

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«УРАЛЬСКАЯ ГОРНАЯ ШКОЛА – РЕГИОНАМ»**

---

11-12 апреля 2016 года

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 621.315.1

**ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЭП И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЕЁ  
ПОВЫШЕНИЮ**

Файзуллин Р.М., Стариков В.С.  
Уральский государственный горный университет

**Способы повышения пропускной способности линий электропередач**

Пропускная способность линии электропередачи – это наибольшая активная мощность, которую с учётом всех технических ограничений можно передать по линии.

Пропускная способность линии электропередачи зависит от напряжения, силы тока и реактивного сопротивления линии. Наибольшая передаваемая мощность определяется по выражению (1).

$$P_{\text{наиб}} = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_c \cdot \sin \alpha_0 \cdot L} \quad (1);$$

где  $U_1$ - модуль напряжения в начале линии;  $U_2$ - модуль напряжения в конце линии;  $Z_c$ -волновое сопротивление линии;  $\alpha_0 L$ -волновая длина линии[1].

Волновое сопротивление определяется по формуле(2).

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \quad (2);$$

где  $x_0$ - удельное реактивное сопротивление линии;  $b_0$ -удельная ёмкостная проводимость линии.

Для широко применяемых для ЛЭП сталеалюминевых проводов волновое сопротивление линии составляет примерно 400 Ом с одиночным проводом в фазе и 270 Ом при расщеплении фазы на три и четыре провода.

Для линии с проводом марки АС напряжением 220 кВ максимальная передаваемая мощность составляет 150 МВт, для линии 330 кВ – 400 МВт, для линии 500 кВ – 1300 МВт, 750 кВ – 2000 МВт, 1150кВ – 6000 МВт.

Для повышения пропускной способности линий электропередач могут быть использованы:

- 1) увеличение напряжения ЛЭП;
- 2) уменьшение суммарного реактивного сопротивления проводников ЛЭП.

Ещё стоит отметить, что пропускная способность линии электропередач зависит от заряда, который линия может перенести в единицу времени. Этот заряд зависит от поверхности провода и допустимой напряжённости электрического поля на нём(3).

$$q = 2\pi\epsilon_0 r_0 E_{\text{дон}} \quad (3);$$

где  $q$ -заряд на единицу длины линии;  $r_0$ -радиус провода;  $E_{\text{доп}}$  -допустимая напряжённость электрического поля;  $\epsilon_0$ -диэлектрическая проницаемость провода.

В то же самое время удельный заряд, передаваемый по проводу ЛЭП, может быть определен по выражению:

$$q = CU_{\phi} \quad (4);$$

$C$ -рабочая ёмкость линии;  $U_{\phi}$ -фазное напряжение линии.

Электрический ток исходя из поверхностного эффекта течет по поверхности провода и практически отсутствует внутри провода. Поэтому электрический ток можно выразить так:

$$I = qV_B \quad (5);$$

$V_B$ -скорость распространения волны вдоль линии.

Таким образом, для увеличения пропускной способности ЛЭП, кроме названных выше способов нужно увеличить рабочую емкость линии. Рабочую емкость можно увеличить, увеличив поверхность провода путем расщепления проводов фазы.

Вместе с тем, пропускная способность линии электропередач ограничена определенными техническими условиями.

В общем случае, пропускная способность линии электропередач ограничивается нагревом проводов. Нельзя допускать нагрев проводов марки АС линии электропередач выше  $70^{\circ}\text{C}$ , потому как в этом случае происходит ускоренное окисление проводов, а также окисление контактов, соединяющих отрезки проводов.

В настоящее время ведущими энергетическими компаниями предпринимаются попытки разработать провода, сочетающие в себе высокую механическую прочность и малый вес без снижения пропускной способности.

Рассмотрим ряд существующих разработок.

Композитные провода и кабели марки АССС (Алюминиевый Проводниковый Провод с Композитным Сердечником). Провод с сердечником из композитов обладает более низким коэффициентом термического расширения и поэтому они менее подвержены тепловому расширению, чем проводники с стальными сердечниками. Производители провода говорят, что можно удвоить величину тока в линии без риска провисания и разрушения провода.

Композитные провода и кабели марки АССР. (Алюминиевый Проводящий Композитный Усиленный провод). В проводе используется сердечник из металлокомпозита, в обертке из высокотемпературных алюминий-цирконидных (Al-Zr) проводов. В этом проводе и композитный сердечник, и наружные пучки Al-Zr дают вклад в прочность провода и повышение проводимости.

Провод и грозотрос марки АААС (АЕRО Z). За счет более плотной скрутки проводников и более гладкой внешней поверхности возможно использование более тонких и более легких проводов (без стального сердечника). Это, в свою очередь приводит к снижению электрических потерь в проводах (на 10-15%), в том числе потери на корону, и повышению механической прочности конструкции.

Применение этих проводов дают следующий эффект:

- снижение потерь при транспортировке электроэнергии по линиям - электропередачи (особенно по магистральным);
  - практически полное отсутствие внешней коррозии проводников;
  - снижение пляски проводов от ветровых нагрузок;
  - уменьшение налипания снега и льда на проводах;
  - уменьшение нагрузки на поддерживающие устройства ЛЭП, что приводит к -
- возможному увеличению длин пролетов и экономии до 10 % числа опор;
- возможность организации каналов передачи информации по оптоволокну внутри проводов и молниезащитных тросов.

Провод марки ZTACIR/AS. : для проводов типа ZTACIR с усиленным сердечником из сталеникелевого сплава INVAR допустимая температура достигает  $160-210^{\circ}\text{C}$ , а передаваемая мощность в 2,5-3 раза выше, чем на линиях с обычными сталеалюминевыми проводами при той же конструкции опор (высоте, точке подвеса).

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Лобович К.В., Стариков В.С.  
Уральский государственный горный университет

В настоящее время все известные объекты постоянного тока делятся на две группы. К первой из них относятся электропередачи постоянного тока (ППТ), по которым электрическая энергия передается на какое-то расстояние, неотъемлемой частью этих электропередач является воздушная или кабельная линия постоянного тока. Ко второй группе относятся так называемые вставки постоянного тока (ВПТ), где линия постоянного тока отсутствует. Все звено постоянного тока расположено на одной подстанции, на которую заходят линии переменного тока от связываемых систем.

Структурные схемы ППТ и ВПТ приведены на рисунках 1 и 2 [1].

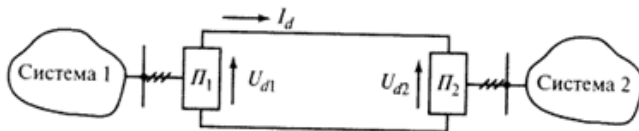


Рисунок 1 - Структурная схема ППТ

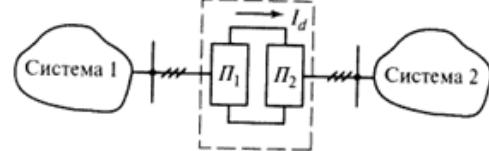


Рисунок 2 - Структурная схема ВПТ

Вставка постоянного тока может быть расположена или вблизи от одной из связываемых систем, или на одной из промежуточных подстанций электропередачи переменного тока, которая связывает эти две системы. В последнем случае линии, подходящие с разных сторон к ВПТ, могут иметь разное напряжение или связываемые системы могут иметь разную частоту [1].

Схема замещения передачи постоянного тока для установившегося режима приведена на рисунке 3 [1].

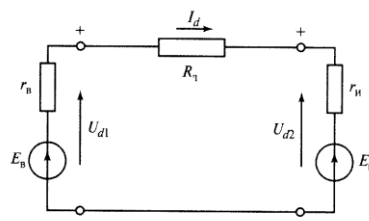


Рисунок 3 - Схема замещения ППТ

Ток в линии определяется выражением:

$$I_d = \frac{E_B - E_H}{r_B + r_H + R_L}, \quad (1)$$

где  $E_B$  и  $E_H$  - ЭДС выпрямителя и противоЭДС инвертора соответственно,  $R_L$  — сопротивление линии постоянному току,  $r_B$  и  $r_H$  — внутреннее сопротивление выпрямителя и инвертора соответственно, определяющее их свойства.

Мощность, отдаваемая выпрямителем в линию постоянного тока:

$$P_{d1} = U_{d1} I_d. \quad (2)$$

Мощность, получаемая инвертором от линии:

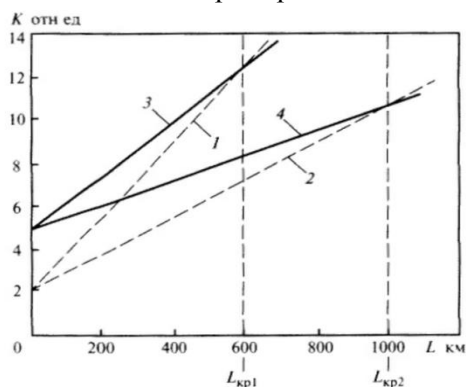
$$P_{d2} = U_{d2} I_d. \quad (3)$$

При этом выполняются условия:

$$\begin{cases} E_B > U_{d1} \\ E_H < U_{d2} \end{cases} \quad (4)$$

Поскольку цепи переменного и постоянного тока в ППТ электрически не связаны, то, если в цепи постоянного тока отсутствует связь с землей, потенциалы относительно земли в этой цепи будут определяться случайными факторами, главным образом токами утечки по изоляции, что недопустимо. Поэтому хотя бы одна из точек в цепи постоянного тока должна быть заземлена. На практике в ППТ обычно заземляют две точки, это могут быть или один из полюсов передачи, заземленной с двух сторон линии, или средние точки преобразовательных подстанций.

При сопоставлении электропередач переменного и постоянного тока равной пропускной способности необходимо учитывать, что класс напряжения этих электропередач должен быть примерно одинаков. При этом сама линия постоянного тока будет иметь



1, 3 — тяжелые условия прохождения трассы; 2, 4 — благоприятные условия прохождения трассы

Рисунок 4 - Капитальные вложения в электропередачи переменного (штриховая линия) и постоянного

несколько меньшую стоимость по сравнению с линией переменного тока, главным образом, за счет более легких опор. В то же время стоимость конечных подстанций электропередачи постоянного тока будет выше стоимости подстанций переменного тока, за счет более сложного и дорогого оборудования.

Исследования, проведенные в нашей стране применительно к различным климатическим и грунтовым условиям, разным типам опор, показывают, что стоимость 1 км линии постоянного тока на 20—25 % ниже такого показателя для сопоставимой линии переменного тока. Как показывает опыт сооружения многих ППТ в мире, удельная стоимость преобразовательных подстанций (долл/кВт) зависит от передаваемой мощности: чем больше передаваемая мощность, тем меньше удельная стоимость. Более дешевая линия и более дорогие подстанции электропередачи постоянного тока по сравнению с электропередачей переменного тока приводят к тому,

что применение ППТ становится выгодным только при такой длине линии, при которой ее удешевление перекрывает удорожание подстанций по сравнению с передачей переменного тока. Такая длина линии, при которой стоимости электропередач переменного и постоянного тока равны, называется *критической* [2].

При критической длине линии,  $L_{кр}$  ( $L_{кр1}$  и  $L_{кр2}$ ) затраты  $K$  на сооружение электропередачи постоянного и переменного тока становятся одинаковыми (рисунок 4). Применительно к условиям России критическая длина линии составляет 600-1000 км [1].

Выбор схемы электропередачи, тем более дальней, всегда является многовариантной задачей. При ее решении необходимо исходить не только из экономических показателей, но учитывать и все те технические и системные характеристики, которые присущи тому или иному варианту, в том числе и электропередачам постоянного тока [2].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжов Ю.П. «Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения»: учебник для вузов — М Издательский дом МЭИ. 2007 — 488 с.
2. Под общей редакцией чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. том 2 под редакцией проф. А.П.Бурмана и проф. В.А.Строева // Основы современной энергетики. В 2-х томах. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО И УЛЬТРАВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Бражников А.М., Стариков В.С.

Уральский государственный горный университет

ЛЭП – один из компонентов электрической сети, система энергетического оборудования, предназначенная для передачи электроэнергии посредством электрического тока. На рисунке 1 приводится классификация классов напряжений ЛЭП.

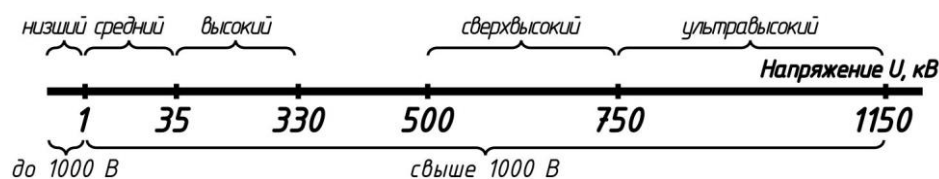


Рисунок 1 – Классификация классов напряжений ЛЭП

В последнее десятилетие мировое производство и потребление электроэнергии выросло, что толкнуло электроэнергетику на бурное развитие, сопровождающееся вводом в строй новых сверхмощных электростанций и ЛЭП сверхвысоких напряжений (СВН) в 500-750 кВ и ультравысоких напряжений (УВН) более 1000 кВ, а также существенным увеличением протяженности ЛЭП.

В связи с этим вопросы экологического влияния высоковольтных ЛЭП приобрели особую актуальность. Влияние ЛЭП на окружающую среду крайне разнообразно. Рассмотрим его подробнее.

Провода работающей линии электропередачи создают в прилегающем пространстве электрическое и магнитное поля промышленной частоты (ЭМП ПЧ). Основные проблемы для линий СВН и УВН связаны с влиянием электрического поля, создаваемого ЛЭП. Это поле определяется, в основном, зарядами фаз. С повышением напряжения ВЛ, числа проводов в фазе и эквивалентного радиуса расщепленного провода заряд фазы быстро увеличивается. Так, заряд фазы линии 750 кВ в 5-6 раз больше заряда одиночного провода линии 220 кВ, а линии 1150 кВ в 10-20 раз. Это создает напряженности электрического поля под проводами ЛЭП, опасные для живых организмов.

Расстояние, на которое распространяются эти поля от проводов ЛЭП, достигает десятков метров. Дальность распространения электрического поля зависит от класса напряжения ЛЭП, чем выше напряжение – тем больше зона повышенного уровня электрического поля, при этом размеры зоны не изменяются в течение времени работы ЛЭП. Дальность распространения магнитного поля зависит от величины протекающего тока или от нагрузки линии. Поскольку нагрузка ЛЭП может неоднократно изменяться как в течение суток, так и с изменением сезонов года, размеры зоны повышенного уровня магнитного поля также меняются.

ЭМП ПЧ являются очень сильными факторами влияния на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону их воздействия. Например, в районе действия электрического поля ЛЭП у насекомых проявляются изменения в поведении: так у пчел фиксируется повышенная агрессивность, беспокойство, снижение работоспособности и продуктивности, склонность к потере маток; у жуков, комаров, бабочек и других летающих насекомых наблюдается изменение поведенческих реакций, в том числе изменение направления движения в сторону с меньшим уровнем поля.

У растений распространены аномалии развития – часто меняются формы и размеры цветков, листьев, стеблей, появляются лишние лепестки. Здоровый человек страдает от относительно длительного пребывания в поле ЛЭП. Кратковременное облучение (минуты)

способно привести к негативной реакции только у гиперчувствительных людей или у больных некоторыми видами аллергии, развивая у них реакцию по типу эпилептической.

Непосредственное (биологическое) влияние электромагнитного поля линий СВН и УВН на человека связано с воздействием на иммунную, эндокринную, сердечно-сосудистую, центральную и периферийную нервные системы, нейрогуморальную реакцию, половую функцию, мышечную ткань и другие органы. При этом возможны изменения давления и пульса, сердцебиение, аритмия, повышенная нервная возбудимость и утомляемость, в последние годы в числе отдаленных последствий часто называют онкологические заболевания. Вредные последствия пребывания человека в сильном электрическом поле зависят от напряженности поля и от продолжительности его воздействия.

Без учета длительности воздействия на человека допустимая напряженность электрического поля составляет:

- 20 кВ/м – для труднодоступной местности;
- 15 кВ/м – для ненаселенной местности;
- 10 кВ/м – для пересечений с дорогами;
- 5 кВ/м – для населенной местности.

При напряженности 0,5 кВ/м на границах жилых застроек допускается пребывание человека в электрическом поле по 24 ч в сутки в течение всей жизни.

Для эксплуатационного персонала подстанций и линии СВН и УВН установлена допустимая продолжительность периодического и длительного пребывания в электрическом поле при напряженностях на уровне головы человека (1,8 м над уровнем земли):

- 5 кВ/м – время пребывания неограниченно;
- 10 кВ/м – 180 мин;
- 15 кВ/м – 90 мин;
- 20 кВ/м – 10 мин;
- 25 кВ/м – 5 мин.

Выполнение этих условий обеспечивает самовосстановление организма в течение суток без остаточных реакций и функциональных или патологических изменений.

Организационные мероприятия по защите от ЭМП. К организационным мероприятиям по защите от действия ЭМП относятся: выбор режимов работы излучающего оборудования, обеспечивающего уровень излучения, не превышающий предельно допустимый, ограничение места и времени нахождения в зоне действия ЭМП (защита расстоянием и временем), обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем ЭМП.

Инженерно-технические защитные мероприятия строятся на использовании явления экранирования электромагнитных полей непосредственно в местах пребывания человека, либо на мероприятиях по ограничению эмиссионных параметров источника поля.

Для защиты населения от воздействия электромагнитных излучений в строительных конструкциях в качестве защитных экранов могут применяться металлизированное стекло, металлическая сетка, металлический лист или любое другое проводящее покрытие, в том числе и специально разработанные строительные материалы. В качестве экранов могут применяться также различные пленки и ткани с металлизированным покрытием.

Биологическое влияние электрических и магнитных полей на организм людей и животных достаточно много исследовалось и исследуется на данный момент. Наблюдаемые при этом эффекты до сих пор не ясны и трудно поддаются определению, поэтому эта тема остается по-прежнему актуальной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Экологические аспекты передачи электроэнергии. В.И. Чехов / Под ред. Г.К. Зарудского. М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 44 с.
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 304 с.

## УПРАВЛЯЕМЫЕ ( ГИБКИЕ ) СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Хузин Р. Ш., Стариков В.С.

Уральский государственный горный университет

Передача и распределение электрической энергии осуществляются в настоящее время в основном по линиям переменного тока. Интенсивное строительство этих линий во второй половине XX в. в развитых странах привело к тому, что строить новые линии стало весьма затруднительно, главным образом, из-за проблем, связанных с отводом земли. В то же время продолжающийся рост нагрузки в сложно замкнутой сети требует увеличения пропускной способности существующих линий электропередач и управления их режимами[1]. Поэтому в последние годы интенсивно обсуждается вопрос о возможных путях решения этой задачи. Основные задачи:

1. Повышение пропускной способности линий электропередачи, вплоть до теплового предела по нагреву;
2. Обеспечение устойчивой работы энергосистемы при различных возмущениях;
3. Обеспечение заданного (принудительного распределения) мощности в электрических сетях в соответствии с требованиями диспетчера;
4. Регулирование напряжения в сетях, повышение надежности энергосбережения потребителей, снижение потерь в электрических сетях;
5. Превращение электрической сети из пассивного устройства транспорта электроэнергии в активный элемент управления режимами работы.

Комплексное и оптимальное решение этих проблем осуществимо при применении технологии управляемых систем передачи переменного тока или FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems).

Основные группы устройств FACTS:

1. устройства регулирования (компенсации) реактивной мощности и напряжения, подключаемые к сетям параллельно;
2. устройства регулирования параметров сети (сопротивления сети), подключаемые в сети последовательно;
3. устройства, сочетающие функции первых двух групп — устройства продольно-поперечного включения.

Данные устройства по принципу действия делятся на статические и электромашинные[2].

К статическим устройствам относятся:

1. батареи статических компенсаторов (БСК) - предназначены для повышения напряжения (на 3-4%) в сетях 6-220 кВ. Кроме этого, БСК позволяют корректировать перетоки энергии и регулировать напряжение в энергосистеме за счет изменения реактивной мощности нагрузки.
2. реакторные группы, коммутируемые вакуумными выключателями (ВРГ) - применяются для компенсации зарядной мощности линий электропередачи, для поддержания напряжения в требуемых пределах в установившихся режимах в узлах нагрузки, обеспечивают ступенчатое регулирование реактивной мощности;
3. управляемые шунтирующие реакторы (УШР) - применение УШР позволяет повысить управляемость режимами работы сетей таким образом, чтобы снизить потери, повысить пропускную способность линий электропередачи;
4. статические тиристорные компенсаторы (СТК) - компенсируют среднюю реактивную мощность нагрузки;

К электромашинным устройствам относятся:

1. синхронные компенсаторы (СК);
2. асинхронизированные статические компенсаторы (АСК).

Устройства регулирования реактивной мощности и напряжения, подключаемые к сетям параллельно, в целом как неуправляемые, так и управляемые (регулируемые) устройства компенсации реактивной мощности предназначены для поддержания уровней напряжения в электрических сетях 110—750 кВ (до 40%), управления перетоками мощности между энергосистемами, повышения пропускной способности ЛЭП (по некоторым оценкам – до 20%), повышения статической и динамической устойчивости энергосистем[3].

Устройства регулирования параметров сети предназначены для изменения сопротивления элементов сети (управление топологией сети), изменения пропускной способности сети, в том числе увеличения вплоть до ограничения по нагреву без нарушения условий устойчивости, перераспределения потоков мощности по параллельным линиям при изменении режимной ситуации[4].

К устройствам относятся:

1. неуправляемые устройства продольной компенсации (УПК) - применяются для увеличения пропускной способности воздушных линий и представляют собой батареи конденсаторов, включаемые последовательно в линии электропередачи для компенсации части продольного индуктивного сопротивления;

2. управляемые устройства продольной компенсации (УУПК) - реализуют сопротивление ЛЭП, увеличивают пропускную способность, обеспечивают регулирование и плавное перераспределение мощности по параллельным линиям электропередачи, демпфирует низкочастотные колебания;

3. фазопоротные устройства (ФПУ) - применение ФПУ позволяет управлять передаваемой по линиям электропередачи мощностью за счет изменения угла сдвига фаз между напряжениями по концам линии. Пример - объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ)[5].

Устройства продольно-поперечного включения обеспечивают заданное регулирование величины и фазы вектора напряжения в местах их подключения (векторное регулирование), изменяя (оптимизируя) за счёт этого управление потоками мощности, как в статических, так и в динамических режимах. Эти устройства создаются либо на базе двух СТАТКОМ, либо двух АСК, соединённых параллельно-последовательно[4].

Также необходимо отметить следующие устройства FACTS:

1. Вставки несинхронной связи - вставки постоянного тока (ВПТ) используются для объединения энергосистем, работающих на разных или несинхронных частотах.

2. Активные фильтры - активные фильтры обеспечивают выполнение двух функций - компенсации реактивной мощности и фильтрации.

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Технология FACTS обеспечивает новый более совершенный уровень функционирования электроэнергетических систем.

2. Технология FACTS основана на использовании достижений современной силовой электроники и электромашинно- вентильных комплексов.

3. Применение технологии FACTS в энергосистемах России актуально.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Худяков В.В. электропередачи постоянного тока и опыт их эксплуатации. М.: Издательство МЭИ, 1992.

2. Рыжов Ю.П., Бумагин Н.Ю. Современные пути создания управляемых линий электропередачи // Вестник МЭИ. 1999. № 4. С. 48—51.

3. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д., Худяков В.В. Гибкие электропередачи переменного тока // Электротехника. 1996. № 8. С. 16—21

4. [http://www.fsk-ees.ru/common/img/uploaded/managed\\_systems.pdf](http://www.fsk-ees.ru/common/img/uploaded/managed_systems.pdf)

5. <http://poisk.livejournal.com/589787.html>