *Application Interpreted Model* – ARM-модель, переведенная в STEP-представление с использованием ряда унифицированных в STEP-понятий, закрепленных в интегрированных ресурсах;

AP – *Application Protocol* – STEP-стандарт, отражающий специфику конкретного приложения;

SDAI – *Standard Data Access Interface* – программный интерфейс к источникам данных (репозиториям) прикладных систем (в том числе к библиотекам моделей систем CAD/CAM) с переводом моделей в STEP- файлы; используется в STEP-средах для организации обменов между приложениями через общую базу данных STEP.

STEP – это совокупность стандартов, состоящих из нескольких томов. Тома имеют свои номера и обозначаются как «часть №» или ISO 10303-№. К настоящему времени разработано более сотни томов. Стандарты ISO 10303 определяют средства описания (моделирования) промышленных изделий на всех этапах их ЖЦ.

Том 1 (ISO 10303-1) – вводный стандарт, выполняющий роль аннотаций всей совокупности томов. В этом стандарте вводится ряд терминов, используемых в других стандартах, например таких, как продукт (*product*), приложение (*application*), проектные данные (*product data*), модель (*model*), модели AAM, AIM, ARM, прикладной протокол (AP), интегрированный ресурс (*integrated resource*), элемент функциональности (*unit of functionality* – UoF).

Тома 11–14 – методы описания (*description methods*).

Тома 21–29 – методы реализации (*implementation methods*).

Тома 31–35 – основы тестирования моделей (*conformance testing methodology and framework*).

Тома 41–50 – интегрированные основные ресурсы (*integrated generic resources*).

Тома 101–108 – интегрированные прикладные ресурсы (*integrated application resources*).

Тома 201–236 – прикладные протоколы (*application protocols*).

Тома 301–332 – абстрактные тестовые наборы (*abstract test suites*).

Тома 501–520 – прикладные компоненты (*application interpreted constructs*).

Ряд томов переведен на русский язык и представлен в виде национальных стандартов России. Это, например, ГОСТ Р ИСО 10303-1–99, посвященный обзору и основополагающим принципам STEP, ГОСТ Р ИСО 10303-11–99 – справочное руководство по языку Express, ГОСТ Р ИСО 10303-21–99 – то же по обменному файлу, ГОСТ Р ИСО 10303-41–99 – описание интегрированных

родовых ресурсов. Перечисленные документы соответствуют стандартам ISO 10303-1, ISO 10303-11, ISO 10303-21, ISO 10303-41. Подготовлены к утверждению ГОСТы, соответствующие томам 43, 44, 203 стандарта ISO 10303.

Таким образом, в томах STEP описаны основные принципы обмена данными, изложены правила языка Express, даны методы его реализации. Модели, методы тестирования моделей, ресурсы как общие для приложений, так и некоторые специальные (например, геометрические и топологические модели, описание материалов, процедуры черчения, конечно-элементного анализа и т. п.), введены прикладные протоколы, отражающие специфику моделей в конкретных предметных областях. Вопросам взаимодействия АС в STEP уделяется основное внимание – выделена подгруппа томов, посвященных способам обмена данными между разными системами, созданными в рамках STEP-технологий.

Развитие CALS-технологий находит выражение также в разработке серий стандартов ISO13584 *Parts Library* (сокращенно *P_Lib*), ISO 14959 *Parametrics*, ISO15531 *Manufacturing Management Data* (*Mandate*), ISO 18876 *Integration of Industrial Data for Exchange, Access, and Sharing* (*IIDEAS*), ISO 8879 *Standard Generalized Markup Language* (*SGML*) (см. т. 107, 108).

Более подробно со структурой STEP-стандартов (методами описания диалектов языка Express № 11–19, методами реализации межпрограммного информационного обмена между прикладными системами в STEP-среде № 21–29, прикладными протоколами № 201–236, интегрированными ресурсами и прикладными компонентами № 41–50 и № 101–108, № 501–520) можно познакомиться в работе [5, с. 166–180].

7.3. Организация в STEP информационных обменов [1]

Возможны обмены через обменный файл, описанный выше (см. п. 5.2), и через базу данных SDAI (Standard Data Access Interface) – интерфейс к данным, представленным в соответствии с CALS-стандартами.

Обменный файл используется при связи моделей *A* и *B*, имеющих общие данные с различными обозначениями. Пользователь должен написать перекодировщик (например, на языке Express-X), с помощью которого отождествляются идентификаторы одних и тех же сущностей, имевших разные обозначения в моделях *A* и *B* (рис. 7.1).

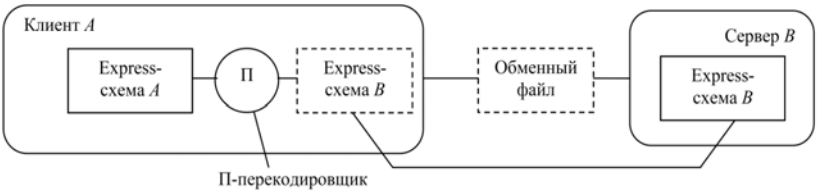


Рис. 7.1. Взаимодействие Express-приложений через обменный файл

Связь через интерфейс SDAI отличается от предыдущего способа обмена тем, что в SDAI имеет место не просто обмен, а разделение данных многими пользователями, и SDAI фактически выступает в роли метамодели для разных САПР. Другими словами, SDAI представляет собой интерфейс, содержащий набор функций на языках C++ и C, для доступа к разделяемым моделям, которые могут быть представлены в виде обменного файла (рис. 7.2).

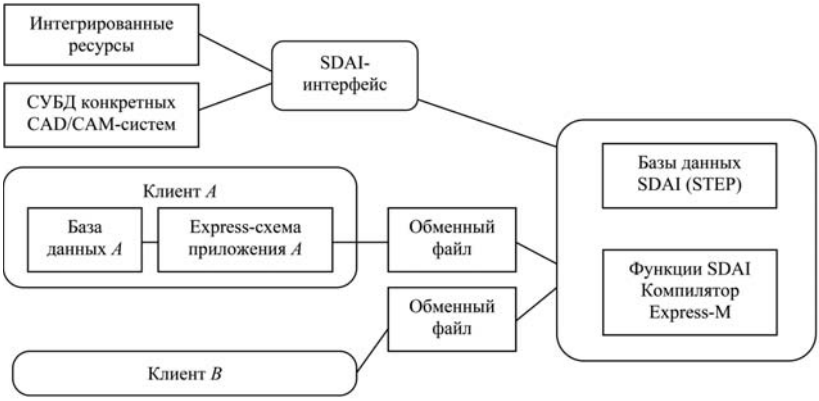


Рис. 7.2. Взаимодействие Express-приложений через базу данных SDAI

В CALS-технологиях рассматриваются не только вопросы представления данных и организации информационных обменов, но и вопросы моделирования приложений и проектирования сложных систем на базе концептуального проектирования.

В заключение данной лекции рассмотрим проблемы практического использования CALS-технологий.

7.4. Проблемы практического использования CALS-технологий

Проблема внедрения CALS-технологий в практику работы промышленных предприятий имеет организационный, технологический, кадровый аспекты.

В организационном плане прежде всего необходима убежденность руководителей предприятий в целесообразности (а в ряде случаев и в неизбежности) перехода к CALS-технологиям, что позволит сконцентрировать усилия на разработке и реализации планов реинжиниринга предприятий с постепенным внедрением элементов CALS-технологий. Эти планы направлены на создание корпоративной автоматизированной системы (КАС), интегрирующей системы автоматизации проектирования, управления и технологической подготовки производства. Особую важность вопросы создания КАС на базе CALS-технологий имеют для производственных объединений, включающих несколько предприятий.

Автономно функционирующие системы САПР, АСУП, АСУТП уже имеются на многих предприятиях. Очевидно, что при их интеграции на основе CALS-технологий собственно задача замены уже используемых систем какими-либо другими не ставится, поскольку замена – процедура дорогостоящая, длительная и болезненная, требующая переучивания специалистов. Замена может быть вызвана не особенностями CALS, а лишь выявленной недостаточной функциональностью используемых систем (например, невозможностью проектирования сборок с тысячами компонентов).

Что в этом случае подразумевается под «единой электронной моделью изделия»? Ответ заключается в следующем: единая электронная модель изделия имеет место, если любая подсистема или пользователь КАС (с соответствующими полномочиями) может, обратившись к базе данных системы, получить нужное подмножество данных об изделии, причем это подмножество будет согласовано с подмножествами, запрашиваемыми другими подсистемами или пользователями. Очевидно, что подмножества данных (профили), запрашиваемые конструкторскими, технологическими, управленческими и другими подсистемами и службами, включают как специфические, так и общие атрибуты, причем общие атрибуты будут иметь одинаковые значения в каждом подмножестве.

Если на предприятии автоматизация была развита слабо, то создание на нем КАС нужно начинать с обследования деятельности предприятия. Перед обследованием формируются и в процессе его проведения уточняются цели обследования – определение возможностей и ресурсов для повышения эффективности функционирования предприятия на основе автоматизации процессов управления, проектирования, документооборота и т. п. Содержание обследования – выявление структуры предприятия, выполняемых функций, информационных потоков, имеющихся опыта и средств автоматизации. Обследование проводят системные аналитики (системные интеграторы) совместно с представителями организации-заказчика.

На основе анализа результатов обследования строят модель, отражающую деятельность предприятия на данный момент. Такую модель называют As Is – «как есть». Далее разрабатывают исходную концепцию КАС. Эта концепция включает в себя предложения по изменению структуры предприятия, взаимодействию подразделений, информационным потокам, что выражается в модели To Be – «как должно быть».

Результаты анализа конкретизируются в техническом задании на создание КАС. В нем указывают потоки входной информации, типы выходных документов и предоставляемых услуг, уровень защиты информации, требования к производительности

(пропускной способности) и т. п. Техническое задание направляют заказчику для обсуждения и окончательного согласования.

Перевод документов в электронную форму – одна из первых задач внедрения CALS-технологий. Для создаваемого электронного архива документов нужно в соответствии со спецификациями MIL-PRF-2800x выбрать единые форматы представления чертежной и текстовой информации. Далее необходимы разработка проекта корпоративной вычислительной сети и его реализация, выбор, приобретение и установка системы PDM, обучение сотрудников предприятия работе в КАС.

Для успешного внедрения и использования CALS-технологий предприятие должно располагать инженерными кадрами, знающими методы и умеющими использовать средства автоматизированного проектирования, поскольку CALS-технологии развиваются прежде всего на базе САПР. В настоящее время в технических вузах страны студенты изучают такие разделы САПР, как геометрическое моделирование и машинная графика, математическое моделирование, оптимизация проектных решений. Целесообразно дополнить учебные программы соответствующих курсов, включив в них изучение вопросов CALS-технологий.

Так, вопросы геометрического моделирования, изучаемые в курсах инженерной графики, основ САПР или в специальном курсе «Вычислительная геометрия», полезно дополнить фрагментами соответствующих прикладных протоколов STEP. В разделах, посвященных математическому моделированию, нужно знакомить студентов с возможностями многоаспектного моделирования, в том числе на базе языка VHDL-AMS. Студенты должны быть знакомы с методиками концептуального проектирования IDEF0, IDEF1X и объектно-ориентированного проектирования на базе языка UML. Эти вопросы, так же как структура стандартов STEP и основы языка Express, могут быть предметом изучения в отдельном курсе «CALS-технологии» или в курсе «Основы автоматизированного проектирования». В раздел оптимизации проектных решений нужно включить методы оптимального планирования и распределения ресурсов. Наконец, следует предусмотреть знакомство студентов с основами Internet-технологий,

в том числе с представлением документов с помощью языков разметки.

Естественно, что преподавание вопросов CALS-технологий требует развития лабораторной базы. В составе программного обеспечения, поддерживающего лабораторные циклы по САПР и CALS, необходимо иметь по крайней мере один из пакетов MCAD (с модулями CAD и CAM), программы моделирования (например, типа ПА9), пакеты поддержки методик функционального и информационного моделирования (например, BPWin и ERWin), XML-редактор, желательно приобретение PDM. Циклы дисциплин радиоэлектронного профиля должны поддерживаться программным обеспечением сквозного проектирования радиоэлектронной аппаратуры и в первую очередь программами разработки схем на базе ПЛИС и проектирования печатных плат.

Более глубоко с отдельными разделами CALS-технологий: обзор CALS-стандартов, математическое, лингвистическое и программное обеспечение – можно ознакомиться в [1, 3, 7, 12].

Контрольные вопросы

1. Дайте обоснование необходимости появления формата STEP обмена данными.
2. Дайте общее определение термина CALS-технологии.
3. Сформулируйте суть стратегии CALS.
4. Перечислите основные свойства единого информационного пространства (ЕИП).
5. Опишите два этапа перехода к ЕИП.
6. Перечислите методы реализации стратегии CALS.
7. Сформулируйте главную задачу создания и внедрения CALS-технологий.
8. Опишите историю зарождения CALS-технологий.
9. Укажите причины повышения эффективности создания и применения сложной техники при использовании CALS-технологий.
10. Опишите различные виды обеспечения CALS-технологий.

11. Укажите условия, необходимые для реализации CALS-технологий.

12. Сформулируйте основное назначение стандарта ISO 10303 (STEP-стандарт).

13. Дайте общую характеристику совокупности стандартов ISO 10303 (содержание томов, входящих в стандарты).

14. Опишите два способа организации в STEP информационных обменов.

15. Опишите порядок внедрения CALS-технологий в практику работы промышленных предприятий.

16. Опишите методику преподавания CALS-технологий для обучения инженерных кадров.

Лекция 8
ОСНОВНЫЕ ПРИКЛАДНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

8.1. Формирование общих проектных решений [3, 12, 13]

Исторически сложилось, что при традиционном проектировании управляемых машин и процессов разработка механической, электронной, информационной и компьютерной частей ведется последовательно и независимо друг от друга (рис. 8.1).

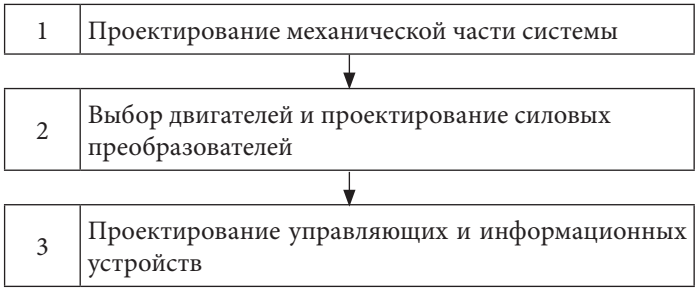


Рис. 8.1. Традиционный алгоритм проектирования

При этом возможности разработчика системы управления крайне ограничены, так как основные конструкторские решения уже приняты на предыдущих этапах, выбор двигателей и силовых преобразователей завершен и не подлежит корректировке при разработке электронной и управляющей частей системы. Кроме

того, при традиционном проектировании многочисленные интерфейсы, связывающие в мехатронной машине (производственном процессе) устройства различной физической природы (механические, электронные, информационные), предопределяют их конструктивную и аппаратно-программную сложность. Опыт эксплуатации сложных систем показывает, что до 70 % проблем их функционирования связаны с надежностью связей и соединений. Поэтому была предложена новая методологическая основа проектирования мехатронных систем – методы параллельного проектирования. Суть методологии параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех устройств мехатронной системы уже на этапах проектирования и изготовления интегрированных модулей системы.

Следуя [13], можно выделить следующие уровни интеграции в мехатронных системах: первый уровень образуют мехатронные (технологические) устройства и составляющие их элементы, второй – включает интегрированные мехатронные модули, третий – предполагает компоновку из мехатронных модулей, четвертый – предполагает построение на единой интеграционной платформе производственных систем (реконфигурируемых производств).

Описанные выше методы параллельного проектирования и выделения уровней интеграции в мехатронных системах позволяют определить направление и глубину интеграционных процессов при проектировании сложных систем.

Использование гибких технологий при проектировании и изготовлении мехатронных систем определяет два направления проектных и конструкторских работ:

1) собственно проектирование производственных процессов на предприятиях на базе готовых программных и аппаратных (технологических) компонентов с помощью специальных инструментальных средств разработки приложений (например, CASE-средств);

2) проектирование упомянутых компонентов и инструментальных средств, ориентированных на многократное применение при разработке многих производственных процессов (систем).

Первое направление базируется на системотехнике, информационных технологиях и программных продуктах, инструментальных средствах разработки приложений (см. лекции 6, 7).

Второе направление в большей мере относится к области разработки математического и программного обеспечения (МО, ПО), методов анализа и синтеза проектных решений, технологий программирования на базе знаний и т. п.

В дальнейшем в лекции основное внимание будет уделено первому направлению работ – собственно проектированию машинных комплексов и производственных процессов на предприятиях.

Проектирование любой сложной системы начинается с формулирования целей, видения будущей системы и исходных технических требований. Затем согласно теории системного проектирования сложных систем выполняются:

– функционально-структурный анализ системы;

– синтез структуры системы;

– структурный анализ и оптимизация (по критерию сложности) отдельных технических подсистем;

– разработка проектно-конструкторской документации в целом на систему.

Функция системы имеет приоритетное значение по отношению к ее структуре, так как различные структуры могут с разной степенью эффективности реализовать одну и ту же функцию.

Заметим, что сложные технические системы различного назначения (интегрированные мехатронные модули и машины, производственные процессы, интегрированные автоматизированные системы и др.) имеют ряд особенностей, которые необходимо учитывать при их проектировании, производстве, реализации (технологической реализации производства) и эксплуатации.

На всех этапах жизненного цикла технологических изделий и производственных процессов (см. рис. 1.1) используются технологии реинжиниринга и параллельного проектирования, методика SADT и стандарты IDEF-технологий (IDEF0, IDEF3, DFD) для проектирования функциональных моделей системы через их поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде.

Для структурного описания систем и связей между их структурными элементами используется методология IDEF1X (задающая структуру баз данных для обеспечения процессов), имитационное моделирование, виртуальная инженерия, системы принятия проектных решений, интегрированные системы CAD/CAM/CAE/PDM.

Из поддерживающих методологию IDEF-систем можно отметить BPWin, ERWin, OOWin, Design IDEF др., а также ряд систем автоматизированного проектирования и управления техническими системами и международных стандартов ISO (STEP-стандарты) (см. лекцию 1).

8.2. Построение модели процесса разработки мехатронных систем

Для описания процесса разработки мехатронных систем (МС) далее будем использовать принятую в САПР терминологию этапов разработки:

1) функциональное проектирование (определение функций МС на основе анализа исходных требований);

2) функционально-структурный анализ (выбор вариантов структурных решений системы по ее заданной функции);

3) конструкторское проектирование элементов и модулей МС по результатам структурно-конструктивного анализа;

4) разработка проектной и конструкторской документации на систему;

5) разработка производства МС (включая технологическую подготовку производства);

6) испытание МС;

7) доводка МС;

8) эксплуатация МС.

Основные этапы проектирования мехатронных систем

Первые три (из перечисленных выше) этапа разработки определяют цикл проектирования (см. рис. 1.1) мехатронных систем. На

этом цикле используются инструментальные средства и методы информационных технологий, которые определяют возможность и уровень разрабатываемых систем. Среди этих методов и средств CALS-технологии, CASE-средства и поддерживающие их инструментальные системы (BPWin, ERWin, Design IDEF и др.), технологии реинжиниринга и параллельного проектирования (методики SADT, IDEF), системные среды Meta САПР (Framework), универсальные CAD/CAM/CAE, PDM, SCADA и другие системы.

В настоящее время актуальной становится задача автоматизации проектирования не отдельных элементов и подсистем, а всего процесса проектирования, конструирования и производства мехатронных систем.

Основными чертами современной технологии создания САПР являются [17]:

– переход к автоматизации всего процесса проектирования в целом;

– обеспечение взаимодействия между автоматизированными системами, ведущими расчеты, разработку, изготовление и т. д.;

– обеспечение возможности адаптации системы к объекту проектирования и развития ее в процессе эксплуатации;

– широкое использование диалоговых режимов работы, процедур коллективного проектирования;

– развитие новой методологии проектирования, ориентированной на сквозное применение средств автоматизации в рамках интегрированных CAD/CAM/CAE-систем, на основе которых создаются «приложения» – специализированные САПР.

Структурная модель МС строится на базе функциональной модели МС, полученной с помощью IDEF-технологий (IDEF0, IDEF1X, DFD) и поддерживающих их систем (BPWin, ERWin, Design IDEF), а также САПР Спрут, имитационного моделирования, систем принятия проектных решений, CALS-технологий. С этой целью функциональную модель МС подвергают декомпозиции на отдельные узлы и детали для технических (конструкционных) мехатронных систем или на отдельные технологические операции для производственных процессов. Далее с помощью интерактивных процедур (например, использования диалоговых

средств), осуществляется оптимизация структурной модели и ее компонентов (см. лекцию 1). Возможность осуществления интерактивного метода конструирования является одним из самых важных требований этапа конструирования. Для автоматизации процесса конструирования должен быть (как минимум) разработан пакет конструирования, состоящий из CAD-систем, обеспечивающих выполнение всего объема конструкторских работ и приложений, интегрированных с выбранными CAD-системами.

Инструментальные средства проектирования мехатронных систем

Далее рассмотрим комплекс инструментальных средств, охватывающих процесс концептуального проектирования (первые три этапа разработки системы) мехатронных систем [16]. На рынке IDEF-систем фирмой Computer Associations предложены CASE-средства BPWin и ERWin. CASE-средство верхнего уровня BPWin поддерживает методологию IDEF0 (функциональная модель), IDEF3 (Workflow Diagram – сценарий бизнес-процесса, поведенческое моделирование) и DFD (Dataflow Diagrams – диаграммы потока данных, набор связанных друг с другом действий).

Функциональная модель предназначена для описания существующих процессов на предприятии (As Is-модели) и того, к чему надо стремиться (модель To Be). Методология IDEF0 предписывает построение иерархической системы диаграмм – единичных описаний фрагментов системы. Сначала проводится описание системы в целом и ее взаимодействие с окружающим миром (контекстная диаграмма), после чего проводится функциональная декомпозиция – система разбивается на подсистемы и каждая подсистема описывается отдельно (диаграмма декомпозиций). Затем каждая подсистема разбивается на более мелкие и так далее до достижения нужной степени подробности. Каждая диаграмма проверяется экспертами предметной области, заказчиками и пользователями процесса. В случае необходимости (чтобы осветить специфические стороны технологии предприятия) BPWin позволяет переключиться на нотацию IDEF3 или DFD и создать

смешанную модель. Нотация DFD включает такие понятия, как внешняя ссылка и хранилище данных, что делает ее более удобной (по сравнению с IDEF0) для моделирования документооборота. Методология IDEF3 включает элемент «перекресток», что позволяет описать логику взаимодействия компонентов системы.

После построения функциональной модели можно построить модель данных, используя модель ERWin. Хотя процесс преобразования модели BPWin в модель данных плохо формализуется и поэтому полностью не автоматизируется, Computer Associations предлагает удобный инструмент для обеспечения построения модели данных на основе функциональной модели (механизм связи BPWin–ERWin). ERWin имеет два уровня представления модели – логический и физический. На логическом уровне данные не связаны с конкретной СУБД, поэтому могут быть наглядно представлены даже не для специалистов. Физический уровень данных – это, по существу, отображение системного каталога, который зависит от конкретной реализации СУБД. ERWin позволяет проводить процессы прямого и обратного проектирования БД. Это означает, что по модели данных можно сгенерировать схему БД или автоматически создать модель данных на основе информации системного каталога. Кроме того, ERWin интегрируется с популярными средствами разработки клиентской части – Power Builder, Visual Basic, Delphi, что позволяет автоматически генерировать код приложения, который полностью готовы к компиляции и выполнению.

В заключение цикла проектирования МС рассмотрим еще одну возможность минимизации сложности МС и мехатронных модулей (ММ).

Синергетическая интеграция в мехатронных системах

В общем случае функциональная и структурная сложность технических систем (подсистем) в значительной степени определяется количеством соединяемых элементов, числом и интенсивностью их взаимодействия. Поэтому оснащение технических систем многофункциональными элементами, повышение уровня

интеграции ММ (подсистем) и снижение числа интерфейсов направлено на минимизацию сложности систем.

Функциональное представление МС и ММ с определенными входными и выходными переменными (модель типа «черный ящик») показано на рис. 8.2.



Рис. 8.2. Мехатронный модуль в виде «черного ящика»

Таким образом, основная функциональная задача мехатронной системы или мехатронного модуля заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение выходного звена.

Программа движения может быть задана управляющим компьютером как набор команд высокого уровня или, в случае дистанционного управления, человеком-оператором с помощью человеко-машинного интерфейса. Управляемое движение осуществляется механической подсистемой ММ, и его конечное звено взаимодействует с объектами внешней среды. Внешние воздействия, например силы резания при шлифовальных и фрезерных операциях, контактные силы и моменты при роботизированной сборке, должны эффективно отражаться мехатронным модулем в процессе движения. Информационная обратная связь необходима для оценки текущего состояния ММ как объекта управления и внешней среды в режиме реального времени.

Обозначенная основная функция не является единственной для мехатронных систем. Некоторые дополнительные функции, такие как реконфигурация системы, обмен сигналами и инфор-

мацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для эффективной и надежной работы МС. Но именно выполнение функционального движения является основной мехатронной функцией, так как механическая подсистема взаимодействует с объектами работ и, таким образом, определяет поведение МС во внешней среде.

Рассмотренное представление мехатронного модуля в форме «черного ящика» (см. рис. 8.2) имеет два информационных входа (программа движения и информационная обратная связь), энергетический вход (реакция внешней среды) и механический выход (целенаправленное управляемое движение). Следовательно, в общем случае функциональная модель мехатронного модуля может быть определена как *информационно-механический преобразователь*.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. На современной стадии развития мехатроники для этой цели в основном используют электрические источники энергии. Введя соответствующие электроэнергетические преобразования, получаем следующую функциональную модель (*F*-модель) мехатронного модуля (рис. 8.3):



Рис. 8.3. Функциональная модель мехатронного модуля

Полученная *F*-модель ММ в общем случае содержит семь базовых функциональных преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками.

Отметим, что электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема отнюдь не является единственно возможной для выполнения мехатронной функции, как это постулировано в приведенном определении мехатроники. Безусловно, и другие виды энергетических процессов могут быть использованы в мехатронных системах для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как альтернативные варианты на этапе концептуального проектирования. Выбор разработчиком ММ физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями его применения. В современной инженерной практике широко применяются гидравлические, пневматические, химические и другие виды энергетических преобразователей.

Итак, в любом мехатронном модуле необходимо реализовать семь функциональных преобразований (см. рис. 8.3). Три из них назовем *моноэнергетическими* (информационный, электрический и механический преобразователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются *дуальными* (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, и параллельные электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурная модель мехатронного модуля должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления и электромеханике принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольника с указанием входной и выходной переменных, а уравнения или характеристики записывают внутри него.

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (*S*-модель –

рис. 8.4). Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электромеханическую подсистемы. При конструировании мехатронных модулей особый интерес представляет исполнительная часть, входящая в состав электромеханической подсистемы.

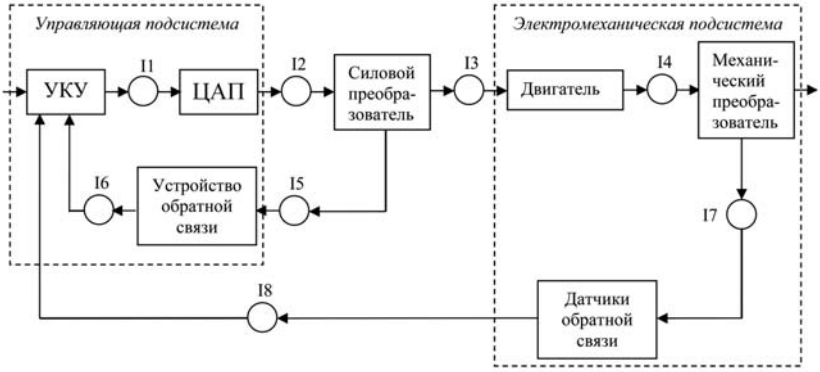


Рис. 8.4. Структурная модель электропривода с компьютерным управлением

Структурная модель электропривода (см. рис. 8.4) включает в себя следующие основные элементы:

– устройство компьютерного управления движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);

– цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;

– силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);

– управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который является электротехническим элементом привода;

– механический преобразователь, который реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними

объектами; в приводных модулях в качестве таких устройств применяют редукторы, вариаторы, либо непосредственно используют рабочий орган (например, в мехатронных модулях типа «мотор-шпиндель»);

– устройство обратной связи, которое используют для контроля текущих напряжений и токов в силовом преобразователе, а также управляющих функций (например, для организации контура регулирования момента, развиваемого приводом);

– датчики обратной связи по положению и скорости движения выходного звена механического устройства, выполняющие функции механико-информационного преобразования;

– интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как 11–18.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими преобразователями движения, так и содержать электронные аппаратно-программные компоненты. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие выходное механическое устройство с двигателем (интерфейс 14) и датчиками обратной связи (интерфейсы 17, 18).

Интерфейсные электронные устройства расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления (УКУ) и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

– с цифро-аналоговым преобразователем (встроенный интерфейс 11) и далее с силовым преобразователем модуля (интерфейс 12);

– с датчиками обратной связи (интерфейс 17), который в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);

– с устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (для традиционного привода интерфейс 16 также использует стандартный АЦП).

В традиционной приводной технике интерфейсы являются сепаратными устройствами. Поэтому их проектирование, изго-

товление и наладка становятся серьезной проблемой для разработчика привода, особенно когда требуется надежно соединять нестандартные и специализированные элементы различных производителей. Мехатронные структуры отличаются высокой степенью интегрированности элементов, причем эти решения закладываются уже на стадии проектирования модулей и машин.

Сравнивая функциональную модель мехатронного модуля (см. рис. 8.3) и структурную модель традиционного электропривода (см. рис. 8.4), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число необходимых функциональных преобразователей. Другими словами, можно говорить о структурной избыточности традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей. Поэтому целесообразно стремиться к сокращению количества сепаратных структурных элементов (как основных, так и интерфейсных блоков) в системе. В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль (см. рис. 8.2), приняв на информационный вход программу движения, должен выполнить целенаправленное управляемое движение с заданными показателями качества. При этом все проблемы интеграции в модуле механических, электронных и управляющих устройств должны быть решены разработчиком для каждой стадии жизненного цикла – от проектирования системы до ее эксплуатации у конечного потребителя.

Суть синергетической интеграции состоит в объединении в единый модуль элементов различной физической природы при сохранении функционального преобразования, выполняемого данным модулем.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании мехатронных модулей основана на трех базовых принципах:

– реализация заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков путем объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули;

– выбор интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаратных элементов;

– перераспределение функциональной нагрузки в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Практическая реализация принципов синергетической интеграции при проектировании позволяет обеспечить основные преимущества мехатронных систем по сравнению с традиционными машинами и добиться качественно новых показателей, в первую очередь по компактности конструкции, скорости и точности движений. Снятие с аппаратной («железной») части системы функциональной нагрузки (прежде всего через упрощение механического узла) и ее перенос на управляющую и электронную подсистемы придает системе гибкость, делает ее способной к легкой реконфигурации под новые технологические задачи. Следует заметить, что интеграция предполагает не только аппаратное объединение элементов, но и организацию интегрированных информационных процессов в интеллектуальных модулях.

Синергетическую интеграцию в мехатронике осуществляют при проектировании двумя основными способами – функционально-структурной интеграцией (ФС-интеграция) и структурно-конструктивной интеграцией (СК-интеграция), которые объединяют в общий алгоритм проектирования мехатронных систем (см. рис. 8.2).

Функционально-структурная интеграция. Задачей этапа функционально-структурной интеграции является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. ФС-интеграция направлена на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение некоторых основных блоков, а значит, и смежных с ними интерфейсов из структуры системы.

Примеры мехатронных проектных решений, основанные на способе ФС-интеграции элементов, приведены в табл. 8.1. Пред-

ставленные решения основаны на совместном анализе функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 8.3) и структуры традиционного электропривода (см. рис. 8.4).

Первые два мехатронных решения относятся к электромеханической подсистеме модуля, следующие варианты интеграции можно реализовать в его управляющей подсистеме (см. рис. 8.4). При конструировании мехатронных модулей наибольшее внимание уделяют решениям, направленным на упрощение механической части модулей и связанных с ней блоков и интерфейсов, которые реализуют электромеханическое и механико-информационное функциональные преобразования.

Рассмотрим подробнее мехатронные решения по ФС-интеграции элементов из табл. 8.1.

Первый вариант предусматривает использование в обратной связи вместо двух отдельных датчиков положения и скорости только одного элемента – фотоимпульсного датчика (ФИД), который позволяет получать информацию и о угле поворота вала, и о скорости его вращения. При этом также важно, что ФИД выдает выходной сигнал в кодовой форме, что дает возможность вводить информацию в УКУ без дополнительного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что было необходимо для традиционных датчиков с аналоговым выходным сигналом (тахогенераторов, потенциометров и т. п.).

Различают два основных вида фотоимпульсных датчиков – *абсолютные* и *инкрементальные*. Абсолютные ФИД (*encoder*) дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) подвижного элемента относительно фиксированного нулевого положения. Преимуществами абсолютного ФИД являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (это важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, которое он занимал до начала движения.

Таблица 8.1

ФС-интеграция элементов в мехатронном модуле

№ п/п	Мехатронное решение	Функциональное преобразование	Исключаемые сепаратные элементы	
			Основные блоки	Интерфейсы
1	Фотоимпульсный датчик обратной связи	Механико-информационное	Один датчик обратной связи	17, 18
2	Вентильный высокомоментный двигатель	Электромеханическое и механико-информационное	Механическое устройство, сепаратные датчики обратной связи	14, 17, 18
3	Интеллектуальный силовой преобразователь	Информационно-электрическое	Избыточное устройство обратной связи	15, 16
4	Управляющие контроллеры на базе блоков FPGA	Электроинформационное	Цифро-аналоговый преобразователь	11, 12

Интеллектуализацию ФИД обеспечивают встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передачи текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании ФИД заключается в объединении в одном сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Таким образом, использование ФИД позволяет исключить из структуры традиционного привода один датчик обратной связи с его интерфейсом (17), а также АЦП на входе УКУ (интерфейс 18).

Применение высокомоментного двигателя (ВМД) позволяет (второе решение в табл. 8.1) заменить исполнительную пару

«двигатель + преобразователь движения» на один приводной элемент «двигатель». Этот способ ФС-интеграции означает исключение механического устройства и избыточного интерфейса 14 из структуры привода.

Ниже перечислены основные преимущества мехатронных модулей с ВМД:

– снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;

– повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформаций звеньев и т. д.;

– исключение трения в механической трансмиссии, что позволяет избежать нелинейных динамических эффектов, особенно на ползучих скоростях.

Для определения положения полюсов на роторе двигателя в конструкцию вентильного ВМД встраивают датчик положения. В исполнительных приводах информацию с этого датчика могут использовать и как сигнал обратной связи. Следовательно, применение вентильных ВМД со встроенными ФИД позволяет упростить не только механическую часть модуля, но и цепь обратной связи, так как разработчику не требуется вводить в конструкцию модуля сепаратные датчики положения и скорости.

ВМД могут быть как углового, так и линейного типа. До появления линейных двигателей традиционные электроприводы линейных перемещений включали в себя двигатель углового движения и механическую передачу для преобразования вращательного движения в поступательное (шарико-винтовую передачу, зубчатую рейку, ленточную передачу и т. п.). Основные преимущества мехатронных модулей на базе линейных двигателей по сравнению с традиционными приводами обусловлены исключением многоступенчатого преобразования движения, отсутствием характерных недостатков механических преобразователей (люфт, упругость, силы трения, высокая инерция). Это позволяет добиться повышения в несколько раз линейной скорости и ускорения, высокой точности реализации движения, повышенной статической и динамической жесткости привода.

В табл. 8.1 приведены также два примера применения способа ФС-интеграции к элементам управляющей подсистемы модуля.

В состав мехатронных модулей могут входить интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП). Их строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (*MOSFET*), биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*), запираемые тиристоры с полевым управлением (*MCT*). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (например, для транзисторов *MOSFET* – 100 000 Гц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для *IGBT* предельная сила коммутируемого тока – до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение – до 3 500 В). Особенность ИСП состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСП в составе мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Использование контроллеров движения с блоками FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*) позволяет исключить цифро-аналоговое преобразование сигналов при компьютерном управлении двигателем. На выходе блоков FPGA сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление. При этом они обладают уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений соизмерима с аппаратными компонентами) с возможностью программирования как обычные микропроцессорные устройства.

Обобщая рассмотренные примеры, интересно обратить внимание на то, что точками для ФС-инитеграции являются структурные блоки, реализующие функциональные преобразования только дуального типа (см. третий столбец табл. 8.1). К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи

функциональной модели мехатронного модуля (см. рис. 8.3) и электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурно-конструктивная интеграция (СК-интеграция) основана на анализе структурной модели мехатронного модуля, которая сформирована на этапе ФС-интеграции. Заданная структура модуля может быть реализована различными конструктивными решениями. СК-интеграция нацеливает разработчика мехатронных модулей на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение интерфейсов как сепаратных блоков путем встраивания их в отдельный корпус. При автоматизированном проектировании принятые решения представляют в виде конструктивной модели.

Методическим ключом при поиске вариантов СК-интеграции является рассмотрение интерфейсных блоков 11–18 в качестве локальных точек, где потенциально возможна СК-интеграция. Можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько точек интеграции.

Таблица 8.2

СК-интеграция элементов в мехатронном модуле

№ п/п	Мехатронные модули	Функциональное преобразование	Встраиваемые элементы	
			Основные блоки	Интерфейсы
1	Модуль движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	14
2	Мехатронный модуль движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатели, механическое устройство, датчик обратной связи	14, 17, 18
3	Интеллектуальный мехатронный модуль	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электромеханическое	Управляющий контроллер, силовой преобразователь, двигатель	11, 12, 13, 15, 16

Примеры мехатронных модулей, основанных на способе СК-интеграции элементов, приведены в табл. 8.2. Представленные решения базируются на анализе структурных моделей мехатронных модулей, разработанных на этапе функционально-структурной интеграции (см. рис. 8.4).

Интеграция элементов в мехатронных модулях является ведущей тенденцией при создании современных машин и систем, так как позволяет добиться качественно нового уровня по основным техническим показателям – скорости и точности движения, компактности конструкции и способности машины к быстрой реконфигурации. Практическое воплощение этой тенденции в машинах сегодняшнего дня зависит от эффективности взаимодействия конструктора, который выдвигает новые интеграционные идеи, и технолога, реализующего предложенные проектные решения в автоматизированных технологических процессах.

Специфика и сложность мехатронных модулей и систем заключается еще и в том, что их составляющие части (механическая, электронная и компьютерная) имеют различную физическую природу, а основные структурные элементы выпускаются зачастую предприятиями различных отраслей промышленности.

Разработка проектной и конструкторской документации

Процесс проектирования и конструирования мехатронной системы завершается разработкой проектной и конструкторской документации на систему, относится к *четвертому* этапу разработки системы.

Конструкторская документация (КД) подразделяется на проектную и рабочую.

Проектная конструкторская документация (ПКД) выполняется на различных стадиях реализации проекта в соответствии с техническим заданием (ТЗ), разработанным на предпроектной стадии (см. рис. 3.2), до разработки рабочей документации. В состав проектной документации входят: техническое предложение, эскизный и технический проекты. Состав и номенклатура документов,

входящих в техническое предложение, эскизный и технический проекты подробно изложены в лекции 3 (раздел 3.2).

Рабочая конструкторская документация (РКД) разрабатывается на основе технического задания или проектной конструкторской документации и предназначается для обеспечения монтажа, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта технических изделий (производственных процессов). Следует отметь, что выпуск и корректировка РКД обычно продолжается и на всех последующих этапах разработки и эксплуатации технической системы.

Четыре последние этапа (5, 6, 7, 8) (см. раздел 8.2) разработки мехатронных систем относятся к процессам подготовки, реализации и эксплуатации мехатронных систем (см. раздел 1.1, лекция 1). Сюда же можно отнести и процессы управления промышленными предприятиями на различных иерархических уровнях.

Основные положения этапа 5 «Разработка производства мехатронных систем (включая технологическую подготовку производства)» были рассмотрены в лекции 4 (раздел 4.1). Разработка больших производственных систем включает следующие виды работ:

– разработка производственных процессов, объединенных в производственную систему;

– разработка технологических процессов, входящих в состав производственных процессов;

– разработка технологических операций, на которые делится технологический процесс;

– разработка локальных систем управления отдельными процессами;

– разработка интегрированной информационной системы для автоматизации технологической подготовки и управления производственными системами и процессами;

– оптимизация технологических и производственных процессов;

– решение ряда инженерных задач.

Работы, связанные с выполнением 6 и 7 этапов, соответственно «Испытание» и «Доводка» мехатронных систем, в данном курсе лекций не рассматриваются.

Последний 8-й этап разработки мехатронных систем «Эксплуатация мехатронных систем» будет рассмотрен в лекции 9 в тесной увязке с этапом «Производство и реализация» жизненного цикла мехатронной системы (см. лекция 1, рис. 1.1). Основное внимание будет уделено автоматизированным системам управления промышленных предприятий, на которых реализуются производственные процессы.

Контрольные вопросы

1. Опишите традиционный алгоритм проектирования.
2. Сформируйте четыре уровня интеграции в мехатронных системах.
3. Разберите два направления проектных и конструкторских работ при проектировании и изготовлении мехатронных систем.
4. Опишите общую схему проектирования любой сложной системы.
5. Перечислите восемь этапов процесса разработки мехатронных систем (с выделением этапов, определяющих цикл проектирования).
6. Опишите инструментальные средства и методы информационных технологий, используемые при выполнении цикла проектирования.
7. Рассмотрите представление мехатронного модуля в форме «черного ящика».
8. Сформулируйте основную функциональную задачу мехатронной системы (или мехатронного модуля). Другие дополнительные функции мехатронных систем.
9. Опишите функциональную модель мехатронного модуля (F-модель).
10. Опишите структурную модель электропривода с компьютерным управлением (S-модель мехатронного модуля).
11. Сформулируйте суть синергетической интеграции элементов при проектировании мехатронных модулей. Рассмотрите три базовых принципа синергетической интеграции.

12. Сформулируйте суть функционально-структурной (ФС) и структурно-конструктивной (СК) синергетической интеграции.

13. Сформулируйте основную задачу этапа функционально-структурной интеграции (ФС-интеграция).

14. Рассмотрите мехатронные решения по функционально-структурной интеграции элементов из табл. 8.1.

15. Сформулируйте основную задачу этапа структурно-конструкторской интеграции (СК-интеграция).

16. Рассмотрите примеры мехатронных модулей, основанных на способе СК-интеграции (табл. 8.2).

Лекция 9
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАТРОННЫМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ [1, 3, 18]

Мехатронные производства имеют иерархическую многомодульную структуру и соответствующие этой структуре автоматизированные системы управления (АСУ). Среди АСУ различают автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП).

9.1. Автоматизация управления предприятиями (АСУП)

В большинстве случаев АСУП охватывают уровни от предприятия до цеха.

Функции АСУП на промышленных предприятиях выполняют следующие автоматизированные системы (на различных иерархических уровнях) (см. лекцию 1, раздел 1.1):

ERP – Enterprise Resource Planning (планирование и управление предприятием);

MRP (MRP-II) – Manufacturing (Material) Requirement Planning (планирование производственных (материальных) ресурсов);

MES – Manufacturing Execution System (производственная исполнительная система);

DRP – Distribution Resource Planning (управление маркетинговыми мероприятиями и обработкой заказов);

FRP – Finance Requirements Planning (финансовый учет и планирование);

PM – Project Management (управление проектами).

Имеется ряд автоматизированных систем (АС):

CRM–$5ustomer Relationship Management (управление продажами), SCM – Supply Chain Management (управление цепочками поставок), S&SM – Sales and Service Management (управление продажами и обслуживанием). Эти АС могут быть отнесены как к АСУП, так и к логистическим системам, которые будут рассмотрены ниже.

Исторически первоначально был разработан стандарт MRP. Он появился в конце 60-х гг. Стандарт MRP включал в себя только планирование потребностей в материалах по замкнутому циклу. Затем стандарт MRP был расширен до MRP-II. Это позволило планировать все производственные ресурсы предприятия на основе данных, полученных от поставщиков и потребителей. Но этого оказалось недостаточно, и появился стандарт ERP, объединяющий возможности MRP и MRP-II, а также возможности стандартов DRP и FRP. Однако ERP-системы имеют явный крен в сторону автоматизации и стандартизации финансовых и учетно-хозяйственных функций производственных процессов и не обеспечивают интегрированного решения задач технологической подготовки производствами с его оперативным управлением, ограничиваясь только стратегическим планированием, а также между уровнем ERP и уровнем технологической подготовки и оперативного управления производством. В результате оказывается не охваченным информационными технологиями целый класс жизненно важных для предприятия производственных процессов.

Опыт внедрения ERP показал, что при создании действительно интегрированной системы управления предприятием в первую очередь необходимо решить в едином информационном пространстве (ЕИП) взаимоувязанные задачи автоматизации технологической подготовки и оперативного управления производством.

В настоящее время создание интегрированных информационных систем управления промышленными предприятиями реализуется на базе CALS-технологий, которые в гражданской

промышленности называются PLM-системами (PLM – Product Lifecycle Management – управление жизненным циклом изделий).

Автоматизированные информационные системы (АИС) класса PLM включают в свой состав PDM-системы в качестве электронного архива и технологического документооборота (workflow).

В [18] приведены зарубежные и российские компании-разработчики АИС-систем класса PLM. Среди российских компаний-разработчиков следует выделить: «Аскон», «Топ Системы», НПП «Интермех» (г. Минск), «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ). Все эти компании разрабатывают АИС-системы класса PLM с программным обеспечением (ПО), позволяющим интегрировать в состав АИС-систем автоматизированные системы (АС), САПР: CAD, CAM, CAE.

На повестку дня поставлена задача определения базовых информационных технологий ИАИС (интегрированная автоматизированная информационная система) для алгоритмического и программного обеспечения функций CAD/CAM/CAE/PDM/FRP/MRP/MES-систем в ЕИП предприятия.

В настоящее время системами корпоративного управления и учета для планирования материальных ресурсов (MRP и MRP-II), управления технической информацией (TIM), электронной почтой, маршрутизацией документов при коллективной работе и т. д. являются: R|3, BAAN, AVALON9 (CIM) MANMAN/X, MMI, SOCAP, TRITON, а также STAFFWARE, SCALA и Lotus Notes. Самой крупной интегрированной системой этого класса является R|3.

9.2. Автоматизация управления технологическими процессами (АСУТП)

Системы АСУТП охватывают уровень от цеха и ниже. Однако в АСУТП могут быть включены и межцеховые связи, если управление единым производственным процессом выполняется в нескольких цехах. Эти системы часто называют системами промышленной автоматики, или встроенными системами (Embedded Systems).

В состав АСУТП входят автоматизированные системы:

– SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (диспетчерское управление производственными процессами);

– CNC – Computer Numerical Control (компьютерное численное управление).

Система SCADA на верхнем иерархическом уровне АСУТП выполняет диспетчерские функции:

– сбор и обработка данных о состоянии оборудования;

– контроль протекания технологических процессов;

– выполняет роль инструментальной системы разработки ПО для встроенного в состав АСУТП оборудования компьютерной автоматизации;

– управление и регистрация аварийных сигналов (алармов);

– связь с корпоративной информационной сетью.

SCADA-системы состоят из терминальных компонентов, диспетчерских пунктов и каналов связи. Связь с контроллерами и приложениями в SCADA-системах обычно осуществляется посредством технологий: DDE – Dynamic Data Exchange (обмен данными), OLE – Object Linking and Embedding Technology (связывание и внедрение объектов), ODBC – Open Database Connectivity (открытый доступ к базам данных). В качестве каналов связи используют последовательные промышленные шины Profibus, CANbus, Foundation Fieldbus и др.

Разработка программ для программируемых контроллеров выполняется на языках C/C++, VBA – Visual basic для приложений или оригинальных языках, разработанных для конкретных систем. Ряд языков стандартизован и представлен в международном стандарте IEC 1131–3.

Известные SCADA-системы:

– Citect (компания Ci Technology), работающая в среде Windows;

– Trace Mode (компания AdAstra), операционные системы QNX, OS9, Windows;

– LabView SCADA (компания National Instruments).

Функциями систем MES являются анализ производственных процессов, их оптимизация, управление ресурсами и расходом

материалов, анализ простоя оборудования, диагностика и предупреждение поломок оборудования, контроль и управление качеством продукции, формирование отчетов о производстве для передачи на уровень ERP.

Функции MES близки по некоторым выполняемым функциям к системам ERP, PDM, SCM, S&SM и отличаются от них именно оперативностью, принятием решений в реальном времени, причем большое значение придается оптимизации этих решений с учетом текущей информации о состоянии оборудования и процессов.

В настоящее время наблюдается интеграция АСУП и АСУТП, ранее развивающихся автономно. Использование информации непосредственно от технологических процессов позволяет более рационально планировать производство и управлять предприятием за счет использования на этих уровнях общих программных средств, баз данных, сетей Industrial Ethernet и др.

На уровне управления технологическим оборудованием (запуск, тестирование, выключение оборудования, сигнализация о неисправностях, выработка управляющих воздействий для программно управляемого оборудования) используются программируемые контроллеры с системой CNC. Эти контроллеры обычно встраиваются в технологическое оборудование.

Техническое обеспечение АСУТП представлено персональными ЭВМ (в промышленном исполнении), контроллерами CNC, микрокомпьютерами PLC, распределенными по контролируемым участкам производства, связанными друг с другом с помощью промышленных шин.

9.3. Информационные логистические системы

Логистические задачи занимают значительное место среди задач, решаемых при организации управления сложными производственными системами.

Исторически в начале логистику связывали с управлением процедурами движения сырья и готовой продукции, их склади-

рованием и движением к месту потребления. Логистика формировалась как «наука об организации совместной деятельности менеджеров различных подразделений предприятия, а также группы предприятий по эффективному продвижению продукции по цепи «закупка сырья – производство продукции – сбыт – распределение» на основе интеграции и координации операций, процедур и функций, выполняемых в рамках данного процесса с целью минимизации общих затрат ресурсов». По существу, логистика выполняла функции подсистемы АСУП.

В 1974 г. международный конгресс по логистике предложил более широкое определение логистики «как науки о планировании, управлении и контроле за движением материальных, информационных и финансовых ресурсов в различных системах».

Затем появился термин «информационная логистика», под которым понимают организацию и использование систем информационного обеспечения производственно-хозяйственных процессов на предприятии. Объект информационной логистики – информационные потоки, сопровождающие материальные потоки.

Информационная логистика наиболее актуальна для автоматизированных систем проектирования (САПР) и управления, оперирующих информационными ресурсами, например в виде потоков документов (в различных формах), порождаемых материальными потоками и сопровождающих материальные потоки. Информационная логистика охватывает все виды деятельности, связанные с планированием и управлением процессами, нацеленными на обеспечение предприятия релевантной информацией.

В процессе проектирования мехатронных изделий или систем вся информация по проекту хранится в банке изделия, но возникает проблема с ее доставкой на рабочее место исполнителя. Возможностей СУБД для этого уже недостаточно. Более эффективные методы управления информацией оформлены в виде международных стандартов группы STEP (ISO 10303) CALS-системы. Такие методы составляют суть современной информационной логистики. Вместо логистической системы нередко

используются родственные ей системы управления разработками (проектами), например PDM-система управления проектными данными [10].

Создание логистической системы для САПР, обеспечивающей разработку или модернизацию сложных технических систем, начинается с описания предполагаемого изделия (входящих в его состав узлов (подсистем) и связей между ними) на специальном алгоритмическом языке EXPRESS, имеющимся в ISO 10303 (см. лекцию 7). При этом производится декомпозиция изделия – детальная функциональная и формируется структура информации, передаваемой по всем предусмотренным типам связи.

Полученная выше система пока обеспечивает только управление потоками информации. В ней не содержится никаких расчетов. Все расчеты, конструирование, анализ полученной информации, ее визуализация и прочая работа, необходимая для создания изделия, выполняется в отдельных модулях. Модули создаются на базе существующих САПР. Модули должны быть оформлены в виде самостоятельных программ со стандартными интерфейсами, предусмотренными в логистической системе. К числу таких модулей относятся системы ERP, SCM, CRM, PDM и др.

Вся созданная система размещается в локальной сети, например типа клиент-сервер. В этом случае все версии банка изделия и банка знаний размещаются на достаточно мощном сервере (типа Cray-3). В этом случае число клиентов в сети может измеряться сотнями.

Затем разрабатывается схема процесса проектирования изделия и начинается проектирование изделия.

В [10] более подробно описывается технология проектирования и последующая работа над изделием.

Логическим решением разработки информационных логистических систем является создание интегрированной автоматизированной системы управления (ИАИСУ), обеспечивающей информационное взаимодействие всех участников проекта.

9.4. Автоматизированные системы делопроизводства

В связи с переходом машиностроительной промышленности от серийного к мелкосерийному производству значительно возросла номенклатура выпускаемых предприятиями наукоемких изделий, что привело к многократному росту объема технической информации и документооборота.

На этапах конструкторской и технологической подготовки производства ведется коллективная работа с большим объемом документации, которая представлена в разных форматах (текстовые документы, чертежи, спецификации, отчеты, таблицы и т. д.) и разрабатываются в разных автоматизированных информационных системах (АИС) с использованием различных методов проектирования и типов сопровождающих их данных (твердотельные 3D модели, схемы печатных плат, программы для ЧПУ и т. д.).

Существует достаточно большое количество критериев классификации автоматизированных систем делопроизводства (АСД) по целевому назначению, приложению, масштабам:

- системы управления документами (СУД);
- системы управления документооборотом (СДО);
- инструментальные среды делопроизводства;
- специализированные и комплексные системы;
- локальные и распределенные системы;
- заказные и тиражируемые системы;
- фактографические и полнотекстовые системы;
- системы управления техническими данными (TDM);
- офисные системы делопроизводства;
- системы управления знаниями.

Отличия TDM от офисных АСД заключается в большом количестве чертежной документации и в тесной взаимосвязи с САПР.

Системы управления документами (СУД) предназначены для обеспечения санкционированного доступа к документам.

Систему управления документооборотом служат для управления деловыми процессами прохождения и обработки документов в соответствующих подразделениях и службах предприятия.

К системам управления знаниями в области делопроизводства относятся системы, выполняющие функции, характерные для интеллектуальных систем (классификация документов, телематический отбор документов, аналитическая обработка данных, моделирование деловых процессов).

Инструментальные среды в системах делопроизводства служат для формирования АСД, адаптированных к условиям конкретных предприятий и фирм. Ряд других задач, решаемых АСД, описан в [3, 18].

Основными компонентами СУД и СДО являются:

- электронный архив;
- система маршрутизации документов;
- контроль исполнения;
- модули сопровождения с прикладными программами;
- средства ввода информации.

В крупных АСД предусматривается распределенное хранение с доступом к документам в режимах off-line и on-line.

Современные системы делопроизводства являются распределенными, имеющими архитектуру клиент-сервер. На серверной стороне применяются серверы баз данных полнотекстовых документов, электронной почты, приложений SQL- и Web-серверы. На клиентской стороне – рабочие места пользователей.

К широкоизвестным СДО и АСД относятся Lotus Notes, Docs Open и др. примерами TDM служат Search или T-Flex Docs (на небольшое число пользователей) и системы документооборота, используемые в PDM Optegra или iMAN (для большого числа пользователей).

Контрольные вопросы

1. Перечислите автоматизированные системы, выполняющие функции АСУП на промышленных предприятиях.
2. Опишите стандарт MRP, входящий в АСУП.
3. Опишите стандарт MRP-II, входящий в АСУП.
4. Перечислите самые крупные интегрированные автоматизированные информационные системы (ИАИС).

5. Перечислите автоматизированные системы, выполняющие функции АСУП.

6. Укажите автоматизированные системы, выполняющие функции АСУТП.

7. Перечислите функции системы SCADA.

8. Перечислите известные SCADA-системы.

9. Опишите функции MES-систем.

10. В чем выражается интеграция АСУП и АСУТП?

11. Опишите историю развития логистических систем.

12. Дайте определение понятию «информационная логистика».

13. Укажите область применения информационной логистики.

14. Опишите порядок создания логистической системы для САПР.

15. Перечислите критерии классификации автоматизированных систем делопроизводства (АСД).

Опишите основные компоненты систем управления документами (СУД) и систем управления документооборотом (СДО).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы рассмотрели курс лекций, посвященных изучению основ дисциплины «Информационная поддержка мехатронных комплексов и производств», являющейся базовой составляющей более общей дисциплины «Проектирование мехатронных систем».

Данный курс лекций составляет в совокупности основу знаний в области информационного обеспечения разработки сложных (мехатронных) систем различного назначения и позволяет оценить роль информационного обеспечения при современном подходе к проектированию любых сложных технических систем.

Авторы не обещают, что прочитав эту книгу, студент сможет непосредственно притупить к разработке мехатронных систем (в лекциях основное внимание уделено только общим подходам к решению этой проблемы). Но авторы уверены, что студент будет подготовлен к дальнейшему самостоятельному углубленному изучению специальной технической литературы по всем аспектам, связанным с разработкой сложных технических и организационных систем.

Желаем вам больших успехов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Норенков И. П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии / И. П. Норенков, П. К. Кузьмик. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 320 с.
2. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
3. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования : учеб. для вузов / И. П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2002. – 336 с.
4. Готлиб Б. М. Технология автоматизированного машиностроения : учеб. пособие : в 2 т. / Б. М. Готлиб, А. А. Вакалюк, М. Б. Готлиб. – Т. 2. Автоматизированные высокоэнергетические технологические процессы точного машиностроения. – Екатеринбург : УрГУПС. – 2012. – 230 с.
5. Юревич Е. И. Основы робототехники : учеб. пособие / Е. И. Юревич. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 308 с.
6. Черемных С. В. структурный анализ систем: IDEF-технологии / С. В. Черемных, И. О. Семенов, В. С. Ручкин. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 208 с.
7. Леопенков А. В. Самоучитель UML / А. В. Леопенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 432 с.
8. Бенькович Е. С. Практическое моделирование динамических систем / Е. С. Бенькович, Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
9. Ли Кунву. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Ли Кунву. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
10. Тунаков А. П. САПР газотурбинных двигателей : учеб. пособие / А. П. Тунаков, И. А. Кривошеев, Д. А. Ахмедзянов. – Уфа : УГАТУ, 2005. – 272 с.
11. Кривошеев И. А. Формализация процесса проектирования и доводки двигателей с использованием CASE-технологии / И. А. Кривошеев. – М. : Изд-во «МАИ», 2008. – 128 с.

12. Лукинов А. П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств : учеб. пособие / А. П. Лукинов. – СПб. : Изд-во «Лань», 2012. – 608 с.
13. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение : учеб. пособие для студентов вузов / Ю. В. Подураев. – М. : Машиностроение, 2006. – 256 с.
14. Егоров О. Д. Мехатронные модули. Расчет и конструирование : учеб. пособие / О. Д. Егоров, Ю. В. Подураев. – М. : МГТУ «Станкин», 2004. – 360 с.
15. Марка Д. Методология структурного анализа и проектирования / Д. Марка, К. МакГоуэн. – М. : Метатехнология, 1992. – 239 с.
16. Файзрахманов Р. А. Структурно-функциональный подход к проектированию информационных технологий и автоматизированных систем с использованием CASE-средств / Р. А. Файзрахманов, К. А. Селезнев. – Пермь : ПГТУ, 2005. – 245 с.
17. Кривошеев И. А. Компьютерное моделирование в инновационном проектировании авиационных двигателей / И. А. Кривошеев, С. Г. Селиванов. – М. : Машиностроение, 2010. – 330 с.
18. Кульга К. С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технологической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством : монография / К. С. Кульга, И. А. Кривошеев. – М. : Машиностроение, 2011. – 377 с.
19. Кривошеев И. А. Общая структура автоматизированной разработки авиационных двигателей и энергоустановок / И. А. Кривошеев. – М. : Машиностроение, 2009. – 265 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе _____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

Б1.В.12 МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНЖИНИРИНГ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника
Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Технической механики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Волков Е.Б.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....4
Методические рекомендации для самостоятельной работы 5
Методические рекомендации для практических занятий..... 7
Методические рекомендации для выполнения контрольной работы.. 11
Библиографический список.....14

ВВЕДЕНИЕ

Обшей тенденцией развития науки и техники последнего столетия явственно выступает интеграция наук, преодоление принципа декомпозиции, стремление к системному подходу. Свидетельством этому является возникновение новых научно-технических направлений, таких, как кибернетика, бионика, системотехника и мехатроника, которая базируется на системных знаниях в областях механики, электроники и компьютерного управления функциональными движениями.

Именно концепция мехатроники наиболее полно отражает глобальную тенденцию интеграции всех функциональных компонентов технических систем вплоть до их конструктивного слияния в виде единых конструкций современных автоматических и автоматизированных систем и комплексов на основе решения двух, тоже общих, проблем развития техники в целом – миниатюризации и интеллектуализации.

Мехатроника является новой и динамично развивающейся отраслью науки и техники. Она базируется на знаниях и достижениях в областях механики, электроники и компьютерного управления и представляет собой более высокий уровень развития современного машиностроения.

Основной целью дисциплины «Международный инжиниринг» является подготовка студентов к научно-исследовательской деятельности посредством обеспечения этапов формирования соответствующих компетенций. Наряду с практической целью курс ставит образовательные и воспитательные цели. Достижение этих целей означает расширение кругозора студентов, повышение уровня их общей культуры и образования, а также культуры мышления, общения и речи и проявляется в готовности студента содействовать налаживанию межкультурных, профессиональных связей.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа – это вид учебной деятельности, выполняемый студентом без непосредственного контакта с преподавателем или управляемый преподавателем опосредовано через специальные учебные материалы; неотъемлемое обязательное звено процесса обучения, предусматривающее, прежде всего, индивидуальную работу студентов в соответствии с установкой преподавателя или учебника, программы обучения.

В процессе самостоятельной деятельности студент должен научиться выделять познавательные задачи, выбирать способы их решения, выполнять операции контроля за правильностью решения поставленной задачи, совершенствовать навыки реализации теоретических знаний.

Самостоятельная работа студента под руководством преподавателя протекает в форме делового взаимодействия: студент получает непосредственные указания, рекомендации преподавателя об организации самостоятельной деятельности, а преподаватель выполняет функцию управления через учет, контроль и коррекцию ошибочных действий.

Успешность самостоятельной работы в первую очередь определяется степенью подготовленности студента. По своей сути самостоятельная работа предполагает максимальную активность студентов в различных аспектах: организации умственного труда, поиске информации, стремлении сделать знания убеждениями. Психологические предпосылки развития самостоятельности студентов заключаются в их успехах в учебе, положительном к ней отношении, заинтересованности и увлеченности предметом, пони мании того, что при правильной организации самостоятельной работы приобретаются навыки и опыт творческой деятельности.

Самостоятельная работа обучающихся является составной частью учебной работы и имеет целью закрепление и углубление полученных знаний и навыков, поиск и приобретение новых знаний, в том числе с использованием автоматизированных обучающих систем, а также выполнение учебных заданий, подготовку к предстоящим занятиям, зачетам и экзаменам.

Самостоятельная работа предназначена не только для овладения дисциплиной, но и для формирования навыков самостоятельной работы вообще, в учебной, научной, профессиональной деятельности, способности принимать на себя ответственность, самостоятельно решить проблему, находить конструктивные решения, выход из кризисной ситуации и т. д.

Самостоятельная работа завершает задачи всех видов учебной работы. Никакие знания, не подкрепленные самостоятельной деятельностью, не могут стать подлинным достоянием человека. Кроме того, самостоятельная работа имеет воспитательное значение: она формирует самостоятельность не только как совокупность умений и навыков, но и как черту характера, играющую существенную роль в структуре личности современного специалиста высшей квалификации.

Для повышения эффективности самостоятельной работы студентов используется:

- организация индивидуальных планов обучения с привлечением студентов к научно-исследовательской работе и по возможности к реальному проектированию по заказам предприятий;
- включение самостоятельной работы студентов в учебный план и расписание занятий с организацией индивидуальных консультаций на кафедрах;
- создание комплекса учебных и учебно-методических пособий для выполнения самостоятельной работы студентов;
- разработка системы интегрированных межкафедральных заданий;
- ориентация лекционных курсов на самостоятельную работу;
- рейтинговый метод контроля самостоятельной работы студентов;
- коллегиальные отношения преподавателей и студентов;
- разработка заданий, предполагающих нестандартные решения;
- индивидуальные консультации преподавателя и перерасчет его учебной нагрузки с учетом самостоятельной работы студентов;
- проведение форм лекционных занятий типа лекции-беседы, лекции-дискуссии, где докладчиками и содокладчиками выступают сами студенты, а преподаватель выполняет роль ведущего. Такие занятия предполагают предварительную самостоятельную проработку каждой конкретной темы выступающими студентами по учебным пособиям, консультации с преподавателем и использование дополнительной литературы.

Тема 1. Materials technology. Describing and categorizing materials. Specifying and describing properties. Discussing quality issue. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - Present Simple, Present Continuous. Nouns and Pronouns. Numerals.

Тема 2. Component shapes and features. Manufacturing techniques. Jointing and fixing techniques. Positions of assembled components. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - irregular verbs; Past Simple vs. Present Perfect; articles.

Тема 3. Engineering design. Technical drawing (CAD, CAM). Design phases and procedures. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение

письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - Speaking about future, adjectives degrees of comparisons.

Тема 4. Electrical circuit concept. Electrical generation and transmission. Electrical loads. Semiconductor devices. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - other perfect tenses, passive and active voice.

Тема 5. Signal processing. Power electronics. Electromagnetisms. Electricla effect and devices. Sensors and actuators. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - Modals.

Тема 6. Digital logic. Control systems - models, operation principles. Software engineering. Describing automated systems. Robotics. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - conditionals; Gerund and Infinitive.

Тема 7. International patenting practice. Norms and regulations in this sphere. Structural, stylistics and lingustic specificity of documentation used in the international patenting practice. Patent search and analysis. Writing a patent. General grammar rules revision and practice.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Практические занятия на уроках дисциплины «Международный инжиниринг» направлены на закрепление теоретических знаний и формирование профессиональных практических умений. Проведение практических занятий позволяет заинтересовать обучающихся в изучении предмета, способствует активному усвоению знаний и умений сбора, обработки и анализа информации, характеризующей различные ситуации. Практические занятия развивают такие профессионально значимые качества, как самостоятельность, ответственность, точность, творческую инициативу, исследовательские умения (наблюдать,

сравнивать, анализировать, устанавливать зависимость, делать выводы и обобщения). Содержание разработанных практических занятий направлено на реализацию Государственных требований и требований работодателя.

Выполнению практических заданий предшествует проверка знаний обучающихся – их теоретической готовности к выполнению данных заданий. К каждому практическому занятию разработана инструкция для обучающихся, в которой указан порядок необходимых действий, а также контрольные вопросы. Основная позиция обучаемого в учебном процессе – активно- деятельностная, субъектная – включает в себя самостоятельный поиск, принятие решений, оценочную деятельность. Основная позиция преподавателя – руководитель и партнер по выполнению практических заданий.

С целью контроля и подготовки студентов к изучению новой темы вначале каждого практического занятия преподавателем проводится индивидуальный или фронтальный устный опрос по выполненным заданиям предыдущей темы. Критерии оценки: – правильность ответа по содержанию задания (учитывается количество и характер ошибок при ответе);

– полнота и глубина ответа (учитывается количество усвоенных фактов, понятий и т.п.);

владение словарем по тематике задания (количество освоенных новых слов);

– сознательность ответа (учитывается понимание излагаемого материала);

– логика изложения материала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться специальной терминологией);

– рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели);

– своевременность и эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе);

– использование дополнительного материала (обязательное условие);

– рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов).

Критерии оценки устных ответов студентов

Оценочные средства текущего контроля успеваемости: тест, опрос.

Система оценивания по оценочным средствам текущего контроля

Оценочное средство	Балловая стоимость
Тест	0-50 баллов (10 заданий)
Опрос	0-10 баллов
Итого	60 баллов

Баллы за тестирование проставляются за правильные ответы на вопросы.

В зависимости от типа вопроса ответ считается правильным, если:

- в тестовом задании закрытой формы с выбором ответа выбран правильный ответ;
- в тестовом задании открытой формы дан правильный ответ;
- в тестовом задании на установление правильной последовательности установлена правильная последовательность;
- в тестовом задании на установление соответствия, если сопоставление произведено верно для всех пар.

Оценка за опрос определяется простым суммированием баллов:

Критерии оценки ответа на вопрос	Количество баллов
правильность ответа	4
всесторонность и глубина ответа (полнота)	3
наличие выводов	1
соблюдение норм литературной речи	1
владение профессиональной лексикой	1
Итого	10

Результаты текущего контроля фиксируются преподавателем.

Типовые контрольные задания и материалы

Тест:

1. К какому виду услуг относится оценка стоимости проекта?

А) Инжиниринговые услуги;
Б) Финансовые услуги;
В) Консультативные услуги;
Г) Правильного ответа нет.

2. Как называется оказание услуг производственного, коммерческого, инженерно-проектного и научно-технического характера в международном масштабе?

А) Межнациональные договора;
Б) Международный рейтинг;
В) Международный инжиниринг;
Г) Нет нужного ответа.

3. Кем может быть оказан международный инжиниринг?

А) Поставщиком технологии;
Б) Генеральным подрядчиком;
В) Производителем;
Г) Правильного ответа нет.

4. Что представляют собой инжиниринговые услуги?

А) Услуги, связанные с подготовкой и налаживанием производственного процесса;
Б) Услуги, связанные с оказанием консультационных услуг;
В) Услуги, связанные с осуществлением предпринимательской деятельности;
Г) Правильного варианта нет.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, владений (опыта деятельности), характеризующие формирование компетенций

1. Ознакомление обучающихся с процедурой и алгоритмом оценивания (в начале изучения дисциплины).

2. Проверка ответов на задания, выполненных работ.

3. Сообщение результатов оценивания обучающимся, обсуждение результатов.
4. Оформление необходимой документации.

Перечень вопросов для устного опроса

Materials technology. Describing and categorizing materials.
Specifying and describing properties of materials.
Component shapes and features.
Manufacturing techniques.
Jointing and fixing techniques.
Positions of assembled components.
Engineering design.
Technical drawing (CAD, CAM). Design phases and procedures.
Manufacturing techniques.
Jointing and fixing techniques.
Electrical circuit concept.
Electrical generation and transmission.
Electrical loads.
Semiconductor devices.
Signal processing.
Power electronics.
Electromagnetisms.
Electrical effect and devices.
Sensors and actuators.
Digital logic.

Практические занятия

1. Materials technology. Describing and categorizing materials. Specifying and describing properties. Discussing quality issue. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - Present Simple, Present Continuous. Nouns and Pronouns. Numerals.
2. Engineering design. Technical drawing (CAD, CAM). Design phases and procedures. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - Speaking about future, adjectives degrees of comparisons.
3. Component shapes and features. Manufacturing techniques. Jointing and fixing techniques. Positions of assembled components. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - irregular verbs; Past Simple vs. Present Perfect; articles.
4. Electrical circuit concept. Electrical generation and transmission. Electrical loads. Semiconductor devices. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - other perfect tenses, passive and active voice.
5. Signal processing. POwer electronics. Electromagnetisms. Electricla effect and devices. Sensors and actuators. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройденным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - Modals.
6. Digital logic. Control systems - models, operation principles. Software engineering. Describing automated systems. Robotics. Выполнение лексико-грамматических упражнений, чтение текста и соответствующие предтекстовые и послетекстовые задания. Выполнение письменного задания, монологическое и диалогические высказывания по пройден-

ным темам. повторение и систематизация ранее пройденного грамматического материала - conditionals; Gerund and Infinitive.

7. International patenting practice. Norms and regulations in this sphere. Structural, stylistics and lingustic specificity of documentation used in the international patenting practice. Patent search and analysis. Writing a patent. General grammar rules revision and practice.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа – это одна из форм устной итоговой аттестации, это самостоятельная исследовательская работа, в которой автор раскрывает суть исследуемой проблемы; приводит различные точки зрения, а также собственные взгляды не нее. Содержание работы должно быть логичным; изложение материала носит проблемно-тематический характер.

Контрольная работа, как форма текущей аттестации, стимулирует раскрытие исследовательского потенциала студента, способность к творческому поиску, сотрудничеству, самораскрытию и проявлению возможностей.

Автор работы должен продемонстрировать достижение им уровня формируемых компетенций, продемонстрировать знание предмета, умение проявлять оценочные знания, изучать теоретические работы, использовать различные методы исследования, применять различные приемы творческой деятельности. Для этого необходимо правильно сформулировать тему, отобрать по ней необходимый материал; использовать только тот материал, который отражает сущность темы. Изложение должно быть последовательным. Недопустимы нечеткие формулировки, речевые и орфографические ошибки. В подготовке работы необходимо использовать материалы современных изданий. Оформление реферата должно быть грамотным и соответствовать ГОСТ 2.105–95, ГОСТ 9327-60. Библиографический список оформляется в соответствие с ГОСТ 7.1-2003.

Изложение текста и оформление выполняют в соответствии с требованиями ГОСТ. Страницы текстовой части и включенные в нее иллюстрации и таблицы должны соответствовать формату А4 по ГОСТ 9327-60. Работа должна быть выполнена печатным способом на одной стороне бумаги формата А4 через полтора интервала. Цвет шрифта должен быть черным, высота букв, цифр и других знаков не менее 1.8 (шрифт Times New Roman, 14 пт.). Текст следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: верхнее и нижнее — 20 мм, левое — 30 мм, правое — 10 мм. Абзацный отступ должен быть одинаковым по всему тексту и составлять 1,25 см. Выравнивание текста по ширине. Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определенных терминах, формулах, применяя выделение жирным шрифтом, курсив, подчеркивание. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой. Название каждой главы и параграфа в тексте работы можно писать более крупным шрифтом, жирным шрифтом,

чем весь остальной текст. Каждая глава начинается с новой страницы, параграфы (подразделы) располагаются друг за другом.

Все страницы обязательно должны быть пронумерованы. Нумерация листов должна быть сквозной. Номер листа проставляется арабскими цифрами. Нумерация листов начинается с третьего листа (после содержания) и заканчивается последним. Номер страницы на титульном листе не проставляется. Список использованной литературы и приложения включаются в общую нумерацию листов. Рисунки и таблицы, расположенные на отдельных листах, включают в общую нумерацию листов и помещают по возможности следом за листами, на которых приведены ссылки на эти таблицы или иллюстрации. Таблицы и иллюстрации нумеруются последовательно арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать рисунки и таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы (рисунка) состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой. В конце работы размещаются приложения. В тексте на все приложения должны быть даны ссылки. Каждое приложение следует начинать с новой страницы с указанием наверху посередине страницы слова «Приложение» и его номера. Приложение должно иметь заголовок, который записывают симметрично относительно текста с прописной буквы отдельной строкой.

Контрольная работа оценивается по следующим критериям: актуальность темы; соответствие содержания теме; глубина проработки материала; правильность и полнота использования источников; соответствие оформления стандартом.

На «отлично»: присутствие всех вышеперечисленных требований; знание студентом изложенного материала, умение грамотно и аргументировано изложить суть проблемы; присутствие личной заинтересованности в раскрываемой теме, собственную точку зрения, аргументы и комментарии, выводы; умение свободно беседовать по любому пункту плана, отвечать на вопросы, поставленные по темеработы; умение анализировать фактический материал и статистические данные, использованные при написании работы; наличие качественно выполненного презентационного материала или (и) раздаточного, не дублирующего основной текст защитного слова, а являющегося его иллюстративным фоном.

На «хорошо»: мелкие замечания по оформлению реферата; незначительные трудности по одному из перечисленных выше требований.

На «удовлетворительно»: тема контрольной работы раскрыта недостаточно полно; неполный список литературы и источников; затруднения в изложении, аргументировании.

Контрольная работа должна содержать: титульный лист, с обязательным указанием наименования учреждения, в котором выполнялся реферат, Ф.И.О. автора, Ф.И.О. руководителя, год написания; введение; основную часть; заключительные выводы; список литературы; при необходимости приложения.

Задание для контрольной работы

1. Write a simple explanation of the existence and behavior of holes in semiconductors.

2. Briefly describe the process by which purified silicon wafers are produced for electronics use from common sand.

3. Draw a sketch similar to Figure 6.3 for p-type Si with boron doping.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cambridge English for Engineering / Ibbotson M., Day J. – Cambridge: Cambridge university press, 2012
2. Oxford English for Electrical and Mechanical Engineering / Answer Book with teaching notes / Glendinning E. H., Glendinning N. – Oxford : University Press, 2006
3. Technology-1: students book: oxford English for careers / Glendinning E. H., Pohl Alison. – New York: Oxford University Press, 2007

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе_____ В. В. Зубов

ПРОГРАММА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИТОГОВОЙ АТТЕСТАЦИИ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Автор: Волков Е.Б., доц., к.т.н.

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией факультета
Технической механики	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Волков Е.Б.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 13.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ 3
1.1 Требования к выпускной квалификационной работе 3
1.2 Порядок выполнения выпускной квалификационной работы 16

2 КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ 18

3 ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 19
3.1 Тематика выпускных квалификационных работ 19
3.2 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность универсальных компетенций 19
3.3 Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общепрофессиональных компетенций 20

ПРИЛОЖЕНИЯ 22

ВВЕДЕНИЕ

Программа государственной итоговой аттестации по основной профессиональной образовательной программе по направлению подготовки – ***15.03.06 Мехатроника и робототехника***, направленность (профиль) - «Мехатроника и робототехника промышленных производств» составлена в соответствии с требованиями:

- Порядка проведения государственной итоговой аттестации по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры, утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29.06.2015 № 636;
- Федерального государственного образовательного стандарта - по направлению подготовки - 15.03.06 Мехатроника и робототехника, утверждённого приказом Минобрнауки России от 17.08.2020 № 1046.
- локальных нормативных актов университета, регламентирующих порядок проведения государственной итоговой аттестации.

Программа государственной итоговой аттестации включает:

I. Требования к выпускным квалификационным работам и порядку их выполнения (методические рекомендации по выполнению выпускных квалификационных работ);

II. Критерии оценки защиты выпускных квалификационных работ;

III. Оценочные материалы;

IV. Приложения.

I МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1.1.1 Общие положения

Государственная итоговая аттестация представляет собой процесс итоговой проверки и оценки компетенций выпускника, полученных в результате обучения. Государственная итоговая аттестация выпускника высшего учебного заведения является обязательной и осуществляется после освоения образовательной программы в полном объеме. Цель итоговой государственной аттестации выпускников – установление уровня готовности выпускника к выполнению профессиональных задач.

Государственная итоговая аттестации выпускников, завершивших освоение основной профессиональной образовательной программы по направлению подготовки – ***15.03.06 Мехатроника и робототехника***, направленность (профиль) - «Мехатроника и робототехника промышленных производств» осуществляется в форме выполнения, подготовки к процедуре защиты выпускной квалификационной работы и защиты выпускной квалификационной работы.

Трудоемкость государственной итоговой аттестации – 9 з.е.:

- выполнение, подготовки к процедуре защиты выпускной квалификационной работы – 6 з.е.;
- защита выпускной квалификационной работы – 3 з.е.

Трудоемкость государственной итоговой аттестации				
кол-во з.е.	часы			
	общая	контактная работа	СР	
6	216	20	196	Выполнение, подготовка к процедуре защиты выпускной квалификационной работы
3	108	5	103	Защита выпускной квалификационной работы

1.1.2 Цели и задачи выпускной квалификационной работы

Цель выполнения выпускной квалификационной работы (далее – ВКР):

систематизация, закрепление и расширение теоретических и практических знаний по направлению подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника, и применение этих знаний при решении конкретных профессиональных задач;

развитие навыков ведения самостоятельной работы и применения методик исследования и экспериментирования при решении разрабатываемых в выпускной квалификационной работе проблем и вопросов;

выяснение подготовленности обучающихся для самостоятельной работы по задачам профессиональной деятельности, определенных федеральным государственным образовательным стандартом (далее - ФГОС) по направлению подготовки – ***15.03.06 Мехатроника и робототехника***.

Выпускная квалификационная работа выполняется, как правило, на материалах организаций (баз практики) с учетом проблем, требующих решения в данной организации.

Основными задачами, которые должен решить обучающийся при выполнении выпускной квалификационной работы являются:

обоснование актуальности и значимости выбранной темы работы;

изучение теоретических положений по проблеме, сущности проблемы, нормативной документации;

обоснование необходимости и возможности применения определенных (в том числе) современных методик в решении задачи, поставленной в работе;

сбор необходимой информации с привлечением первичных и вторичных источников;

разработка практических рекомендаций и предложений, их экономическое и технологическое обоснование;

оформление ВКР в соответствии с нормативными требованиями.

В ходе государственной итоговой аттестации проверяется сформированность следующих компетенций:

универсальных

Категория (группа) универсальных компетенций	Код и наименование универсальной компетенции	Код и наименование индикатора достижения универсальной компетенции
Системное и критическое мышление	УК-1 Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	УК-1.1. Выбирает информационные ресурсы для поиска информации в соответствии с поставленной задачей УК-1.2. Оценивает соответствие выбранного информационного ресурса критериям полноты и аутентичности УК-1.3. Использует системный подход для решения поставленных задач
Разработка и реализация проектов	УК-2 Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения,	УК-2.1. Формулирует цели, задачи, обосновывает актуальность, значимость проекта при разработке его концепции в рамках выявленной проблемы;

	исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений	оценивает ожидаемые результаты и области их применения УК-2.2. Предлагает процедуры и механизмы внедрения стандартов, исходя из действующих правовых норм, организации информационного обеспечения в сфере проектного управления для повышения эффективности его осуществления
Командная работа и лидерство	УК.3 Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде	УК-3.1. Взаимодействует с другими членами команды для достижения поставленной задачи УК-3.2. Выбирает стратегии поведения в команде в зависимости от условий
Коммуникация	УК-4 Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(ых) языке(ах)	УК-4.1. Демонстрирует умение вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке УК-4.2. Демонстрирует умение вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах не менее чем на одном иностранном языке УК-4.3. Использует современные информационно-коммуникативные средства для коммуникации
Межкультурное взаимодействие	УК-5 Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах	УК-5.1. Толерантно воспринимает социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия УК-5.2. Анализирует современное состояние общества на основе знания истории УК-5.3 Интерпретирует проблемы современности с позиций этики и философских знаний
Самоорганизация и саморазвитие (в том числе здоровьесбережение)	УК-6 Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	УК-6.1. Эффективно планирует собственное время УК-6.2. Планирует траекторию своего профессионального развития и предпринимает шаги по ее реализации
	УК-7 Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности	УК-7.1. Использует основы физической культуры для осознанного выбора здоровьесберегающих технологий с учетом внутренних и внешних условий реализации конкретной профессиональной деятельности УК-7.2. Выполняет индивидуально подобранные комплексы оздоровительной или адаптивной физической культуры УК-7.3. Выбирает и применяет рациональные способы и приемы сохранения физического здоровья,

		профилактики заболеваний, психофизического и нервно-эмоционального утомления
Безопасность жизнедеятельности	УК-8 Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов	УК-8.1. Выявляет возможные угрозы для жизни и здоровья в повседневной и профессиональной деятельности УК-8.2. Понимает, как создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов УК-8.3. Демонстрирует приемы оказания первой помощи
Инклюзивная компетентность	УК-9 Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах	УК-9.1. Применяет базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах УК 9.2. Применяет навыки взаимодействия в социальной и профессиональной сферах с лицами из числа инвалидов и лицами с ограниченными возможностями здоровья
Экономическая культура, в том числе финансовая грамотность	УК-10 Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности	УК-10.1. Понимает основные проблемы, базовые принципы и законы функционирования экономики, роль государства в экономическом развитии УК-10.2. Понимает поведение потребителей и производителей экономических благ, особенности рынков факторов производства
Гражданская позиция	УК-11 Способен формировать нетерпимое отношение к проявлениям экстремизма, терроризма, коррупционному поведению и противодействовать им в профессиональной деятельности	УК-11.1 Знает законодательство, направленное на борьбу с экстремизмом, терроризмом, коррупцией УК-11.2 Понимает правовые нормы, обеспечивающие борьбу с экстремизмом, терроризмом, коррупцией в различных областях жизнедеятельности

Общепрофессиональных

Код и наименование общепрофессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения общепрофессиональной компетенции
ОПК-1 Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности	ОПК-1.1. Анализирует фундаментальные естественнонаучные и общеинженерные теории, методы математического анализа и моделирования, их роль в развитии науки ОПК-1.2. Применяет математические и физические законы для решения типовых профессиональных задач ОПК-1.3. Проводит математическое и физическое моделирование в профессиональной деятельности

ОПК-2 Способен применять основные методы, способы и средства получения, хранения, переработки информации при решении задач профессиональной деятельности	ОПК-2.1. Применяет основные методы получения, хранения, переработки информации при решении задач профессиональной деятельности ОПК-2.2.Анализирует способы и средства получения, хранения, переработки информации при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен осуществлять профессиональную деятельность с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений на всех этапах жизненного уровня	ОПК-3.1. Применяет основы экономической теории, основные понятия и законы экологии, новейшие технологии управления социально-техническими системами на всех этапах жизненного уровня ОПК-3.2. Использует экономическую теорию и инструментарий, применяет базовые знания фундаментальных разделов экологии, применяет современную научную методологию исследования управления социально-техническими системами на всех этапах жизненного уровня ОПК-3.3. Демонстрирует навыки расчета основных показателей деятельности предприятия в разных временных периодах; приемами анализа экологических последствий хозяйственной деятельности человека; навыками принятия управленческих решений с учетом возможных рисков на всех этапах жизненного уровня
ОПК-4 Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности	ОПК-4.1. Понимает принципы работы современных информационных технологий, необходимых для решения задач профессиональной деятельности ОПК-4.2. Использует современные информационные технологии для решения задач профессиональной деятельности
ОПК-5 Способен работать с нормативно-технической документацией, связанной с профессиональной деятельностью, с использованием стандартов, норм и правил	ОПК-5.1. Анализирует нормативно-техническую документацию, связанную с профессиональной деятельностью, с учетом стандартов, норм и правил ОПК-5.2. Применяет нормативно-техническую документацию, связанную с профессиональной деятельностью, с учетом стандартов, норм и правил
ОПК-6 Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий	ОПК-6.1. Решает стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной культуры с применением информационно-коммуникативных технологий ОПК-6.2. Демонстрирует профессиональную деятельность на основе библиографической культуры с применением информационно-коммуникативных технологий
ОПК-7 Способен применять современные экологичные и безопасные методы рационального использования сырьевых и энергетических ресурсов в машиностроении	ОПК-7.1. Анализирует современные экологичные методы рационального использования сырьевых и энергетических ресурсов в машиностроении ОПК-7.2. Применяет безопасные методы рационального использования сырьевых и энергетических ресурсов в машиностроении
ОПК-8 Способен проводить анализ затрат на обеспечение деятельности производственных подразделений	ОПК-8.1. Анализирует затраты на обеспечение деятельности производственных подразделений

ОПК-9 Способен внедрять и осваивать новое технологическое оборудование	ОПК-9.1. Внедряет новое технологическое оборудование ОПК-9.2. Осваивает новое технологическое оборудование
ОПК-10 Способен контролировать и обеспечивать производственную и экологическую безопасность на рабочих местах	ОПК-10.1. Обеспечивает производственную и экологическую безопасность на рабочих местах ОПК-10.2. Контролирует производственную и экологическую безопасность на рабочих местах
ОПК-11 Способен разрабатывать и применять алгоритмы и современные цифровые программные методы расчетов и проектирования отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием, разрабатывать цифровые алгоритмы и программы управления робототехнических систем	ОПК-11.1. Применяет стандартные методы расчетов и проектирования отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием ОПК-11.2. Разрабатывает цифровые алгоритмы управления для робототехнических систем и реализует их в виде прикладного программного обеспечения ОПК-11.3. Применяет методы расчета типовых характеристик силовых электронных преобразователей, методы их проектирования в соответствии с техническим заданием, в том числе с использованием типовых и специальных пакетов прикладных программ ОПК-11.4. Применяет современные методы компьютерного проектирования цифровых систем с использованием элементов программируемой логики
ОПК-12 Способен участвовать в монтаже, наладке, настройке и сдаче в эксплуатацию опытных образцов мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей	ОПК-12.1. Выбирает необходимый комплекс технических средств для современных микроконтроллерных и микропроцессорных систем управления ОПК-12.2. Знает конструктивные особенности и назначение мехатронных и робототехнических систем, правила их эксплуатации ОПК-12.3. Умеет пользоваться инструментом, оборудованием и приборами для наладки мехатронных и робототехнических систем ОПК-12.4. Выбирает способы, средства и методы измерений физических величин
ОПК-13 Способен применять методы контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности	ОПК-13.1. Выбирает и применяет типовые методы и средства контроля качества изделий и объектов в сфере профессиональной деятельности
ОПК-14 Способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения	ОПК-14.1. Составляет алгоритмы, пригодные для практического применения; ОПК-14.2. Разрабатывает компьютерные программы, пригодные для практического применения

Профессиональных

Код и наименование профессиональной компетенции	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
ПК-1.1 Способен осуществлять анализ технологических процессов механосборочного	ПК-1.1.1 Собирает и анализирует исходные информационные данные для проектирования технологических процессов механосборочного производства с целью выявления операций, подлежащих автоматизации и механизации

производства с целью выявления операций, подлежащих автоматизации и механизации	ПК-1.1.2 Владеет навыками проведения патентных исследований, изучение передового опыта в области автоматизации и механизации технологических процессов ПК-1.1.3 Участвует в разработке предложений по автоматизации и механизации технологических процессов механосборочного производства
ПК-1.2 Способен к внедрению средств автоматизации и механизации технологических процессов механосборочного производства	ПК-1.2.1 Знает способы внедрения средств автоматизации и механизации технологических процессов механосборочного производства ПК-1.2.2 Знает принципы разработки технологической части проекта по внедрению средств автоматизации и механизации технологических процессов механосборочного производства ПК-1.2.3 Выполняет проверку соответствия разрабатываемых средств автоматизации и механизации технологических процессов современному уровню развития техники и технологии
ПК-1.3 Способен осуществлять контроль за эксплуатацией средств автоматизации и механизации технологических процессов механосборочного производства	ПК-1.3.1 Осуществляет контроль за правильной эксплуатацией, обслуживанием средств автоматизации и механизации технологических процессов ПК-1.3.2 Осуществляет анализ эффективности и надежности средств автоматизации и механизации технологических процессов ПК-1.3.3 Формулирует предложения по устранению недостатков средств автоматизации и механизации технологических процессов, изменению их конструкции на более совершенную
ПК-1.4 Способен разрабатывать схемотехнические решения и осуществлять проведение расчетов изделий детской и образовательной робототехники	ПК-1.4.1 Знает принципы построения кинематических схем узлов изделий детской и образовательной робототехники ПК-1.4.2 Выполняет кинематические и прочностные расчеты механических узлов изделий детской и образовательной робототехники ПК-1.4.3 Осуществляет расчет надежности разрабатываемых изделий детской и образовательной Робототехники ПК-1.4.4 Разрабатывает схемотехническую документацию изделий детской и образовательной робототехники
ПК-1.5 Способен проводить финансовый анализ, бюджетирование и управление денежными потоками	ПК-1.5.1 Разрабатывает финансовую политику экономического субъекта, определяет и осуществляет меры по обеспечению ее финансовой устойчивости ПК-1.5.2 Составляет финансовые планы, бюджеты и сметы экономического субъекта ПК-1.5.3 Руководит работой по управлению финансами с учётом стратегических целей ПК-1.5.4 Оценивает и анализирует финансовый потенциал, ликвидность и платежеспособность, финансовую устойчивость, прибыльность и рентабельность, инвестиционную привлекательность экономического субъекта
ПК-1.6 Способен прогнозировать доходы и расходы инвестиционного проекта, оценивать его	ПК-1.6.1 Осуществляет подготовку производственного плана и прогнозирование доходов и расходов инвестиционного проекта ПК-1.6.2 Определяет срок окупаемости и потребность в кредитных ресурсах на основе доли собственных средств акционеров проекта

эффективность и устойчивость к изменяющимся параметрам внешней и внутренней среды	ПК-1.6.3 Применяет методы оценки эффективности инвестиционного проекта ПК-1.6.4 Оценивает устойчивость инвестиционного проекта к изменяющимся ключевым параметрам внешней и внутренней среды
ПК-1.7 Способен выполнять типовые задачи тактического планирования с учётом имеющихся ресурсов, потребностей рынка и современных достижений науки и техники	ПК-1.7.1 Организует работу по тактическому планированию деятельности структурных подразделений (отделов, цехов) производственной организации, направленному на определение пропорций развития производства, исходя из конкретных условий и потребностей рынка, выявление и использование резервов производства ПК-1.7.2 Выполняет типовые расчеты, необходимые для составления проектов перспективных планов производственной деятельности организации, разработки технико-экономических нормативов материальных и трудовых затрат для определения себестоимости продукции, планово-расчетных цен на основные виды сырья, материалов, топлива, энергии, потребляемые в производстве ПК-1.7.3 Разрабатывает с учетом требований рыночной конъюнктуры и современных достижений науки и техники мероприятия по модернизации систем управления производством в целях реализации стратегии организации, обеспечения эффективности производства и повышения качества выпускаемой продукции
ПК-1.8 Способен разрабатывать стратегию хозяйствующего субъекта, управлять процессами организации производства и труда для обеспечения конкурентоспособности производимой и реализуемой продукции, работ (услуг) и получения прибыли	ПК-1.8.1 Разрабатывает предложения по рационализации структуры управления производством в соответствии с целями и стратегией организации, действующих систем, форм и методов управления производством, по совершенствованию организационно-распорядительной документации и организации документооборота, по внедрению технических средств обработки информации, персональных компьютеров и сетей, автоматизированных рабочих мест ПК-1.8.2 Организует на тактическом горизонте управление мониторингом производственных процессов; обеспечивает максимальное использование производственных мощностей, ритмичное и бесперебойное движение незавершенного производства, сдачу готовой продукции, выполнение работ (услуг), складских и погрузочно-разгрузочных операций по установленным графикам ПК-1.8.3 Руководит проведением экономических исследований производственно-хозяйственной деятельности структурного подразделения (отдела, цеха) промышленной организации в целях обоснования внедрения новых технологий, смены ассортимента продукции с учетом конъюнктуры рынка; разрабатывает предложения по совершенствованию управления организацией и эффективному выявлению и использованию имеющихся ресурсов для обеспечения конкурентоспособности производимой продукции, работ (услуг) и получения прибыли ПК-1.8.4: разрабатывает стратегию организации с целью адаптации ее хозяйственной деятельности и системы управления к изменяющимся в условиях рынка внешним и внутренним экономическим условиям; подготавливает и согласовывает разделы тактических комплексных планов производственной, финансовой и коммерческой деятельности организации и ее структурных подразделений (отделов, цехов)

При выполнении выпускной квалификационной работы обучающиеся должны *показать*, опираясь на полученные знания, умения и полученные навыки:

сформированные универсальные, общепрофессиональные и профессиональные компетенции;

способность самостоятельно решать на современном уровне задачи своей профессиональной деятельности;

навыки постановки исследовательской проблемы, ее самостоятельного обсуждения, анализа возможных вариантов ее решения;

способность грамотно излагать специальную информацию, аргументировать и защищать свою точку зрения;

умение самостоятельного квалифицированного библиографического поиска, изучения и анализа научной литературы по теме;

навыки использования методологических, историко-философских и конкретных знаний, полученных в процессе обучения, для решения поставленной в работе проблемы;

умение написания профессионально грамотного текста и оформления его в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным публикациям;

использование в работе современных технологий.

1.1.3 Общие требования к выпускной квалификационной работе

Выпускная квалификационная работа должна отвечать следующим требованиям:

- быть актуальной (иметь теоретическое обоснование актуальности изучаемой проблемы в современных условиях хозяйственной деятельности);
- носить практический или научно-исследовательский характер;
- представлять самостоятельное исследование, демонстрирующее способность выпускника решать профессиональные проблемы, делать на основе анализа учебной и специальной литературы, нормативной и технической документации соответствующие выводы и вносить предложения;
- отражать добросовестность обучающегося в использовании опубликованных материалов других авторов.

Общие требования к выпускной квалификационной работе – целевая направленность; четкость построения; логическая последовательность изложения материала; глубина исследования и полнота освещения вопросов; убедительность аргументаций; доказательность выводов и обоснованность рекомендаций; грамотное оформление.

Текст выпускной квалификационной работы должен демонстрировать:

- знакомство автора с литературой вопроса;
- умение выделить проблему и определить методы ее решения;
- умение последовательно изложить существо рассматриваемых вопросов, грамотно цитировать ведущих исследователей, делать ссылки на использованные источники;
- умение собирать, обобщать, анализировать нормативные документы, практические материалы, полученные в результате собственного исследования в организации;
- достоверность и конкретность изложения фактических и экспериментальных данных о работе организации;
- обоснование выводов и предложений по результатам исследования, их конкретный характер, практическую ценность для решения исследуемых проблем;
- владение соответствующим понятийным и терминологическим аппаратом;
- четкость и логичность изложения мыслей, доказательность целесообразности и эффективности предлагаемых решений;
- приемлемый уровень языковой грамотности, включая владение функциональным стилем научного изложения.

1.1.4 Выбор, согласование и утверждение темы выпускной квалификационной работы

Выбор темы выпускной квалификационной работы осуществляется обучающимся по согласованию с руководителем ВКР и (или) специалистами организации-базы практики, где будет проходить преддипломная практика. При выборе темы ВКР необходимо исходить из:

актуальности проблемы и значимости ее для научной и практической деятельности;

потребностей развития и совершенствования деятельности конкретной организации;

интересов, склонностей в научно-исследовательской работе обучающегося, а также перспектив его будущей профессиональной деятельности;

возможности получения информации для проведения анализа и обоснования предлагаемых решений.

Примерный перечень тем выпускных квалификационных работ разрабатывается выпускающей кафедрой и доводится до сведения обучающихся. Обучающийся может предложить свою тему, обосновав целесообразность ее разработки. Тема выпускной квалификационной работы может являться продолжением тем, ранее представленных обучающимся в рамках курсовых работ (проектов).

Для успешного выполнения выпускной квалификационной работы необходимо уже на первом этапе (выбор темы) четко сформулировать цель работы (отражающуюся в ее названии) и задачи.

После выбора темы, согласования ее с руководителем ВКР, обучающийся подает заявление на имя заведующего кафедрой об утверждении темы выпускной квалификационной работы (приложение 1).

Закрепление тем выпускных квалификационных работ за обучающимися оформляется приказом по университету. Следует иметь в виду, что **тема, утвержденная приказом ректора университета, изменению не подлежит**. Исключение могут составить лишь случаи возникновения объективных непреодолимых препятствий к ее разработке. Изменение оформляется приказом по университету на основании письменного заявления обучающегося и представления заведующего кафедрой.

1.1.5 Структура и содержание выпускной квалификационной работы

Структурные элементы выпускной квалификационной работы **перечислены ниже в порядке их расположения и брошюровки.**

1. Титульный лист (приложение 2)
2. Сопроводительные документы к выпускной квалификационной работе:

2.1 Задание на выполнение выпускной квалификационной работы (приложение 3).

2.2 Отзыв руководителя ВКР (приложение 4).

2.3 Если результаты исследования нашли практическое применение, то прилагается документ, подтверждающий внедрение результатов исследования в практическую деятельность (приложение 6)

2.4 Справка о проверке в системе «Антиплагиат. ВУЗ» (приложение 7).

3. Содержание (приложение 8).
4. Введение.
5. Основная часть работы.
6. Заключение.
7. Список использованных источников (приложение 9).
8. Приложения.

Титульный лист должен содержать все необходимые идентификационные признаки, в частности, название работы, указание автора работы, руководителя.

На титульном листе подписью руководителя, консультанта (при наличии) подтверждается допуск выпускной квалификационной работы к защите.

Титульный лист учитывается в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы, порядковый номер на титульном листе не ставится.

Сопроводительные документы подшиваются следом за титульным листом работы, но в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы они не учитываются и порядковые номера на них не ставятся.

Цель составления *задания на выполнение выпускной квалификационной работы* – уяснение замысла работы и поставленных в ней основных проблем. Оформление задания на работу предполагает составление под контролем руководителя ВКР плана будущей работы.

Наличие *содержания* (плана работы) позволяет уйти от освещения вопросов, не относящихся к теме работы, обеспечить четкость и последовательность изложения материала, избежать пробелов и повторений, рационально организовать самостоятельный труд, сэкономить время.

Содержание работы помещают после справки о внедрении (если она есть). Слово «СОДЕРЖАНИЕ» записывают в виде заголовка симметрично тексту прописными буквами. В содержании работы указывается перечень всех глав и параграфов выпускной квалификационной работы, а также номера страниц, с которых начинается каждый из них (точно по тексту). Главы в выпускной квалификационной работе должны иметь в пределах всей работы порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами. Параграфы каждой главы должны иметь нумерацию в пределах каждой главы. Номер параграфа состоит из номера главы и непосредственно номера параграфа в данной главе, отделенного от номера главы точкой. Заголовки содержания должны точно повторять заголовки в тексте. Сокращать или давать их в другой формулировке, последовательности и соподчиненности по сравнению с заголовками в тексте нельзя.

При этом надо иметь в виду, что названия глав и параграфов не должны дублировать друг друга, а также наименование темы работы. Каждая глава должна раскрывать часть темы, каждый параграф главы – часть содержания главы.

Введение, заключение, список использованных источников включают в содержание, но не нумеруют.

Пример оформления содержания выпускной квалификационной работы приведен в приложении 8.

Страницы содержания учитываются в общей нумерации страниц выпускной квалификационной работы, порядковый номер на странице не ставится.

Выполнение выпускной квалификационной работы рекомендуется начинать с написания «ВВЕДЕНИЯ». Естественно, в процессе исследования первичный текст введения будет меняться, иногда очень существенно. Но это не отрицает необходимости на начальном этапе поставить перед собой задачи исследования, отражаемые во введении.

«ВВЕДЕНИЕ» в общем случае имеет следующую структуру:

актуальность выбранной темы;

формулировка цели и определение конкретных задач исследования (они найдут отражение в содержании работы);

оценка современного состояния техники и технологии в данной области;

связь решаемых в работе вопросов с общими задачами развития предприятий.

Во введении следует коротко сформулировать актуальность темы, т.е. причину возникновения проблемы и ее суть. Актуальность определяется как значимость, важность и приоритетность выбранной темы исследования среди других тем. Она должна подтверждаться положениями и доводами, свидетельствующими в пользу научной и практической значимости решения проблем и вопросов, исследуемых в работе. Необходимо объяснить, почему именно выбранная тема представляет интерес на современном этапе развития. Обоснование актуальности темы работы не должно быть многословным. Главное – показать, как автор оценивает своевременность и социальную значимость выбранной темы.

От доказательства актуальности следует перейти к формулировке цели исследования. Цель исследования – это образ желаемого результата, то, что намерен достичь автор работы.

Цель выпускной квалификационной работы должна соответствовать названию темы. Цель работы формулируется кратко и точно. Например, «Цель выпускной квалификационной работы – Разработать систему управления мехатронным модулем движения шахтного вентилятора местного проветривания».

Конкретизация цели осуществляется в задачах исследования. «Исходя из поставленной цели, были поставлены следующие задачи выпускной квалификационной работы:

- Анализ существующих мехатронных модулей движения горных машин;
- Сбор и анализ параметров шахтных вентиляторов местного проветривания;

- Математическое описание системы управления мехатронным модулем движения шахтного вентилятора местного проветривания

- Технико-экономическое обоснование

- Безопасность и экологичность проекта».

Формулировки задач необходимо делать очень тщательно, так как описание их решения должно составить содержание последующих глав (параграфов) выпускной квалификационной работы.

После того, как сформулированы цель и задачи, следует указать информационную базу и структуру выпускной работы, а именно:

«Выпускная квалификационная работа состоит из введения, разделов или частей основного текста, заключения, списка использованных источников, приложений».

Введение не должно превышать 2-3 страницы компьютерного набора.

Страницы введения учитываются в общей нумерации страниц работы, номер страницы проставляется.

Основная часть выпускной квалификационной работы состоит из следующих разделов:

В основной части работы излагается суть исследования (анализ изучаемого объекта), показывается понимание сущности избранной темы, знание используемых источников, умение сопоставлять различные точки зрения. Важно не механическое их сопоставление или бездоказательная критика отдельных авторов, а стремление к тому, чтобы отстаиваемые или разделяемые студентом суждения были подкреплены теоретическими положениями, фактами и конкретными примерами.

Если в работе критически рассматривается точка зрения какого-либо автора, при изложении его мысли следует приводить цитаты, только при этом условии критика может быть объективной. В качестве довода, подтверждающего ту или иную мысль, могут приводиться выводы, полученные специалистами по данной проблеме. В этих случаях допускается передача чужого мнения в форме свободного изложения, либо цитирование специальных мест из опубликованных работ с обязательной ссылкой на источники.

В выпускной квалификационной работе должна быть выдержана логическая связь между главами, последовательное развитие темы и доказательность.

Первая глава, как правило, носит теоретический характер, в ней может приводится обзор отечественной и зарубежной литературы по разрабатываемой проблеме, могут раскрываться основные понятия и сущность изучаемого вопроса, может даваться характеристика исследуемого объекта, обосновываться цель и задачи работы.

Вторая и последующие главы, как правило, содержат описание и результаты самостоятельного теоретического и экспериментального исследования.

Текст работы излагается самостоятельно (не допускается дословное переписывание использованной литературы), последовательно, грамотно и аккуратно, при написании работы необходимо употреблять профессиональные термины, избегать сложных грамматических оборотов. Обучающийся должен показать не только знание материала, но и умение разбираться в нем, творчески использовать основные положения источников. Материал, используемый из других источников, должен быть переработан, органически увязан с избранной обучающимся темой и изложен своими словами с приведением ссылок на источники информации.

Содержание выпускной квалификационной работы должно демонстрировать:

знакомство автора с учебной и научной литературой по теме выпускной квалификационной работы;

умение обобщать и анализировать материал литературных источников, выделить проблему и определить пути ее решения, последовательно изложить существо рассматриваемых вопросов, делать самостоятельные выводы;

владение понятийным и терминологическим аппаратом.

В тексте выпускной квалификационной работы следует избегать использования личных местоимений, заменяя их безличными формами (вместо «я считаю» - «автор считает», «мы полагаем»).

Рекомендуется использование вводных и соединительных слов – *таким образом, из этого следует, в связи и т.д.* – для подчеркивания причинно-следственных связей и выражения личного отношения к излагаемому материалу.

Все страницы основной части выпускной квалификационной работы участвуют в общей нумерации страниц, номера страниц проставляются.

«ЗАКЛЮЧЕНИЕ» выполняет роль концовки, обусловленной логикой проведенного исследования. Оно содержит изложение полученных итогов и их соотношение с общей целью и конкретными задачами, поставленными и сформулированными во введении. Именно здесь содержится «выводное» знание, полученное в результате исследования. В заключении указывается вытекающая из конечных результатов теоретическая и практическая ценность, значимость. Заключительная часть предполагает обобщенную итоговую оценку проделанной работы.

В «ЗАКЛЮЧЕНИИ» находят отражение основные положения и выводы, содержащиеся во всех главах работы.

Объем заключения – 3-4 страницы.

Нумерация страниц, на которых приводится текст заключения, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Список использованных источников является составной частью работы и отражает степень изученности рассматриваемой проблемы. При этом в список использованных источников включаются, как правило, те источники, на которые в работе имеются библиографические ссылки. Использованные источники должны содержать их полное описание по требованиям стандартов.

Порядок оформления списка использованных источников представлен в приложении 9.

Нумерация страниц, на которых приводится текст списка использованных источников, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

В *приложения* следует выносить вспомогательный материал, который при включении в основную часть работы загромождает текст.

К вспомогательному материалу относятся таблицы цифровых данных, инструкции, методики, иллюстрации вспомогательного характера, заполненные формы документов, выдержки из локальных нормативных актов и др.

Нумерация страниц, на которых даются приложения, должна продолжать общую нумерацию страниц основного текста.

Объем выпускной квалификационной работы должен составлять – 70-110 страниц компьютерного набора (без приложений).

При выполнении выпускной квалификационной работы обучающийся должен продемонстрировать навыки работы на персональном компьютере (например, статистическая обработка материалов, выполнение графических построений, проведения математических расчетов, использование программного обеспечения для решения конкретных задач, поставленных в работе).

1.1.6 Руководство выпускной квалификационной работой

Общее руководство и контроль за ходом выполнения ВКР осуществляет выпускающая кафедра в лице руководителя ВКР. Руководитель ВКР:

помогает обучающемуся с выбором темы и разработкой плана работы;

оформляет задание на выполнение выпускной квалификационной работы;

оказывает обучающемуся помощь в разработке календарного графика на весь период выполнения выпускной квалификационной работы;

рекомендует обучающемуся необходимую литературу, нормативную документацию по теме;

систематически контролирует ход работы и информирует кафедру о состоянии дел;

дает подробный отзыв на законченную работу.

Проверяя работу, руководитель не должен превращаться в корректора или редактора, хотя замечания в этой части он тоже высказывает. Руководитель ВКР выявляет полноту, глубину и всесторонность рассмотрения поставленных в плане вопросов, последовательность изложения материала, достаточность использования литературы, аргументированность выводов, степень их обоснованности и самостоятельности. В случае обнаружения плагиата, ошибочных решений и научных положений по тем или иным вопросам, неполноты или поверхностности исследования, противоречивости, излишнего отклонения от темы и других недостатков руководитель предлагает выпускнику устранить их, рекомендует пути и сроки их устранения.

Руководитель ВКР помогает выпускнику на всех этапах его работы, но эта помощь не должна выливаться в соавторство. Отношения руководителя со обучающимся строятся на основе сотрудничества.

1.2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.2.1 Основные этапы выполнения выпускной квалификационной работы

Соблюдение установленных сроков и последовательности выполнения выпускной квалификационной работы направлено на оптимизацию процесса достижения поставленных целей.

Рекомендуется следующая последовательность этапов выполнения выпускной квалификационной работы:

выбор темы работы, её утверждение;

подбор литературы, нормативной документации и ознакомление с ними;

сбор и обобщение аналитических материалов, анализ;

написание работы и представление её руководителю, доработка по замечаниям руководителя;

написание введения и заключения, подготовка списка использованных источников, приложений, представление работы руководителю ВКР;

прохождение нормоконтроля, исправление замечаний по оформлению работы;

проверка в системе «Антиплагиат. ВУЗ»*;*

размещение работы в портфолио;

подготовка к защите выпускной квалификационной работы: подготовка презентационных материалов, оформление документов на выпускную квалификационную работу.

1.2.2 Подготовка к защите выпускной квалификационной работы

Законченная ВКР, подписанная обучающимся, передается руководителю ВКР для проверки соответствия оформления работы предъявляемым требованиям и составления письменного отзыва руководителя. В отзыве руководителя указываются сведения об актуальности темы работы, достоинства и недостатки работы, оценка подготовленности обучающегося, инициативности и самостоятельности при решении задач выпускной квалификационной работы, умение обучающегося работать с литературными и нормативными источниками, способность ясно и четко излагать материал, соблюдение правил и качества оформления работы. Особое внимание уделяется оценке выпускника по личностным характеристикам (ответственность, дисциплинированность, самостоятельность, активность, творчество, инициативность и т.д.), проявленным способностям к исследовательской деятельности, достигнутым результатам в формировании компетенций выпускника данной программы, мотивируется возможность или невозможность представления выпускной квалификационной работы на защиту в государственной экзаменационной комиссии.

Решение руководителя ВКР является основанием для допуска ВКР к защите. Допуск работы к защите производится заведующим выпускающей кафедры.

Текст ВКР должен быть проверен на объем заимствований в системе «Антиплагиат. ВУЗ», отчет печатается. ВКР размещается в портфолио. Размещение ВКР – не позднее, чем за 3 дня до защиты.

Перед защитой обучающимся представляются в ГЭК следующие документы:

1) ВКР, подписанная на титульном листе выпускником, руководителем ВКР, консультантами (если есть);

2) задание на выполнение работы с отметками сроков окончательной подготовки работы, подписанное руководителем ВКР и заключением кафедры о допуске к защите;

3) отзыв руководителя ВКР;

4) отзыв рецензента (при наличии);

5) отчет о проверке в системе «Антиплагиат. ВУЗ».

Готовясь к защите работы, обучающийся составляет тезисы выступления, содержащего наиболее важные и интересные результаты исследования. При этом следует помнить о том, что выпускнику для доклада отводится ограниченное время; оформляет наглядные пособия, раздаточный материал к докладу, продумывает ответы на замечания рецензента (при наличии).

Доклад на защите выпускной квалификационной работы, как правило, не должен превышать 7-10 мин. Следует помнить, что обучающийся не просто излагает, а защищает положения своей работы.

1.2.3 Защита выпускной квалификационной работы

Защита выпускной квалификационной работы проводится на открытом заседании ГЭК.

Порядок защиты:

- председатель ГЭК объявляет фамилию, имя и отечество выпускника, название работы с указанием места ее выполнения;

- доклад продолжительностью, как правило, не более 7-10 минут, в течении которых он должен кратко сформулировать актуальность, цель и задачи работы, изложить основные результаты, выводы и рекомендации, конкретные предложения, обосновать возможность их реализации, эффективность. При этом необходимо уточнить личный вклад в разработку проблемы.

Обучающийся может пользоваться заранее подготовленным тезисами доклада, но должен излагать основное содержание своей выпускной квалификационной работы свободно, не читая письменного текста. При чтении утрачивается эмоциональность изложения, монотонное чтение текста не привлекает внимания и утомляет слушателей. Свободный рассказ по теме свидетельствует об уровне подготовки и глубине специальных знаний по проблеме выпускной квалификационной работы. Все это существенно влияет на итоговую оценку работы.

Все принципиальные положения выпускной квалификационной работы для большей наглядности могут быть представлены на демонстрационном материале. К демонстрационным материалам относится информация из выпускной квалификационной работы (таблицы, диаграммы, схемы, иллюстрации и пр.), оформленная в виде презентаций или ксерокопий для каждого члена ГЭК. Во время доклада необходимо ссылаться на эти материалы;

- после окончания доклада члены ГЭК и присутствующие на защите предлагают выпускнику вопросы, касающиеся устного выступления, имеющие непосредственное отношение к теме работы, или же просто в связи с обсуждаемой проблемой;

- зачитывается внешняя рецензия на выпускную квалификационную работу (при наличии);

-выступление руководителя выпускной квалификационной работы, а в случае его отсутствия секретарь ГЭК зачитывает отзыв руководителя;

- председатель ГЭК предоставляет желающим слово для выступления, затем выпускнику, которое предполагает ответы на замечания рецензента и всех, выступивших при обсуждении работы, после чего объявляет об окончании защиты.

После окончания открытой защиты проводится закрытое заседание ГЭК (возможно с участием руководителей), на котором определяются итоговые оценки по четырехбалльной системе («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»). После закрытого обсуждения председатель объявляет решение ГЭК. Протокол заседания ГЭК ведется секретарем. В него вносятся все заданные вопросы, особые мнения, решение комиссии об оценке.

II КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Оценка выпускной квалификационной работы производится по пяти группам критериев:

Система оценивания по оценочным средствам государственной итоговой аттестации

Оценочное средство	Максимальная стоимость в баллах	Критерии начисления баллов
Выпускная квалификационная работа	0-90 балл	Качество выполненной работы, ее научно-теоретический уровень, степень самостоятельности и логичность изложения материала, правильность оформления и результат ее защиты
Отзыв руководителя ВКР	0-15 баллов	Ответственность, дисциплинированность, стремление к достижению высоких результатов самостоятельность, добросовестность в выполнении ВКР, контактность….
Отзыв рецензента ВКР	0-5 баллов	…….
Ответы на вопросы (проверка компетенций)	0-5 баллов	Полнота и правильность ответа
Итого	115 баллов	

Оценка по итогам государственной итоговой аттестации определяется простым суммированием баллов:

Критерии оценки	*Количество баллов*
Критерии содержания ВКР	
обоснованность выбора и актуальность темы исследования	0-5
обоснование практической и теоретической значимости исследования	0-5
уровень теоретической проработки проблемы, осмысления теоретических вопросов и обобщения собранного материала	0-5
умение представить литературный обзор проблемы исследования	0-5
широта и качество использованных источников	0-5
объем и уровень анализа профессиональной, научной литературы, релевантность, полнота, корректность и содержание цитирования	0-5
умение правильно применить необходимые для решения проблемы нормативные правовые акты (документы) в объяснении конкретной ситуации деятельности организации	0-5
наличие в ВКР результатов, которые в совокупности решают конкретную научную и (или) практическую задачу, или - результатов (теоретических и (или) экспериментальных), которые имеют существенное значение для развития конкретных направлений в опре-	0-5

деленной отрасли науки (деятельности), или – научно-обоснованных разработок, использование которых в полном объёме обеспечивает решение прикладных задач	
умение логические верно, аргументированно и ясно излагать материалы исследования в ВКР	0-5
обоснованность и четкость сформулированных выводов	0-5
адекватность использования методов исследования	0-1
умение использовать компьютерные технологии в режиме пользователя для решения профессиональных задач	0-5
Критерии оформления ВКР	
владение научным стилем изложения, орфографическая и пунктуационная грамотность	0-5
соответствие формы представления работы требованиям, предъявляемым к оформлению данных работ	0-5
Критерии процедуры защиты	
качество устного доклада: соответствие доклада содержанию работы, логичность, точность формулировок, обоснованность выводов, культура речи	0-5
владение профессиональной терминологией и навыками профессиональной аргументации	0-4
презентационные навыки: структура и последовательность изложения материала, соблюдение временных требований, использование презентационного оборудования и/или раздаточного материала, грамотность оформления иллюстрационных материалов, выразительность использования, контакт с аудиторией	0-5
поведение при защите (коммуникационные характеристики (культура) докладчика (речь, манера говорить, отстаивать свою точку зрения, привлекать внимание к важным моментам в докладе или ответах на вопросы)	0-5
качество ответов на вопросы членов ГЭК: логичность, глубина, правильность и полнота ответов	0-5
Отзыв рецензента ВКР	
теоретическая значимость исследования; анализ представленных методик исследования; практическая значимость исследования; степень полноты обзора состояния проблемы и корректность постановки задачи; уровень и корректность использования в работе методов исследования; степень комплексности работы, применение в ней знаний социально-гуманитарных дисциплин, естественно-математических, общепрофессиональных и специальных дисциплин; ясность, четкость, последовательность и обоснованность изложения.	0-5
Отзыв руководителя ВКР	
ответственное отношение к работе, дисциплинированность, стремление к достижению высоких результатов, самостоятельность, добросовестность в выполнении работы, соблюдение сроков представления материалов, контактность	0-5
владеет навыками самостоятельного получения новых знаний, использования современных технологий	0-5
умение систематизировать и обобщать информацию из разных источников	0-5
Теоретические вопросы	
качество ответов на вопросы членов ГЭК: правильность и полнота ответов	0-5
Итого баллов	115

Правила оценивания результатов защиты ВКР

104-115 баллов (90-100%) – оценка **«отлично»;**
81-103 балла (70-89%) – оценка **«хорошо»;**
58-80 баллов (50-69%) – оценка **«удовлетворительно;**
0-57 баллов (0-49%) – оценка **«неудовлетворительно».**

III ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Оценочными средствами результатов обучения на этапе государственной итоговой аттестации являются выпускная квалификационная работа и ее защита по установленной процедуре (доклад, презентация, ответы на вопросы государственной экзаменационной комиссии), позволяющей сделать вывод о сформированности компетенций.

3.1 *Примерная тематика выпускных квалификационных работ*

1. Интеллектуальная система управления транспортной сети шахты «Центральная» ООО «Березовский рудник».
2. Система управления двигателем «*Указывается горная машина*».
3. Систему управления мехатронным модулем движения шахтного вентилятора местного проветривания.

3.2 *Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность универсальных компетенций:*

1. Каковы главные особенности научного знания в отличие от религиозных представлений о мире?
2. Что, по вашему мнению, является важнейшим фактором развития общества в современном мире?
3. В каких формах осуществляется влияние научного знания на развитие экономики, культуры, духовной жизни и общества в целом?
5. Каково значение коммуникативных навыков для успешной деятельности производственного коллектива?
6. В чем вы видите основные причины необходимости овладения навыками общения на иностранном языке для успешного решения профессиональных задач в современных условиях?
7. В чем проявляется толерантность в восприятии социальных, этнических, конфессиональных и культурных различий?
8. Чем обусловлена необходимость овладения правовой культурой для достижения высоких экономических результатов в современных условиях?
9. Какая формулировка образовательных потребностей специалиста в современных условиях является более актуальной: «образование для всей жизни» или «образование в течение всей жизни»?
10. В чем состоит профессиональная самореализация работника?
11. В чем вы видите значение здорового образа жизни, овладения методами и средствами физической культуры для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности?
12. Чем обусловлена в настоящее время необходимость овладения приемами первой помощи, методами защиты в условиях чрезвычайных ситуаций?
13. Каков порядок действий мастера смены при обнаружении пожара?
14. Каков порядок действий мастера смены в чрезвычайной ситуации (стихийное бедствие)?
15. Определение понятия «качество продукции горно-добывающего производства».
16. Какие меры может предпринять главный инженер предприятия для повышения экономической эффективности предприятия в целом?

17. Что представляют собой кондиции на полезное ископаемое и для чего они необходимы?

18. Объясните, как Вы понимаете термин «техногенное сырьё». Каковы перспективы развития обогащения этого вида сырья?

19. Как проявляется негативное влияние разубоживания на результаты деятельности горно-металлургической компании и на интересы государства?

20. Какова, на Ваш взгляд, роль высшего технического образования для подготовки кадров в области добычи полезных ископаемых?

3.3 *Теоретические вопросы государственной итоговой аттестации, оценивающие сформированность общепрофессиональных компетенций:*

1. Каковы, на Ваш взгляд, основные информационные источники необходимые в работе специалиста на производстве?

2. Каковы, на Ваш взгляд, основные информационные источники необходимые в работе специалиста в научно-исследовательском секторе?

3. Каковы, на Ваш взгляд, основные информационные источники необходимые в работе специалиста в проектной организации?

4. Перечислите основные требования информационной безопасности, применяемые на современных предприятиях.

5. Какие основные формы устного и письменного общения являются традиционными для специалиста на производстве?

6. Какие основные формы устного и письменного общения являются традиционными для специалиста в научно- исследовательском секторе?

7. Какие основные формы устного и письменного общения являются традиционными для специалиста в проектной организации?

8. Каковы основные права и обязанности горного мастера смены?

9. Каковы основные права и обязанности заведующего научно-исследовательской лабораторией?

10. Каковы основные права и обязанности главного инженера предприятия?

11. Перечислите основные направления рационального и комплексного освоения недр при добыче и переработке твёрдых полезных ископаемых.

12. Как Вы понимаете термин «ресурсосбережение»? Как это учтено в Вашей ВКР?

13. Назовите основные производственные процессы при строительстве шахт и подземных сооружений

14. Основные организационные мероприятия безопасного проведения взрывных работ

15. Какие цели достигаются при применении подземного дробильного комплекса?

16. Принципы и способы управления качеством руды в руднике.

17. Зачем необходимо повышать уровень своей профессиональной компетентности?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Форма заявления на утверждение темы выпускной квалификационной работы

Зав. кафедрой _____
_____
обучающегося группы _____
_____

Заявление
на утверждение темы выпускной квалификационной работы

Прошу утвердить тему выпускной квалификационной работы (из числа предложенных университетом):
_____
_____

Прошу утвердить самостоятельно определенную тему выпускной квалификационной работы
_____
_____

Место прохождения производственной (преддипломной) практики:
_____
_____

Руководитель ВКР_____
(Ф.И.О., ученая степень, ученое звание, должность)

Дата _____ Подпись обучающегося _____

Решение зав. кафедрой

«УТВЕРЖДАЮ»

_____

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Форма оформления титульного листа выпускной квалификационной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРИАТ/СПЕЦИАЛИТЕТ /МАГИСТРАТУРА)

ТЕМА:_____
_____

Факультет:_____

Направление/Специальность:
_____

Профиль/специализация:
_____

Квалификация:
_____

Кафедра:_____

Обучающийся: _____(*подпись*)
Фамилия И.О.
Группа:

*Руководитель:*_____(*подпись*)
Фамилия И.О.

Консультант: _____(*подпись*)
Фамилия И.О.

_____
(подпись)
Допустить к защите:
Зав. кафедрой _____
(Фамилия И.О., ученая степень, ученое звание)

Екатеринбург
202_

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Пример оформления задания на выполнение выпускной квалификационной работы

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра_____

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой_____
_____
«___»_____20__ г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
для присвоения квалификации _____ по направлению подготовки/
специальности _____ направленности (профилю)
/специализации _____

Обучающемуся_____
(фамилия, имя, отчество полностью)

Тема выпускной квалификационной работы_____
_____
_____

Руководитель работы_____
(фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание)

Консультанты по разделам:

Фамилия И.О. консультанта	Должность, ученая степень, ученое звание	Разделы работы

Дата выдачи задания «___» _____ 20____г.

Срок сдачи обучающимся законченной выпускной квалификационной работы «___» _____ 20__г.

Исходные данные для выполнения выпускной квалификационной работы:

Содержание расчетно-пояснительной записки:

Демонстрационный материал:

Руководитель ВКР _____
(подпись)

Обучающийся _____
(подпись)

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Примерная форма отзыва руководителя выпускной квалификационной работы

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Выпускная квалификационная работа выполнена

Обучающимся	*Фамилия Имя Отчество*
Специальность	15.03.06 Мехатроника и робототехника
Направленность (профиль)	Мехатроника и робототехника промышленных производств
Кафедра	Технической механики
Группа	МИР-25
Руководитель ВКР	Доцент, к.т.н. *Фамилия Имя Отчество*

Общая характеристика работы студента в период выполнения ВКР: _____
_____
_____
_____

Актуальность темы _____
_____
_____

Степень достижения целей ВКР _____
_____
_____

Общая характеристика теоретической части (глубина разработки проблемы, логика изложения и проч.) _____
_____
_____

Общая характеристика практической части работы (наличие элементов практической новизны, наличие и значимость практических предложений и рекомендаций) _____
_____
_____

Степень владения профессиональными знаниями, умениями и навыками _____
_____
_____

Замечания к ВКР _____
_____
_____

Заключение: _____

Руководитель: _____ «___» _____ 20____ г.
подпись

Обучающийся: _____ «___» _____ 20____ г.
подпись

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Примерная форма отзыва рецензента о выпускной квалификационной работе

ОТЗЫВ
РЕЦЕНЗЕНТА О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

Фамилия И.О. выпускника	*Фамилия Имя Отчество*
Специальность	15.03.06 Мехатроника и робототехника
Направленность (профиль)	Мехатроника и робототехника промышленных производств
Тема рецензируемой работы	*ТЕМА РАБОТЫ*
Рецензент место работы, должность (при наличии)	*Фамилия Имя Отчество*, ООО «Березовское РУ», гл. инженер

Заключение о степени соответствия выпускной квалификационной работы заданию_____

Оценка теоретической части ВКР (теоретическая значимость исследования, анализ использованных источников) _____
_____

Оценка аналитической части ВКР (анализ представленных методик исследования)
_____
_____

Оценка проектной части ВКР (практическая значимость исследования)
_____
_____

Логичность, четкость, грамотность изложения материала_____
_____

Оценка сформированности компетенций, предусмотренных федеральным государственным образовательным стандартом:

ВКР демонстрирует (высокий, средний, низкий) уровень сформированности универсальных компетенций и (высокий, средний, низкий) уровень сформированности общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

Замечания и рекомендации (к публикации, внедрению, представлению на конкурс) по ВКР_____
_____

Общая оценка ВКР_____

Рецензент: _____ Фамилия И.О.
(подпись)
«_____» _____ 20____г.

Обучающийся: _____ Фамилия И.О.
(подпись)
«_____» _____ 20____г.

М.П

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

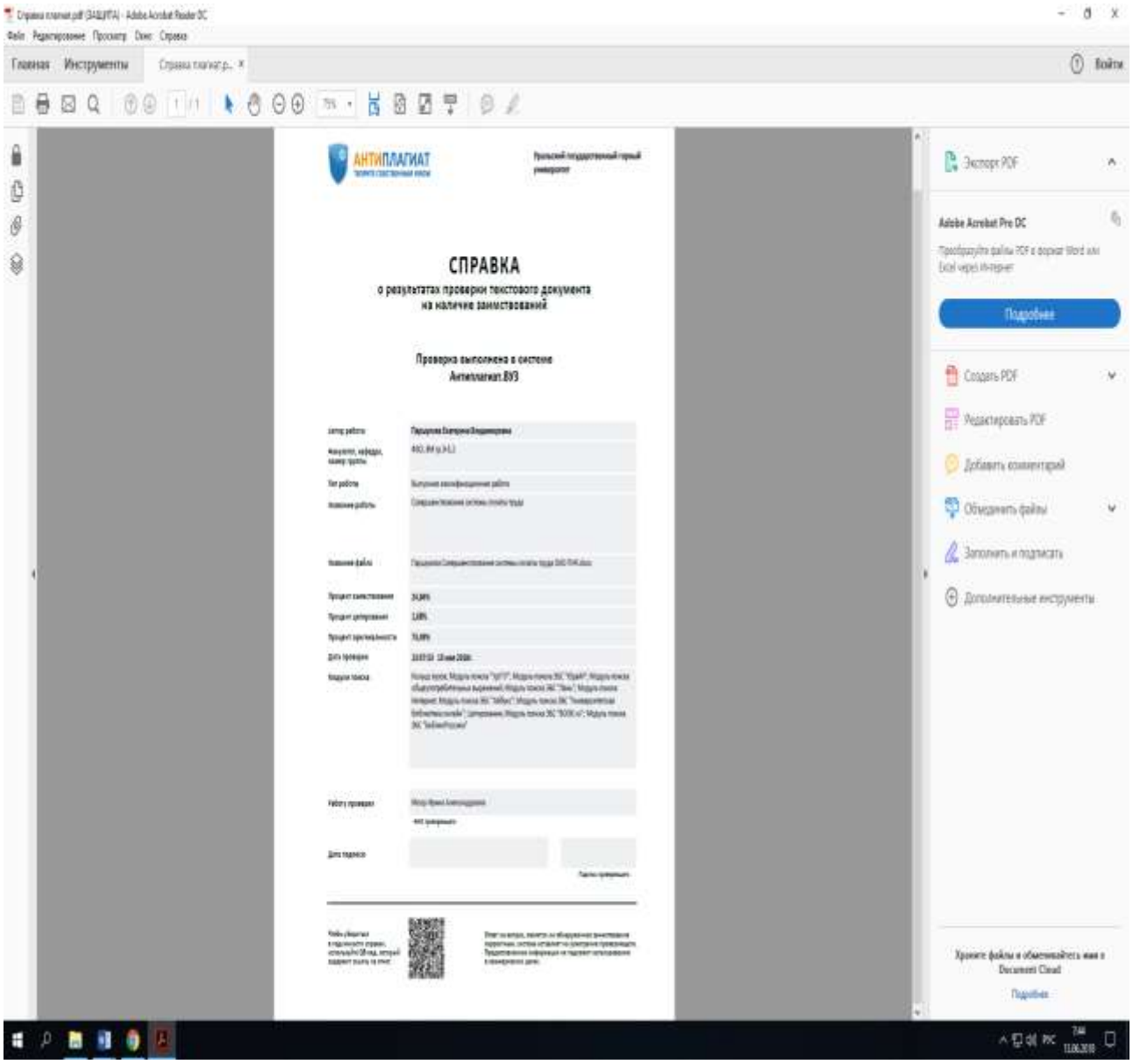
Пример оформления документа, подтверждающего использование результатов выпускной квалификационной работы

СПРАВКА
об использовании результатов выпускной квалификационной работы
на тему: «_____»

Выводы и предложения, представленные в работе Смирнова С.С. нашли применение в практической деятельности шахты «Центральная» ООО «Березовский рудник», в частности, при разработке интеллектуальной системы управления транспортной сети.

Рекомендации автора по совершенствованию интеллектуальной системы управления транспортной сети шахты взяты за основу при разработке перспективных планов развития горных работ в ООО «Березовский рудник».

Гл. инженер ООО «Березовский рудник» _____ И.О. Фамилия
(подпись)



АНТИПЛАГИАТ

СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Проверка выполнена в системе
Антиплагиат.ВУЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Пример структуры и оформления содержания выпускной квалификационной работы

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 …….	6
1.1 ……	6
1.2 …….	..
1.3 ……	..
2 ……	
2.1 ……	
2.2 …..	
Заключение	
Список использованных источников	
Приложения	

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Примеры библиографических описаний, применяемых при оформлении списка использованных источников

1. Об основополагающих принципах и правах в сфере труда и механизм её реализации [Текст]: Декларация МОТ от 18.06.1998 // МБТ.1998.

2. Конституция Российской Федерации [Электронный ресурс]: Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

3. Трудовой кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 30.12.2001 г. № 197-ФЗ (в ред. от 05.10.2015) – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

4. О безопасности [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 28.12.2010 г. № 390-ФЗ – Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». - Режим доступа: http://www.consultant.ru.

5. Об общих принципах организации законодательных (представительных) и исполнительных органов власти субъектов Российской Федерации [Текст]: Федеральный закон от 06.10.1999 г. № 184-ФЗ // Собрание законодательства РФ. - 1999. - № 43.

6. О концепции национальной безопасности Российской Федерации [Текст]: Указ Президента Российской Федерации от 10 января 2000 г. № 24 // Собрание законодательства РФ. - 2000. - № 2.- Ст.170.

7. О порядке разработки и утверждения административных регламентов исполнения государственных функций (предоставления государственных услуг) [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ от 11.11.2005 г. № 679. - Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: http://www.consultant.ru.

8. Булаевский, Б.А. Правовое положение несовершеннолетних по российскому гражданскому законодательству [Текст]: Автореф. дисс. … к.ю.н. М., 1998.

9. Гаврилов, Э. О наименовании юридического лица [Текст] / Э.О. Гаврилов // Хозяйство и право. - 2011. - № 12. - С. 3 – 11.

10. Мачульская, Е.Е. Право социального обеспечения [Текст]: учебник для бакалавров / Е.Е. Мачульская. – М.: Изд-во Юрайт, 2012. – 575 с.

11. Черткова, Е.Л. Утопия как способ постижения социальной действительности [Электронный ресурс] / Е.Л. Черткова // Социемы: журнал Уральского гос. ун-та. – 2002. - № 8. – Режим доступа: http://2www/usu.ru/philosoph/chertkova.

12. Цивилистические записки: [Текст]: Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 2. – М.: «Статут» - Екатеринбург: Институт частного права, 2002. – 511 с.

13. Юридический советник [Электронный ресурс]. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.; 12 см. – Прил.: Справочник пользователя [Текст]/ сост. В.А. Быков. – 32 с.

14. Временные методические рекомендации по вопросам реструктуризации бюджетной сферы и повышения эффективности расходов региональных и местных бюджетов (Краткая концепция реструктуризации государственного и муниципального сектора и повышения эффективности бюджетных расходов на региональном и местном уровнях) [Текст]. - М.: ИЭПП, 2006. - 67 с.

15. Свердловская область в 1992-1996 годах [Текст]: Стат. сб./ Свердл. обл. комитет гос. статистики Госкомстата РФ. – Екатеринбург, 1997. – 115 с.

16. Социальное положение и уровень жизни населения России в 2010 г. [Текст]: Стат. сб. / Росстат. – М., 2011. – 320 с.

17. Социально-экономическое положение федеральных округов в 2010 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.gks. Ru.

18. An Interview with Douglass C. North [Text] // The Newsletter of The Cliometric Society. - 1993. - Vol. 8. - N 3. - P. 23–28.

19. Burkhead, J. The Budget and Democratic Government [Text] / Lyden F.J., Miller E.G. (Eds.) / Planning, Programming, Budgeting. Markham: Chicago, 1972. 218 p.

20. Miller, D. Strategy Making and Structure: Analysis and Implications for Performance [Text] // Academy of Management Journal. - 1987. - Vol. 30. - N 1. - P. 45–51.

21. Министерство финансов Российской Федерации: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.minfin.ru.

22. Российская книжная палата: [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.bookchamber.ru.

23. Инструкция по делопроизводству в ООО «СК-групп» [Текст]. - Екатеринбург, 2012. – 26 с.

24. Бухгалтерский отчет ЗАО «ФНК» за 2012 год [Текст]. - Екатеринбург, 2013. – 14 с.

25. Правила внутреннего трудового распорядка АО «Маяк» [Текст]. - Екатеринбург, 2010. – 22 с.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.01 ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА

Направление
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией
Управления персоналом	Горно-механического факультета
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Беляева Е.А.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 06.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..…3

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ…….……..….6

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ……..…8

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ……..12

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ……...……...….13

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……...…..28

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям (в т.ч. подготовка к практико-ориентированным заданиям и др.).

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;

- уровень образования и степень подготовленности студентов;

- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим (семинарским) занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки, подготовка к выполнению практико-ориентированных заданий);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Особенности информационных технологий для людей с ограниченными возможностями.

Информационные технологии
Универсальный дизайн
Адаптивные технологии

Тема 2. Тифлотехнические средства/ Сурдотехнические средства/ Адаптивная компьютерная техника (Материал изучается по подгруппам в зависимости от вида ограничений здоровья обучающихся)

Брайлевский дисплей
Брайлевский принтер
Телевизионное увеличивающее устройство
Читающая машина
Экранные лупы
Синтезаторы речи
Ассистивные тифлотехнические средства
Ассистивные сурдотехнические средства
Адаптированная компьютерная техника
Ассистивные технические средства

Тема 3. Дистанционные образовательные технологии

Дистанционные образовательные технологии
Иинформационные объекты

Тема 4. Интеллектуальный труд и его значение в жизни общества

Система образования
Образовательная среда вуза
Интеллектуальный труд
Интеллектуальный ресурс
Интеллектуальный продукт

Тема 5. Развитие интеллекта – основа эффективной познавательной деятельности

Личностный компонент
Мотивационно-потребностный компонент
Интеллектуальный компонент
Организационно-деятельностный компонент
Гигиенический компонент
Эстетический компонент
Общеучебные умения
Саморегуляция

Тема 6. Самообразование и самостоятельная работа студента – ведущая форма умственного труда.

Самообразование
Самостоятельная работа студентов
Технологии интеллектуальной работы
Технологии групповых обсуждений

Тема 7. Технологии работы с информацией студентов с ОВЗ и инвалидов

Традиционные источники информации
Технологии работы с текстами
Технологии поиска, фиксирования, переработки информации
Справочно-поисковый аппарат книги
Техника быстрого чтения
Реферирование
Редактирование
Технология конспектирования
Методы и приемы скоростного конспектирования

Тема 8. Организация научно-исследовательской работы

Доклад
Реферат
Курсовая работа
Выпускная квалификационная работа
Техника подготовки работы
Методика работы над содержанием Презентация

Тема 9. Тайм-менеджмент

Время
Планирования времени
Приемы оптимизации распределения времени

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным;

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением,

содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;
- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении

конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование –наиболее сложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных задания от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их потребуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

1. В соответствии с опросником «Саморегуляция» (ОС) (модификация методики А.К. Осницкого) оцените свои качества, возможности, отношение к деятельности в протоколе (132 высказывания) по 4-х бальной шкале: 4 балла – да; 3 балла – пожалуй да; 2 балла – пожалуй нет; 1 балл – нет.

Текст опросника

1. Способен за дело приниматься без напоминаний.
2. Планирует, организует свои дела и работу.
3. Умеет выполнить порученное задание.
4. Хорошо анализирует условия.
5. Учитывает возможные трудности.
6. Умеет отделять главное от второстепенного.
7. Чаще всего избирает верный путь решения задачи.
8. Правильно планирует свои занятия и работу.
9. Пытается решить задачи разными способами.
10. Сам справляется с возникающими трудностями.
11. Редко ошибается, умеет оценить правильность действий.
12. Быстро обнаруживает свои ошибки.
13. Быстро находит новый способ решения.
14. Быстро исправляет ошибки.
15. Не повторяет ранее сделанных ошибок.
16. Продумывает свои дела и поступки.
17. Хорошо справляется и с трудными заданиям.
18. Справляется с заданиями без посторонней помощи.
19. Любит порядок.
20. Заранее знает, что будет делать.
21. Аккуратен и последователен.
22. Продумывает, все до мелочей.
23. Ошибается чаще из-за того, что смысл задания целом не понят, хотя все детали продуманы.
24. Старателен, хотя часто не выполняет заданий.
25. Долго готовится, прежде чем приступить к делу.
26. Избегает риска.
27. Сначала обдумывает, потом делает.
28. Решения принимает без колебаний.
29. Уверенный в себе.
30. Действует решительно, настойчив.
31. Предприимчивый, решительный.
32. Активный.
33. Ведущий.
34. Реализует почти все, что планирует.
35. Начатое дело доводит до конца.
36. Предпочитает действовать, а не обсуждать.

37. Обдумывает свои дела и поступки.
38. Анализирует свои ошибки и неудачи.
39. Планирует дела, рассчитывает свои силы.
40. Прислушивается к замечаниям.
41. Редко повторяет одну и ту же ошибку.
42. Знает о своих недостатках.
43. Сделает задание на совесть.
44. Как всегда сделает на отлично.
45. Для него важно качество, а не отметка.
46. Всегда проверяет правильность работы.
47. Старается довести дело до конца.
48. Стирается добиться лучших результатов.
49. Действует самостоятельно, мало советуясь с другими.
50. Предпочитает справляться с трудностями сам.
51. Может принять не зависимое от других решение.
52. Любит перемену в занятиях.
53. Легко переключается с одной работы на другую.
54. Хорошо ориентируется в новых условиях.
55. Аккуратен.
56. Внимателен.
57. Усидчив.
58. С неудачами и ошибками обычно справляется.
59. Неудачи активизируют его.
60. Старается разобраться в причинах неудач.
61. Умеет мобилизовать усилия.
62. Взвешивает все «за» и «против».
63. Старается придерживаться правил.
64. Всегда считается с мнением других.
65. Его нетрудно убедить в чем-то.
66. Прислушивается к замечаниям.
67. Нужно напоминать о том, что необходимо закончить дело.
68. Не планирует, мало организует свои дела, и работу.
69. Не выполняет заданий оттого, что отвлекается.
70. Условия анализирует плохо.
71. Не учитывает возможных трудностей.
72. Не умеет отделять главное от второстепенного.
73. Пути решения выбирает не лучшие.
74. Не умеет планировать работу и занятия.
75. Не пытается решать задачи разными способами.
76. Не может справиться с трудностями без помощи других.
77. Часто допускает ошибки в работе, часто их повторяет.
78. С трудом находит ошибки в своей работе.
79. С трудом находит новые способы решения.
80. С большим трудом и долго исправляет ошибки.

81. Повторяет одни и те же ошибки.
82. Часто поступает необдуманно, импульсивно.
83. С трудными заданиями справляется плохо.
84. Не справляется с заданием без напоминаний и помощи.
85. Не любит порядок.
86. Часто не знает заранее, что ему предстоит делать.
87. Непоследователен и неаккуратен.
88. Ограничивается лишь общими сведениями, общим впечатлением.
89. Ошибается чаще из-за того, что не продуманы мелочи, детали.
90. Не очень старателен, но задания выполняет.
91. Приступает к делу без подготовки.
92. Часто рискует, ищет приключений.
93. Сначала сделает, лотом подумает.
94. Решения принимает после раздумий и колебаний.
95. Часто сомневается в своих силах.
96. Нерешителен, небольшие помехи уже останавливают его.
97. Нерешительный.
98. Вялый, безучастный.
99. Ведомый.
100. Задумывает много, а делает мало.
101. Редко, когда начатое дело доводит до конца.
102. Предпочитает обсуждать, а не действовать.
103. Действует без раздумий, «с ходу».
104. Не анализирует ошибок.
105. Не планирует почти ничего, не рассчитывает своих сил.
106. Не прислушивается к замечаниям.
107. Часто повторяет одну и ту же ошибку.
108. Не хочет знать и исправлять свои недостатки.
109. Сделает «спустя рукава».
110. Сделает как получится.
111. Сделает из-за угрозы получения плохой оценки.
112. Не проверяет правильность результатов своих действий.
113. Часто бросает работу, не доделав ее.
114. Результат неважен – лишь бы поскорее закончить работу.
115. О его трудностях и делах знают почти все.
116. Всегда надеется на друзей, на их помощь.
117. Действует по принципу: как все, так и я!
118. Любит однообразные занятия.
119. С трудом переключается с одной работы на другую.
120. Плохо ориентируется в новых условиях.
121. Неаккуратен.
122. Невнимателен.
123. Неусидчив.
124. Ошибку может исправить, если его успокоить.

125. Неудачи быстро сбивают с толку.
126. Равнодушен к причинам неудач.
127. С трудом мобилизуется на выполнение задания.
128. Поступает необдуманно, импульсивно.
129. Не придерживается правил.
130. Не считается с мнением окружающих.
131. Его трудно убедить в чем-либо.
132. Не прислушивается к замечаниям.

Ключ для обработки и интерпретации данных

В тесте оценивается 132 характеристики саморегуляции. Они разбиты на тройки.

Всего 22 пары противоположных характеристик.

1. Целеполагание - 23. Неустойчивость целей.
2. Моделирование условий - 24. Отсутствие анализа условий.
3. Программирование действий - 25. Спонтанность действий.
4. Оценивание результатов - 26. Ошибки в работе.
5. Коррекции результатов и способ» действий - 27. Повторные ошибки.
6. Обеспеченность регуляции в целом - 28. Импульсивность.
7. Упорядоченность деятельности - 29. Непоследовательность, неаккуратность.
8. Детализация регуляции действий - 30. Поверхностность.
9. Осторожность в действиях - 31. Необдуманность, рискованность.
10. Уверенность в действиях - 32. Неуверенность в своих силах.
11. Инициативность в действиях - 33. Нерешительность.
12. Практическая реализуемость намерений - 34. Незавершенность дел.
13. Осознанность действий - 35. Действия наобум.
14. Критичность в делах и поступках -36. Равнодушие к недостаткам.
15. Ориентированность на оценочный балл -37. Попустительство.
16. Ответственность в делах и поступках - 38. Безответственность в делах.
17. Автономность - 39. Зависимость в действиях.
18. Гибкость, пластичность в действиях - 40. Инертность в работе.
19. Вовлечение полезных привычек в регуляцию действий - 41. «Плохиш».
20. Практичность, устойчивость в регуляции действий - 42. Равнодушие к ошибкам, неудачам.
21. Оптимальность (адекватность) регуляции усилий - 43. Отсутствие последовательности.
22. Податливость воспитательным воздействиям - 44. Самодостаточность.

Необходимо найти сумму в каждой из троек характеристик и сопоставить ее с их противоположностью.

4-6 баллов - слабое проявление характеристики.

7-9 баллов - ситуативное проявление.

10-12 баллов - выраженность характеристики.

Бланк для ответов

ФИ_____
Пол_____ Возраст (дата рождения)_____ Гр._____ Дата_____ № ___

Шкала ответов

4 – да; 3 – пожалуй да; 2 – пожалуй нет; 1 – нет.

№			S		№		S
1	1			23	67		
	2				68		
	3				69		
2	4			24	70		
	5				71		
	6				72		
3	7			25	73		
	8				74		
	9				75		
4	10			26	76		
	11				77		
	12				78		
5	13			27	79		
	14				80		
	15				81		
6	16			28	82		
	17				83		
	18				84		
7	19			29	85		
	20				86		
	21				87		
8	22			30	88		
	23				89		
	24				90		
9	25			31	91		
	26				92		
	27				93		

10	28			32	94	
	29				95	
	30				96	
11	31			33	97	
	32				98	
	33				99	
12	34			34	100	
	35				101	
	36				102	
13	37			35	103	
	38				104	
	39				105	
14	40			36	106	
	41				107	
	42				108	
15	43			37	109	
	44				ПО	
	45				111	
16	46			38	112	
	47				113	
	48				114	
17	49			39	115	
	50				116	
	51				117	
18	52			40	118	
	53				119	
	54				120	
19	55			41	121	
	56				122	
	57				123	
20	58			42	124	
	59				125	
	60				126	

21	61			43	127	
	62				128	
	63				129	
22	64			44	130	
	65				131	
	66				132	

Качественные характеристики саморегуляции

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
1	Целеполагание	За дело приниматься без напоминаний, планирует, организует свои дела и работу. Задания и поручения выполняет.	23	Неустойчивость целей	Не планирует, мало организует свою работу. Нужно напоминать о том, что необходимо закончить дело. Отвлекается.
2	Моделирование условий	Анализирует условия предстоящей деятельности, возможные трудности. Выделяет главное.	24	Отсутствие анализа условий	Не умеет отделять главное от второстепенного. Не предвидит ход дел, возможные трудности.
3	Программирование действий	Правильно планирует свои занятия и работу, избирает верный путь решения задачи.	25	Спонтанность действий	Не умеет планировать работу в занятия, затрудняется в выборе путей решения задач.
4	Оценивание результатов	Редко ошибается, умеет оценить правильность действий. Быстро обнаруживает свои ошибки.	26	Ошибки в работе	Часто допускает ошибки в работе, часто их повторяет. Не находит ошибок в своей работе.
5	Коррекция результатов и способов действий	Быстро находит новый способ решения. Быстро исправляет ошибки.	27	Повторные ошибки	С трудом находит новые способы решения. Повторяет одни и те же ошибки.
6	Обеспеченность регуляции в целом	Продумывает свои дела и поступки. Справляется с заданиями без посторонней помо-	28	Импульсивность	Часто поступает необдуманно, импульсивно. С трудными заданиями справляется плохо.

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции	№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
		щи.			
7	Упорядоченность деятельности	Любит порядок. Аккуратен и последователен.	29	Непоследовательность	Часто не знает заранее, что ему предстоит делать, непоследователен и неаккуратен.
8	Детализация регуляции действий	Продумывает, все до мелочей. Ошибается чаще из-за того, что смысл задания целом не понят, хотя все детали продуманы.	30	Поверхностность	Ограничивается лишь общими сведениями, общим впечатлением. Ошибается чаще из-за того, что не продуманы мелочи, детали.
9	Осторожность в действиях	Долго обдумывает и готовится, прежде чем приступить к делу. Избегает риска.	31	Необдуманность, рискованность	Приступает к делу без подготовки. Сначала сделает, лотом подумает.
10	Уверенность в действиях	Уверенный в себе. Решения принимает без колебаний. Решителен. Настойчив.	32	Неуверенность в своих силах	Решения принимает после колебаний. Сомневается в своих силах. Нерешителен.
11	Инициативен в действиях.	Предприимчивый, решительный. Активный. Ведущий.	33	Нерешительность	Нерешительный. Вялый, безучастный. Ведомый.
12	Практическая реализуемость намерений	Реализует почти все, что планирует. Начатое дело доводит до конца.	34	Незавершенность дел	Редко, когда начатое дело доводит до конца. Предпочитает обсуждать, а не действовать.
13	Осознанность действий	Обдумывает, планирует свои дела и поступки. Анализирует свои ошибки и неудачи.	35	Действия наобум	Действует без раздумий, «с ходу», не рассчитывает своих сил.
14	Критичность в делах и поступках	Знает о своих недостатках. Редко повторяет ошибки. Прислушивается к замечаниям.	36	Равнодушие к недостаткам	Часто повторяет одну и ту же ошибку. Не хочет знать и исправлять свои недостатки.

№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции		№	Качества саморегуляции	Содержательные характеристики саморегуляции
15	Ориентированность на оценочный балл	Сделает задание на совесть. Для него важно качество, а не отметка.		37	Попустительство	Делает все «спустя рукава», как получится. Делает из-за угрозы плохой оценки.
16	Ответственность в делах и поступках	Гарантирует доведение дел до конца. Всегда проверяет правильность работы.		38	Безответственность в делах	Не проверяет результатов своих действий. Часто бросает работу, не доделав до конца.
17	Автономность	Действует и принимает самостоятельные решения. Предпочитает сам справляться с трудностями.		39	Зависимость в действиях	Всегда надеется на друзей, на их помощь.
18	Гибкость, пластичность в действиях	Легко переключается с одной работы на другую. Хорошо ориентируется в новых условиях.		40	Инертность в работе	Любит однообразные занятия. С трудом переключается с одной работы на другую.
19	Вовлечение полезных привычек в регуляцию действий	Аккуратен. Внимателен. Усидчив.		41	«Плохиш»	Неаккуратен. Невнимателен. Неусидчив.
20	Практичность, устойчивость в регуляции действий	Справляется с неудачами и ошибками. Неудачи активизируют его. Старается разобраться в их причинах.		42	Равнодушие к ошибкам, неудачам	Неудачи быстро сбивают с толку. Равнодушен к их причинам.
21	Оптимальность (адекватность) регуляции усилий	Взвешивает все «за» и «против». Умеет мобилизовать усилия.		43	Отсутствие последовательности	Поступает необдуманно. С трудом мобилизуется на выполнение задания.
22	Податливость воспитательным воздействиям	Всегда считается с мнением других. Прислушивается к замечаниям.		44	Самодостаточность	Не считается с мнением окружающих. Не прислушивается к замечаниям.

Задание: На основе самодиагностики саморегуляции сформулируйте рекомендации по саморегуляции.

2. Выберите научную статью по своей специальности и напишите к ней аннотацию, реферат, конспект, рецензию.

Методические указания

АННОТАЦИЯ (от лат. annotatio - замечание, пометка) – это краткая характеристика статьи, рукописи, книги, в которой обозначены тема, проблематика и назначение издания, а также содержатся сведения об авторе и элементы оценки книги.

Перед текстом аннотации даются выходные данные (автор, название, место и время издания). Эти данные можно включить в первую часть аннотации.

Аннотация обычно состоит из двух частей. В первой части формулируется основная тема книги, статьи; во второй части перечисляются (называются) основные положения. Говоря схематично, аннотация на книгу (прежде всего научную или учебную) отвечает на вопросы о чем? из каких частей? как? для кого? Это ее основные, стандартные смысловые элементы. Каждый из них имеет свои языковые средства выражения.

Аннотация на книгу помещается на оборотной стороне ее титульного листа и служит (наряду с ее названием и оглавлением) источником информации о содержании работы. Познакомившись с аннотацией, читатель решает, насколько книга может быть ему нужна. Кроме того, умение аннотировать прочитанную литературу помогает овладению навыками реферирования.

Языковые стереотипы, с помощью которых оформляется каждая смысловая часть аннотации:

1. Характеристика содержания текста:

В статье (книге) рассматривается…; Статья посвящена…; В статье даются…; Автор останавливается на следующих вопросах…; Автор затрагивает проблемы…; Цель автора – объяснить (раскрыть)…; Автор ставит своей целью проанализировать…;

2. Композиция работы:

Книга состоит из … глав (частей)…; Статья делится на … части; В книге выделяются … главы.

3. Назначение текста:

Статья предназначена (для кого; рекомендуется кому)…; Сборник рассчитан…; Предназначается широкому кругу читателей…; Для студентов, аспирантов…; Книга заинтересует…

РЕФЕРАТ (от лат.referre- докладывать, сообщать) – это композиционно организованное, обобщенное изложение содержания источника информации (статьи, ряда статей, монографии и др.). Реферат отвечает на вопрос: «Какая информация содержится в первоисточнике, что излагается в нем?»

Реферат состоит из трех частей: общая характеристика текста (выходные данные, формулировка темы); описание основного содержания; выводы референта. Изложение одной работы обычно содержит указание на тему и композицию реферируемой работы, перечень ее основных положений с приведением аргументации, реже - описание методики и проведение эксперимента, результатов и выводов исследования. Такой реферат называется про-

стым информационным. Студенты в российских вузах пишут рефераты обычно на определенные темы. Для написания таких тематических рефератов может быть необходимо привлечение более чем одного источника, по крайней мере двух научных работ. В этом случае реферат является не только информационным, но и обзорным.

Реферирование представляет собой интеллектуальный творческий процесс, включающий осмысление текста, аналитико-синтетичесокое преобразование информации и создание нового текста. Реферат не должен превращаться в «ползанье» по тексту. Цель реферирования – создать «текст о тексте». Реферат – это не конспект, разбавленный «скрепами» типа *далее автор отмечает…* Обильное цитирование превращает реферат в конспект. При чтении научного труда важно понять его построение, выделить смысловые части (они будут основой для плана), обратить внимание на типичные языковые средства (словосочетания, вводные конструкции), характерные для каждой части. В реферате должны быть раскрыты проблемы и основные положения работы, приведены доказательства этих положений и указаны выводы, к которым пришел автор. Реферат может содержать оценочные элементы, например: *нельзя не согласиться, автор удачно иллюстрирует* и др. Обратите внимание, что в аннотации проблемы научного труда лишь обозначаются, а в реферате - раскрываются.

Список конструкций для реферативного изложения**:**

Предлагаемая вниманию читателей статья (книга, монография) представляет собой детальное (общее) изложение вопросов…; Рассматриваемая статья посвящена теме (проблеме, вопросу…);

Актуальность рассматриваемой проблемы, по словам автора, определяется тем, что…; Тема статьи (вопросы, рассматриваемые в статье) представляет большой интерес…; В начале статьи автор дает обоснование актуальности темы (проблемы, вопроса, идеи); Затем дается характеристика целей и задач исследования (статьи);

Рассматриваемая статья состоит из двух (трех) частей…; Автор дает определение (сравнительную характеристику, обзор, анализ)…; Затем автор останавливается на таких проблемах, как…; Автор подробно останавливается на истории возникновения (зарождения, появления, становления)…; Автор подробно (кратко) описывает (классифицирует, характеризует) факты…; Автор доказывает справедливость (опровергает что-либо)…; Автор приводит доказательства справедливости своей точки зрения…; В статье дается обобщение…, приводятся хорошо аргументированные доказательства…;

В заключение автор говорит о том, что…; Несомненный интерес представляют выводы автора о том, что…; Наиболее важными из выводов автора представляются следующие…; Изложенные (рассмотренные) в статье вопросы (проблемы) представляют интерес не только для…, но и для…

КОНСПЕКТИРОВАНИЕ – письменная фиксация основных положений читаемого или воспринимаемого на слух текста. При конспектировании происходит свертывание, компрессия первичного текста.

КОНСПЕКТ- это краткое, но связное и последовательное изложение значимого содержания статьи, лекции, главы книги, учебника, брошюры. Запись-конспект позволяет восстановить, развернуть с необходимой полнотой исходную информацию, поэтому при конспектировании надо отбирать новый и важный материал и выстраивать его в соответствии с логикой изложения. В конспект заносят основные (существенные) положения, а также фактический материал (цифры, цитаты, примеры). В конспекте последующая мысль должна вытекать из предыдущей (как в плане и в тезисах). Части конспекта должны быть связаны внутренней логикой, поэтому важно отразить в конспекте главную мысль каждого абзаца. Содержание абзаца (главная мысль) может быть передано словами автора статьи (возможно сокращение высказывания) или может быть изложено своими словами более обобщенно. При конспектировании пользуются и тем и другим приемом, но важно передать самые главные положения автора без малейшего искажения смысла.

Различают несколько видов конспектов в зависимости от степени свернутости первичного текста, от формы представления основной информации:

1. конспект-план;
2. конспект-схема;
3. текстуальный конспект.

Подготовка конспекта включает следующие этапы:

1. Вся информация, относящаяся к одной теме, собирается в один блок – так выделяются смысловые части.
2. В каждой смысловой части формулируется тема в опоре на ключевые слова и фразы.
3. В каждой части выделяется главная и дополнительная по отношению к теме информация.
4. Главная информация фиксируется в конспекте в разных формах: в виде тезисов (кратко сформулированных основных положений статьи, доклада), выписок (текстуальный конспект), в виде вопросов, выявляющих суть проблемы, в виде назывных предложений (конспект-план и конспект-схема).
5. Дополнительная информация приводится при необходимости.

РЕЦЕНЗИЯ - это письменный критический разбор какого-либо произведения, предполагающий, во-первых, комментирование основных положений (толкование авторской мысли; собственное дополнение к мысли, высказанной автором; выражение своего отношения к постановке проблемы и т.п.); во-вторых, обобщенную аргументированную оценку, в третьих, выводы о значимости работы.

В отличие от рецензии ОТЗЫВ дает самую общую характеристику работы без подробного анализа, но содержит практические рекомендации: анализируемый текст может быть принят к работе в издательстве илина соискание ученой степени.

Типовой план для написания рецензии и отзывов:

1. Предмет анализа: *В работе автора…; В рецензируемой работе…; В предмете ана*лиза…

2. Актуальность темы: Работа посвящена актуальной теме…; Актуальность темы обусловлена…; Актуальность темы не вызывает сомнений (вполне очевидна)…

3. Формулировака основного тезиса: Центральным вопросом работы, где автор добился наиболее существенных (заметных, ощутимых) результатов, является…; В работе обоснованно на первый план выдвигается вопрос о…

4. Краткое содержание работы.

5. Общая оценка: Оценивая работу в целом…; Таким образом, рассматриваемая работа…; Автор проявил умение разбираться в…; систематизировал материал и обобщил его…; Безусловной заслугой автора является новый методический подход (предложенная классификация, некоторые уточнения существующих понятий); Автор, безусловно, углубляет наше представление об исследуемом явлении, вскрывает новые его черты…

6. Недостатки, недочеты: Вместе с тем вызывает сомнение тезис о том…; К недостаткам (недочетам) работы следует отнести допущенные автором длинноты в изложении (недостаточную ясность при изложении)…; Работа построена нерационально, следовало бы сократить…; Существенным недостатком работы является…; Отмеченные недостатки носят чисто локальный характер и не влияют на конечные результаты работы…; Отмеченные недочеты работы не снижают ее высокого уровня, их скорее можно считать пожеланиями к дальнейшей работе автора…; Упомянутые недостатки связаны не столько с…, сколько с…

7. Выводы: Представляется, что в целом работа… имеет важное значение…; Работа может быть оценена положительно, а ее автор заслуживает…; Работа заслуживает высокой (положительной, отличной) оценки…; Работа удовлетворяет всем требованиям…, а ее автор, безусловно, имеет (определенное, законное, заслуженное, безусловное) право…

Задание

а) Выберите научную статью по своей специальности и напишите к ней аннотацию, реферат, конспект, рецензию.

3. Проанализируйте отрывок из студенческой курсовой работы, посвященной проблеме связи заголовка и текста. Соответствует ли язык сочинения нормам научного стиля? На основании анализа проведите правку текста:

Заголовок, будучи неотъемлемой частью газетных публикаций, определяет лицо всей газеты. Сталкиваясь с тем или иным периодическим изданием, читатель получает первую информацию о нем именно из заголовков. На примере газеты «Спорт – экспресс» за апрель – май 1994 г. я рассмотрю связь: заголовок – текст, ведь, как говорится в народной мудрости «встречают по одежке, а провожают – по уму». Но даже при наличии прекрасной одежки (заглавий) и величайшего ума (самих материалов) стилистическая концепция газеты будет не полной, если будет отсутствовать продуманная и логичная связь между содержанием и заголовком. Итак, стараясь выбрать наиболее продуманные заглавия,

я попытаюсь проследить за тем, по какому принципу строится связь между содержанием и заголовком самой популярной спортивной газеты России «Спорт – экспресс». А к тому же я остановлюсь и на классификации заголовков по типу их связей с газетным текстом вообще.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Технологии интеллектуального труда*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Технологии интеллектуального труда*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.02 СРЕДСТВА КОММУНИКАЦИИ В УЧЕБНОЙ И ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Направление

15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль

Мехатроника и робототехника промышленных производств

Автор: Полянок О.В., к.пс.н.

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией
Управления персоналом	Горно-механического факультета
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Беляева Е.А.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 06.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….……..…3

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ……..…..….6

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ…….…..…8

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ……12

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ……...…….…14

ПОДГОТОВКА РЕФЕРАТА……...….36

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ……..…..45

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной и научной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества бакалавра и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям (в т.ч. подготовка к практико-ориентированным заданиям и др.).

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;

- уровень образования и степень подготовленности студентов;

- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим (семинарским) занятиям (в т.ч. подготовка к выполнению практико-ориентированных заданий, подготовка реферата);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Сущность коммуникации в разных социальных сферах. Основные функции и виды коммуникации

Коммуникации
Межличностное общение
Речевые способности
Профессиональное общение

Тема 2. Специфика вербальной и невербальной коммуникации

Вербальная коммуникация
Невербальная коммуникация

Тема 3. Эффективное общение

Эффективное общение
Обратная связь
Стиль слушания

Тема 4. Основные коммуникативные барьеры и пути их преодоления в межличностном общении. Стили поведения в конфликтной ситуации

Конфликт
Барьер речи

Тема 5. Виды и формы взаимодействия студентов в условиях образовательной организации

Группа
Коллектив
Групповое давление
Феномен группомыслия
Феномен подчинения авторитету
Обособление
Диктат
Подчинение
Вызов
Выгода
Соперничество
Сотрудничество
Взаимодействие

Взаимопонимание

Тема 6. Формы, методы, технологии самопрезентации
Самопрезенгация
Публичное выступление

САМООРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ЛИТЕРАТУРОЙ

Самостоятельное изучение тем курса осуществляется на основе списка рекомендуемой литературы к дисциплине. При работе с книгой необходимо научиться правильно ее читать, вести записи. Самостоятельная работа с учебными и научными изданиями профессиональной и общекультурной тематики– это важнейшее условие формирования научного способа познания.

Основные приемы работы с литературой можно свести к следующим:

• составить перечень книг, с которыми следует познакомиться;

• перечень должен быть систематизированным;

• обязательно выписывать все выходные данные по каждой книге (при написании курсовых и выпускных квалификационных работ это позволит экономить время);

• определить, какие книги (или какие главы книг) следует прочитать более внимательно, а какие – просто просмотреть;

• при составлении перечней литературы следует посоветоваться с преподавателями, которые помогут сориентироваться, на что стоит обратить большее внимание, а на что вообще не стоит тратить время;

• все прочитанные монографии, учебники и научные статьи следует конспектировать, но это не означает, что надо конспектировать «все подряд»: можно выписывать кратко основные идеи автора и иногда приводить наиболее яркие и показательные цитаты (с указанием страниц);

• если книга – собственная, то допускается делать на полях книги краткие пометки или же в конце книги, на пустых страницах просто сделать свой «предметный указатель», где отмечаются наиболее интересные мысли и обязательно указываются страницы в тексте автора;

• следует выработать способность «воспринимать» сложные тексты; для этого лучший прием – научиться «читать медленно», когда понятно каждое прочитанное слово (а если слово незнакомое, то либо с помощью словаря, либо с помощью преподавателя обязательно его узнать). Таким образом, чтение текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации.

От того, насколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия. Грамотная работа с книгой, особенно если речь идет о научной литературе, предполагает соблюдение ряда правил, для овладения которыми необходимо настойчиво учиться. Это серьёзный, кропотливый труд. Прежде всего, при такой работе

невозможен формальный, поверхностный подход. Не механическое заучивание, не простое накопление цитат, выдержек, а сознательное усвоение прочитанного, осмысление его, стремление дойти до сути – вот главное правило. Другое правило – соблюдение при работе над книгой определенной последовательности. Вначале следует ознакомиться с оглавлением, содержанием предисловия или введения. Это дает общую ориентировку, представление о структуре и вопросах, которые рассматриваются в книге.

Следующий этап – чтение. Первый раз целесообразно прочитать книгу с начала до конца, чтобы получить о ней цельное представление. При повторном чтении происходит постепенное глубокое осмысление каждой главы, критического материала и позитивного изложения; выделение основных идей, системы аргументов, наиболее ярких примеров и т.д. Непременным правилом чтения должно быть выяснение незнакомых слов, терминов, выражений, неизвестных имен, названий. Студентам с этой целью рекомендуется заводить специальные тетради или блокноты. Важная роль в связи с этим принадлежит библиографической подготовке студентов. Она включает в себя умение активно, быстро пользоваться научным аппаратом книги, справочными изданиями, каталогами, умение вести поиск необходимой информации, обрабатывать и систематизировать ее.

Выделяют четыре основные установки в чтении текста:

- информационно-поисковая (задача – найти, выделить искомую информацию);
- усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить, как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений);
- аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему);
- творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к тексту связано существование и нескольких видов чтения:

- библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
- просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
- ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц; цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
- изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять

изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

- аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач.

Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым, или, в связи с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной и научной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках образовательной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с текстом. Научная методика работы с литературой предусматривает также ведение записи прочитанного. Это позволяет привести в систему знания, полученные при чтении, сосредоточить внимание на главных положениях, зафиксировать, закрепить их в памяти, а при необходимости вновь обратиться к ним.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения.

Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала.

Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала.

Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора.

Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного. Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Как правильно составлять конспект? Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта. Выделите главное, составьте план, представляющий собой перечень заголовков, подзаголовков, вопросов, последовательно раскрываемых затем в конспекте. Это первый элемент конспекта. Вторым элементом конспекта являются тезисы. Тезис - это кратко сформулированное положение. Для лучшего усвоения и запоминания материала следует записывать тезисы своими словами. Тезисы, выдвигаемые в конспекте, нужно доказывать. Поэтому третий элемент конспекта - основные доводы, доказывающие истинность рассматриваемого тезиса. В конспекте могут быть положения и примеры. Законспектируйте материал, четко следуя

пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Конспектирование –наиболеесложный этап работы. Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы. Конспект ускоряет повторение материала, экономит время при повторном, после определенного перерыва, обращении к уже знакомой работе. Учитывая индивидуальные особенности каждого студента, можно дать лишь некоторые, наиболее оправдавшие себя общие правила, с которыми преподаватель и обязан познакомить студентов:

1. Главное в конспекте не объем, а содержание. В нем должны быть отражены основные принципиальные положения источника, то новое, что внес его автор, основные методологические положения работы. Умение излагать мысли автора сжато, кратко и собственными словами приходит с опытом и знаниями. Но их накоплению помогает соблюдение одного важного правила – не торопиться записывать при первом же чтении, вносить в конспект лишь то, что стало ясным.

2. Форма ведения конспекта может быть самой разнообразной, она может изменяться, совершенствоваться. Но начинаться конспект всегда должен с указания полного наименования работы, фамилии автора, года и места издания; цитаты берутся в кавычки с обязательной ссылкой на страницу книги.

3. Конспект не должен быть «слепым», безликим, состоящим из сплошного текста. Особо важные места, яркие примеры выделяются цветным подчеркиванием, взятием в рамочку, оттенением, пометками на полях специальными знаками, чтобы можно было быстро найти нужное положение. Дополнительные материалы из других источников можно давать на полях, где записываются свои суждения, мысли, появившиеся уже после составления конспекта.

ПОДГОТОВКА К ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫМ ЗАДАНИЯМ

Практико-ориентированные задания выступают средством формирования у студентов системы интегрированных умений и навыков, необходимых для освоения профессиональных компетенций. Это могут быть ситуации, требующие применения умений и навыков, специфичных для соответствующего профиля обучения (знания содержания предмета), ситуации, требующие организации деятельности, выбора её оптимальной структуры личностно-ориентированных ситуаций (нахождение нестандартного способа решения).

Кроме этого, они выступают средством формирования у студентов умений определять, разрабатывать и применять оптимальные методы решения профессиональных задач. Они строятся на основе ситуаций, возникающих на различных уровнях осуществления практики и формулируются в виде производственных поручений (заданий).

Под практико-ориентированными заданиями понимают задачи из окружающей действительности, связанные с формированием практических навыков, необходимых в повседневной жизни, в том числе с использованием элементов производственных процессов.

Цель практико-ориентированных заданий – приобретение умений и навыков практической деятельности по изучаемой дисциплине.

Задачи практико-ориентированных заданий:

- закрепление, углубление, расширение и детализация знаний студентов при решении конкретных задач;
- развитие познавательных способностей, самостоятельности мышления, творческой активности;
- овладение новыми методами и методиками изучения конкретной учебной дисциплины;
- обучение приемам решения практических задач;
- выработка способности логического осмысления полученных знаний для выполнения заданий;
- обеспечение рационального сочетания коллективной и индивидуальной форм обучения.

Важными отличительными особенностями практико-ориентированных задания от стандартных задач (предметных, межпредметных, прикладных) являются:

- значимость (познавательная, профессиональная, общекультурная, социальная) получаемого результата, что обеспечивает познавательную мотивацию обучающегося;
- условие задания сформулировано как сюжет, ситуация или проблема, для разрешения которой необходимо использовать знания из разных разделов основного предмета, из другого предмета или из жизни, на которые нет явного указания в тексте задания;

- информация и данные в задании могут быть представлены в различной форме (рисунок, таблица, схема, диаграмма, график и т.д.), что потребует распознавания объектов;

- указание (явное или неявное) области применения результата, полученного при решении задания.

Кроме выделенных четырех характеристик, практико-ориентированные задания имеют следующие:

1. по структуре эти задания – нестандартные, т.е. в структуре задания не все его компоненты полностью определены;

2. наличие избыточных, недостающих или противоречивых данных в условии задания, что приводит к объемной формулировке условия;

3. наличие нескольких способов решения (различная степень рациональности), причем данные способы могут быть неизвестны учащимся, и их потребуется сконструировать.

При выполнении практико-ориентированных заданий следует руководствоваться следующими общими рекомендациями:

- для выполнения практико-ориентированного задания необходимо внимательно прочитать задание, повторить лекционный материал по соответствующей теме, изучить рекомендуемую литературу, в т.ч. дополнительную;

- выполнение практико-ориентированного задания включает постановку задачи, выбор способа решения задания, разработку алгоритма практических действий, программы, рекомендаций, сценария и т. п.;

- если практико-ориентированное задание выдается по вариантам, то получить номер варианта исходных данных у преподавателя; если нет вариантов, то нужно подобрать исходные данные самостоятельно, используя различные источники информации;

- для выполнения практико-ориентированного задания может использоваться метод малых групп. Работа в малых группах предполагает решение определенных образовательных задач в рамках небольших групп с последующим обсуждением полученных результатов. Этот метод развивает навыки сотрудничества, достижения компромиссного решения, аналитические способности.

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Организуйте коллективную сетевую деятельность.

Методические указания:

Под организацией **коллективной сетевой деятельности** понимают совместные действия нескольких пользователей в сети электронных коммуникаций, направленные на получение информации. Участники совместной сетевой деятельности могут быть объединены общими целями, интересами, что позволяет им обмениваться мнениями, суждениями, а также совершать действия с различными объектами, такими как фотографии, программы, записи, статьи, представленными в цифровом виде.

Подобное взаимодействие может заключаться в различных его видах, таких как:

- - общение;
- - обмен данными;
- - организация трудовой деятельности;
- - совместное времяпрепровождение за сетевыми развлечениями.

Рассмотрим каждый из них. Одним из примеров организации **общения** в сети

Интернет могут служить популярные на сегодняшний день сообщества **Livejournal** (www.livejoumal.ru), **Facebook** (www.facebook.com), **Twitter** (http://t witter.com) и др.

По своей сути это социальные сети, которые работают в режиме реального времени, позволяя участникам взаимодействовать друг с другом. Так, социальная сеть Livejournal (Живой журнал) предоставляет возможность публиковать свои и комментировать чужие записи, вести коллективные блоги («сообщества»), получать оперативную информацию, хранить фотографии и видеоролики, добавлять в друзья других пользователей и следить за их записями в «ленте друзей» и др.

Facebook позволяет создать профиль с фотографией и информацией о себе, приглашать друзей, обмениваться с ними сообщениями, изменять свой статус, оставлять сообщения на своей и чужой «стенах», загружать фотографии и видеозаписи, создавать группы (сообщества по интересам).

Система Twitter позволяет пользователям отправлять короткие текстовые заметки, используя web-интерфейс, sms-сообщения, средства мгновенного обмена сообщениями (например, Windows Live Messenger), сторонние программы-клиенты. Отличительной особенностью Твиттера является публичная доступность размещенных сообщений, что роднит его с **блогами** (онлайн-дневник, содержимое которого, представляет собой регулярно обновляемые записи — **посты).**

Другим способом общения, безусловно, является **электронная почта.** Принципы создания ящика электронной почты подробно рассматривались в практикуме параграфа 2.12. При всех своих плюсах электронная почта не позволяет организовать двусторонний оперативный диалог, максимально приближенный к обычному разговору. Отправив письмо, человек уверен, что оно оперативно будет доставлено в ящик адресата, но будет ли получен быстрый ответ? Кроме того, переписка может растянуться, что сводит к минимуму решение возможных актуальных проблем человека в настоящий момент времени.

Именно поэтому возникла необходимость в самостоятельном классе программ, которые выполняли бы две основные задачи:

- 1. Показать, находится ли собеседник в данный момент в сети Интернет, готов ли он общаться.
- 2. Отправить собеседнику короткое сообщение и тут же получить от него ответ.

Такие программы получили название IMS (англ. Instant Messengers Service —

служба мгновенных сообщений). Часто такие программы называют **интернет-пейджерами.** В качестве примера подобных программ можно привести Windows Live Messenger, Yahoo!Messenger, ICQ.

Так, программа Windows Live Messenger является одним из компонентов Windows Live — набора сетевых служб от компании Microsoft. Ранее мы познакомились с такими его модулями, как Семейная безопасность и Киностудия. Доступ к Messenger можно получить по адресу http://download.ru.msn.com/ wl/messenger, либо через кнопку **Пуск** на своем персональном компьютере (предварительно установив основные компоненты службы Windows Live).

В настоящее время произошла интеграция Messenger и программы Skype, функции которой будут рассмотрены позже.

Чтобы начать «разговор», достаточно выполнить двойной щелчок мыши на имени собеседника и ввести сообщение в соответствующее окно. Если друга нет на месте, можно оставить ему сообщение, и он увидит его, когда снова войдет в программу.

Коммуникацию в реальном масштабе времени возможно осуществить с помощью **чатов** (англ. Chatter — болтать). Если ваш компьютер оснащен видеокамерой, вы сможете начать видеочат. Одной из наиболее интересных особенностей видео- чата в Messenger является то, что он позволяет делать через Интернет все, что ранее можно было делать только при личном общении. Например, можно легко обмениваться фотографиями и видеть, как собеседник реагирует на них.

Теперь рассмотрим, каким образом можно организовать коллективную сетевую деятельность, связанную с **обменом данными.** Сразу отметим, что для передачи или открытия доступа к файлам в локальной сети используются стандартные возможности операционной системы компьютера. Для этого достаточно в настройках определенной директории открыть общий доступ на чтение или запись другими пользователями сети.

В настоящее время популярнейшим способом обмена данными является размещение файлов на различных видеохостингах и в социальных сетях. **Хостинг** — это услуга по предоставлению вычислительных мощностей для размещения информации на сервере, постоянно находящемся в сети Интернет. Для размещения видеофайлов, как правило, используются такие крупные видеохос- тинги, как YouTube (www.youtube.com), Rutube (http://mtube.ru). Социальные сети, например Одноклассники (www.odnoklassniki.rn), ВКонтакте (http://vk.com) и др., также можно использовать для размещения видеофотоматериалов.

Хранение, обмен файлов возможно организовать и с помощью облачных сервисов, таких как Яндекс.Диск, SkyDrive, iCloud и т.д. Перечислим ряд достоинств подобного способа организации работы:

- не требуется денежных вложений - сервисы бесплатны;
- возможность резервного хранения данных;
- доступность информации из любой точки мира с разных устройств, подключенных к Интернету;
- пользователь самостоятельно определяет доступность к файлам другим людям;
- большой размер облачного хранилища (7-10 Гб);
- информация не привязана к одному компьютеру;
- доступ к файлам, хранящимся на устройствах с разными аппаратными платформами (Windows, Android, iOS).

В качестве примера рассмотрим работу с программой Яндекс.Диск, которую предварительно следует установить на свой компьютер с адреса http://disk. yandex.ru/download. После инсталляции программы на вашем устройстве создается папка Яндекс.Диск, в которой будет находиться ряд папок, таких как Документы, Музыка, Корзина. Теперь, после того как мы добавим, изменим или удалим файл в папке Яндекс.Диск на своем компьютере, то же самое автоматически произойдет на серверах Яндекс, т. е. происходит процесс синхронизации.

Поделиться файлом с друзьями через web-интерфейс можно, выполнив следующие действия:

1. Зайти в свой почтовый ящик на сервисе Яндекс.

2. Выполнив команду **Файлы/Документы,** выделить нужный файл из списка.

3. Установить переключатель на панели предпросмотра в положение **Публичный** и нажать на одну из кнопок, расположенных ниже, что гарантирует публикацию ссылки на файл в одной из социальных сетей (ВКонтакте, Facebook и т.д.) либо отправку по электронной почте (рис. 1).



Рис. 1. Ссылка на файл

Другой возможностью публикации ссылки на файл - получение ее через ОС Windows. В этом случае порядок действий следующий:

- 1. Открыть папку Яндекс.Диск.
- 2. Выполнить щелчок правой кнопкой мыши на нужном файле.
- 3. В контекстном меню выбрать пункт **Яндекс.Диск: Скопировать публичную ссылку.**

Теперь в буфере обмена находится ссылка на файл, например, http://yadi.Sk/d/91nV8FjiOYnX, с которой вы можете поделиться со своими друзьями.

Перейдем к описанию организации **трудовой деятельности** как способа совместного сетевого взаимодействия. Она может выглядеть самой разной, от простого общения в видеоконференциях, заканчивая использованием серьезных корпоративных решений для управления рабочим процессом в компании. Примерами таких решений являются:

1. 1С-Битрикс: Корпоративный Портал (http://www.lc-bitrix.ru/products/

intranet/) — система управления внутренним информационным ресурсом компании для коллективной работы над задачами, проектами и документами.

2. Мегаплан (www.megaplan.ru) — онлайн-сервис для управления бизнесом.

3. TeamLab (www.teamlab.com/ru) — многофункциональный онлайн-сервис для совместной работы, управления документами и проектами.

4. BaseCamp (http://basecamp.com) — онлайн-инструмент для управления проектами, совместной работы и постановки задач по проектам.

Рассмотрим эти решения на примере облачного сервиса **Мегаплан,** который относится к **модели SaaS** (англ. Software as a service — программное обеспечение как услуга). В рамках модели SaaS заказчики платят не за владение программным обеспечением как таковым, а за его аренду (т. е. за его использование через web-интерфейс). Таким образом, в отличие от классической схемы лицензирования программного обеспечения заказчик несет сравнительно небольшие периодические затраты (от 150 до 400 руб./мес.), и ему не требуется инвестировать значительные средства в приобретение ПО и аппаратной платформы для его развертывания, а затем поддерживать его работоспособность.

Используя на предприятии Мегаплан, можно получить множество современных эффективных средств управления персоналом компании, в частности:

- выстроить иерархическую структуру предприятия, прояснить уровни подчинения, сделать связи сотрудников внутри предприятия логичными и понятными каждому;

- система управления персоналом на предприятии позволит каждому руководителю контролировать деятельность своих подчиненных в режиме реального времени. Кроме того,

можно получать актуальную информацию, даже не находясь в офисе — для этого достаточно иметь доступ в Интернет;

- получить возможность обмениваться документами, выкладывать в общий доступ бизнес-планы, презентации, проекты и распоряжения, ускоряя обмен информацией внутри предприятия;

- системы обмена сообщениями и корпоративный форум делают общение, как деловое, так и личное, более живым и эффективным. Кроме того, выоказывания по ходу исполнения задачи, зафиксированные в Мегаплане, позволяют анализировать ход работы над проектом.

Зарегистрировавшись на вышеуказанном сайте, вы получите бесплатный доступ для знакомства с сервисом Мегаплан. Из трех решений предлагаемых компанией, а именно Совместная работа, Учет клиентов и Бизнес-менеджер, выберите первое — **Совместная работа.** Такой выбор дает возможность эффективно управлять проектами, задачами и людьми. Выбрав модуль **Сотрудники,** добавьте несколько сотрудников, заполнив их личные карточки. Много информации в карточки заносить необязательно, их всегда можно отредактировать, при этом не забывая нажимать на кнопку **Сохранить.** Заполненный модуль **Сотрудники** представлен на рис. 2.



Рис. 2. Модуль Сотрудники

Заполнив базу сотрудников, отметив все необходимые сведения в картотеке, вы получаете автоматизированную систему управления персоналом компании, которая более оперативно, чем любой менеджер по кадрам, будет оповещать вас обо всех изменениях, напоминать о днях рождения, давать доступ к картотеке и персональным сообщениям.

Теперь создайте отделы своей виртуальной организации. Для этого, находясь в модуле **Сотрудники,** выберите блок **Структура,** а в нем ссылку **Добавить отдел.** Чтобы добавить сотрудника в отдел, его надо перетащить мышью из списка **Нераспределенные.** После этого следует установить связь «Начальник-Подчиненный», используя ссылки **Начальники, Подчиненные.** Подобная ситуация представлена на рис. 3.

Красные стрелки на схеме обозначают вашу подчиненность, а зеленые — сотрудники подчиняются вам.

Для того чтобы организовать взаимодействие в команде, выберите модуль **Задачи** и поставьте перед каждым сотрудником задачу, указав сроки ее выполнения. Сотрудник может принять или отклонить задачу, делегировать ее своему подчиненному, комментировать задачу, оперировать списком своих задач (распечатывать, сортировать по признакам). Он может даже провалить задачу — и это немедленно станет известно всем, кто с ней связан.

Используя модуль **Документы,** попробуйте создать несколько текстовых документов (их объем не может превышать 300 Мб). Также имеется возможность импортировать имеющиеся документы, которые Мегаплан будет сортировать по типам: текстовые

документы, презентации, PDF-файлы, таблицы, изображения и др. Таким образом, можно хранить общие для всей компании договоры, банки, анкеты и другие важные файлы.

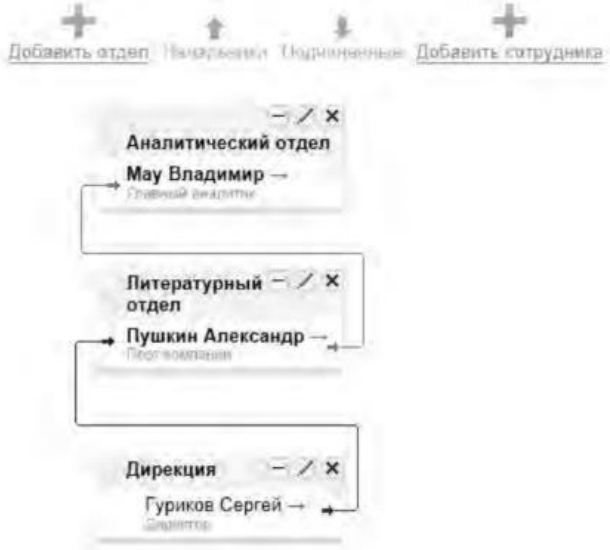


Рис. 3 Организационная структура предприятия

Модуль **Обсуждение** представляет собой корпоративный форум, в рамках которого можно рассматривать любые вопросы. Обсуждение тем может происходить в нескольких уже созданных разделах, а именно Новости, Отдых, Работа. Подобная ситуация представлена на рис. 4.

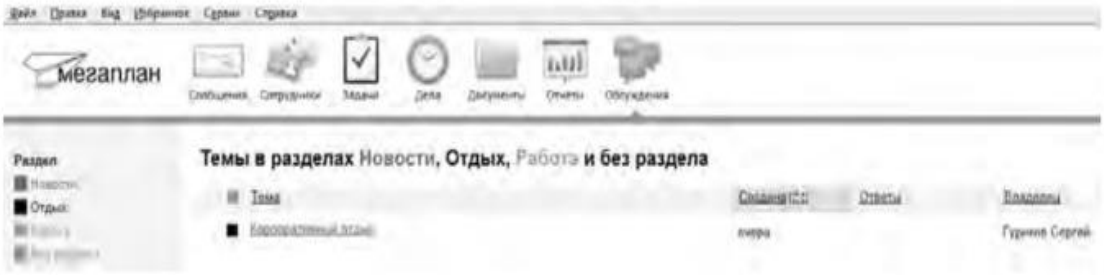


Рис. 4.Создание темы в модуле Обсуждение

Создайте несколько тем, воспользовавшись кнопкой **Добавить.** Обратите внимание на то, что вы можете ограничить просмотр обсуждаемых тем отдельным сотрудникам и группам. Корпоративный форум делает общение внутри компании более открытым. Возможность общения онлайн между сотрудниками, встреча которых могла бы и не произойти в реальной жизни, развивает неформальные отношения, вследствие которых совместная работа над проектами становится более комфортной. Работа над проектом, созданным в виртуальной среде, существенно упрощается за счет системы обмена сообщениями (модуль **Сообщения),** совместной работы, обработки файлов, находящихся в общем доступе.

Итак, освоение базовых функциональных операций в процессе работы с Мегапланом происходит очень быстро. С учетом того, что бесплатная версия продукта позволяет зарегистрировать трех пользователей, можно организовать сетевое взаимодействие, создав учебное предприятие и тем самым, усовершенствовать навыки взаимодействия исполнителей и руководителей в рабочем процессе.

Совместное времяпрепровождение за сетевыми развлечениями — последний вид сетевого взаимодействия, рассматриваемого нами. Сетевыми развлечениями в основном являются компьютерные игры. Вид взаимодействия в играх может быть различным: игроки могут соперничать друг с другом, могут быть в команде, а в некоторых играх возможны оба

вида взаимодействия. Соперничество может выражаться как напрямую, например игра в шахматы, так и в таблице рейтингов в какой-нибудь браузерной игре.

Существует особый жанр игр MMORPG (англ. Massive Multiplayer Online Role-playing Game, массовая многопользовательская онлайновая ролевая игра) — разновидность онлайновых ролевых игр, позволяющая тысячам людей одновременно играть в изменяющемся виртуальном мире через Интернет. Сообщество любителей игр в жанре MMORPG зарегистрировано в сети Интернет по адресу www.mmorpg.su.

Подобные игры, как правило, построены на технологии «клиент-сервер», но есть разновидности, где в качестве клиента выступает обычный браузер. Игрок в такой игре представляется своим **аватаром** — виртуальным представлением его игрового персонажа. Создатели игры поддерживают существование игрового мира, в котором происходит действие игры и который населен ее персонажами.

Когда геймеры попадают в игровой мир, они могут в нем выполнять различные действия вместе с другими игроками со всего мира. Разработчики MMORPG поддерживают и постоянно развивают свои миры, добавляя новые возможности и доступные действия для того, чтобы «гарантировать» интерес игроков. Яркими представителями подобного рода игр на сегодняшний день являются EverQuest, World of Warcraft, Anarchy Online, Asheron's Call, Everquest II, Guild Wars, Ragnarok Online, Silkroad Online, The Matrix Online, City of Heroes.

Задания:

а)Создайте свой аккаунт (если вы его не имеете) в одной из социальных сетей, например Livejournal или Facebook. Выполните скриншоты своего блога. Результат отправьте на электронную почту преподавателя.

б)Используя программу Windows Live Messenger, добавьте в друзья (по предварительной договоренности) своего преподавателя и свяжитесь с ним в режиме реального времени либо оставьте ему сообщение.

в)Установите на свой компьютер программу Яндекс.Диск. Предоставьте доступ к нескольким файлам своему преподавателю.

г)Создайте учебное предприятие, используя облачный сервис Мегаплан. Заполните информацией все имеющиеся в программе модули. Установите связи между отделами. Пригласите нескольких своих друзей в проект. Продемонстрируйте результат преподавателю, открыв ему доступ.

д)Напишите краткий отчет о результатах своей работы по созданию виртуального предприятия, указав в нем этапы его создания, результаты совместной сетевой деятельности.

е)Являетесь ли вы участником какой-либо игры в жанре MMORPG? Если да, расскажите об основных правилах той игры, в которой вы участвуете. Каким образом происходит ваше взаимодействие в ней с друзьями?

3. Организация форумов

Методические указания

В настоящее время перед каждым образовательным учреждением стоит задача формирования открытой информационной образовательной среды. Эффективным механизмом является использование коммуникационных возможностей сети Интернет. В частности, организация на сайтах или в информационных системах образовательных учреждений форумов (дискуссий).

Форум — это web-страница, созданная на основе клиент-серверной технологии для организации общения пользователей сети Интернет. Концепция форума основана на создании разделов, внутри которых происходит обсуждение различных тем в форме сообщений. От чата форум отличается тем, что общение может происходить не в реальном времени. Таким образом, человек имеет возможность подумать над своим ответом или над создаваемой темой.

По методу формирования набора тем форумы бывают:

- **тематические. В** рамках таких форумов пользователи обсуждают предварительно опубликованную статью, новость СМИ и т.д. Обсуждение происходит в одной или нескольких темах;

- **проблемные.** Для обсуждения предлагается ряд проблемных вопросов (тем). Обсуждение каждой проблемы происходит в своей ветке. Чаще всего в подобных типах форумов пользователь не имеет права создавать новую тему;

- **постоянно действующие форумы.** Форумы поддержки (помощи). По такому принципу строятся форумы технической поддержки, различные консультации и пр. Чаще всего это форумы с динамическим списком тем, где простые участники могут создавать новую тему в рамках тематики форума.

Форумы функционируют согласно определенным правилам, которые определяют администраторы и модераторы. **Администратор форума** следит за порядком во всех разделах, контролирует общение на ресурсе и соблюдение правил сайта. **Модератор форума** чаще всего следит за порядком в конкретном разделе, имеет более узкие права, чем администратор. Его основная задача — увеличивать популярность форума, количество участников и число интересных обсуждений. Дополнительные задачи:

- стимулировать появление новых интересных тем;
- стимулировать общение на форуме;
- не допускать конфликтных ситуаций на форуме, а в случае их возникновения — уметь найти выход из сложной ситуации;
- при появлении в темах **спама** (рассылка коммерческой и иной рекламы или иных видов сообщений (информации) лицам, не выражавшим желания их получать) немедленно сообщать об этом администратору сайта;
- следить за культурой сетевого общения.

Для каждого конкретного форума администратором могут быть созданы свои правила, но в целом их можно свести к следующим:

1. На форумах приветствуется поддержание дискуссии, обмен опытом, предоставление интересной информации, полезных ссылок.
2. Не нужно вести разговор на «вольные» темы и размещать бессодержательные (малосодержательные) или повторяющиеся сообщения. Под бессодержательными (малосодержательными) понимаются, в частности, сообщения, содержащие исключительно или преимущественно эмоции (одобрение, возмущение и т. д.).
3. Желательно проверять грамотность сообщений (например, редактором Microsoft Word) — ошибки затрудняют понимание вопроса или ответа и могут раздражать участников обсуждения.
4. Длинные сообщения желательно разбивать на абзацы пустыми строчками, чтобы их было удобно читать.
5. Запрещается размещать заведомо ложную информацию.
6. Не рекомендуется публиковать сообщения, не соответствующие обсуждаемой теме, в том числе личные разговоры в ветках форума.
7. Не следует писать сообщения сплошными заглавными буквами, так как это эквивалентно повышению тона, а также латинскими буквами. При этом сообщение считается нарушающим данное правило, если такого рода текстом набрано более трети всего сообщения.
8. Участники форума не должны нарушать общепринятые нормы и правила поведения. Исключено употребление грубых слов и ненормативной лексики, выражение расистских, непристойных, оскорбительных или угрожающих высказываний, нарушений законодательства в области авторского права или сохранности конфиденциальной информации.
9. Запрещено публично обсуждать нелегальное использование (в том числе взлом) программного обеспечения, систем безопасности, а также публикацию паролей, серийных номеров и адреса (ссылки), по которым можно найти что-либо из вышеназванного.

10. Не следует размещать в форумах, а также рассылать через личные сообщения коммерческую рекламу и спам.

Для создания форумов используется ряд программных решений, написанных на языке PHP (англ. Hypertext Preprocessor — предпроцессор гипертекста) и используемых для ведения своей базы данных сервер MySQL. К их числу относится **Invision Power Board** (www.invisionpower.com), **vBulletin** (www.vbulletin.com), **PHP Bulletin Board** (www.phpbb.com), **Simple Machines Forum** (www.simplemachines.org) и ряд других. Однако создать «движок форума» с помощью перечисленного программного обеспечения начинающему пользователю будет весьма непросто, поскольку и сами программы, и документация к ним написаны на английском языке.

Попробовать свои силы для создания тематического форума можно с использованием российских web-сервисов, предлагающих свои услуги в этом направлении. Остановим свой выбор на сервисе Forum2x2 (www.forum2x2.ru), который предлагает создание и хостинг форумов. Forum2x2 позволяет создать форум бесплатно, всего за несколько секунд и без всяких технических знаний, а после — мгновенно начать общение. Интерфейс форума является наглядным, простым в использовании и легко настраивается.

Определим следующую задачу — создать форум своего учебного заведения. Находясь на сайте сервиса Forum2x2, выберем кнопку **Создать бесплатный форум.** Пользователю будет предложено выбрать одну из четырех версий создания форумов: Phpbb3, Phpbb2, IPB и Punbb. Их краткая характеристика будет представлена в соответствующих вкладках. Воспользуемся самым простым из них - **Punbb,** который предоставляет только базовые опции web-форума, а следовательно, является оптимальным по скорости и простоте использования. Далее нам предстоит выполнить три простых шага:

- 1. Выбрать графический стиль форума.
- 2. Ввести название форума, его интернет-адрес, свой адрес электронной почты, пароль.
- 3. Прочитать информацию о недопустимом содержании создаваемого форума.

На этом создание форума можно считать завершенным. На рис. 5 представлен один из возможных примеров созданного форума.



Рис. 5 Внешний вид созданного форума

В своем электронном почтовом ящике вы обнаружите письмо от администрации сервиса Forum2x2, в котором будут даны несколько полезных советов для успешного начала работы форума, в частности:

- - поместить в форум несколько сообщений, чтобы задать тон обсуждения;
- - внести личный аспект в стиль оформления форума, подобрав цвета и шрифты;

- - сообщить по электронной почте друзьям о новом форуме и пригласить их поучаствовать в форуме;
- - поместить ссылки на форум на других сайтах, форумах и в поисковых системах.

Для администрирования вновь созданного форума необходимо ввести имя пользователя (Admin) и пароль, который вы выбрали при создании форума. После этого вы получаете доступ к ссылке **Панель администратора,** расположенной внизу страницы, которая имеет несколько вкладок (рис. 6).



Рис. 6. Вкладки Панели администратора

Вкладка **Главная** отображает информацию по статистике созданных сообщений, количестве пользователей и тем. Здесь же можно воспользоваться практическими советами по повышению посещаемости созданного форума. Попробуйте пригласить на созданный форум своих друзей, знакомых, с помощью ссылки **Адреса Email,** вводя в соответствующее поле их электронные адреса. Максимальное число приглашений, отправляемых за один раз, — десять.

Вкладка **Общие настройки** позволяет сконфигурировать форум в соответствии с личными целями администратора. В частности, можно изменить название сайта, его описание, определить конфигурацию защиты форума, определить E- mail администратора.

С помощью раздела **Категории и форумы** создайте свои форумы, определите порядок их вывода с помощью соответствующих кнопок **(Сдвинуть вверх, Сдвинуть вниз). Категория** представляет собой совокупность форумов, объединенных общей тематикой. Один из возможных примеров создания форумов приведен на рис. 7.

Сделанные изменения доступны для просмотра после нажатия на кнопку **Просмотр форума.** Находясь на вкладке **Общие настройки,** перейдите в раздел **Раскрутка форума** и выберите пункт **Поисковые системы.** Введите информацию для ваших мета-тегов, чтобы улучшить позицию вашего форума в поисковых системах. **Мета-теги** — это невидимые коды, используемые поисковиками для индексации и позиционирования вашего форума. Зарегистрируйте ваш форум в основных поисковых системах: Yandex, Google, Rambler.

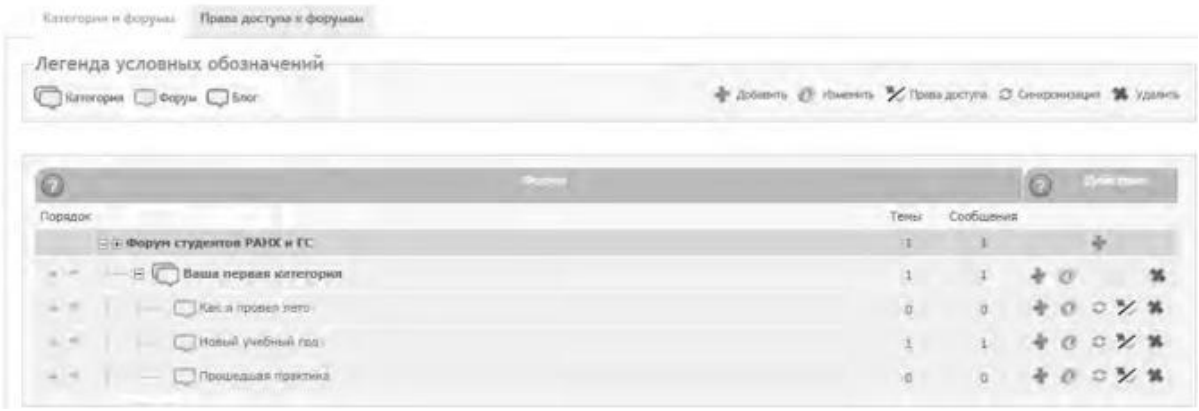


Рис. 7. Структура форумов

Используя вкладку **Оформление,** поэкспериментируйте с различными стилями для того, чтобы повысить привлекательность форума. Здесь же можно поменять версию «движка» форума.

Будучи администратором вашего форума, вы являетесь его единственным полноправным хозяином и полностью контролируете его. С помощью вкладки **Пользователи & Группы** создайте группу модераторов, ответственных за соблюдение установленных вами правил (правил орфографии, правил поведения на форуме и т.д.).

Перейдите на вкладку **Модули.** Здесь вы можете добавить к вашему форуму такие модули, как портал, календарь, галерея, чат или листы персонажей. Выберите ссылку **Портал.** Появится информация о том, что портал не инсталлирован. Нажмите ссылку — инсталлировать. Внешний вид созданного портала представлен на рис. 8.



Рис. 8. Созданный портал

На вкладке **Модули** попробуйте поработать с виджетами (гаджетами) форума, из которых и состоит портал. **Виджет** — это элемент интерфейса, предназначенный для облегчения доступа к информации.

Добавьте/удалите стандартные виджеты форума (Поиск, Календарь, Новости, Последние темы, Самые активные пользователи и др.), отслеживая изменения нажатием кнопки **Просмотр портала.** Оставьте наиболее удачный, с вашей точки зрения, вариант.

Итак, мы приобрели первоначальные практические навыки создания собственного форума и выполнили действия, направленные на увеличение его посещаемости. Кроме того, необходимо создать ссылку на форум с главной страницы сайта учебного заведения. Следует отметить, что, для того чтобы созданный форум не оставался в статичном виде, необходима большая работа администратора, модераторов по его поддержанию.

Альтернативным способом организации форумов является их развертывание в информационной системе учебного заведения. На современном отечественном рынке автоматизированных информационных систем управления учебным процессом представлено достаточно большое количество решений. Свой выбор остановим на ИС ModEUS (http://modeus.krf.ane.ru/index.php), которая разработана с учетом специфики российского образования и обеспечивает автоматизацию учебного процесса, в том числе и дистантного (учет учебного процесса, его планирование и публикация, подготовка отчетной документации).

После регистрации в системе ModEUS, нужно выбрать ссылку **Дискуссии.** Вы можете организовать дискуссию (форум) по любому из находящихся в системе курсов, щелкнув мышью по его названию.

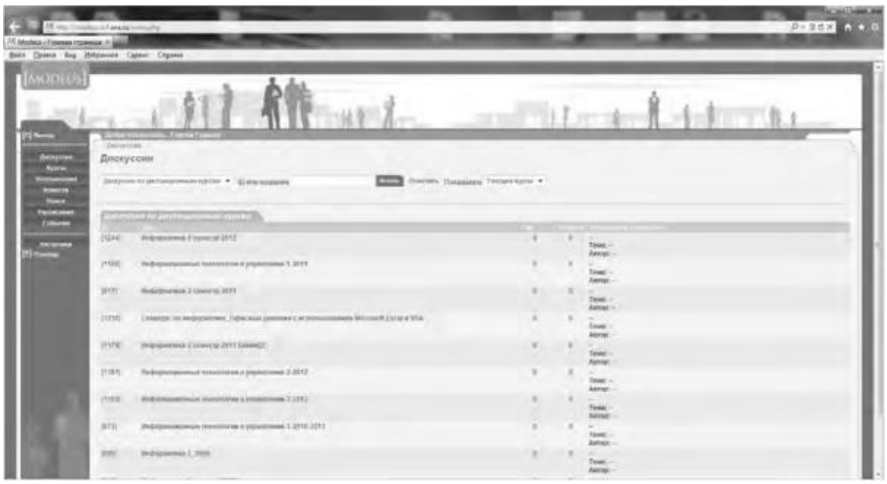


Рис. 9. Страница Дискуссии в ИС ModEUS

Создадим новую тему, нажав одноименную кнопку. Впишем в соответствующие поля название темы и вопрос, предлагаемый для обсуждения. Подобная ситуация представлена на рис. 437. Кроме того, мы имеем возможность прикрепить текстовый файл объемом не более 16 Мб, например список вопросов к экзамену.

После нажатия на кнопку **Создать** тема дискуссии отображается в системе (рис. 10), и любой из студентов может принять участие в ее обсуждении.

Таким образом, можно определить преимущества создания форума в информационной системе учебного заведения:

- - отсутствует необходимость иметь практические навыки работы по созданию web-страниц;
- - нет необходимости заботиться о раскрутке форума - студенты и преподаватели постоянно работают в системе.

В то же время есть и ряд недостатков, в частности:

- - форум доступен исключительно для студентов и преподавателей учебного заведения, в котором функционирует информационная система;
- - стандартизированный типовой интерфейс для всех выполняемых функций;
- - нет возможности организовать дискуссию на вольную тему.



Рис. 10 Создание новой темы



Рис. 11. Создана тема для дискуссии

Использование тестирующих систем в локальной сети образовательного учреждения

Теперь познакомимся с возможностями ИС ModEUS для **организации тестирования студентов в локальной сети образовательного учреждения.** Использование тестирования как наиболее объективного метода оценки качества образования широко используется в учебных заведениях России. Полнота охвата проверкой требований к уровню подготовки студентов предполагает методику конструирования тестовых заданий закрытого и открытого типа. К тестовым заданиям **закрытого типа** относятся задания, предполагающие выбор верного ответа из предложенных вопросов. Тестовые задания **открытого типа** требуют конструирования ответов с кратким и развернутым ответом. И тот, и другой тип заданий успешно реализуются в ИС ModEUS.

Прежде чем создать тестовое задание, необходимо зайти в один из учебных курсов, находящихся в репозитарии (хранилище данных), нажав кнопку **Курсы** в главном меню. Под «курсом» в ПС ModEUS понимается дисциплина, находящаяся в учебном плане.

Найдем в списке **Занятия курса** требуемое занятие и нажмем ссылку **Список заданий,** находящуюся справа от поля **Тип.** Для того чтобы добавить задание в занятие, нажмем кнопку **Добавить.** Подобная ситуация представлена на рис. 11.

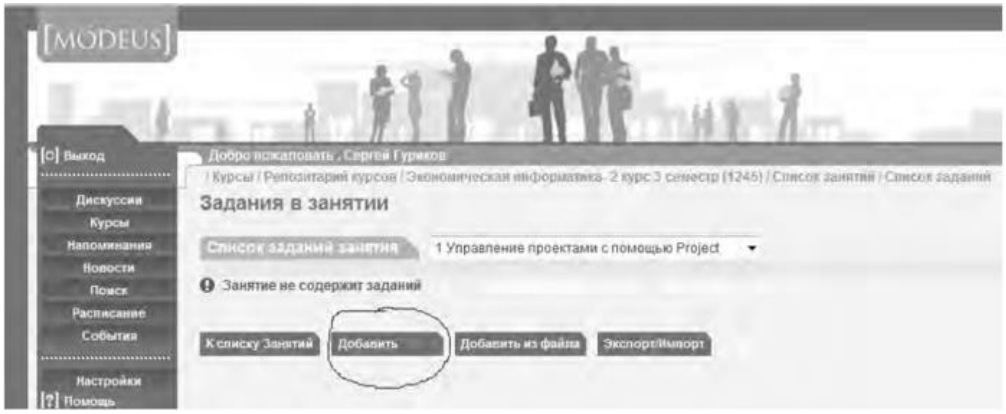


Рис.12. Добавление задания

Тип задания можно выбрать из раскрывающегося списка (рис. 12), кроме того, можно дать название новому заданию, установить балл и выбрать количество попыток сдачи.

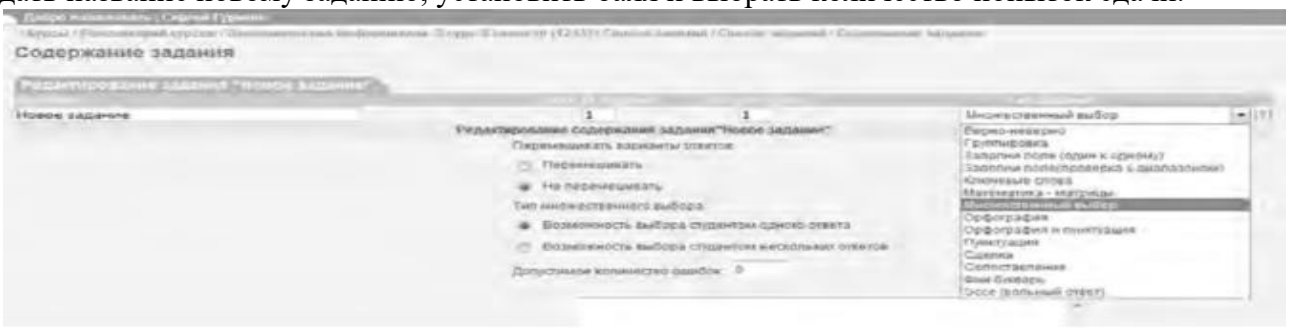


Рис.13. Выбор типа задания

Рассмотрим несколько примеров формирования вопросов закрытого и открытого типа в ИС ModEUS.

Тестовое задание со множественным выбором верных ответов (закрытый тип). Данный тип задания дает вам возможность задать вопрос и варианты ответов на него, из которых обучающийся должен выбрать верный (рис. 14). Правильным может быть один или несколько вариантов. Для того чтобы наполнить задание, выполните следующие действия:

- - в опции **Перемешивать варианты ответов** поставьте метку в поле **Перемешивать,** если вы хотите, чтобы указанные вами варианты ответов выводились на экран в различном порядке, поставьте метку в поле **Не перемешивать,** если варианты ответов должны выводиться всегда в одинаковом порядке;
- - в опции **Тип множественного выбора** поставьте метку в поле **Возможность выбора студентом одного ответа,** если обучающийся из предложенных вариантов ответов может выбрать только один верный, поставьте метку в поле **Возможность выбора студентом нескольких ответов,** если обучающийся может выбрать несколько верных ответов;
- - введите текст задания в поле **Текст задания;**
- - в случае если в задании присутствует приложение, укажите путь к этому приложению, нажав на кнопку I обзор... I и указав путь к файлу на жестком или сетевом диске. Приложением может быть документ любого формата, например изображение;
- - введите тексты вариантов ответов в соответствующие поля;
- - для добавления нового поля под вариант ответа нажмите на кнопку



- каждый вариант ответа может быть дополнен приложением. Для добавления к варианту ответа приложенияукажите путь к нему в поле **Добавить приложение,** нажав на кнопку 

и указав путь к файлу на жестком

или сетевом диске;

- установите флажки напротив одного или нескольких правильных вариантов ответа;

- нажмите на кнопку Зафиксировать для сохранения задания в базе данных;

- нажмите на кнопку Сохранить и добавить новое, чтобы сохранить задание и сразу

перейти к составлению нового задания.

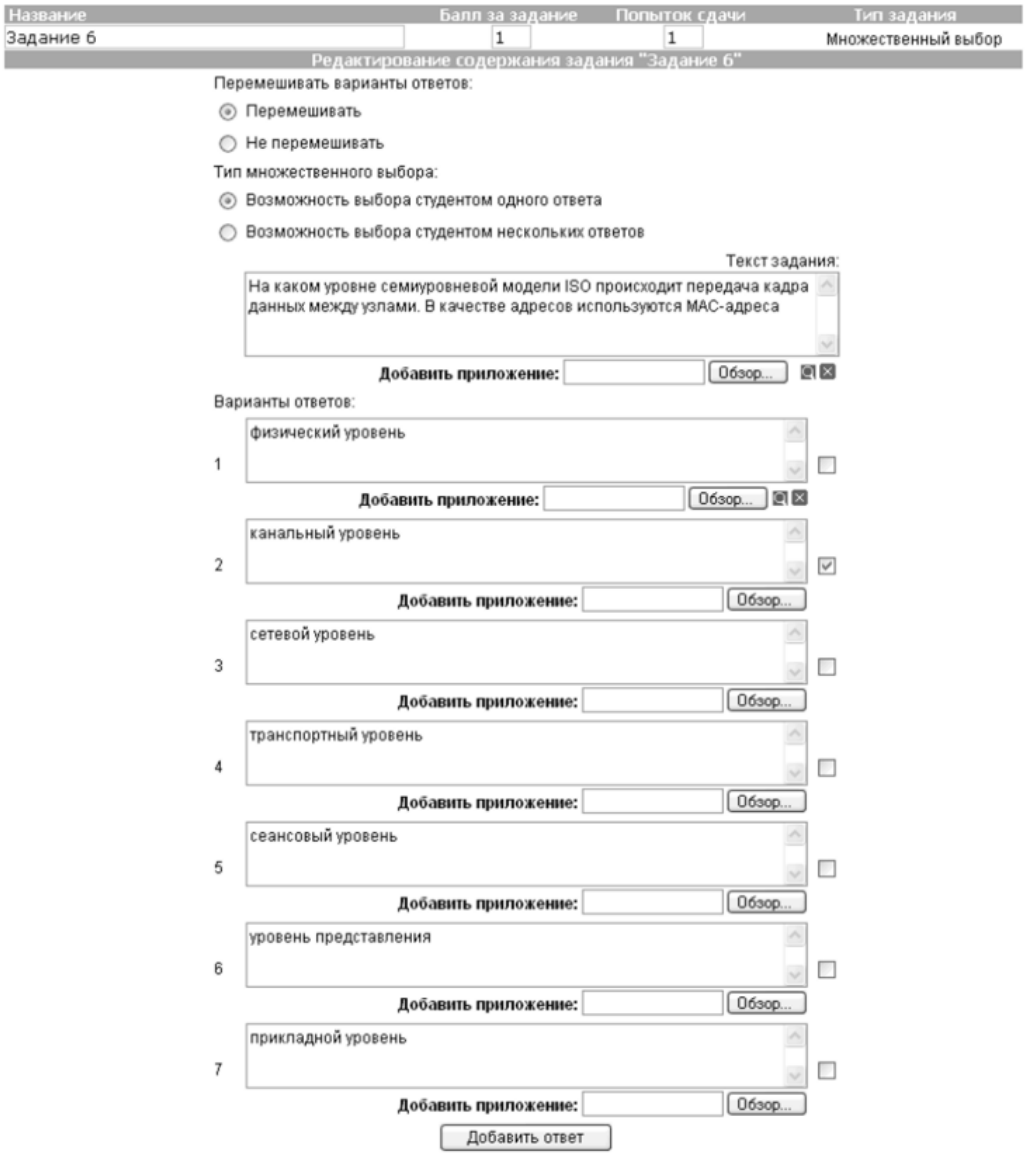


Рис. 14. Создание задания со множественным выбором верных ответов

Тестовое задание с добавлением слова (открытый тип). Данный тип задания (рис. 15) дает вам возможность задать вопрос, на который обучающийся должен ответить, введя ответ с клавиатуры в виде текста, цифры, слова, математической формулы и т.д. Для того чтобы наполнить задание, выполните следующие действия:

- - введите текст задания в поле **Текст задания;**
- - текст задания может представлять собой текст или текст в сочетании с

приложением. Чтобы добавить приложение (изображение или документ), нажмите на кнопку Обзор..., находящуюся под полем **Текст задания,** и
укажите путь к файлу на жестком или сетевом диске;

- - в поле **Вопрос** введите вопрос, на который должен ответить обучающийся;
- - в поле **Ответ** укажите правильный ответ;

- в пределах одного задания вы можете задать обучающемуся несколько вопросов. Для добавления вопроса нажмите на кнопку Добавить вопрос;

- нажмите на кнопку Зафиксировать для сохранения задания в базе данных;

- нажмите на кнопку Сохранить и добавить новое, чтобы сохранить задание и сразу перейти к составлению нового задания.

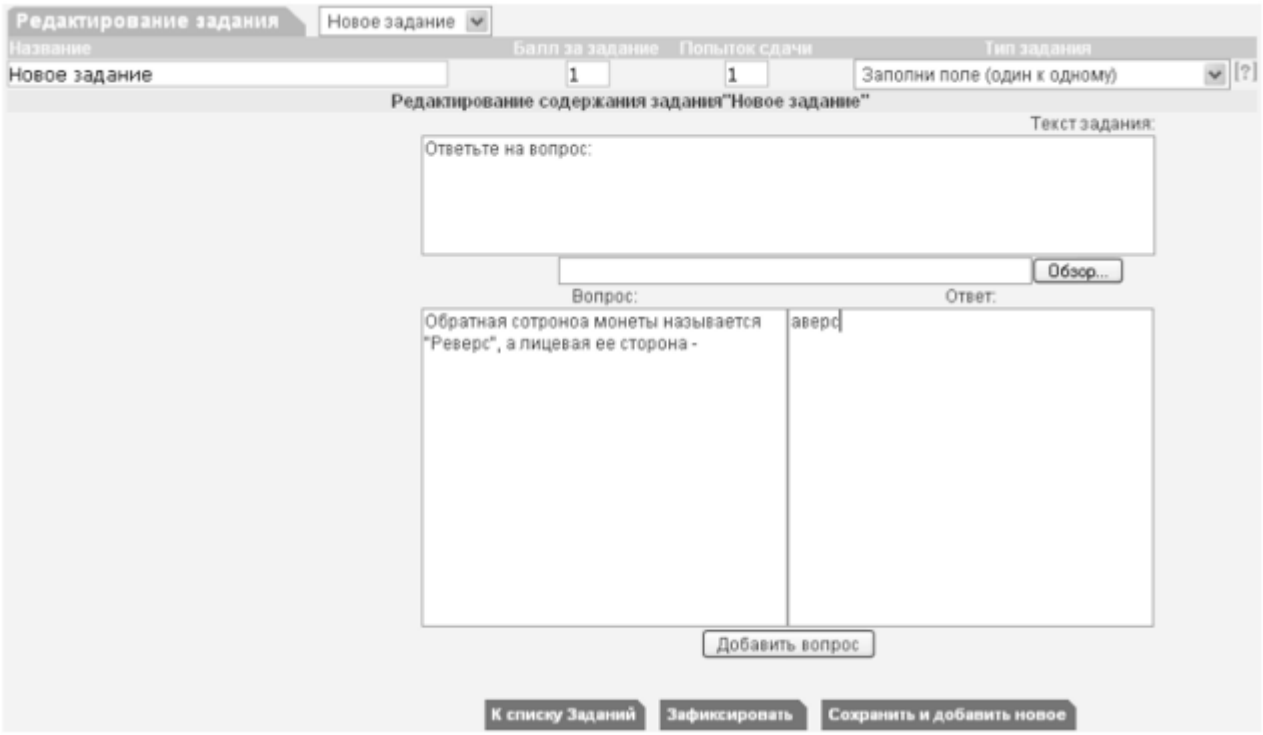


Рис. 15 Создание задания с добавлением слова

Кроме рассмотренных типов заданий, в ИС ModEUS существует и ряд других, в частности:

Верно - неверно. Данный тип задания предоставляет возможность обучающемуся выбрать один из вариантов ответа («верно» или «неверно») на поставленный вопрос.

Группировка. В данном типе задания обучающемуся необходимо распределить заданный список понятий по группам.

Заполни поле (проверка с диапазоном). Данный тип задания дает возможность задать вопрос, на который обучающийся должен ответить, введя с клавиатуры числовой ответ.

Сопоставление. Проверяется способность обучающихся сопоставить понятия по указанному принципу.

Эссе. Обучающийся отвечает в свободной форме на поставленный преподавателем вопрос. Вопрос может быть представлен в виде текста или любого другого документа.

Следует отметить, что в ИС ModEUS можно задать количество вопросов, время на проведение тестовых заданий, а также **мощность теста.** Мощность определяет количество заданий, которые будут предложены студенту для выполнения. Например, если в группе заданий десять вариантов заданий, а мощность группы равна пяти, то студенту будут предложены для выполнения пять заданий из десяти. После проведения тестирования в

информационной системе происходит автоматическое формирование оценок на основании выполненных студентами заданий.

Итак, мы завершили рассмотрение возможностей информационной системы, работающей в локальной сети учебного заведения для организации форумов и проведения тестирования студентов.

Настройка видео web-сессий

В настоящее время миллионы пользователей во всем мире используют видеосвязь с помощью сети Интернет для общения друг с другом. Достоинства такого способа общения очевидны: есть возможность слышать и визуально наблюдать собеседника, находящегося, возможно, за тысячи километров. Для обеспечения полноценной видеосвязи для захвата и воспроизведения видео и звука могут использоваться как встроенные в компьютер камера, микрофон или динамик, так и внешние устройства, такие как web-камера, головная гарнитура, а также следует обеспечить высокоскоростной доступ к Интернету.

Взаимодействие собеседников при организации видео web-сессий возможно в нескольких направлениях: видеоконференция и видеотелефония.

1. **Видеоконференция** — это технология интерактивного взаимодействия двух и более человек, при которой между ними происходит обмен информацией в режиме реального времени. Существует нескольких видов видеоконференций:

- **симметричная (групповая)** видеоконференция позволяет проводить сеансы показа презентаций или рабочего стола;
- **асимметричная** видеоконференция используется для дистанционного образования. Позволяет собрать в конференции множество участников таким образом, что все они будут видеть и слышать одного ведущего, он, в свою очередь, всех участников одновременно;
- **селекторное видеосовещание** — рассчитано на взаимодействие большой группы участников, при котором пользователи имеют возможность активно обсуждать действия при чрезвычайных ситуациях, оперативно решать текущие вопросы.

Для эффективной организации проведения web-конференций, маркетинговых презентаций, онлайн-обучения, совещаний и любых других видов онлайн-встреч существует ряд программных решений. В качестве примера можно привести программы Mirapolis Virtual Room (http://virtualroom.ru/), ВидеоМост (www.videomost.com), TrueConf Online (http://trueconf.ru/) и др.

2. Видеотелефония — реализуется посредством сеанса видеосвязи между двумя пользователями, во время которого они могут видеть и слышать друг друга, обмениваться сообщениями и файлами, вместе работать над документами и при этом находиться в разных местах в комфортной для себя обстановке.

Для того чтобы общаться с близкими и друзьями, можно бесплатно совершать видеозвонки с помощью таких программ, как Skype (http://www.Skype, com/intl/ru/get-skype), Mail.ru Агент (http://agent.mail.ru) и ряд других.

Для того чтобы проверить наличие встроенной web-камеры на компьютере, достаточно войти в меню **Пуск,** выбрать **Компьютер,** щелкнуть на нем правой кнопкой мыши и в контекстно-зависимом меню нажать пункт **Свойства.** Далее следует выбрать пункт меню **Диспетчер устройств,** а в нем пункт **Устройства обработки изображений.** Наличие в нем устройства, например, USB 2.0 Camera свидетельствует о наличии web-камеры.

Кроме того, в документации к компьютеру (Руководство пользователя) или другому устройству должны быть приведены сведения об установленных в систему устройствах и, в частности, инструкция по использованию встроенной камеры и программному обеспечению, отвечающему за данное устройство.

Одной из таких популярных утилит является ArcSoft WebCam Companion — пакет приложений для взаимодействия с web-камерой, который позволяет захватывать, редактировать изображения и записывать видео. Самостоятельно проведите ее инсталляцию,

воспользовавшись web-адресом http://arcsoft-webcam- companion.en.softonic.com. После установки данной программы на компьютер ее можно запустить на выполнение командой **Пуск/Все программы/ArcSoft WebCam Companion/WebCam Companion.** Интерфейс программы представлен несколькими разделами: Захват, Маска, Забавная рамка, Правка, Монитор, Другие приложения (рис. 16).



Рис. 16. Пункты меню программы ArcSoft WebCam Companion

Выберем значок **Захват,** а в нем пункт меню **Параметры web-камеры.** Откроется окно, представленное на рис. 17.

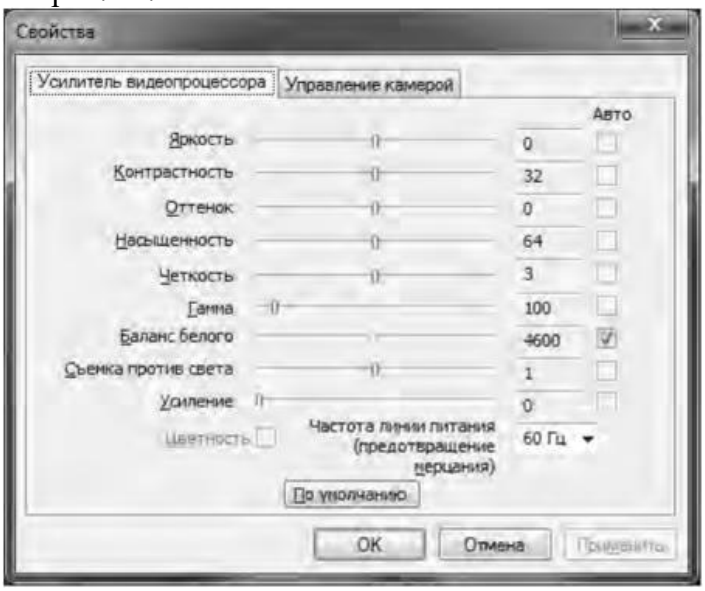


Рис. 17. Окно Свойства web-камеры

Как видно из рис. 17, в данном окне можно изменить основные параметры настройки web-камеры, одновременно наблюдая за результатом на экране. При желании настройки можно вернуть в исходное состояние, нажав на кнопку **По умолчанию.**

Теперь поговорим о том, как организовать web-сессию в такой популярной программе, как Skype. Ее большим преимуществом является такой факт, что звонки между абонентами являются бесплатными. Однако, если вы делаете звонок на мобильный или стационарный телефон, вам потребуется позаботиться о том, чтобы на вашем счете были деньги. Положить деньги на оплату разговоров в Skype вы можете с использованием такого сервиса, как Яндекс.Деньги (https://money.yandex.ru/).

Инсталлируйте программу Skype, воспользовавшись ее адресом в сети Интернет http://www.skype.com/intl/ru/get-skype. После установки программа становится доступной после выполнения команды **Пуск/Все программы/ Skype/Skype. В** окне регистрации введите свой логин и пароль. Обратите внимание на то, что если вы установите флажок в пункте **Автоматическая авторизация при запуске Skype,** то вам не придется каждый раз вводить свои данные.

Добавьте своих друзей, родственников в список контактов, воспользовавшись командой **Контакты/Добавить контакт.** Вам нужно ввести фамилию, имя знакомого, его контактный телефон, адрес электронной почты. В результате ваши контакты будут располагаться в группе **Контакты** и будут видны при каждом запуске программы.

Выполним настройку web-камеры. Последовательно нажмем **Инструменты/Настройки/Настройки видео.** Появится окно, представленное на рис. 18.

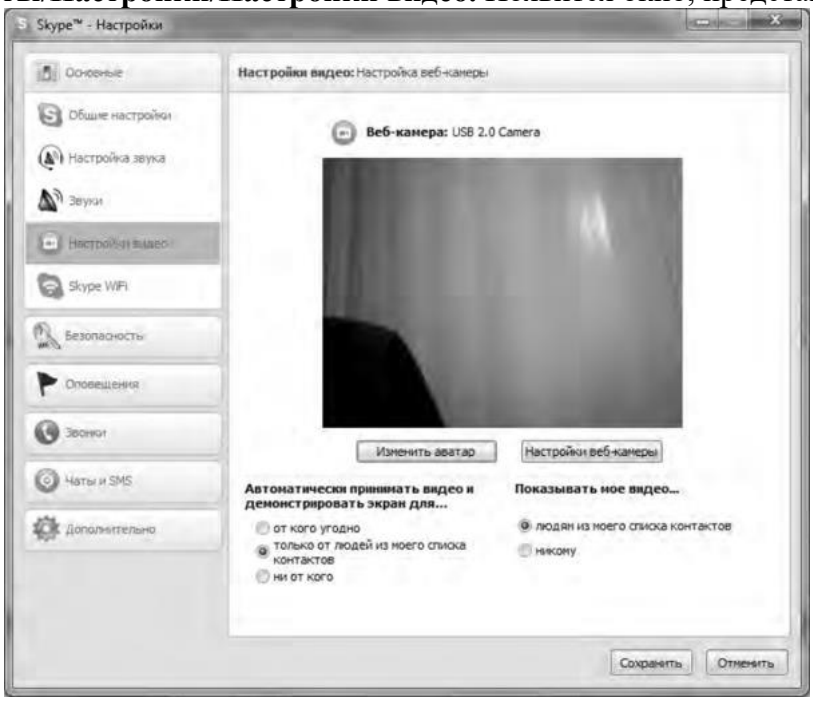


Рис.18. Окно Настройки

Если вы видите изображение - камера настроена и готова к работе. В противном случае, Skype выведет об этом текстовое сообщение. Теперь перейдем в меню **Настройка звука.** Проверьте, что поставлен флажок в опции **Разрешить автоматическую настройку микрофона.** Скажите несколько слов вслух, уровень громкости звука в опции **Громкость** должен изменяться. Окончательно проверить сделанные настройки можно с помощью контрольного звонка. Для этого, находясь в меню **Настройка** звука, выберите пункт **Сделать контрольный звонок в** Skype. В ходе контрольного звонка вы сможете сделать запись своего голоса в течение десяти секунд, а затем прослушать его. Если этот эксперимент окончится удачно, значит, все настройки выполнены правильно и программа готова к работе.

Теперь, когда мы завершили работу с настройками программы, можно попробовать сделать видеозвонок. Для этого необходимо совершить следующие действия:

1. Войти в программу Skype.
2. В группе **Контакты** щелчком мыши выбрать абонента. Во время звонка он должен быть в сети, о чем будет свидетельствовать соответствующий значок в программе Skype.
3. Нажать кнопку **Видеозвонок.**

Через несколько секунд соединение будет установлено и вы можете начать разговор, в процессе которого вы будете видеть и слышать своего собеседника. Подобная ситуация представлена на рис. 19.



Рис. 19 Сеанс связи установлен

Если во время разговоров у вас возникают неполадки со звуком, такие как сильный фоновый шум, эхо, задержка звука, «механический» звук или пропадание слов, следует убедиться в следующем:

1. Использует ли собеседник последнюю версию программы Skype? Информацию о версии программы можно получить, выполнив команду **По- мощь/О** Skype.
2. Нет ли рядом с микрофоном источников шума?
3. Не расположен ли микрофон рядом с динамиками?
4. Достаточно ли высокая скорость соединения?

Кроме того, когда программа Skype обнаруживает неполадки во время звонка, на экране появляется сообщение с рекомендациями, которые помогут вам повысить качество связи. Необходимо выполнить эти рекомендации.

Итак, вы получили теоретические сведения и практические навыки работы с организацией видео web-сессий, которые, несомненно, будут востребованы в вашей повседневной жизни.

Задания:

а)Зарегистрируйтесь на сервисе Forum2x2. Создайте форум своего учебного заведения, выбрав одну из четырех версий создания форумов. Выполните советы для успешного начала работы своего форума, приведенные в параграфе 5.4. После завершения работы отправьте на электронную почту преподавателя ссылку на созданный вами форум.

б)Установите на свой компьютер программу Skype. Сделайте видеозвонок вашему преподавателю (по предварительной договоренности).

2. Проведите диагностику стиля делового общения.

Инструкция. С помощью этого теста вы можете оценить свой стиль делового общения. Вам предложено 80 утверждений. Из каждой пары выберите одно — то, которое, как вы считаете, наиболее соответствует вашему поведению. Обратите внимание па то, что ни одна пара не должна быть пропущена. Тест построен таким образом, что ни одно из приведенных ниже утверждений не является ошибочным.

1. Я люблю действовать.
2. Я работаю над решением проблем систематическим образом.
3. Я считаю, что работа в командах более эффективна, чем на индивидуальной основе.
4. Мне очень нравятся различные нововведения.
5. Я больше интересуюсь будущим, чем прошлым.
6. Я очень люблю работать с людьми.
7. Я люблю принимать участие в хорошо организованных встречах.
8. Для меня очень важными являются окончательные сроки.

9. Я против откладываний и проволочек.
10. Я считаю, что новые идеи должны быть проверены прежде, чем они будут применяться на практике.
11. Я очень люблю взаимодействовать с другими людьми. Это меня стимулирует и вдохновляет.
12. Я всегда стараюсь искать новые возможности.
13. Я сам люблю устанавливать цели, планы и т.п.
14. Если я что-либо начинаю, то доделываю это до конца.
15. Обычно и стараюсь понять эмоциональные реакции других.
16. Я создаю проблемы другим людям.
17. Я надеюсь получить реакцию других на свое поведение.
18. Я нахожу, что действия, основанные на принципе «шаг за шагом», являются очень эффективными.
19. Я думаю, что хорошо могу понимать поведение и мысли других.
20. Я люблю творческое решение проблем.
21. Я все время строю планы на будущее.
22. Я восприимчив к нуждам других.
23. Хорошее планирование — ключ к успеху.
24. Меня раздражает слишком подробный анализ.
25. Я остаюсь невозмутимым, если на меня оказывают давление.
26. Я очень ценю опыт.
27. Я прислушиваюсь к мнению других.
28. Говорят, что я быстро соображаю.
29. Сотрудничество является для меня ключевым словом.
30. Я использую логические методы для анализа альтернатив.
31. Я люблю, когда одновременно у меня идут разные проекты.
32. Я постоянно задаю себе вопросы.
33. Делая что-либо, я тем самым учусь.
34. Полагаю, что я руководствуюсь рассудком, а не эмоциями.
35. Я могу предсказать, как другие будут вести себя в той или иной ситуации.
36. Я не люблю вдаваться в детали.
37. Анализ всегда должен предшествовать действиям.
38. Я способен оценить климат в группе.
39. У меня есть склонность не заканчивать начатые дела.
40. Я воспринимаю себя как решительного человека.
41. Я ищу такие дела, которые бросают мне вызов.
42. Я основываю свои действия на наблюдениях и фактах.
43. Я могу открыто выразить свои чувства.
44. Я люблю формулировать и определять контуры новых проектов.
45. Я очень люблю читать.
46. Я воспринимаю себя как человека, способного интенсифицировать, организовать деятельность других.
47. Я не люблю заниматься одновременно несколькими вопросами.
48. Я люблю достигать поставленных целей.
49. Мне нравится узнавать что-либо о других людях.
50. Я люблю разнообразие.
51. Факты говорят сами за себя.
52. Я использую свое воображение, насколько это возможно.
53. Меня раздражает длительная, кропотливая работа.
54. Мой мозг никогда не перестает работать.
55. Важному решению предшествует подготовительная работа.
56. Я глубоко уверен в том, что люди нуждаются друг в друге, чтобы завершить работу.

57. Я обычно принимаю решение, особо не задумываясь.
58. Эмоции только создают проблемы.
59. Я люблю быть таким же, как другие.
60. Я не могу быстро прибавить пятнадцать к семнадцати.
61. Я примеряю свои новые идеи к людям.
62. Я верю в научный подход.
63. Я люблю, когда дело сделано.
64. Хорошие отношения необходимы.
65. Я импульсивен.
66. Я нормально воспринимаю различия в людях.
67. Общение с другими людьми значимо само по себе.
68. Люблю, когда меня интеллектуально стимулируют.
69. Я люблю организовывать что-либо.
70. Я часто перескакиваю с одного дела на другое.
71. Общение и работа совместно с другими людьми являются творческим процессом.
72. Самоактуализация является крайне важной для меня.
73. Мне очень нравится играть идеями.
74. Я не люблю попусту терять время.
75. Я люблю делать то, что у меня получается.
76. Взаимодействуя с другими, я учусь.
77. Абстракции интересны для меня.
78. Мне нравятся детали.
79. Я люблю кратко подвести итоги, прежде чем прийти к какому-либо умозаключению.
80. Я достаточно уверен в себе.

Обработка результатов.

Обведите те номера, на которые вы ответили положительно, и отметьте их в приведенной ниже таблице. Посчитайте количество баллов по каждому стилю (один положительный ответ равен 1 баллу). Тот стиль, по которому вы набрали наибольшее количество баллов (по одному стилю не может быть более 20 баллов), наиболее предпочтителен для вас.
Если вы набрали одинаковое количество баллов по двум стилям, значит, они оба присущи вам.

Ключ

Стиль 1: 1, 8, 9, 13, 17, 24, 26, 31, 33, 40, 41, 48, 50, 53, 57, 63, 65, 70, 74, 79.
Стиль 2: 2, 7, 10, 14, 18, 23, 25, 30, 34, 37, 42, 47, 51, 55, 58, 62, 66, 69, 75, 78.
Стиль 3: 3, 6, 11, 15, 19, 22, 27, 29, 35, 38, 43, 46, 49, 56, 59, 64, 67, 71, 76, 80.
Стиль 4: 4, 5, 12, J6, 20, 21, 28, 32, 36, 39, 44, 45, 52, 54, 60, 61, 68, 72, 73, 77.

Интерпретация результатов

Стиль 1 — ориентация на действие. Характерно обсуждение результатов, конкретных вопросов, поведения, ответственности, опыта, достижений, решений. Люди, владеющие этим стилем, прагматичны, прямолинейны, решительны, легко переключаются с одного вопроса на другой.

Стиль 2 — ориентация на процесс. Характерно обсуждение фактов, процедурных вопросов, планирования, организации, контролирования, деталей. Человек, владеющий этим стилем, ориентирован на систематичность, последовательность, тщательность. Он честен, многословен и мало эмоционален.

Стиль 3 ориентация на людей. Характерно обсуждение человеческих нужд, мотивов, чувств, «духа работы в команде», понимания, сотрудничества. Люди этого стиля эмоциональны, чувствительны, умеют сопереживать окружающим.

Стиль 4 — ориентация на перспективу, на будущее. Людям этого стиля присуще обсуждение концепций, больших планов, нововведений, различных вопросов, новых методов, альтернатив. Они обладают хорошим воображением, полны идей, но мало реалистичны и порой их сложно понять.

Задания:

а) На основе самодиагностики определите стиль делового общения

б) Дайте обоснование рекомендаций по совершенствованию делового общения.

ПОДГОТОВКА РЕФЕРАТА

Общая характеристика реферата

Написание реферата практикуется в учебном процессе в целях приобретения магистрантом необходимой профессиональной подготовки, развития умения и навыков самостоятельного научного поиска: изучения литературы по выбранной теме, анализа различных источников и точек зрения, обобщения материала, выделения главного, формулирования выводов и т. п. С помощью реферата магистрант может глубже постигать наиболее сложные проблемы дисциплины, учится лаконично излагать свои мысли, правильно оформлять работу, докладывать результаты своего труда.

Реферат является первой ступенью на пути освоения навыков проведения научно-исследовательской работы. В «Толковом словаре русского языка» дается следующее определение: «**реферат** – краткое изложение содержания книги, статьи, исследования, а также доклад с таким изложением».

Различают два вида реферата:

- *репродуктивный* – воспроизводит содержание первичного текста в форме реферата-конспекта или реферата-резюме. В реферате-конспекте содержится фактическая информация в обобщённом виде, иллюстрированный материал, различные сведения о методах исследования, результатах исследования и возможностях их применения. В реферате-резюме содержатся только основные положения данной темы;
- *продуктивный* – содержит творческое или критическое осмысление реферируемого источника и оформляются в форме реферата-доклада или реферата-обзора. В реферате-докладе, наряду с анализом информации первоисточника, дается объективная оценка проблемы, и он имеет развёрнутый характер. Реферат-обзор составляется на основе нескольких источников и в нем сопоставляются различные точки зрения по исследуемой проблеме.

Магистрант для изложения материала должен выбрать продуктивный вид реферата.

Выбор темы реферата

Магистранту предоставляется право выбора темы реферата из рекомендованного преподавателем дисциплины списка. Выбор темы должен быть осознанным и обоснованным с точки зрения познавательных интересов автора, а также полноты освещения темы в имеющейся научной литературе.

Если интересующая тема отсутствует в рекомендованном списке, то по согласованию с преподавателем магистранту предоставляется право самостоятельно предложить тему реферата, раскрывающую содержание изучаемой дисциплины. Тема не должна быть слишком общей и глобальной, так как небольшой объем работы (до 20-25 страниц без учёта приложений) не позволит раскрыть ее.

Начинать знакомство с избранной темой лучше всего с чтения обобщающих работ по данной проблеме, постепенно переходя к узкоспециальной литературе. При этом следует сразу же составлять

библиографические выходные данные используемых источников (автор, название, место и год издания, издательство, страницы).

На основе анализа прочитанного и просмотренного материала по данной теме следует составить тезисы по основным смысловым блокам, с пометками, собственными суждениями и оценками. Предварительно подобранный в литературных источниках материал может превышать необходимый объем реферата.

Формулирование цели и составление плана реферата

Выбрав тему реферата и изучив литературу, необходимо сформулировать цель работы и составить план реферата.

Цель – это осознаваемый образ предвосхищаемого результата. Возможно, формулировка цели в ходе работы будет меняться, но изначально следует ее обозначить, чтобы ориентироваться на нее в ходе исследования. Формулирование цели реферата рекомендуется осуществлять при помощи глаголов: исследовать, изучить, проанализировать, систематизировать, осветить, изложить (представления, сведения), создать, рассмотреть, обобщить и т. д.

Определяясь с целью дальнейшей работы, параллельно необходимо думать над составлением плана, при этом четко соотносить цель и план работы. Правильно построенный план помогает систематизировать материал и обеспечить последовательность его изложения.

Наиболее традиционной является следующая **структура реферата**:

Титульный лист.

Оглавление (план, содержание).

Введение.

1. (полное наименование главы).
   1.1. (полное название параграфа, пункта);
   1.2. (полное название параграфа, пункта).
2. (полное наименование главы).
   2.1. (полное название параграфа, пункта);
   2.2. (полное название параграфа, пункта).

Основная часть

Заключение (выводы).

Библиография (список использованной литературы).

Приложения (по усмотрению автора).

Титульный лист оформляется в соответствии с Приложением.

Оглавление (план, содержание) включает названия всех глав и параграфов (пунктов плана) реферата и номера страниц, указывающие их начало в тексте реферата.

Введение. В этой части реферата обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи работы, указываются используемые материалы и дается их краткая характеристика с точки зрения полноты освещения избранной темы. Объем введения не должен превышать 1-1,5 страницы.

Основная часть реферата может быть представлена двумя или тремя главами, которые могут включать 2-3 параграфа (пункта).

Здесь достаточно полно и логично излагаются главные положения в используемых источниках, раскрываются все пункты плана с сохранением связи между ними и последовательности перехода от одного к другому.

Автор должен следить за тем, чтобы изложение материала точно соответствовало цели и названию главы (параграфа). Материал в реферате рекомендуется излагать своими словами, не допуская дословного переписывания из литературных источников. В тексте обязательны ссылки на первоисточники, т. е. на тех авторов, у которых взят данный материал в виде мысли, идеи, вывода, числовых данных, таблиц, графиков, иллюстраций и пр.

Работа должна быть написана грамотным литературным языком. Сокращение слов в тексте не допускается, кроме общеизвестных сокращений и аббревиатуры. Каждый раздел рекомендуется заканчивать кратким выводом.

Заключение (выводы). В этой части обобщается изложенный в основной части материал, формулируются общие выводы, указывается, что нового лично для себя вынес автор реферата из работы над ним. Выводы делаются с учетом опубликованных в литературе различных точек зрения по проблеме рассматриваемой в реферате, сопоставления их и личного мнения автора реферата. Заключение по объему не должно превышать 1,5-2 страниц.

Библиография (список использованной литературы) – здесь указывается реально использованная для написания реферата литература, периодические издания и электронные источники информации. Список составляется согласно правилам библиографического описания.

Приложения могут включать графики, таблицы, расчеты.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕФЕРАТА

Общие требования к оформлению реферата

Рефераты по дисциплинам магистратуры направления подготовки 38.04.02 – «Менеджмент», как правило, требуют изучения и анализа значительного объема статистического материала, формул, графиков и т. п. В силу этого особое значение приобретает правильное оформление результатов проделанной работы.

Текст реферата должен быть подготовлен в печатном виде. Исправления и помарки не допускаются. Текст работы оформляется на листах формата А4, на одной стороне листа, с полями: левое – 25 мм, верхнее – 20 мм, правое – 15 мм и нижнее – 25 мм. При компьютерном наборе шрифт должен быть таким: тип шрифта Times New Roman, кегль 14, междустрочный интервал 1,5.

Рекомендуемый объем реферата – не менее 20 страниц. Титульный лист реферата оформляется магистрантом по образцу, данному в приложении 1.

Текст реферата должен быть разбит на разделы: главы, параграфы и т. д. Очередной раздел нужно начинать с нового листа.

Все страницы реферата должны быть пронумерованы. Номер страницы ставится снизу страницы, по центру. Первой страницей является титульный лист, но на ней номер страницы не ставится.

Таблицы

Таблицы по содержанию делятся на аналитические и неаналитические. Аналитические таблицы являются результатом обработки и анализа цифровых показателей. Как правило, после таких таблиц делается обобщение, которое вводится в текст словами: «таблица позволяет сделать вывод о том, что…», «таблица позволяет заключить, что…» и т. п.

В неаналитических таблицах обычно помещаются необработанные статистические данные, необходимые лишь для информации и констатации фактов.

Таблицы размещают после первого упоминания о них в тексте таким образом, чтобы их можно было читать без поворота работы или с поворотом по часовой стрелке.

Каждая таблица должна иметь нумерационный и тематический заголовок. Тематический заголовок располагается по центру таблицы, после нумерационного, размещённого в правой стороне листа и включающего надпись «Таблица» с указанием арабскими цифрами номера таблицы. Нумерация таблиц сквозная в пределах каждой главы. Номер таблицы состоит из двух цифр: первая указывает на номер главы, вторая – на номер таблицы в главе по порядку (например: «Таблица 2.2» – это значит, что представленная таблица вторая во второй главе).

Цифры в графах таблиц должны проставляться так, чтобы разряды чисел во всей графе были расположены один под другим. В одной графе количество десятичных знаков должно быть одинаковым. Если данные отсутствуют, то в графах ставят знак тире. Округление числовых значений величин до первого, второго и т. д. десятичного знака для различных значений одного и того же наименования показателя должно быть одинаковым.

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другую страницу, при этом заголовок таблицы помещают только над ее первой частью, а над переносимой частью пишут «Продолжение таблицы» или «Окончание таблицы». Если в работе несколько таблиц, то после слов «Продолжение» или «Окончание» указывают номер таблицы, а само слово «таблица» пишут сокращенно, например: «Продолжение табл. 1.1», «Окончание табл. 1.1».

На все таблицы в тексте курсовой работы должны быть даны ссылки с указанием их порядкового номера, например: «…в табл. 2.2».

Формулы

Формулы – это комбинации математических знаков, выражающие какие-либо предложения.

Формулы, приводимые в реферате, должны быть наглядными, а обозначения, применяемые в них, соответствовать стандартам.

Пояснения значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой, в той последовательности, в какой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента дается с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия после него.

Формулы и уравнения следует выделять из текста свободными строками. Если уравнение не умещается в одну строку, оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знака (+), минус (–), умножения (х) и деления (:).

Формулы нумеруют арабскими цифрами в пределах всей курсовой работы (реферата) или главы. В пределах реферата используют нумерацию формул одинарную, в пределах главы – двойную. Номер указывают с правой стороны листа на уровне формулы в круглых скобках.

В тексте ссылки на формулы приводятся с указанием их порядковых номеров, например: «…в формуле (2.2)» (второй формуле второй главы).

Иллюстрации

Иллюстрации позволяют наглядно представить явление или предмет такими, какими мы их зрительно воспринимаем, но без лишних деталей и подробностей.

Основными видами иллюстраций являются схемы, диаграммы и графики.

Схема – это изображение, передающее обычно с помощью условных обозначений и без соблюдения масштаба основную идею какого-либо устройства, предмета, сооружения или процесса и показывающее взаимосвязь их главных элементов.

Диаграмма – один из способов изображения зависимости между величинами. Наибольшее распространение получили линейные, столбиковые и секторные диаграммы.

Для построения линейных диаграмм используется координатное поле. По горизонтальной оси в изображенном масштабе откладывается время или факториальные признаки, на вертикальной – показатели на определенный момент (период) времени или размеры результативного независимого признака. Вершины ординат соединяются отрезками – в результате получается ломаная линия.

На столбиковых диаграммах данные изображаются в виде прямоугольников (столбиков) одинаковой ширины, расположенных вертикально или горизонтально. Длина (высота) прямоугольников пропорциональна изображенным ими величинам.

Секторная диаграмма представляет собой круг, разделенный на секторы, величины которых пропорциональны величинам частей изображаемого явления.

График – это результат обработки числовых данных. Он представляет собой условные изображения величин и их соотношений через геометрические фигуры, точки и линии.

Количество иллюстраций в работе должно быть достаточным для пояснения излагаемого текста.

Иллюстрации обозначаются словом «Рис.» и располагаются после первой ссылки на них в тексте так, чтобы их было удобно рассматривать без поворота

работы или с поворотом по часовой стрелке. Иллюстрации должны иметь номер и наименование, расположенные по центру, под ней. Иллюстрации нумеруются в пределах главы арабскими цифрами, например: «Рис. 1.1» (первый рисунок первой главы). Ссылки на иллюстрации в тексте реферата приводят с указанием их порядкового номера, например: «…на рис. 1.1».

При необходимости иллюстрации снабжаются поясняющими данными (подрисуночный текст).

Приложения

Приложение – это часть основного текста, которая имеет дополнительное (обычно справочное) значение, но, тем не менее, необходима для более полного освещения темы. По форме они могут представлять собой текст, таблицы, графики, карты. В приложении помещают вспомогательные материалы по рассматриваемой теме: инструкции, методики, положения, результаты промежуточных расчетов, типовые проекты, имеющие значительный объем, затрудняющий чтение и целостное восприятие текста. В этом случае в тексте приводятся основные выводы (результаты) и делается ссылка на приложение, содержащее соответствующую информацию. Каждое приложение должно начинаться с новой страницы. В правом верхнем углу листа пишут слово «Приложение» и указывают номер приложения. Если в реферате больше одного приложения, их нумеруют последовательно арабскими цифрами, например: «Приложение 1», «Приложение 2» и т. д.

Каждое приложение должно иметь заголовок, который помещают ниже слова «Приложение» над текстом приложения, по центру.

При ссылке на приложение в тексте реферата пишут сокращенно строчными буквами «прил.» и указывают номер приложения, например: «…в прил. 1».

Приложения оформляются как продолжение текстовой части реферата со сквозной нумерацией листов. Число страниц в приложении не лимитируется и не включается в общий объем страниц реферата.

Библиографический список

Библиографический список должен содержать перечень и описание только тех источников, которые были использованы при написании реферата.

В библиографическом списке должны быть представлены монографические издания отечественных и зарубежных авторов, материалы профессиональной периодической печати (экономических журналов, газет и еженедельников), законодательные и др. нормативно-правовые акты. При составлении списка необходимо обратить внимание на достижение оптимального соотношения между монографическими изданиями, характеризующими глубину теоретической подготовки автора, и периодикой, демонстрирующей владение современными экономическими данными.

Наиболее распространенным способом расположения наименований литературных источников является алфавитный. Работы одного автора перечисляются в алфавитном порядке их названий. Исследования на

иностранных языках помещаются в порядке латинского алфавита после исследований на русском языке.

Ниже приводятся примеры библиографических описаний использованных источников.

Статья одного, двух или трех авторов из журнала

Зотова Л. А., Еременко О. В. Инновации как объект государственного регулирования // Экономист. 2010. № 7. С. 17–19.

Статья из журнала, написанная более чем тремя авторами

Валютный курс и экономический рост / С. Ф. Алексашенко, А. А. Клепач, О. Ю. Осипова [и др.] // Вопросы экономики. 2010. № 8. С. 18–22.

Книга, написанная одним, двумя или тремя авторами

Иохин В. Я. Экономическая теория: учебник. М.: Юристъ, 2009. 178 с.

Книга, написанная более чем тремя авторами

Экономическая теория: учебник / В. Д. Камаев [и др.]. М.: ВЛАДОС, 2011. 143 с.

Сборники

Актуальные проблемы экономики и управления: сборник научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. 146 с.

Статья из сборника

Данилов А. Г. Система ценообразования промышленного предприятия // Актуальные проблемы экономики и управления: сб. научных статей. Екатеринбург: УГГУ, 2010. Вып. 9. С. 107–113.

Статья из газеты

Крашаков А. С. Будет ли обвал рубля // Аргументы и факты. 2011. № 9. С. 3.

Библиографические ссылки

Библиографические ссылки требуется приводить при цитировании, заимствовании материалов из других источников, упоминании или анализе работ того или иного автора, а также при необходимости адресовать читателя к трудам, в которых рассматривался данный вопрос.

Ссылки должны быть затекстовыми, с указанием номера соответствующего источника (на который автор ссылается в работе) в соответствии с библиографическим списком и соответствующей страницы.

Пример оформления затекстовой ссылки

Ссылка в тексте: «При оценке стоимости земли необходимо учесть все возможности ее производственного использования» [17, С. 191].

В списке использованных источников:

17. *Борисов Е. Ф.* Основы экономики. М.: Юристъ, 2008. 308 с.

ОРГАНИЗАЦИЯ ЗАЩИТЫ РЕФЕРАТА

Необходимо заранее подготовить тезисы выступления (план-конспект).

Порядок защиты реферата.

1. Краткое сообщение, характеризующее цель и задачи работы, ее актуальность, полученные результаты, вывод и предложения.
2. Ответы магистранта на вопросы преподавателя.
3. Отзыв руководителя-консультанта о ходе выполнения работы.

Советы магистранту:

- Готовясь к защите реферата, вы должны вспомнить материал максимально подробно, и это должно найти отражение в схеме вашего ответа. Но тут же необходимо выделить главное, что наиболее важно для понимания материала в целом, иначе вы сможете проговорить все 15-20 минут и не раскрыть существа вопроса. Особенно строго следует отбирать примеры и иллюстрации.
- Вступление должно быть очень кратким – 1-2 фразы (если вы хотите подчеркнуть при этом важность и сложность данного вопроса, то не говорите, что он сложен и важен, а покажите его сложность и важность).
- Целесообразнее вначале показать свою схему раскрытия вопроса, а уж потом ее детализировать.
- Рассказывать будет легче, если вы представите себе, что объясняете материал очень способному и хорошо подготовленному человеку, который не знает именно этого раздела, и что при этом вам обязательно нужно доказать важность данного раздела и заинтересовать в его освоении.
- Строго следите за точностью своих выражений и правильностью употребления терминов.
- Не пытайтесь рассказать побольше за счет ускорения темпа, но и не мямлите.
- Не демонстрируйте излишнего волнения и не напрашивайтесь на сочувствие.
- Будьте особенно внимательны ко всем вопросам преподавателя, к малейшим его замечаниям. И уж ни в коем случае его не перебивайте!
- Не бойтесь дополнительных вопросов – чаще всего преподаватель использует их как один из способов помочь вам или сэкономить время. Если вас прервали, а при оценке ставят в вину пропуск важной части материала, не возмущайтесь, а покажите план своего ответа, где эта часть стоит несколько позже того, на чем вы были прерваны.
- Прежде чем отвечать на дополнительный вопрос, необходимо сначала правильно его понять. Для этого нужно хотя бы немного подумать, иногда переспросить, уточнить: правильно ли вы поняли поставленный вопрос. И при ответе следует соблюдать тот же принцип экономности мышления, а не высказывать без разбора все, что вы можете сказать.
- Будьте доброжелательны и тактичны, даже если к ответу вы не готовы (это вина не преподавателя, а ваша).

ТЕМЫ РЕФЕРАТА

1. Общение как социально-психологическая категория.
2. Коммуникативная культура в деловом общении.
3. Условия общения и причины коммуникативных неудач.
4. Роль невербальных компонентов в речевом общении.
5. Речевой этикет, его основные функции и правила.
6. Причины отступлений от норм в речи, типы речевых ошибок, пути их устранения и предупреждения.
7. Деловая беседа (цели, задачи, виды, структура).
8. Особенности телефонного разговора.
9. Новые тенденции в практике русского делового письма.
10. Культура дискутивно-полемической речи. Виды споров, приемы и уловки в споре
11. Основные правила эффективного общения.
12. Личность как субъект общения. Коммуникативная компетентность личности.
13. Конфликтное поведение и причины его возникновения в деструктивном взаимодействии.
14. Деловое общение и управление им.
15. Отношения сотрудничества и конфликта в представлениях российских работников.
16. Реформы в России и проблемы общения молодого поколения и работодателей.
17. Культура речи в деловом общении.
18. Содержание закона конгруэнтности и его роль в деловом общении.
19. Этика использования средств выразительности деловой речи.
20. Особенности речевого поведения.
21. Культура устной и письменной речи делового человека в современной России.
22. Вербальные конфликтогены в практике современного российского общества.
23. Этические нормы телефонного разговора.
24. Основные тенденции развития Российской деловой культуры.
25. Характеристика манипуляций в общении.
26. Приемы, стимулирующие общение и создание доверительных отношений.
27. Правила подготовки публичного выступления.
28. Правила подготовки и проведения деловой беседы.
29. Типология конфликтных личностей и способы общения с ними.
30. Этикет и имидж делового человека.

ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить информацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Средства коммуникации в учебной и профессиональной деятельности*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете*(в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по
учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

ФТД.В.03 ОСНОВЫ СОЦИАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ И ПРАВОВЫХ ЗНАНИЙ

Направление
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрена на заседании кафедры	Рассмотрена методической комиссией
Управления персоналом	Горно-механического факультета
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____	Председатель _____
(подпись)	*(подпись)*
Беляева Е.А.	Осипов П.А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 06.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Методические рекомендации по решению практико-ориентированных заданий	5
2	Методические указания по подготовке к опросу	9
3	Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям	11
4	Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям	13
5	Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов	14
	Заключение	17
	Список использованных источников	18

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов может рассматриваться как организационная форма обучения - система педагогических условий, обеспечивающих управление учебной деятельностью студентов по освоению знаний и умений в области учебной и научной деятельности без посторонней помощи.

Самостоятельная работа студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- формирования практических (общеучебных и профессиональных) умений и навыков;
- развитияисследовательских умений;
- получения навыков эффективной самостоятельной профессиональной (практической и научно-теоретической) деятельности.

В учебном процессе выделяют два вида самостоятельной работы:

- аудиторная;
- внеаудиторная.

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа, не предусмотренная образовательной программой, учебным планом и учебно-методическими материалами, раскрывающими и конкретизирующими их содержание, осуществляется студентами инициативно, с целью реализации собственных учебных и научных интересов.

Для более эффективного выполнения самостоятельной работы по дисциплине преподаватель рекомендует студентам источники и учебно-методические пособия для работы, характеризует наиболее рациональную методику самостоятельной работы, демонстрирует ранее выполненные студентами работы и т. п.

Подразумевается несколько категорий видов самостоятельной работы студентов, значительная часть которых нашла отражения в данных методических рекомендациях:

- работа с источниками литературы и официальными документами (*использование библиотечно-информационной системы*);
- выполнение заданий для самостоятельной работы в рамках учебных дисциплин (*рефераты, эссе, домашние задания, решения практико-ориентированных заданий*);

- реализация элементов научно-педагогической практики (*разработка методических материалов, тестов, тематических портфолио*);
- реализация элементов научно-исследовательской практики (*подготовка текстов докладов, участие в исследованиях*).

Особенностью организации самостоятельной работы студентов является необходимость не только подготовиться к сдаче зачета, но и собрать, обобщить, систематизировать, проанализировать информацию по темам дисциплины.

Технология организации самостоятельной работы студентов включает использование информационных и материально-технических ресурсов образовательного учреждения.

Самостоятельная работа может осуществляться индивидуально или группами студентовonline и на занятиях в зависимости от цели, объема, конкретной тематики самостоятельной работы, уровня сложности, уровня умений студентов.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы студентов могут быть использованы обмен информационными файлами, семинарские занятия, тестирование, опрос, доклад, реферат, самоотчеты, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

Контроль результатов внеаудиторной самостоятельной работы студентов осуществляется в пределах времени, отведенного на обязательные учебные занятия по дисциплине.

1. Методические рекомендации по решению практико-ориентированных заданий

Практико-ориентированные задания - метод анализа ситуаций. Суть его заключается в том, что студентам предлагают осмыслить реальную жизненную ситуацию, описание которой одновременно отражает не только какую-либо практическую проблему, но и актуализирует определенный комплекс знаний, который необходимо усвоить при разрешении данной проблемы. При этом сама проблема не имеет однозначных решений.

Использование метода практико-ориентированного задания как образовательной технологии профессионально-ориентированного обучения представляет собой сложный процесс, плохо поддающийся алгоритмизации [1] . Формально можновыделить следующиеэтапы:

- ознакомление студентовс текстом;
- анализ практико-ориентированного задания;
- организация обсуждения практико-ориентированного задания, дискуссии, презентации;
- оценивание участников дискуссии;
- подведение итогов дискуссии.

Ознакомление студентов с текстом практико-ориентированного задания и последующий анализ практико-ориентированного задания чаще всего осуществляются за несколько дней до его обсуждения и реализуются как самостоятельная работа студентов; при этом время, отводимое на подготовку, определяется видом практико-ориентированного задания, его объемом и сложностью.

Общая схема работы с практико-ориентированное заданием на данном этапе может быть представлена следующим образом: в первую очередь следует выявить ключевые проблемы практико-ориентированного задания и понять, какие именно из представленных данных важны для решения; войти в ситуационный контекст практико-ориентированного задания, определить, кто его главные действующие лица, отобрать факты и понятия, необходимые для анализа, понять, какие трудности могут возникнуть при решении задачи; следующим этапом является выбор метода исследования.

Знакомство с небольшими практико-ориентированного заданиями и их обсуждение может быть организовано непосредственно на занятиях. Принципиально важным в этом случае является то, чтобы часть теоретического курса, на которой базируется практико-ориентированное задание, была бы прочитана и проработана студентами.

Максимальная польза из работы над практико-ориентированного заданиями будет извлечена в том случае, если аспиранты при предварительном знакомстве с ними будут придерживаться систематического подхода к их анализу, основные шаги которого представлены ниже:

1. Выпишите из соответствующих разделов учебной дисциплины ключевые идеи, для того, чтобы освежить в памяти теоретические концепции и подходы, которые Вам предстоит использовать при анализе практико-ориентированного задания.
2. Бегло прочтите практико-ориентированное задание, чтобы составить о нем общее представление.
3. Внимательно прочтите вопросы к практико-ориентированное задание и убедитесь в том, что Вы хорошо поняли, что Вас просят сделать.
4. Вновь прочтите текст практико-ориентированного задания, внимательно фиксируя все факторы или проблемы, имеющие отношение к поставленным вопросам.
5. Прикиньте, какие идеи и концепции соотносятся с проблемами, которые Вам предлагается рассмотреть при работе с практико-ориентированное заданием.

---

[1] Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально -ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

Организация обсуждения практико-ориентированного задания предполагает формулирование перед студентами вопросов, включение их в дискуссию. Вопросы обычно подготавливают заранее и предлагают студентам вместе с текстом практико-ориентированного задания. При разборе учебной ситуации преподаватель может занимать активную или пассивную позицию, иногда он «дирижирует» разбором, а иногда ограничивается подведением итогов дискуссии.

Организация обсуждения практико-ориентированных заданий обычно основывается на двух методах. Первый из них носит название традиционного Гарвардского метода - открытая дискуссия. Альтернативным методом является метод, связанный с индивидуальным или групповым опросом, в ходе которого аспиранты делают формальную устную оценку ситуации и предлагают анализ представленного практико-ориентированного задания, свои решения и рекомендации, т.е. делают презентацию. Этот метод позволяет некоторым студентам минимизировать их учебные усилия, поскольку каждый аспирант опрашивается один- два раза за занятие. Метод развивает у студентов коммуникативные навыки, учит их четко выражать свои мысли. Однако, этот метод менее динамичен, чем Гарвардский метод. В открытой дискуссии организация и контроль участников более сложен.

Дискуссия занимает центральное место в методе. Ее целесообразно использовать в том случае, когда аспиранты обладают значительной степенью зрелости и самостоятельности мышления, умеют аргументировать, доказывать и обосновывать свою точку зрения. Важнейшей характеристикой дискуссии является уровень ее компетентности, который складывается из компетентности ее участников. Неподготовленность студентов к дискуссии делает ее формальной, превращает в процесс вытаскивания ими информации у преподавателя, а не самостоятельное ее добывание.

Особое место в организации дискуссии при обсуждении и анализе практико-ориентированного задания принадлежит использованию метода генерации идей, получившего название «мозговой атаки» или «мозгового штурма».

Метод «мозговой атаки» или «мозгового штурма» был предложен в 30-х годах прошлого столетия А. Осборном как групповой метод решения проблем. К концу XX столетия этот метод приобрел особую популярность в практике управления и обучения не только как самостоятельный метод, но и как использование в процессе деятельности с целью усиления ее продуктивности. В процессе обучения «мозговая атака» выступает в качестве важнейшего средства развития творческой активности студентов. «Мозговая атака» включает в себя три фазы.

Первая фаза представляет собой вхождение в психологическую раскованность, отказ от стереотипности, страха показаться смешным и неудачником; достигается созданием благоприятной психологической обстановки и взаимного доверия, когда идеи теряют авторство, становятся общими. Основная задача этой фазы - успокоиться и расковаться.

Вторая фаза - это собственно атака; задача этой фазы - породить поток, лавину идей. «Мозговая атака» в этой фазе осуществляется по следующим принципам:

- есть идея, - говорю, нет идеи, - не молчу;
- поощряется самое необузданное ассоциирование, чем более дикой покажется идея, тем лучше;
- количество предложенных идей должно быть как можно большим;
- высказанные идеи разрешается заимствовать и как угодно комбинировать, а также видоизменять и улучшать;
- исключается критика, можно высказывать любые мысли без боязни, что их признают плохими, критикующих лишают слова;
- не имеют никакого значения социальные статусы участников; это абсолютная демократия и одновременно авторитаризм сумасшедшей идеи;
- все идеи записываются в протокольный список идей;

• время высказываний - не более 1-2 минут.

Третья фаза представляет собой творческий анализ идей с целью поиска конструктивного решения проблемы по следующим правилам:

- анализировать все идеи без дискриминации какой-либо из них;
- найти место идее в системе и найти систему под идею;
- не умножать сущностей без надобности;
- не должна нарушаться красота и изящество полученного результата;
- должно быть принципиально новое видение;
- ищи «жемчужину в навозе».

В методе мозговая атака применяется при возникновении у группы реальных затруднений в осмыслении ситуации, является средством повышения активности студентов. В этом смысле мозговая атака представляется не как инструмент поиска новых решений, хотя и такая ее роль не исключена, а как своеобразное «подталкивание» к познавательной активности.

Презентация, или представление результатов анализа практико-ориентированного задания, выступает очень важным аспектом метода ***case-study***. Умение публично представить интеллектуальный продукт, хорошо его рекламировать, показать его достоинства и возможные направления эффективного использования, а также выстоять под шквалом критики, является очень ценным интегральным качеством современного специалиста. Презентация оттачивает многие глубинные качества личности: волю, убежденность, целенаправленность, достоинство и т.п.; она вырабатывает навыки публичного общения, формирования своего собственного имиджа.

Публичная (устная) презентация предполагает представление решений практико-ориентированного задания группе, она максимально вырабатывает навыки публичной деятельности и участия в дискуссии. Устная презентация обладает свойством кратковременного воздействия на студентов и, поэтому, трудна для восприятия и запоминания. Степень подготовленности выступающего проявляется в спровоцированной им дискуссии: для этого необязательно делать все заявления очевидными и неопровержимыми. Такая подача материала при анализе практико-ориентированного задания может послужить началом дискуссии. При устной презентации необходимо учитывать эмоциональный настрой выступающего: отношение и эмоции говорящего вносят существенный вклад в сообщение. Одним из преимуществ публичной (устной) презентации является ее гибкость. Оратор может откликаться на изменения окружающей обстановки, адаптировать свой стиль и материал, чувствуя настроение аудитории.

Непубличная презентация менее эффектна, но обучающая роль ее весьма велика. Чаще всего непубличная презентация выступает в виде подготовки отчета по выполнению задания, при этом стимулируются такие качества, как умение подготовить текст, точно и аккуратно составить отчет, не допустить ошибки в расчетах и т.д. Подготовка письменного анализа практико-ориентированного задания аналогична подготовке устного, с той разницей, что письменные отчеты-презентации обычно более структурированы и детализированы. Основное правило письменного анализа практико-ориентированного задания заключается в том, чтобы избегать простого повторения информации из текста, информация должна быть представлена в переработанном виде. Самым важным при этом является собственный анализ представленного материала, его соответствующая интерпретация и сделанные предложения. Письменный отчет - презентация может сдаваться по истечении некоторого времени после устной презентации, что позволяет студентам более тщательно проанализировать всю информацию, полученную в ходе дискуссии.

Как письменная, так и устная презентация результатов анализа практико-ориентированного задания может быть групповая и индивидуальная. Отчет может быть индивидуальным или групповым в зависимости от сложности и объема задания. Индивидуальная презентация формирует ответственность, собранность, волю;

групповая - аналитические способности, умение обобщать материал, системно видеть проект.

Оценивание участников дискуссии является важнейшей проблемой обучения посредством метода практико-ориентированного задания. При этом выделяются следующие требования к оцениванию:

- объективность - создание условий, в которых бы максимально точно выявлялись знания обучаемых, предъявление к ним единых требований, справедливое отношение к каждому;
- обоснованность оценок - их аргументация;
- систематичность - важнейший психологический фактор, организующий и дисциплинирующий студентов, формирующий настойчивость и устремленность в достижении цели;
- всесторонность и оптимальность.

Оценивание участников дискуссии предполагает оценивание не столько набора определенных знаний, сколько умения студентов анализировать конкретную ситуацию, принимать решение, логически мыслить.

Следует отметить, что оценивается содержательная активность студента в дискуссии или публичной (устной) презентации, которая включает в себя следующие составляющие:

- выступление, которое характеризует попытку серьезного предварительного
- анализа (правильность предложений, подготовленность,
- аргументированность и т.д.);
- обращение внимания на определенный круг вопросов, которые требуют углубленного обсуждения;
- владение категориальным аппаратом, стремление давать определения, выявлять содержание понятий;
- демонстрация умения логически мыслить, если точки зрения, высказанные раньше, подытоживаются и приводят к логическим выводам;
- предложение альтернатив, которые раньше оставались без внимания;
- предложение определенного плана действий или плана воплощения решения;
- определение существенных элементов, которые должны учитываться при анализе практико-ориентированного задания;
- заметное участие в обработке количественных данных, проведении расчетов;
- подведение итогов обсуждения.

При оценивании анализа практико-ориентированного задания, данного студентами при непубличной (письменной) презентации учитывается:

- формулировка и анализ большинства проблем, имеющихся в практико-ориентированное задание;
- формулировка собственных выводов на основании информации о практико-ориентированное задание, которые отличаются от выводов других студентов;
- демонстрация адекватных аналитических методов для обработки информации;
- соответствие приведенных в итоге анализа аргументов ранее выявленным проблемам, сделанным выводам, оценкам и использованным аналитическим методам.

2. Методические указанияпо подготовке к опросу

Самостоятельная работа обучающихся включает подготовку к устному или письменному опросу на семинарских занятиях. Для этого обучающийся изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

Письменный опрос

В соответствии с технологической картой письменный опрос является одной из форм текущего контроля успеваемости студента по данной дисциплине. При подготовке к письменному опросу студент должен внимательно изучает лекции, основную и дополнительную литературу, публикации, информацию из Интернет-ресурсов. Темы и вопросы к семинарским занятиям, вопросы для самоконтроля приведены в методических указаниях по разделам и доводятся до обучающихся заранее.

При изучении материала студент должен убедиться, что хорошо понимает основную терминологию темы, умеет ее использовать в нужном контексте. Желательно составить краткий конспект ответа на предполагаемые вопросы письменной работы, чтобы убедиться в том, что студент владеет материалом и может аргументировано, логично и грамотно письменно изложить ответ на вопрос. Следует обратить особое внимание на написание профессиональных терминов, чтобы избегать грамматических ошибок в работе. При изучении новой для студента терминологии рекомендуется изготовить карточки, которые содержат новый термин и его расшифровку, что значительно облегчит работу над материалом.

Устный опрос

Целью устного собеседования являются обобщение и закрепление изученного курса. Студентам предлагаются дляосвещения сквозные концептуальные проблемы. При подготовке следует использовать лекционный материал и учебную литературу. Для более глубокого постижения курса и более основательной подготовки рекомендуется познакомиться с указанной дополнительной литературой. Готовясь к семинару, студент должен, прежде всего, ознакомиться с общим планом семинарского занятия. Следует внимательно прочесть свой конспект лекции по изучаемой теме и рекомендуемую к теме семинара литературу. С незнакомыми терминами и понятиями следует ознакомиться в предлагаемом глоссарии, словаре или энциклопедии[2].

Критерии качества устного ответа.

1. Правильность ответа по содержанию.
2. Полнота и глубинаответа.
3. Сознательность ответа(учитывается понимание излагаемого материала).
4. Логика изложенияматериала (учитывается умение строить целостный, последовательный рассказ, грамотно пользоваться профессиональной терминологией).
5. Рациональность использованных приемов и способов решения поставленной учебной задачи (учитывается умение использовать наиболее прогрессивные и эффективные способы достижения цели).
6. Своевременностьи эффективность использования наглядных пособий и технических средств при ответе (учитывается грамотно и с пользой применять наглядность и демонстрационный опыт при устном ответе).
7. Использованиедополнительного материала (приветствуется, но не обязательно для всех студентов).

[2]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

8. Рациональность использования времени, отведенного на задание (не одобряется затянутость выполнения задания, устного ответа во времени, с учетом индивидуальных особенностей студентов)[3].

Ответ на каждый вопрос из плана семинарского занятия должен быть содержательным и аргументированным. Для этого следует использовать документы, монографическую, учебную и справочную литературу.

Для успешной подготовки к устному опросу, студент должен законспектировать рекомендуемую литературу, внимательно осмыслить лекционный материал и сделать выводы. В среднем, подготовка к устному опросу по одному семинарскому занятию занимает от 2 до 4 часов в зависимости от сложности темы и особенностей организации обучающимся своей самостоятельной работы.

3.Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям

На практических занятиях необходимо стремиться к самостоятельному решению задач, находя для этого более эффективные методы. При этом студентам надо приучить себя доводить решения задач до конечного «идеального» ответа. Это очень важно для

[3]Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: http://priab.ru/images/metod_agro/Metod_Inostran_yazyk_35.03.04_Agro_15.01.2016.pdf

будущих специалистов. Практические занятия вырабатывают навыки самостоятельной творческой работы, развивают мыслительные способности.

Практическое занятие – активная форма учебного процесса, дополняющая теоретический курс или лекционную часть учебной дисциплины и призванная помощь обучающимся освоиться в «пространстве» (тематике) дисциплины, самостоятельно прооперировать теоретическими знаниями на конкретном учебном материале.

Продолжительность одного практического занятия – от 2 до 4 академических часов. Общая доля практических занятий в учебном времени на дисциплину – от 10 до 20 процентов (при условии, что все активные формы займут в учебном времени на дисциплину от 40 до 60 процентов).

Для практического занятия в качестве темы выбирается обычно такая учебная задача, которая предполагает не существенные эвристические и аналитические напряжения и продвижения, а потребность обучающегося «потрогать» материал, опознать в конкретном то общее, о чем говорилось в лекции. Например, при рассмотрении вопросов оплаты труда, мотивации труда и проблем безработицы в России имеет смысл провести практические занятия со следующими сюжетами заданий: «Расчет заработной платы работников предприятия». «Разработка механизма мотивации труда на предприятии N». «В чем причины и особенности безработицы в России?». Последняя тема предполагает уже некоторую аналитическую составляющую. Основная задача первой из этих тем - самим посчитать заработную плату для различных групп работников на примере заданных параметров для конкретного предприятия, т. е. сделать расчеты «как на практике»; второй – дать собственный вариант мотивационной политики для предприятия, учитывая особенности данного объекта, отрасли и т.д.; третьей – опираясь на теоретические знания в области проблем занятости и безработицы, а также статистические материалы, сделать авторские выводы о видах безработицы, характерных для России, и их причинах, а также предложить меры по минимизации безработицы.

Перед проведением занятия должен быть подготовлен специальный материал – тот объект, которым обучающиеся станут оперировать, активизируя свои теоретические (общие) знания и тем самым, приобретая навыки выработки уверенных суждений и осуществления конкретных действий.

Дополнительный материал для практического занятия лучше получить у преподавателя заранее, чтобы у студентов была возможность просмотреть его и подготовить вопросы.

Условия должны быть такими, чтобы каждый мог работать самостоятельно от начала до конца. В аудитории должны быть «под рукой» необходимые справочники и тексты законов и нормативных актов по тематике занятия. Чтобы сделать практическое занятие максимально эффективным, надо заранее подготовить и изучить материал по наиболее интересным и практически важным темам.

Особенности практического занятия с использованием компьютера

Для того чтобы повысить эффективность проведения практического занятия, может использоваться компьютер по следующим направлениям:

- поиск информации в Интернете по поставленной проблеме: в этом случае преподаватель представляет обучающимся перечень рекомендуемых для посещения Интернет-сайтов;
- использование прикладных обучающих программ;
- выполнение заданий с использованием обучающимися заранее установленных преподавателем программ;
- использование программного обеспечения при проведении занятий, связанных с моделированием социально-экономических процессов.

4.Методические рекомендации по подготовке семинарским занятиям

Семинар представляет собой комплексную форму и завершающее звено в изучении определенных тем, предусмотренных программой учебной дисциплины. Комплексность данной формы занятий определяется тем, что в ходе её проведения сочетаются выступления обучающихся и преподавателя: рассмотрение обсуждаемой проблемы и анализ различных, часто дискуссионных позиций; обсуждение мнений обучающихся и разъяснение (консультация) преподавателя; углубленное изучение теории и приобретение навыков умения ее использовать в практической работе.

По своему назначению семинар, в процессе которого обсуждается та или иная научная проблема, способствует:

- углубленному изучению определенного раздела учебной дисциплины, закреплению знаний;
- отработке методологии и методических приемов познания;
- выработке аналитических способностей, умения обобщения и формулирования выводов;
- приобретению навыков использования научных знаний в практической деятельности;
- выработке умения кратко, аргументированно и ясно излагать обсуждаемые вопросы;
- осуществлению контроля преподавателя за ходом обучения.

Семинары представляет собой дискуссию в пределах обсуждаемой темы (проблемы). Дискуссия помогает участникам семинара приобрести более совершенные знания, проникнуть в суть изучаемых проблем. Выработать методологию, овладеть методами анализа социально-экономических процессов. Обсуждение должно носить творческий характер с четкой и убедительной аргументацией.

По своей структуре семинар начинается со вступительного слова преподавателя, в котором кратко излагаются место и значение обсуждаемой темы (проблемы) в данной дисциплине, напоминаются порядок и направления ее обсуждения. Конкретизируется ранее известный обучающимся план проведения занятия. После этого начинается процесс обсуждения вопросов обучающимися. Завершается занятие заключительным словом преподавателя.

Проведение семинарских занятий в рамках учебной группы (20 - 25 человек) позволяет обеспечить активное участие в обсуждении проблемы всех присутствующих.

По ходу обсуждения темы помните, что изучение теории должно быть связано с определением (выработкой) средств, путей применения теоретических положений в практической деятельности, например, при выполнении функций государственного служащего. В то же время важно не свести обсуждение научной проблемы только к пересказу случаев из практики работы, к критике имеющих место недостатков. Дискуссии имеют важное значение: учат дисциплине ума, умению выступать по существу, мыслить логически, выделяя главное, критически оценивать выступления участников семинара.

В процессе проведения семинара обучающиеся могут использовать разнообразные по своей форме и характеру пособия (от доски смелом до самых современных технических средств), демонстрируя фактический, в том числе статистический материал, убедительно подтверждающий теоретические выводы и положения. В завершение обсудите результаты работы семинара и сделайте выводы, что хорошо усвоено, а над чем следует дополнительно поработать.

В целях эффективности семинарских занятий необходима обстоятельная подготовка к их проведению. В начале семестра (учебного года) возьмите в библиотеке необходимые методические материалы для своевременной подготовки к семинарам. Во время лекций, связанных с темой семинарского занятия, следует обращать внимание на то, что необходимо дополнительно изучить при подготовке к семинару (новые официальные документы, статьи в периодических журналах, вновь вышедшие монографии и т.д.).

5.Методические рекомендации по подготовке к сдаче экзаменов и зачетов

Экзамен - одна из важнейших частей учебного процесса, имеющая огромное значение.

Во-первых, готовясь к экзамену, студент приводит в систему знания, полученные на лекциях, семинарах, практических и лабораторных занятиях, разбирается в том, что осталось непонятным, и тогда изучаемая им дисциплина может быть воспринята в полном объеме с присущей ей строгостью и логичностью, ее практической направленностью. А это чрезвычайно важно для будущего специалиста.

Во-вторых, каждый хочет быть волевым и сообразительным., выдержанным и целеустремленным, иметь хорошую память, научиться быстро находить наиболее рациональное решение в трудных ситуациях. Очевидно, что все эти качества не только украшают человека, но и делают его наиболее действенным членом коллектива. Подготовка и сдача экзамена помогают студенту глубже усвоить изучаемые дисциплины, приобрести навыки и качества, необходимые хорошему специалисту.

Конечно, успех на экзамене во многом обусловлен тем, насколько систематически и глубоко работал студент в течение семестра. Совершенно очевидно, что серьезно продумать и усвоить содержание изучаемых дисциплин за несколько дней подготовки к экзамену просто невозможно даже для очень способного студента. И, кроме того, хорошо известно, что быстро выученные на память разделы учебной дисциплины так же быстро забываются после сдачи экзамена.

При подготовке к экзамену студенты не только повторяют и дорабатывают материал дисциплины, которую они изучали в течение семестра, они обобщают полученные знания, осмысливают методологию предмета, его систему, выделяют в нем основное и главное, воспроизводят общую картину с тем, чтобы яснее понять связь между отдельными элементами дисциплины. Вся эта обобщающая работа проходит в условиях напряжения воли и сознания, при значительном отвлечении от повседневной жизни, т. е. в условиях, благоприятствующих пониманию и запоминанию.

Подготовка к экзаменам состоит в приведении в порядок своих знаний. Даже самые способные студенты не в состоянии в короткий период зачетно-экзаменационной сессии усвоить материал целого семестра, если они над ним не работали в свое время. Для тех, кто мало занимался в семестре, экзамены принесут мало пользы: что быстро пройдено, то быстро и забудется. И хотя в некоторых случаях студент может «проскочить» через экзаменационный барьер, в его подготовке останется серьезный пробел, трудно восполняемый впоследствии.

Определив назначение и роль экзаменов в процессе обучения, попытаемся на этой основе пояснить, как лучше готовиться к ним.

Экзаменам, как правило, предшествует защита курсовых работ (проектов) и сдача зачетов. К экзаменам допускаются только студенты, защитившие все курсовые работы проекты) и сдавшие все зачеты. В вузе сдача зачетов организована так, что при систематической работе в течение семестра, своевременной и успешной сдаче всех текущих работ, предусмотренных графиком учебного процесса, большая часть зачетов не вызывает повышенной трудности у студента. Студенты, работавшие в семестре по плану, подходят к экзаменационной сессии без напряжения, без излишней затраты сил в последнюю, «зачетную» неделю.

Подготовку к экзамену следует начинать с первого дня изучения дисциплины. Как правило, на лекциях подчеркиваются наиболее важные и трудные вопросы или разделы дисциплины, требующие внимательного изучения и обдумывания. Нужно эти вопросы выделить и обязательно постараться разобраться в них, не дожидаясь экзамена, проработать их, готовясь к семинарам, практическим или лабораторным занятиям, попробовать самостоятельно решить несколько типовых задач. И если, несмотря на это, часть материала осталась неусвоенной, ни в коем случае нельзя успокаиваться, надеясь на

то, что это не попадется на экзамене. Факты говорят об обратном; если те или другие вопросы учебной дисциплины не вошли в экзаменационный билет, преподаватель может их задать (и часто задает) в виде дополнительных вопросов.

Точно такое же отношение должно быть выработано к вопросам и задачам, перечисленным в программе учебной дисциплины, выдаваемой студентам в начале семестра. Обычно эти же вопросы и аналогичные задачи содержатся в экзаменационных билетах. Не следует оставлять без внимания ни одного раздела дисциплины: если не удалось в чем-то разобраться самому, нужно обратиться к товарищам; если и это не помогло выяснить какой-либо вопрос до конца, нужно обязательно задать этот вопрос преподавателю на предэкзаменационной консультации. Чрезвычайно важно приучить себя к умению самостоятельно мыслить, учиться думать, понимать суть дела. Очень полезно после проработки каждого раздела восстановить в памяти содержание изученного материала. кратко записав это на листе бумаги. создать карту памяти (умственную карту), изобразить необходимые схемы и чертежи (логико-графические схемы), например, отобразить последовательность вывода теоремы или формулы. Если этого не сделать, то большая часть материала останется не понятой, а лишь формально заученной, и при первом же вопросе экзаменатора студент убедится в том, насколько поверхностно он усвоил материал.

В период экзаменационной сессии происходит резкое изменение режима работы, отсутствует посещение занятий по расписанию. При всяком изменении режима работы очень важно скорее приспособиться к новым условиям. Поэтому нужно сразу выбрать такой режим работы, который сохранился бы в течение всей сессии, т. е. почти на месяц. Необходимо составить для себя новый распорядок дня, чередуя занятия с отдыхом. Для того чтобы сократить потерю времени на включение в работу, рабочие периоды целесообразно делать длительными, разделив день примерно на три части: с утра до обеда, с обеда до ужина и от ужина до сна.

Каждый рабочий период дня надо заканчивать отдыхом. Наилучший отдых в период экзаменационной сессии - прогулка, кратковременная пробежка или какой-либо неутомительный физический труд.

При подготовке к экзаменам основное направление дают программа учебной дисциплины и студенческий конспект, которые указывают, что наиболее важно знать и уметь делать. Основной материал должен прорабатываться по учебнику (если такой имеется) и учебным пособиям, так как конспекта далеко недостаточно для изучения дисциплины, Учебник должен быть изучен в течение семестра, а перед экзаменом сосредоточьте внимание на основных, наиболее сложных разделах. Подготовку по каждому разделу следует заканчивать восстановлением по памяти его краткого содержания в логической последовательности.

За один - два дня до экзамена назначается консультация. Если ее правильно использовать, она принесет большую пользу. Во время консультации студент имеет полную возможность получить ответ на нее ни ясные ему вопросы. А для этого он должен проработать до консультации все темы дисциплины. Кроме того, преподаватель будет отвечать на вопросы других студентов, что будет для вас повторением и закреплением знаний. И еще очень важное обстоятельство: преподаватель на консультации, как правило, обращает внимание на те вопросы, по которым на предыдущих экзаменах ответы были неудовлетворительными, а также фиксирует внимание на наиболее трудных темах дисциплины. Некоторые студенты не приходят на консультации либо потому, что считают, что у них нет вопросов к преподавателю, либо полагают, что у них и так мало времени и лучше самому прочитать материал в конспекте или и учебнике. Это глубокое заблуждение. Никакая другая работа не сможет принести столь значительного эффекта накануне экзамена, как консультация преподавателя.

Но консультация не может возместить отсутствия длительной работы в течение семестра и помочь за несколько часов освоить материал, требующийся к экзамену. На консультации студент получает ответы на трудные или оставшиеся неясными вопросы и, следовательно, дорабатывается материал. Консультации рекомендуется посещать,

подготовив к ним все вопросы, вызывающие сомнения. Если студент придет на консультацию, не проработав всего материала, польза от такой консультации будет невелика.

Очень важным условием для правильного режима работы в период экзаменационной сессии является нормальным сон. Подготовка к экзамену не должна идти в ущерб сну, иначе в день экзамена не будет чувства свежести и бодрости, необходимых для хороших ответов. Вечер накануне экзамена рекомендуем закончить небольшой прогулкой.

Итак, *основные советы* для подготовки к сдаче зачетов и экзаменов состоят в следующем:

- лучшая подготовка к зачетам и экзаменам - равномерная работа в течение всего семестра;
- используйте программы учебных дисциплин - это организует вашу подготовку к зачетам и экзаменам;
- учитывайте, что для полноценного изучения учебной дисциплины необходимо время;
- составляйте планы работы во времени;
- работайте равномерно и ритмично;
- курсовые работы (проекты) желательно защищать за одну - две недели до начала зачетно-экзаменационной сессии;
- все зачеты необходимо сдавать до начала экзаменационной сессии;
- помните, что конспект не заменяет учебник и учебные пособия, а помогает выбрать из него основные вопросы и ответы;
- при подготовке наибольшее внимание и время уделяйте трудным и непонятным вопросам учебной дисциплины;
- грамотно используйте консультации;
- соблюдайте правильный режим труда и отдыха во время сессии, это сохранит работоспособность и даст хорошие результаты;
- учитесь владеть собой на зачете и экзамене;
- учитесь точно и кратко передавать свои мысли, поясняя их, если нужно, логико-графическими схемами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методические указания по выполнению самостоятельной работы обучающихся являются неотъемлемой частью процесса обучения в вузе. Правильнаяорганизация самостоятельной работы позволяет обучающимся развивать умения и навыки в усвоении и систематизации приобретаемых знаний, обеспечивает высокий уровень успеваемости в период обучения, способствует формированию навыков совершенствования профессионального мастерства. Также внеаудиторное время включает в себя подготовку к аудиторным занятиям и изучение отдельных тем, расширяющих и углубляющих представления обучающихся по разделам изучаемой дисциплины.

Таким образом, обучающийся используя методические указания может в достаточном объеме усвоить и успешно реализовать конкретные знания, умения, навыки и получить опыт при выполнении следующих условий:

1) систематическаясамостоятельная работа по закреплению полученных знаний и навыков;

2) добросовестноевыполнение заданий;

3) выяснениеи уточнение отдельных предпосылок, умозаключений и выводов, содержащихся в учебном курсе;

4) сопоставление точек зрения различных авторов по затрагиваемым в учебном курсе проблемам; выявление неточностей и некорректного изложения материала в периодической и специальной литературе;

5) периодическое ознакомление с последними теоретическими и практическими достижениями в области управления персоналом;

6) проведение собственных научных и практических исследований по одной или нескольким актуальным проблемам для *HR*;

7) подготовка научных статей для опубликования в периодической печати, выступление на научно-практических конференциях, участие в работе студенческих научных обществ, круглых столах и диспутах по проблемам управления персоналом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брандес М. П. Немецкий язык. Переводческое реферирование: практикум. М.: КДУ, 2008. – 368с.

2. Долгоруков А. Метод case-study как современная технология профессионально -ориентированного обучения [Электронный ресурс]. Режим доступа: //http://evolkov.net/case/case.study.html/

3. Методические рекомендации по написанию реферата. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hse.spb.ru/edu/recommendations/method-referat-2005.phtml

4. Фролова Н. А. Реферирование и аннотирование текстов по специальности: Учеб. пособие / ВолгГТУ, Волгоград, 2006. - С.5.

5. Методические рекомендации для студентов [Электронный ресурс]: Режим доступа:http://lesgaft.spb.ru/sites/default/files/u57/metod.rekomendacii_dlya_studentov_21.pdf

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И. о. проректора по учебно-методической работе
_____ В. В. Зубов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

ФТД.04 ОСНОВЫ ВОЕННОЙ ПОДГОТОВКИ

Направление -
15.03.06 Мехатроника и робототехника

Профиль -
Мехатроника и робототехника промышленных производств

Одобрены на заседании кафедры	Рассмотрены методической комиссией факультета
Геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях	Горно-механического
(название кафедры)	*(название факультета)*
Зав. кафедрой _____ *(подпись)*	Председатель _____ *(подпись)*
Стороженко Л.А.	Осипов П. А.
(Фамилия И.О.)	*(Фамилия И.О.)*
Протокол № 1 от 18.09.2024	Протокол № 2 от 18.10.2024
(Дата)	*(Дата)*

Екатеринбург

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……3

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ……....5

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ ……..…5

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОПРОСУ……...9

4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ……...10

5. ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ…….....28

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ……31

ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа в высшем учебном заведении - это часть учебного процесса, метод обучения, прием учебно-познавательной деятельности, комплексная целевая стандартизованная учебная деятельность с запланированными видом, типом, формами контроля.

Самостоятельная работа представляет собой плановую деятельность обучающихся по поручению и под методическим руководством преподавателя.

Целью самостоятельной работы студентов является закрепление тех знаний, которые они получили на аудиторных занятиях, а также способствование развитию у студентов творческих навыков, инициативы, умению организовать свое время.

Самостоятельная работа реализует следующие задачи:

- предполагает освоение курса дисциплины;
- помогает освоению навыков учебной работы;
- способствует осознанию ответственности процесса познания;
- способствует углублению и пополнению знаний студентов, освоению ими навыков и умений;
- формирует интерес к познавательным действиям, освоению методов и приемов познавательного процесса,
- создает условия для творческой и научной деятельности обучающихся;
- способствует развитию у студентов таких личных качеств, как целеустремленность, заинтересованность, исследование нового.

Самостоятельная работа обучающегося выполняет следующие функции:

- развивающую (повышение культуры умственного труда, приобщение к творческим видам деятельности, обогащение интеллектуальных способностей студентов);
- информационно-обучающую (учебная деятельность студентов на аудиторных занятиях, неподкрепленная самостоятельной работой, становится мало результативной);
- ориентирующую и стимулирующую (процессу обучения придается ускорение и мотивация);
- воспитательную (формируются и развиваются профессиональные качества специалиста и гражданина);
- исследовательскую (новый уровень профессионально-творческого мышления).

Организация самостоятельной работы студентов должна опираться на определенные требования, а, именно:

- сложность осваиваемых знаний должна соответствовать уровню развития студентов;
- стандартизация заданий в соответствии с логической системой курса дисциплины;
- объем задания должен соответствовать уровню студента;
- задания должны быть адаптированными к уровню студентов.

Содержание самостоятельной работы студентов представляет собой, с одной стороны, совокупность теоретических и практических учебных заданий, которые должен выполнить студент в процессе обучения, объект его деятельности; с другой стороны - это способ деятельности студента по выполнению соответствующего теоретического или практического учебного задания.

Свое внешнее выражение содержание самостоятельной работы студентов находит во всех организационных формах аудиторной и внеаудиторной деятельности, в ходе самостоятельного выполнения различных заданий.

Функциональное предназначение самостоятельной работы студентов в процессе лекций, практических занятий по овладению специальными знаниями заключается в самостоятельном прочтении, просмотре, прослушивании, наблюдении, конспектировании, осмыслении, запоминании и воспроизведении определенной информации. Цель и планирование самостоятельной работы студента определяет преподаватель. Вся информация осуществляется на основе ее воспроизведения.

Так как самостоятельная работа тесно связана с учебным процессом, ее необходимо рассматривать в двух аспектах:

1. аудиторная самостоятельная работа – практические занятия;

2. внеаудиторная самостоятельная работа – подготовка к практическим занятиям.

Основные формы организации самостоятельной работы студентов определяются следующими параметрами:

- содержание учебной дисциплины;

- уровень образования и степень подготовленности студентов;

- необходимость упорядочения нагрузки студентов при самостоятельной работе.

Таким образом, самостоятельная работа студентов является важнейшей составной частью процесса обучения.

Методические указания по организации самостоятельной работы и задания для обучающихся по дисциплине «*Основы военной подготовки*» обращают внимание студента на главное, существенное в изучаемой дисциплине, помогают выработать умение анализировать явления и факты, связывать теоретические положения с практикой, а также облегчают подготовку к сдаче *зачета*.

Настоящие методические указания позволят студентам самостоятельно овладеть фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю подготовки, опытом творческой и исследовательской деятельности, и направлены на формирование компетенций, предусмотренных учебным планом поданному профилю.

Видами самостоятельной работы обучающихся по дисциплине «*Основы военной подготовки*» являются:

- самостоятельное изучение тем курса (в т.ч. рассмотрение основных категорий дисциплины, работа с литературой);

- подготовка к практическим занятиям (в т.ч. ответы на вопросы для самопроверки, подготовка к выполнению практических заданий);

- подготовка к зачету.

В методических указаниях представлены материалы для самостоятельной работы и рекомендации по организации отдельных её видов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В современных условиях подготовка граждан Российской Федерации к военной службе является приоритетным направлением государственной политики. Важнейшими вопросами образования на всех уровнях является воспитание любви к Родине, чувства патриотизма, готовности к защите Отечества.

Образовательная дисциплина «Основы военной подготовки» (далее – дисциплина) реализуется исходя из базовых принципов и направлений военной подготовки, дисциплина состоит из основных разделов военной подготовки, тем военно-политической и правовой подготовки.

Основной целью освоения дисциплины является получение знаний, умений и навыков, необходимых для становления обучающихся образовательных организаций высшего образования (далее – вуз) в качестве граждан способных и готовых к выполнению воинского долга и обязанности по защите своей Родины в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Задачами дисциплины «Основы военной подготовки» являются:

1) формирование у обучающихся понимания главных положений военной доктрины Российской Федерации, а также основ военного строительства и структуры Вооруженных Сил Российской Федерации (далее - ВС РФ);

2) формирование у обучающихся высокого общественного сознания и воинского долга;

3) воспитание дисциплинированности, высоких морально-психологических качеств личности гражданина – патриота;

4) освоение базовых знаний и формирование ключевых навыков военного дела;

5) раскрытие специфики деятельности различных категорий военнослужащих ВС РФ;

6) ознакомление с нормативными документами в области обеспечения обороны государства и прохождения военной службы;

7) формирование строевой подтянутости, уважительного отношения к воинским ритуалам и традициям, военной форме одежды;

8) изучение и принятие правил воинской вежливости;

9) овладение знаниями уставных норм и правил поведения военнослужащих.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации

Тема 1. Общевоинские уставы Вооруженных Сил Российской Федерации, их основные требования и содержание.

Структура, требования и основное содержание общевоинских уставов. Права военнослужащих. Общие обязанности военнослужащих. Воинские звания. Единоначалие. Начальники и подчиненные. Старшие и младшие. Приказ и приказание. Порядок отдачи и выполнение приказа. Воинская вежливость и воинская дисциплина военнослужащих.

Тема 2. Внутренний порядок и суточный наряд.

Размещение военнослужащих. Распределение времени и внутренний порядок. Суточный наряд роты, его предназначение, состав.

Дневальный, дежурный по роте. Развод суточного наряда.

Тема 3. Общие положения Устава гарнизонной и караульной службы.

Общие положения Устава гарнизонной и караульной службы.

Обязанности разводящего, часового.

Раздел 2. Строевая подготовка

Тема 4. Строевые приемы и движение без оружия.

Строй и его элементы. Виды строя. Сигналы для управления строем. Команды и порядок их подачи. Обязанности командиров, военнослужащих перед построением и в строю. Строевой расчет. Строевая стойка. Выполнение команд: «Становись», «Равняйсь», «Смирно», «Вольно», «Заправиться». Повороты на месте. Строевой шаг. Движение строевым шагом. Движение строевым шагом в составе подразделения. Повороты в движении. Движение в составе взвода. Управление подразделением в движении.

Раздел 3. Огневая подготовка из стрелкового оружия

Тема 5. Основы, приемы и правила стрельбы из стрелкового оружия.

Требования безопасности при обращении со стрелковым оружием.

Требования безопасности при проведении занятий по огневой подготовке.

Приемы и правила стрельбы из стрелкового оружия.

Тема 6. Назначение, боевые свойства, материальная часть и применение стрелкового оружия, ручных противотанковых гранатометов и ручных гранат.

Назначение, состав, боевые свойства и порядок сборки разборки АК-74 и РПК-74.

Назначение, состав, боевые свойства и порядок сборки разборки пистолета ПМ.

Назначение, состав, боевые свойства РПГ-7.

Назначение, боевые свойства и материальная часть ручных гранат.

Сборка разборка пистолета ПМ и подготовка его к боевому применению.

Сборка разборка АК-74, РПК-74 и подготовка их к боевому применению.

Снаряжение магазинов и подготовка ручных гранат к боевому применению.

Тема 7. Выполнение упражнений учебных стрельб из стрелкового оружия.
Требования безопасности при организации и проведении стрельб из стрелкового оружия. Порядок выполнения упражнения учебных стрельб. Меры безопасности при проведении стрельб и проверка усвоения знаний и мер безопасности при обращении со стрелковым оружием. Выполнение норматива №1 курса стрельб из стрелкового оружия.

Раздел 4. Основы тактики общевойсковых подразделений

Тема 8. Вооруженные Силы Российской Федерации их состав и задачи.
Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ. Вооруженные Силы Российской Федерации их состав и задачи. Назначение, структура мотострелковых и танковых подразделений сухопутных войск, их задачи в бою. Боевое предназначение входящих в них подразделений.
Тактико-технические характеристики основных образцов вооружения и техники ВС РФ.
Тема 9. Основы общевойскового боя.
Сущность современного общевойскового боя, его характеристики и виды. Способы ведения современного общевойскового боя и средства вооруженной борьбы.
Тема 10. Основы инженерного обеспечения.
Цели и основные задачи инженерного обеспечения частей и подразделений. Назначение, классификация инженерных боеприпасов, инженерных заграждений и их характеристики.
Полевые фортификационные сооружения: окоп, траншея, ход сообщения, укрытия, убежища.
Тема 11. Организация воинских частей и подразделений, вооружение, боевая техника вероятного противника.
Организация, вооружение, боевая техника подразделений мпб и тб армии США.
Организация, вооружение, боевая техника подразделений мпб и тб армии Германии.

Раздел 5. Радиационная, химическая и биологическая защита

Тема 12. Ядерное, химическое, биологическое, зажигательное оружие.
Ядерное оружие. Средства их применения. Поражающие факторы ядерного взрыва и их воздействие на организм человека, вооружение, технику и фортификационные сооружения.
Химическое оружие. Отравляющие вещества (ОВ), их назначение, классификация и воздействие на организм человека. Боевые состояния, средства применения, признаки применения ОВ, их стойкость на местности.
Биологическое оружие. Основные виды и поражающее действие.
Средства применения, внешние признаки применения.

Зажигательное оружие. Поражающие действия зажигательного оружия на личный состав, вооружение и военную технику, средства и способы защиты от него.

Тема 13. Радиационная, химическая и биологическая защита.

Цель, задачи и мероприятия РХБ защиты.

Мероприятия специальной обработки:

дегазация, дезактивация, дезинфекция, санитарная обработка.

Цели и порядок проведения частичной и полной специальной обработки.

Технические средства и приборы радиационной, химической и биологической защиты. Средства индивидуальной защиты и порядок их использования.

Подгонка и техническая проверка средств индивидуальной защиты.

Раздел 6. Военная топография

Тема 14. Местность как элемент боевой обстановки.

Измерения и ориентирование на местности без карты, движение по азимутам.

Местность как элемент боевой обстановки.

Способы ориентирования на местности без карты.

Способы измерения расстояний. Движение по азимутам.

Тема 15. Топографические карты и их чтение, подготовка к работе.

Определение координат объектов и целеуказания по карте.

Геометрическая сущность, классификация и назначение топографических карт.

Определение географических и прямоугольных координат объектов по карте.

Целеуказание по карте.

Раздел 7. Основы медицинского обеспечения

Тема 16. Медицинское обеспечение войск (сил), первая медицинская помощь при ранениях, травмах и особых случаях.

Медицинское обеспечение – как вид всестороннего обеспечения войск.

Обязанности и оснащение должностных лиц медицинской службы тактического звена в бою. Общие правила оказания самопомощи и взаимопомощи.

Первая помощь при ранениях и травмах.

Первая помощь при поражении отравляющими веществами, бактериологическими средствами. Содержание мероприятия доврачебной помощи.

Раздел 8. Военно-политическая подготовка

Тема 17. Россия в современном мире. Основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны.

Новые тенденции и особенности развития современных международных отношений.

Место и роль России в многополярном мире.

Основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития Российской Федерации.
Цели, задачи, направления и формы военно-политической работы в подразделении, требования руководящих документов.

Раздел 9. Правовая подготовка

Тема 18. Военная доктрина Российской Федерации. Законодательство Российской Федерации о прохождении военной службы.
Основные положения Военной доктрины Российской Федерации.
Правовая основа воинской обязанности и военной службы.
Понятие военной службы, ее виды и их характеристики.
Обязанности граждан по воинскому учету.

3. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОПРОСУ

Раздел 3. Огневая подготовка из стрелкового оружия

1. Каковы виды стрелкового оружия
2. Какие бывают боеприпасы
3. Марки ручных гранат.

Раздел 4. Основы тактики общевойсковых подразделений

1. Из чего состоит организационно-штатная структура общевойсковых подразделений
2. Перечислите Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ
3. Каковы основные факторы, определяющие характер, организацию и способы ведения современного общевойскового боя
4. Перечислите основные инженерно-технических мероприятия.
5. Какие знаете защитные сооружения.
6. Виды заграждений
7. На чем основывается полевое водоснабжение.
8. Каковы емкости РДВ
9. Назначение ТУФ-200
10. Назначение МТК
11. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии США
12. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии Германии

Раздел 5. Радиационная, химическая и биологическая защита

1. Общие сведения о ядерном оружии
2. Общие сведения о химическом оружии
3. Общие сведения о биологическом оружии
4. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях радиоактивного заражения
5. Каковы правила поведения и меры профилактики при применении отравляющих веществ

6. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях применения бактериальных средств
7. Какие знаете индивидуальные средства РХБ защиты
8. Каковы мероприятия радиационной, химической и биологической защиты?

Раздел 6. Военная топография

1. Каковы тактические свойства местности, их влияние на действия подразделений в боевой обстановке
2. Назначение, номенклатура и условные знаки топографических карт
3. Способы ориентирования на местности по карте и без карты
4. Что такое номенклатура топографических карт
5. Как задается координаты объекта
6. Уточнение координат по "улитке"

Раздел 8. Военно-политическая подготовка

1. Каковы тенденции и особенности развития современных международных отношений, место и роль России в многополярном мире, основные направления социально-экономического, политического и военно-технического развития страны, основные положения Военной доктрины РФ
2. Правовое положение и порядок прохождения военной службы.

Раздел 9. Правовая подготовка

1. Что значит нормативно-правовой акт
2. Чем определяется порядок прохождения военной службы

4. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Кем утверждаются ОВУ?
- Вариант ответа
Государственной Думой
- Вариант ответа
Правительством РФ
- Вариант ответа
Федеральным собранием РФ
- Вариант ответа
Президентом РФ

2. Кем присваивается первое офицерское звание?
- Вариант ответа
Мин. Обороны РФ
- Вариант ответа
Президентом РФ
- Вариант ответа
Правительством РФ
- Вариант ответа
Командующим ВВО

- Вариант ответа
Командиром в/ч

3. К какому виду ответственности могут быть привлечены офицеры запаса за уклонение от призыва на действительную в/службу?
- Вариант ответа
моральной
- Вариант ответа
нравственной
- Вариант ответа
административной
- Вариант ответа
уголовной
- Вариант ответа
общественной

4. На чем основываются взаимоотношения между военнослужащими?
- Вариант ответа
на дружбе
- Вариант ответа
на чувстве взаимного уважения
- Вариант ответа
на товариществе
- Вариант ответа
на любви
- Вариант ответа
на вере в силу армии РФ

5. Какое минимальное количество часов отдыха разрешено военнослужащим согласно распорядку дня?
- Вариант ответа
не > 10
- Вариант ответа
не < 8
- Вариант ответа
не > 8
- Вариант ответа
не > 6
- Вариант ответа
не < 6

6. Какое минимальное количество унитазов (очек) должно быть в подразделении (роте)?
- Вариант ответа

не < 15 шт
- Вариант ответа
1 на 30 чел
- Вариант ответа
не > 20 шт
- Вариант ответа
1 на 20 чел
- Вариант ответа
1 на 10-12 чел

7. Сколько должно быть умывальников для умывания в подразделении (роте)?
- Вариант ответа
1 на 5-7 чел
- Вариант ответа
не > 10 шт
- Вариант ответа
не < 10 шт
- Вариант ответа
1 на 10 чел
- Вариант ответа
1 на 8-9 чел

8. Сколько форм одежды для проведения утренней физзарядки?
- Вариант ответа
1
- Вариант ответа
2
- Вариант ответа
3
- Вариант ответа
6
- Вариант ответа
5

9. На чем основывается воинская дисциплина?
- Вариант ответа
на чувстве ответственности за порученное дело
- Вариант ответа
на страхе перед командиром
- Вариант ответа
на осознании каждым в/с воинского долга и личной ответственности за защиту своего Отечества, на его беззаветной преданности своему народу
- Вариант ответа
на взаимном уважении военнослужащих

- Вариант ответа
на чувстве преданности Родине

10. Какие поощрения могут применяться к младшим офицерам?
- Вариант ответа
внеочередной отпуск до 10 суток
- Вариант ответа
увольнение
- Вариант ответа
благодарность, награждение грамотой, присвоение внеочередного воинского звания
- Вариант ответа
фотографированием у развернутого б/знамени части
- Вариант ответа
награждение путевкой в санаторий

11. Какие взыскания могут накладываться на мл. офицеров?
- Вариант ответа
до 3 нарядов вне очереди на службу
- Вариант ответа
лишение увольнения
- Вариант ответа
арест с содержанием на г/вахте
- Вариант ответа
отлучение от офицерского собрания
- Вариант ответа
выговор, строгий выговор, снятие с должности, понижение в в/звании

12. Каким взысканием может подвергнуться солдат, проходящий военную службу по призыву, за нарушение воинской дисциплины?
- Вариант ответа
арест с содержанием на г/вахте до 30 сут
- Вариант ответа
арест с содержанием на г/вахте до 20 сут
- Вариант ответа
лишение очередного отпуска на родину
- Вариант ответа
задержка в выплате денежного довольствия
- Вариант ответа
выговор, строгий выговор, лишение очередного увольнения, до 10 суток ареста с содержанием на г/вахте, лишением нагрудного знака отличника, снижением в должности в в/звании на одну ступень, с переводом на низшую должность, до 5 нарядов вне очереди на работу

13. Каким взысканиям может подвергаться КО за нарушения воинской дисциплины?
- Вариант ответа
снятие с должности, выговор, строгий выговор
- Вариант ответа
лишение в/звания «сержант»
- Вариант ответа
лишение очередного отпуска
- Вариант ответа
арест на г/вахту до 5 суток
- Вариант ответа
лишение денежного довольствия

14. Какие поощрения могут применяться к солдату?
- Вариант ответа
до 10 увольнений вне очереди
- Вариант ответа
снятие ранее наложенного взыскания, благодарность, награждение грамотой, ценным подарком, присвоение в/звания «ефрейтор», фотографированием у развернутого б/знамени
- Вариант ответа
до 15 суток кратковременного отпуска
- Вариант ответа
награждение боевым именным орудием
- Вариант ответа
выдача дополнительного продовольственного пайка

15. Обязанности КВ по отношению к подчиненным при их поощрении?
- Вариант ответа
присваивать в/звания «мл. сержант», «сержант», «ст. сержант»
- Вариант ответа
отправлять в отпуск на родину на срок до 10 сут
- Вариант ответа
объявлять благодарность, снятие ранее наложенного взыскания
- Вариант ответа
освобождать с г/вахты
- Вариант ответа
водить в чайную за свое денежное довольствие

16. Права КВ по отношению к подчиненным при применении дисциплинарных взысканий?
- Вариант ответа
арестовывать на срок до 3 суток
- Вариант ответа

лишать отпуска с выездом на Родину
- Вариант ответа
объявлять до 6 нарядов вне очереди
- Вариант ответа
объявлять выговор, стр. выговор, лишать очередного увольнения, объявлять до 4 нарядов вне очереди на работу
- Вариант ответа
лишать выдачи печенья и сахара вместо сигарет некурящим в/служащим

17. Чем вооружается наряд по роте?
- Вариант ответа
АК
- Вариант ответа
РПГ
- Вариант ответа
лопатами
- Вариант ответа
вениками
- Вариант ответа
штык-ножами

18. Основные задачи наряда по КПП
- Вариант ответа
открывать ворота КПП
- Вариант ответа
открывать и закрывать ворота КПП
- Вариант ответа
смотреть на проходящих мимо красивых девушек
- Вариант ответа
осуществлять строгий контрольно-пропускной режим в части
- Вариант ответа
пропускать только в/служащих и членов семей на территорию части

19. Основная задача наряда по роте
- Вариант ответа
никуда не сбегать
- Вариант ответа
мыть полы в спальных помещениях
- Вариант ответа
следить за соблюдением распорядка дня, сохранностью КДХО, имущества роты и личных вещей в/служащих
- Вариант ответа
находиться в роте
- Вариант ответа

убирать грязную посуду за л/с роты в столовой

20. Какие бывают парки в ВС РФ?
- Вариант ответа
зоопарки
- Вариант ответа
развлечений и отдыха
- Вариант ответа
постоянные и полевые
- Вариант ответа
аквапарки
- Вариант ответа
стационарные

21. Кто назначается в наряд по парку?
- Вариант ответа
дежурный и дневальный
- Вариант ответа
дежурный и водитель-механик дежурного тягача
- Вариант ответа
дежурный, дневальные и барабанщик
- Вариант ответа
дежурный, дневальные, механик-водитель дежурного тягача
- Вариант ответа
механик-водитель дежурного тягача и барабанщик

22. Состав суточного наряда при перевозках войск
- Вариант ответа
дежурный по эшелону, помощник, дежурные по вагонам и дневальные
- Вариант ответа
дежурные по вагонам, дневальные, барабанщик, фельдшер
- Вариант ответа
дежурный, горнист, фельдшер
- Вариант ответа
барабанщик и горнист
- Вариант ответа
дневальные

23. Сколько времени должно отводиться распорядком дня подготовки лиц суточного наряда
- Вариант ответа
не менее 3 ч
- Вариант ответа
не более 1 ч

- Вариант ответа
не менее 4 ч
- Вариант ответа
не более 1 ч
- Вариант ответа
не менее 30 мин

24. С какого момента караул переходит в подчинение дежурному по части
- Вариант ответа
после того, как помощник дежурного по части дает команду ”равнение на –…“ и “смирно” и докладывает дежурному по воинской части
- Вариант ответа
при выходе дежурного по части на строевой плац
- Вариант ответа
когда дежурный по части выдает пароль
- Вариант ответа
при докладе о смене караулов
- Вариант ответа
при первом прибытии в караул дежурного по части

25. С чего начинается прием дежурства дежурным по роте
- Вариант ответа
со счета кроватей в подразделении
- Вариант ответа
со счета тумбочек в подразделении
- Вариант ответа
с проверки количества оружия и его качественного состояния
- Вариант ответа
с перекура
- Вариант ответа
с убытием на улицу

26. Кто инструктирует дежурного по парку
- Вариант ответа
командир части
- Вариант ответа
начальник штаба в/ч
- Вариант ответа
начальник штаба батальона
- Вариант ответа
командиром батальона
- Вариант ответа
заместителем командира части по вооружению

27. Что не должен принимать дежурный по парку
- Вариант ответа
объекты, охраняемые внутренним караулом
- Вариант ответа
количество деревьев на территории парка
- Вариант ответа
количество автомобильной техники в/ч
- Вариант ответа
состояние деж. тягача
- Вариант ответа
количество и состояние оттисков печатей на хранилищах с техникой

28. Где должно храниться оружие в подразделении
- Вариант ответа
под кроватями
- Вариант ответа
под подушками
- Вариант ответа
за тумбочками
- Вариант ответа
в каптерке
- Вариант ответа
в комнате для хранения оружия, в пирамидах

29. У кого должны храниться ключи от комнаты для хранения оружия
- Вариант ответа
у дежурного по роте
- Вариант ответа
у командира взвода
- Вариант ответа
у командира батальона
- Вариант ответа
у командира роты
- Вариант ответа
у дежурного по части

30. Кто дает разрешение на вскрытие комнате для хранения оружия
- Вариант ответа
старшина роты
- Вариант ответа
командир взвода
- Вариант ответа
заместитель командира роты по воспитательной работе
- Вариант ответа

командир роты
- Вариант ответа
командир части

31. Чьими печатями должна опечатываться комната для хранения оружия
- Вариант ответа
командира части и командира роты
- Вариант ответа
командира роты и дежурного по роте
- Вариант ответа
дежурного по роте и дежурного по части
- Вариант ответа
старшины роты и командира роты
- Вариант ответа
командира роты и дежурного по части

Тесты по медицинской подготовке:

1. Объем первой медицинской помощи с динамическими (механическими) факторами поражения:
- Вариант ответа
временная остановка кровотечения, искусственное дыхание
- Вариант ответа
временная остановка наружного кровотечения, устранение асфиксии, искусственное дыхание, непрямой массаж сердца, введение обезболивающих средств, наложение асептических повязок, транспортная иммобилизация
- Вариант ответа
простейшие противошоковые мероприятия, временная остановка кровотечения, эвакуация
- Вариант ответа
закрытие ран повязками, иммобилизация конечностей табельными и подручными средствами

2. Методы временной остановки наружного кровотечения на месте поражения:
- Вариант ответа
наложение асептической повязки, пальцевое прижатие кровоточащего сосуда, давящая повязка, наложение жгута
- Вариант ответа
наложение кровоостанавливающего жгута, давящая повязка, тугая тампонада раны, форсированное сгибание конечности с последующей фиксацией, пальцевое прижатие кровоточащего сосуда
- Вариант ответа
давящая повязка, наложение жгута, наложение зажима на кровоточащий сосуд, форсированное сгибание конечности
- Вариант ответа

наложение зажима на кровоточащий сосуд, наложение асептической повязки

3. Объем первой медицинской помощи при проникающем ранении живота:
- Вариант ответа
при эвентрации вправление выпавших органов в брюшную полость, наложение асептической повязки на рану, эвакуация в положении лежа
- Вариант ответа
введение анальгетиков, теплое питье, асептическая повязка, эвакуация на носилках
- Вариант ответа
обезболивание, наложение асептической повязки, вынос из очага на носилках, эвакуация в первую очередь
- Вариант ответа
введение аналептиков, теплое питье, асептическая повязка, эвакуация на носилках

4. Первая медицинская помощь при повреждении таза и тазовых органов:
- Вариант ответа
инъекция спазмолитиков, наложение асептических повязок, щадящая эвакуация на носилках на спине, при подозрении на перелом таза - в положении лягушки
- Вариант ответа
инъекция промедола, наложение асептических повязок на раны, дача противобактериальных препаратов, эвакуация в положении лягушки
- Вариант ответа
инъекция морфина, наложение асептических повязок на раны, при кровотечении прием гомеостатических средств, эвакуация на носилках спиной вниз
- Вариант ответа
инъекция морфина, наложение асептических повязок на раны, при кровотечении прием гомеостатических средств, эвакуация на носилках лежа

5. Максимально допустимая длительность клинической смерти:
- Вариант ответа
1-2 минуты
- Вариант ответа
5-7 минут
- Вариант ответа
3-5 минут
- Вариант ответа
10-15 минут

6. Порядок реанимационных мероприятий одним человеком:
- Вариант ответа
2 вдувания + 30 компрессий
- Вариант ответа

1 вдувание + 5 компрессий
- Вариант ответа
3 вдувания + 10 компрессий
- Вариант ответа
5 вдуваний + 20 компрессий

7. Положение рук реаниматора при проведении непрямого массажа сердца:
- Вариант ответа
лучезапястные и локтевые суставы максимально разогнуты
- Вариант ответа
лучезапястные и локтевые суставы максимально согнуты
- Вариант ответа
локтевые суставы согнуты, лучезапястные – разогнуты
- Вариант ответа
локтевые суставы разогнуты, лучезапястные – согнуты

8. Темп непрямого массажа сердца должен составлять в минуту:
- Вариант ответа
5 сжатий
- Вариант ответа
12 сжатий
- Вариант ответа
20 сжатий
- Вариант ответа
100-110 сжатий

9. Реанимация это:
- Вариант ответа
раздел клинической медицины, изучающий терминальные состояния
- Вариант ответа
отделение многопрофильной больницы
- Вариант ответа
практические действия, направленные на восстановление жизнедеятельности
- Вариант ответа
раздел клинической медицины, изучающий термические состояния

10. Реанимация показана:
- Вариант ответа
в каждом случае смерти больного
- Вариант ответа
только при внезапной смерти молодых больных
- Вариант ответа
при внезапно развившихся терминальных состояниях
- Вариант ответа

только при внезапной смерти детей

11. Максимальная продолжительность клинической смерти в обычных условиях составляет:
- Вариант ответа
10-15 мин
- Вариант ответа
5-6 мин
- Вариант ответа
2-3 мин

12. Необходимыми условиями при проведении искусственной вентиляции легких являются:
- Вариант ответа
применение воздуховода
- Вариант ответа
достаточный объем вдуваемого воздуха
- Вариант ответа
валик под лопатками больного
- Вариант ответа
применение воздуховода

13. Первая медицинская помощь при сдавлении конечностей:
- Вариант ответа
новокаиновая блокада, транспортная иммобилизация, введение обезболивающих, сердечных, антигистаминных и противобактериальных средств, прием внутрь соды, ингаляции кислорода
- Вариант ответа
введение промедола, прием внутрь противобактериального средства, тугое бинтование придавленных конечностей от периферии к центру, охлаждение конечности, транспортная иммобилизация
- Вариант ответа
прием внутрь соды и утоление жажды, инъекция атропина, морфия, кофеина и димедрола
- Вариант ответа
иммобилизация транспортными шинами, быстрая эвакуация
личии у них травм позвоночника транспортируются в положении:
- Вариант ответа
на боку на обычных носилках
- Вариант ответа
на животе на обычных носилках
- Вариант ответа
на боку на щите
- Вариант ответа

на спине на щите

14. Шок – это:
- Вариант ответа
острая сердечная недостаточность
- Вариант ответа
острая сердечно-сосудистая недостаточность
- Вариант ответа
острое нарушение периферического кровообращения
- Вариант ответа
острая легочно-сердечная недостаточность

15. При болевом шоке первой развивается:
- Вариант ответа
торпидная фаза шока
- Вариант ответа
эректильная фаза шока
- Вариант ответа
фаза сопротивления
- Вариант ответа
фаза истощения

16. Первое действие при оказании ПМП при синдроме длительного сдавления:
- Вариант ответа
обезболить, наложить жгут
- Вариант ответа
освободить конечность
- Вариант ответа
наложить асептическую повязку
- Вариант ответа
транспортная иммобилизация

17. При сдавливании конечности в течение 4-7 часов возникает:
- Вариант ответа
легкая степень СДР
- Вариант ответа
тяжелая степень СДР
- Вариант ответа
крайне тяжелая степень СДР
- Вариант ответа
средняя степень СДР

18. Какая повязка накладывается при растяжении голеностопных связок:
- Вариант ответа

черепашья
- Вариант ответа
восьмиобразная
- Вариант ответа
уздечка
- Вариант ответа
Колосовидная

19. Какая повязка накладывается при ранениях волосистой части головы:
- Вариант ответа
Восьмиобразная
- Вариант ответа
Т-образная
- Вариант ответа
"Чепец"
- Вариант ответа
Уздечка

20. Какая повязка накладывается при обширных повреждениях груди:
- Вариант ответа
окклюзионная
- Вариант ответа
спиральная
- Вариант ответа
восьмиобразная
- Вариант ответа
Колосовидная

21. При повреждении плеча показана повязка:
- Вариант ответа
колосовидная
- Вариант ответа
восьмиобразная
- Вариант ответа
черепашья
- Вариант ответа
спиральная

22. При обширных отморожениях конечностей используют:
- Вариант ответа
рыцарскую перчатку
- Вариант ответа
варежку
- Вариант ответа

термоизолирующую повязку
- Вариант ответа
асептическую

23. Смешанное кровотечение:
- Вариант ответа
при одновременном ранении артерий и вен
- Вариант ответа
при ранениях вен и капилляров
- Вариант ответа
при ранении вен
- Вариант ответа
при ранении артерий

24. Первая медицинская помощь при ранении наружной сонной артерии:
- Вариант ответа
пальцевое ее прижатие
- Вариант ответа
прошивание раны
- Вариант ответа
наложение давящей повязки
- Вариант ответа
наложение стерильной повязки

25. Первая медицинская помощь при закрытых переломах костей конечностей:
- Вариант ответа
наложение транспортной шины
- Вариант ответа
транспортировка без транспортной иммобилизации
- Вариант ответа
транспортировка пешком
- Вариант ответа
транспортировка в «позе лягушки»

26. Мероприятия первой медицинской помощи, проводимые пострадавшему с ожогами:
- Вариант ответа
промывание ожоговой поверхности
- Вариант ответа
обезболивание
- Вариант ответа
инфузионная терапия
- Вариант ответа
наложение клеоловой повязки

27. Общие принципы неотложной помощи при отравлениях:
- Вариант ответа
вызывание рвоты различными методами, зондовое промывание желудка, стимуляция мочеотделения, удаление неабсорбированчых ядов,
- Вариант ответа
прекращение дальнейшего поступания яда в организм, применение антидота, восстановление и поддержание нарушенных функций организма, устранение отдельных симптомов интоксикации
- Вариант ответа
удаление неабсорбированных токсических веществ, форсированный диурез, гемодиализ, слабительные средства, гемоперфузия, полная санитарная обработка, применение антидота
- Вариант ответа
антибиотикотерапия, применение противосудорожных средств

28. Территория, на которой произошел выброс ядовитого вещества в окружающую среду и продолжается его испарение в атмосферу, называется:
- Вариант ответа
очагом экологического заражения
- Вариант ответа
очагом химического заражения
- Вариант ответа
зоной химического заражения
- Вариант ответа
зоной экологического заражения

29. Территория, подвергнутая воздействию паров ядовитого вещества, называется:
- Вариант ответа
очагом химического заражения
- Вариант ответа
зоной экологического заражения
- Вариант ответа
зоной химического заражения
- Вариант ответа
очагом экологического заражения

30. Промывание желудка при отравлениях кислотами и щелочами производится:
- Вариант ответа
после обезболивания рефлекторным методом
- Вариант ответа
противопоказано

- Вариант ответа
после обезболивания зондовым методом
- Вариант ответа
после обезболивания физиологическим методом

31. Промывание желудка при отравлениях кислотами и щелочами производится:
- Вариант ответа
нейтрализующими растворами
- Вариант ответа
холодной водой
- Вариант ответа
водой комнатной температуры
- Вариант ответа
теплой водой

32. Наиболее эффективно удаляется яд из желудка:
- Вариант ответа
холодной водой
- Вариант ответа
горячей водой
- Вариант ответа
при промывании рефлекторным методом
- Вариант ответа
при промывании зондовым методом

33. При наличии в атмосфере паров хлора необходимо перемещаться:
- Вариант ответа
в верхние этажи зданий
- Вариант ответа
на улицу
- Вариант ответа
в нижние этажи и подвалы
- Вариант ответа
на крышу

34. При наличии в атмосфере паров хлора дыхательные пути нужно защитить:
- Вариант ответа
ватно-марлевой повязкой, смоченной в растворе питьевой соды
- Вариант ответа
ватно-марлевой повязкой, смоченной в растворе уксусной кислоты
- Вариант ответа
ватно-марлевой повязкой, смоченной кипяченой водой
- Вариант ответа

сухой ватно-марлевой повязкой

35. Пары хлора и аммиака вызывают:
- Вариант ответа
возбуждение и эйфорию
- Вариант ответа
раздражение верхних дыхательных путей
- Вариант ответа
слезотечение
- Вариант ответа
Ларингоспазм

36. Способы защиты пищевых продуктов от заражения, загрязнения* при применении оружия массового поражения:
- Вариант ответа
герметизация складов и других хранилищ пищевых продуктов, дезинфекция
- Вариант ответа
автоклавирование посуды
- Вариант ответа
расфасовка пищевых продуктов в герметическую тару, строительство объектов пищевого надзора за городом, герметизация складов и других хранилищ пищевых продуктов
- Вариант ответа
ассредоточение пищевых продуктов и строительство объектов пищевого надзора за городом, кипячение

37. Средства обеззараживания воды в очагах массового поражения:
- Вариант ответа
гиперхлорирование (с последующим дехлорированием), кипячение, фильтрация, отстаивание, применение перекиси водорода, пергидроля, пантоцида
- Вариант ответа
хлорирование, фильтрация, применение перекиси водорода
- Вариант ответа
хлорирование, использование пергидроля, пантоцида
- Вариант ответа
кипячение, фильтрация, применение перекиси водорода

5. ПОДГОТОВКА К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

При подготовке к *зачету* по дисциплине «*Основы военной подготовки*» обучающемуся рекомендуется:

1. повторить пройденный материал и ответить на вопросы, используя конспект и материалы лекций. Если по каким-либо вопросам у студента недостаточно информации в лекционных материалах, то необходимо получить ин-

формацию из раздаточных материалов и/или учебников (литературы), рекомендованных для изучения дисциплины «*Основы военной подготовки*».

Целесообразно также дополнить конспект лекций наиболее существенными и важными тезисами для рассматриваемого вопроса;

2. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* особое внимание необходимо уделять схемам, рисункам, графикам и другим иллюстрациям, так как подобные графические материалы, как правило, в наглядной форме отражают главное содержание изучаемого вопроса;

3. при изучении основных и дополнительных источников информации в рамках выполнения заданий на *зачете* (в случаях, когда отсутствует иллюстративный материал) особое внимание необходимо обращать на наличие в тексте словосочетаний вида «во-первых», «во-вторых» и т.д., а также дефисов и перечислений (цифровых или буквенных), так как эти признаки, как правило, позволяют структурировать ответ на предложенное задание.

Подобную текстовую структуризацию материала слушатель может трансформировать в рисунки, схемы и т. п. для более краткого, наглядного и удобного восприятия (иллюстрации целесообразно отразить в конспекте лекций – это позволит оперативно и быстро найти, в случае необходимости, соответствующую информацию);

4. следует также обращать внимание при изучении материала для подготовки к *зачету* на словосочетания вида «таким образом», «подводя итог сказанному» и т.п., так как это признаки выражения главных мыслей и выводов по изучаемому вопросу (пункту, разделу). В отдельных случаях выводы по теме (разделу, главе) позволяют полностью построить (восстановить, воссоздать) ответ на поставленный вопрос (задание), так как содержат в себе основные мысли и тезисы для ответа.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЕТУ

1. Каковы виды стрелкового оружия?
2. Какие бывают боеприпасы?
3. Назовите марки ручных гранат.
4. Из чего состоит организационно-штатная структура общевойсковых подразделений?
5. Перечислите Тактико-технические характеристики (ТТХ) основных образцов вооружения и техники ВС РФ.
6. Каковы основные факторы, определяющие характер, организацию и способы ведения современного общевойскового боя?
7. Перечислите основные инженерно-технических мероприятия.
8. Какие существуют защитные сооружения?
9. Какие бывают виды заграждений?
10. На чем основывается полевое водоснабжение?
11. Каковы емкости РДВ?

12. Назовите назначение ТУФ-200.
13. Назовите назначение МТК.
14. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии США.
15. Перечислите ТТХ и ТТД вооружения и боевой техники армии Германии.
16. Перечислите общие сведения о ядерном оружии.
17. Перечислите общие сведения о химическом оружии
18. Перечислите общие сведения о биологическом оружии
19. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях радиоактивного заражения?
20. Каковы правила поведения и меры профилактики при применении отравляющих веществ?
21. Каковы правила поведения и меры профилактики в условиях применения бактериальных средств?
22. Какие существуют индивидуальные средства РХБ защиты?
23. Каковы мероприятия радиационной, химической и биологической защиты?
24. Каковы тактические свойства местности, их влияние на действия подразделений в боевой обстановке?
25. Опишите назначение, номенклатура и условные знаки топографических карт.
26. Назовите способы ориентирования на местности по карте и без карты.
27. Что такое номенклатура топографических карт?
28. Как задаются координаты объекта?
29. Что такое уточнение координат по "улитке"?
30. Каковы тенденции и особенности развития современных международных отношений?
31. Назовите место и роль России в многополярном мире.
32. Перечислите основные направления социально-экономического развития России.
33. Перечислите основные направления политического развития России.
34. Перечислите основные направления военно-технического развития России.
35. Какие существуют основные положения Военной доктрины РФ?
36. Назовите правовое положение и порядок прохождения военной службы.
37. Что значит нормативно-правовой акт?
38. Чем определяется порядок прохождения военной службы?
39. Назовите основные задачи укрепления безопасности страны.
40. Чем актуальны положения военной доктрины?
41. Перечислите основные тенденции развития военно-политической обстановки.
42. Какие существуют основные требования и категории военной доктрины России?
43. Как взаимосвязаны военная безопасность и жизненно важные интересы?

44. Напишите методологическое значение определения жизненно важных интересов.
45. Перечислите военно-политические основы военной доктрины РФ.
46. Перечислите военно-стратегические основы военной доктрины РФ.
47. Перечислите военно-экономические основы военной доктрины РФ.
48. Перечислите военно-технические основы военной доктрины РФ.
49. Назовите роль и место вооруженных сил в демократическом государстве.
50. Перечислите особенности гражданского контроля за вооруженными силами в демократических государствах.
51. Какие вы знаете особенности дисциплинарной практики?
52. Что такое «статус военнослужащего»?

6. ПЕРЕЧЕНЬ УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование	Кол-во экз.
1	Общевоинские уставы Вооруженных сил Российской Федерации : курс лекций / составители В. А. Борисов, И. Е. Акулов, В. К. Фоменко. — Томск : Томский политехнический университет, 2019. — 87 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/106173.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
2	Основы огневой подготовки : учебное пособие / А. В. Рыжов, В. М. Коняев, С. В. Пожидаев, Д. В. Горденко. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 110 с. — ISBN 978-5-4497-1170-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/109245.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: https://doi.org/10.23682/109245	Эл. ресурс
3	Огневая подготовка : учебное пособие / В. В. Белевцев, Д. В. Горденко, Д. Н. Резеньков, Е. В. Кособлик. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 132 с. — ISBN 978-5-4497-1289-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/109244.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: https://doi.org/10.23682/109244	Эл. ресурс
4	Общевоенная подготовка. В 2 частях. Ч.1 : учебное пособие / А. Г. Борисов, К. В. Анистратенко, Е. Ю. Лубашев [и др.] ; под редакцией А. Г. Борисова. — Ростов-на-Дону, Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2022. — 414 с. — ISBN 978-5-9275-4192-8 (ч.1), 978-5-9275-4191-1. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127091.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. -	Эл. ресурс
5	Общевоенная и тактическая подготовка : учебное пособие / С. А. Чеховский, В. Н. Алёшичев, А. С. Евтехов, С. К. Бушанский. — Саратов : Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, ЭБС АСВ, 2021. — 280 с. — ISBN 978-5-7433-3472-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/124344.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI:	Эл. ресурс

	https://doi.org/10.23682/124344	
6	Баранов, А. Р. Военная топография в служебно-боевой деятельности оперативных подразделений : учебник для курсантов и слушателей военных учебных заведений / А. Р. Баранов, Ю. Г. Маслак, В. И. Ягодинцев. — Москва : Академический проект, 2020. — 159 с. — ISBN 978-5-8291-2944-6. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/110047.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.	Эл. ресурс
7	Оказание первой доврачебной помощи в образовательных организациях : учебно-методическое пособие / Ю. В. Азизова, С. К. Касимова, А. В. Трясучев [и др.]. — Астрахань : Астраханский государственный университет, Издательский дом «Астраханский университет», 2020. — 70 с. — ISBN 978-5-9926-1188-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/108843.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
8	Маслова, Л. Ф. Первая помощь пострадавшим : учебное пособие / Л. Ф. Маслова. — Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2020. — 40 с. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/121690.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
9	Кутепов, В. А Тактическая подготовка. Радиационная, химическая и биологическая защита : учебное пособие / В. А Кутепов, А. Б. Адемченко, С. В Ковалев. — Омск : Омский государственный технический университет, 2017. — 226 с. — ISBN 978-5-8149-2523-7. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/78509.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
10	Техническое обеспечение средств радиационной, химической и биологической защиты : учебное пособие / А. В. Шаламов, С. Р. Ахметов, Н. Р. Минуллин [и др.]. — Казань : Издательство КНИТУ, 2022. — 256 с. — ISBN 978-5-7882-3135-8. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/129262.html (дата обращения: 25.04.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
11	Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Часть 2. Батальон, рота. — Саратов : Вузовское образование, 2023. — 286 с. — ISBN 978-5-4487-0918-0. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127500.html (дата обращения: 23.01.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
12	Боевой устав по подготовке и ведению общевойскового боя. Часть 3. Взвод, отделение, танк. — Саратов : Вузовское образование, 2023. — 224 с. — ISBN 978-5-4487-0917-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/127501.html (дата обращения: 23.01.2023). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс
13	Баранов, А. Р. Тактико-специальная подготовка войскового разведчика внутренних войск : учебно-практическое пособие / А. Р. Баранов, Ю. Г. Маслак ; под редакцией Ю. Г. Маслак. — Москва : Академический Проект, Трикста, 2015. — 368 с. — ISBN 978-5-8291-1490-9. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: https://www.iprbookshop.ru/36874.html (дата обращения: 16.05.2022). — Режим доступа: для авторизир. пользователей	Эл. ресурс