

*На правах рукописи*



СИТНИКОВ ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ  
РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ (FACTS)**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции  
и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Иваново 2009



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Анализ актуальных проблем функционирования ЕЭС России и транспорта электроэнергии позволили выявить ряд «узких мест», которыми, в частности, являются: ограниченные возможности параллельной работы ОЭС Сибири с Европейской частью ЕЭС, а также получения и выдачи мощности из Тюменской энергосистемы; недостаточная пропускная способность ряда сечений между ОЭС Центра и энергосистемами Северного Кавказа и стран Закавказья; отсутствие возможности осуществления параллельной работы ОЭС Сибири и ОЭС Востока и др. В ближайшей перспективе возможны ограничения в сечениях ОЭС Центра, ОЭС Средней Волги и ОЭС Урала, в ОЭС Северо-Запада; имеются также ограничения по выдаче «запертых» мощностей ряда электростанций (Печорской ГРЭС, Кольской АЭС и др.).

Многие из указанных проблем могут быть эффективно решены путем совершенствования методов и средств управления потоками мощности в электрических сетях высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения как при нормальных, так и в переходных режимах функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) на основе применения технологии *управляемых гибких электропередач переменного тока* или, или, в соответствии с терминологией IEEE, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*.

Основная задача технологии FACTS заключается в повышении эффективности управления потоками мощности, регулирования напряжения, обеспечения статической или динамической устойчивости. Такая возможность обеспечивается благодаря способности элементов FACTS управлять взаимосвязанными параметрами, определяющими функционирование магистральных линий электропередачи, такими, как полное сопротивление, ток, напряжение, угол фазового сдвига между напряжениями по концам линии, затухание колебаний на различных частотах и т.д.

Большой вклад в решение проблем управляемых гибких электропередач переменного тока и электропередач постоянного тока внесли отечественные и зарубежные ученые Александров Г.Н., Астахов Ю.Н., Ботвинник М.М., Баринов В. А., Брянцев А.М., Веников В.А., Воропай Н.И., Глинтерник С.Р., Гринштейн Б.И., Жданов П.С., Идельчик В.И., Ивакин В.Н., Ковалев В.А., Кошечев Л.А., Ледянкин Д.П., Лабунцов В.А., Литкенс И.В., Либкинд М.С., Лутидзе Ш.И., Мамиконянц Л.Г., Маркович И.М., Мисриханов М.Ш., Нейман Л.Д., Кочкин В.И., Поссе А.В., Розанов Ю.К., Руденко Ю.Н., Рыжов Ю.П., Строев В.А., Совалов С.А., Соколов Н.И., Тиходеев Н.Н., Хвощинская З.Г., Худяков В.В., Чебан В.М., Шакарян Ю.Г., Якимец И.В., Acha E., Akagi H., Andersson G., Hingorani N. и др.

Для решения задач управления режимами работы ЭЭС и потоками мощности как в существующих, так и в новых или модернизируемых линиях электропередачи в целях обеспечения надежности и устойчивости функционирования отдельных и объединенных энергосистем, а также ЕЭС России в целом широко используются современные программно-технические средства и высокоскоростные каналы связи (оптико-волоконные, спутниковые и др.). Однако даже при их использовании эффективность управления во многих случаях ограничивает недостаточное быстродействие широко применяемых в современных ЭЭС силовых управляющих схем с механически переключаемыми устройствами. Другая связанная с этим сторона проблемы заключается в том, что команды управления для таких устройств нельзя формировать с высокой частотой, поскольку механические устройства имеют меньшую износостойкость по сравнению со статическими устройствами.

Поэтому возможности эффективного применения технологии FACTS в значительной мере связаны с развитием и совершенствованием бесконтактных электрических аппаратов, элементов силовой электроники и их систем управления. В

частности, применение современных высокоскоростных преобразовательных и исполнительных устройств в регуляторах FACTS позволит последним эффективно выполнять следующие функции: управления реактивной мощностью; регулирования напряжения, изменения направления и величины перетоков мощности; функции активных или гибридных фильтров и др.

Для исследования и оценки эффективности нового поколения регуляторов FACTS необходимо модернизировать значительную часть инструментов расчета и анализа перетоков мощности, используемых при планировании режимов и в процессе функционирования ЭЭС. В настоящее время одним из основных методов решения задачи расчетов потоков мощности, в том числе, и при наличии элементов FACTS, является метод Ньютона-Рафсона. Однако при последовательном поиске решений этим методом в конце каждой итерации возникает подзадача переопределения переменных состояния управляемых силовых устройств, и в результате таких переопределений итерационный процесс теряет свойство квадратической сходимости. Поэтому совершенствование и развитие методов и инструментов расчета режимов с учетом взаимодействия различных устройств FACTS также является актуальной задачей.

Современные методы синтеза устройств FACTS в большой мере связаны с выполняемыми этими устройствами функциями. Для минимизации нежелательного взаимодействия (взаимовлияния) устройств FACTS используемые для их синтеза методы и процедуры должны учитывать факт такого взаимодействия. Нелинейность моделей энергосистем, их параметрическая неопределенность и непредсказуемые в аварийных ситуациях изменения режимов работы существенно затрудняют задачу синтеза координированного управления. Задачи адаптивного управления (регулирования) ЭЭС, демпфирования колебаний перетоков мощности и ряд других требуют разработки специальных методов синтеза устройств FACTS.

Традиционные устройства компенсации реактивной мощности, коммутируемые выключателями, имеют ряд существенных недостатков. Кроме того, в настоящее время очень актуальна проблема повышения качества электроэнергии. Тенденция роста нелинейных нагрузок в общем составе потребителей электроэнергии, являющихся источниками высших гармоник, усугубляет эту проблему. Применяемые для повышения качества электроэнергии пассивные фильтры переменного тока имеют высокие потери и не обеспечивают эффективное снижение высших гармоник. Поэтому актуальны исследования и разработки принципов управления активной фильтрацией на основе элементов силовой электроники для решения проблем повышения качества электроэнергии в ЭЭС.

Новые технологии создания и развития сетей электропередачи с быстродействующим электронным управлением режимами их работы обуславливают необходимость иных способов разработки и сооружения оборудования электростанции, изменения подходов и процедур планирования работы сетей для передачи и распределения электроэнергии.

Эти технологии могут также изменить характер деловых операций на энергорынке из-за появления возможности высокоскоростного управления потоками электроэнергии. Благодаря множеству присущих ей и многообещающих экономических и технических достоинств технология FACTS сознательно поддерживается производителями электрооборудования, систем энергоснабжения и научно-исследовательскими организациями во всем мире.

## **Связь работы с государственными и отраслевыми научно - техническими программами, темами.**

Исследования по данной проблеме проводились автором в рамках отраслевых программ Министерства промышленности и энергетики РФ, и в соответствии с приказом РАО «ЕЭС России» от 29.05.06 №380 «О создании управляемых линий электропередачи и оборудования для них» и с решениями Координационного Совета ОАО «ФСК ЕЭС» по созданию и применению в ЕЭС устройств и технологий управляемых систем электропередачи переменного тока.

**Цель работы.** Целью работы является исследование и разработка эффективных методов и средств управления режимами ЭЭС на основе применения гибких электропередач переменного тока (FACTS) и современных высокоскоростных преобразовательных и исполнительных устройств в регуляторах FACTS, а также совершенствование их математического, алгоритмического и программного обеспечения, расширяющего их функциональные возможности для обеспечения надежности и устойчивости функционирования электроэнергетических систем.

Для достижения поставленной цели решен следующий комплекс задач:

1. Выполнен сравнительный анализ функциональных возможностей средств управления режимами ЭЭС на основе элементов FACTS и оценка их эффективности.

2. Проведено исследование режимов работы и функциональных возможностей устройств силовой электроники, выполненных на полностью управляемых ключах, и разработаны инженерные методики расчета элементов их силовых частей.

3. Разработаны принципы управления активной фильтрацией на основе элементов силовой электроники для решения проблем повышения качества электроэнергии в ЭЭС.

4. Разработаны принципы и методы управления элементами FACTS с учетом их взаимодействия для управления режимами ЭЭС.

5. Разработаны методы синтеза систем управления устройств FACTS, обеспечивающие заданные динамические свойства.

6. Исследованы возможности управления устройствами FACTS на основе адаптивных самоорганизующихся регуляторов (СОРЭ).

7. Разработаны рекомендации и предложены методы и средства их реализации для решения проблем функционирования ЕЭС России и транспортирования электроэнергии с учетом «узких мест», связанных с ограниченными возможностями: параллельной работы ОЭС, получения и выдачи мощности энергосистемами, их пропускной способности.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются методы и средства управления режимами электроэнергетических систем на основе гибких электропередач переменного тока (FACTS). Предметом исследований являются режимы работы ЭЭС и электропередач высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электромагнитных переходных процессов в электрических цепях, теория электромеханических переходных процессов в электроэнергетических системах, теория автоматического управления, методы анализа многомерных динамических систем, исследования с использованием математических и цифровых моделей.

**Достоверность и обоснованность результатов работы.** Достоверность предложенных в работе решений и обоснованность основных научных положений, полученных в диссертационной работе, подтверждается выполненными ис-

следованиями и опытом проектирования ряда важнейших энергетических объектов.

**Научная новизна и значимость полученных результатов** заключается в совершенствовании методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе гибких электропередач переменного тока (FACTS) и состоит в следующем:

1. На основе анализа и исследований методов и инструментальных средств расчета режимов функционирования ЭЭС для определения эффективности устройств FACTS предложен унифицированный подход, который объединяет переменные состояния ЭЭС без управляемого силового оборудования и переменные состояния, описывающие данное управляемое силовое оборудование (устройства FACTS) в единое множество состояний, обеспечивающий описание исследуемого объекта в единой системе координат и сохранение квадратической сходимости итеративных решений при использовании алгоритма Ньютона-Рафсона.

2. Для решения задачи демпфирования колебаний перетоков мощности предложен модальный подход к синтезу управления ЭЭС с устройствами FACTS, заключающийся в преобразованиях уравнений линейной модели ЭЭС к диагональному виду.

3. Для решения проблемы координированного и адаптивного управления (регулирования) ЭЭС предложено использовать теорию самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией (СОРЭ), оперирующих с дискретными моделями объектов управления и использующих алгоритмы циклических наблюдателей Калмана.

4. На основе разработанных методов синтеза устройств FACTS впервые предложена технология многоуровневого управления режимами ЭЭС, которая может быть использована при перспективном планировании электрических сетей.

5. Разработаны и исследованы принципы управления активной фильтрацией на основе элементов силовой электроники, обеспечивающие повышение качества электроэнергии в ЭЭС.

6. Исследованы актуальные проблемы функционирования ЕЭС России и транспорта электроэнергии и выявлены «узкие места», связанные с ограниченными возможностями параллельной работы ОЭС Сибири с Европейской частью ЕЭС, а также получения и выдачи мощности из Тюменской энергосистемы; недостаточной пропускной способностью ряда сечений между ОЭС Центра и энергосистемами Северного Кавказа и стран Закавказья; отсутствием возможности осуществления параллельной работы ОЭС Сибири и ОЭС Востока и др.; возможным ограничением в ближайшей перспективе в сечениях ОЭС Центра, ОЭС Средней Волги и ОЭС Урала, в ОЭС Северо-Запада; ограничением по выдаче «запертых» мощностей ряда электростанций (Печорской ГРЭС, Кольской АЭС и др.).

7. Исследованы режимы при установке устройств FACTS (СТАТКОМ) в ЕНЭС России (на примере ПС 330/400 кВ Выборгская в ОЭС Северо-Запада) и сформулированы технические требования к разрабатываемым устройствам FACTS и их системам автоматического регулирования.

8. Разработаны рекомендации по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра, позволяющие увеличить максимально допустимые перетоки мощности в межсистемном сечении ОЭС Урала - ОЭС Средней Волги в сторону ОЭС Центра на 340 МВт и в сторону ОЭС Урала на 520 МВт; перераспределить перетоки мощности по ВЛ 500 и 220 кВ, входящих в межсистемное сечение, уменьшив на 10 % нагрузку последних.

9. Впервые выполнены исследования и разработаны рекомендации по решению проблемы получения дополнительного системного эффекта от взаиморезервирования энергосистем Восточной Сибири и западного региона ОЭС Востока и повышения надежности электроснабжения тяговых подстанций участка Транссибирской железной дороги за счет организации межсистемной связи между ОЭС Сибири и Востока на основе вставки несинхронной связи (ВНС).

#### **Практическая ценность работы.**

1. Предложенный метод расчета потоков мощности для сложных систем с устройствами FACTS, который объединяет переменные состояния ЭЭС без управляемого силового оборудования и переменные состояния, описывающие данное управляемое силовое оборудование (устройства FACTS) в единое множество состояний, позволяет эффективно выявлять возможности использования различных устройств FACTS.

2. Разработанные методы синтеза устройств FACTS могут быть использованы при перспективном планировании электрических сетей для решения различных задач: демпфирования колебаний перетоков мощности, координированного и адаптивного управления (регулирования) ЭЭС.

3. Предложения в части использования активных и гибридных фильтров могут быть применены для решения проблем компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии при перспективном и конкретном проектировании ЭЭС.

4. На базе выполненных исследований для применения устройств FACTS (СТАТКОМ) в ЕНЭС России разработаны технические требования к такого рода устройствам и их системам регулирования. Ввод в эксплуатацию опытно-промышленных образцов устройств СТАТКОМ позволит отработать модуль СТАТКОМ для создания в дальнейшем в ЕНЭС России гибких систем электропередачи переменного тока и замены синхронных компенсаторов.

5. Реализация предложенных в работе рекомендаций по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра, Сибири и Востока позволит получить значительный технический эффект.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационных исследований и разработок внедрены в ОАО «Институт «Энергосетьпроект» при выполнении ряда важнейших работ для электроэнергетики:

- Проведение исследований по определению мест установки и эффективности применения устройств управляемой продольной компенсации в ЕНЭС России», выполненной совместно с ОАО «Филиал НТЦЭ – ВНИИЭ» в соответствии с приложением 3 «Перечень пилотных проектов устройств FACTS к проекту приказа РАО «ЕЭС России» «О внесении изменений в приказ от 29.05.2006г. №380 «О создании управляемых линий электропередачи и оборудования для них».

- Управление реактивной мощностью и напряжением в Московской энергосистеме (заказчик ОАО «МОЭСК»).

- Исследование установившихся режимов связей ОЭС Урала-ОЭС Средней Волги и Центра для обоснования FACTS.

- Техничко-экономическое обоснование «Создание межсистемной связи на напряжении 220 кВ между ОЭС Сибири и ОЭС Востока на основе Забайкальского преобразовательного комплекса на ПС Могоча (ЗБПК)».

- Проведение исследований по определению мест установки и эффективности применения в ЕНЭС России объединенных регуляторов потоков мощности на базе СТАТКОМ.

- Уточняющие рекомендации по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра с оценкой экономической эффективности инвестиций для их реализации.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод расчета потоков мощности для сложных ЭЭС с устройствами FACTS, объединяющий переменные состояния ЭЭС без управляемого силового оборудования и переменные состояния, описывающие данное управляемое силовое оборудование (устройства FACTS) в единое множество состояний, и позволяющий оценивать возможности и эффективность использования различных устройств FACTS.

2. Разработанные методы синтеза устройств FACTS, которые могут быть использованы при перспективном планировании электрических сетей для решения различных задач: минимизации нежелательного взаимодействия (взаимовлияния) устройств FACTS, демпфирования колебаний перетоков мощности, координированного и адаптивного управления (регулирования) ЭЭС.

3. Предложения в части принципов управления активной фильтрацией на основе элементов силовой электроники для решения проблем повышения качества электроэнергии в ЭЭС.

4. Технические требования к устройствам FACTS (СТАТКОМ) и их системам регулирования для создания в дальнейшем в ЕНЭС России гибких систем электропередачи переменного тока и замены синхронных компенсаторов.

5. Рекомендации по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра, Сибири и Востока, позволяющие получить значительный технико-экономический эффект.

**Личный вклад соискателя.** Приведенные в диссертации результаты являются составной частью проектных и научно-исследовательских работ, выполненных в ОАО «Институт «Энергосетьпроект» под руководством и при участии автора, а также ряда инициативных работ. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит постановка задач, разработка теоретических и методических положений, физических и математических моделей и методов, обобщение результатов и рекомендации по применению предложенных решений.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на различных международных, всесоюзных и всероссийских семинарах и конференциях, в том числе, на: всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы преобразовательной техники» (Киев, 1987); всесоюзном научно-техническом семинаре «Организация электроснабжения в условиях перерывов и значительных отклонений напряжения питающей сети» (Москва, 1987); 2-ой Научной конференции с международным участием Словацкой Высшей Школы Техники «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА'89» (Братислава, 1989); международной конференции CIGRE (Санкт-Петербург, 2003); IX симпозиуме «ЭЛЕКТРОТЕХНИКА 2030» (Истра, 2007); 42<sup>st</sup> CIGRE Session, SC B4 «HVDC and Power Electronics» (Париж, 2008); международной конференции «Консолидация усилий электроэнергетики и электротехники в условиях роста инвестиций. Перспективные технологии и электрооборудование» (Москва, 2008) и др.

**Публикации.** По теме диссертации после получения ученой степени кандидата технических наук опубликовано 43 печатных работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем основного текста работы составляет 297 страниц, включая 133 рисунка и 16 страниц библиографического списка (172 наименования).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* отмечена актуальность темы диссертации с точки зрения обеспечения надежности и устойчивости работы отдельных и объединенных энергосистем, а также ЕЭС России в целом за счет исследования, разработки и внедрения новых методов и средств управления режимами электроэнергетических систем на основе гибких электропередач переменного тока (FACTS).

Сформулированы задачи исследования, связанные с: анализом характеристик основных элементов гибких электропередач переменного тока (FACTS), основой которых является статический источник (генератор и/или потребитель) реактивной мощности (ИРМ); сравнением эффективности различных устройств FACTS в зависимости от решаемых задач: управления потоками мощности, управления напряжением, обеспечения статической или динамической устойчивости; исследованием основных характеристик силовых полупроводниковых устройств для мощных преобразователей без принудительной коммутации тиристоров, не вызывающая искажения формы кривой формируемого тока на рабочей частоте, которые являются основой построения преобразователей электроэнергетического назначения, в том числе, применяемых в устройствах FACTS; исследованием перспективных методов и инструментов расчета и анализа, используемых при планировании режимов и в процессе функционирования ЭЭС для определения эффективности устройств FACTS; анализом и разработкой современных методов синтеза устройств FACTS, связанных с возможностями последних в части решения различных задач для: минимизации нежелательного взаимодействия (взаимовлияния) устройств FACTS, демпфирования колебаний перетоков мощности, координированного и адаптивного управления (регулирования) ЭЭС; исследованием и разработкой предложений в части использования активных и гибридных фильтров на основе элементов FACTS для решения проблем компенсации реактивной мощности и повышения качества электроэнергии в ЭЭС; исследованием актуальных проблем функционирования ЕЭС России и транспорта электроэнергии для выявления «узких мест», связанных с ограниченными возможностями: параллельной работы ОЭС, получения и выдачи мощности энергосистемами, по пропускной способности ряда сечений и т.п.

Отмечены научная новизна, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту, а также структура представленной работы.

**В первой главе** рассмотрены основные элементы гибких электропередач переменного тока и их возможности в современной электроэнергетике при решении следующих актуальных задач: регулирования напряжения; симметрирования нагрузки; повышения предела динамической устойчивости; демпфирования различных колебаний в ЭЭС; ограничения временных перенапряжений; компенсации реактивной мощности на преобразовательных подстанциях электропередач и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ); повышения пропускной способности ЛЭП.

Основные элементы устройств FACTS представляют собой семейство автоматических устройств (регуляторов) большой мощности, каждое из которых может применяться как индивидуально, так и во взаимодействии с другими устройствами для управления одним или бóльшим числом взаимосвязанных параметров электроэнергетических систем (ЭЭС).

Основой устройства FACTS (рис. 1), является статический источник (генератор и/или потребитель) реактивной мощности (ИРМ).

Основное внимание в работе уделяется наиболее востребованным устройствам FACTS, которыми являются: статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ); статический тиристорный компенсатор (СТК); статический син-

хронный генератор (ССГ); устройство продольной компенсации (УПК); фазопоротное устройство (ФПУ) и т.п.

*Статический синхронный компенсатор (СТАТКОМ)* – одно из ключевых устройств FACTS. Как и большинство устройств FACTS СТАТКОМ является тиристорно управляемым ИРМ, обеспечивающим поддержание заданного значения напряжения посредством потребления или генерации реактивной мощности в точке подключения без использования дополнительных внешних реакторов или

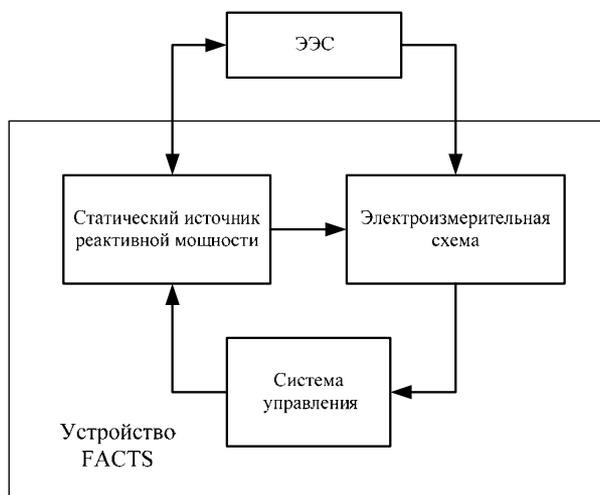


Рис. 1. Общая структура устройства FACTS

КБ большой мощности. СТАТКОМ может быть основан на использовании преобразователя напряжения (ПН) или преобразователя тока (ПТ). На рис. 2 приведена упрощенная схема СТАТКОМ с ПН.

Управление перетоком реактивной мощности между преобразователем и ЭЭС переменного тока осуществляется путем изменения амплитуды выходного напряжения  $\underline{U}$ . При превышении значения выходного напряжения ПН  $\underline{U}$  по отношению к напряжению в линии  $\underline{U}_L$  формируется опережающий ток. В этом случае статический синхронный компенсатор СТАТКОМ работает в емкостном режиме и происходит генерация реактивной мощности. При уменьшении значения выходного напряжения  $\underline{U}$  ниже напряжения в линии  $\underline{U}_L$ , формируется отстающий ток, и СТАТКОМ работает в индуктивном режиме. В этом случае происходит потребление реактивной мощности. При равенстве напряжений  $\underline{U}_L = \underline{U}$  перетока мощности не происходит.

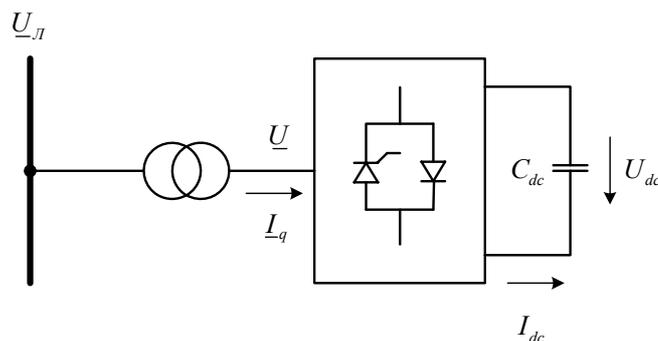


Рис. 2. Схема СТАТКОМ с преобразователем напряжения

*Статический тиристорный компенсатор (СТК)* является общим термином для обозначения реактора или батареи конденсаторов (КБ) с тиристорным управлением (переключением), а также их комбинации. СТК, как правило, основан на использовании тиристоров без возможности запираания с отдельным оборудованием.

*Статический синхронный генератор (ССГ)* является комбинацией СТАТКОМ и любого источника энергии. Термин ССГ обобщает присоединение любого источника энергии, включая аккумуляторную батарею, СПИНЭ и т.д.

*Устройство продольной компенсации (УПК)* - емкостный реактивный компенсатор, состоящий из последовательно включенной в линию батареи конденсаторов, соединенных параллельно с реактором с тиристорным управлением для обеспечения плавного изменения емкостного сопротивления.

*Фазоворотное устройство (ФПУ)* - трансформатор-фазовращатель, регулируемый с помощью тиристорного управления для обеспечения быстрого изменения угла фазового сдвига.

В зависимости от режима и характеристик электроэнергетической системы (ЭЭС) ИРМы способны потреблять или выдавать (генерировать) реактивную мощность. ИРМы широко применяются в современной электроэнергетике при решении следующих актуальных задач: 1) регулирования напряжения; 2) симметрирования нагрузки; 3) повышения пропускной способности (повышение статической и динамической устойчивости); 4) демпфирования различных колебаний в ЭЭС; 5) ограничения временных перенапряжений; 6) компенсации реактивной мощности на преобразовательных подстанциях электропередач и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ).

В таблице 1 приведены «Примеры использования устройств FACTS». При этом важно отметить, что ни одно из устройств FACTS не обладает максимальной степенью эффективности в отношении перечисленных задач управления ЭЭС, т.е. ни одно из устройств FACTS не является «панацеей от всех бед» и максимальная эффективность может быть достигнута только путем их комплексного использования.

**Во второй главе** приведены: анализ особенностей развития силовой электроники; основные характеристики силовых полупроводниковых устройств; сравнительная оценка силовых полупроводниковых устройств; возможности использования силовой электроники в системах электроснабжения.

Перспективы и возможности технологии FACTS в задачах управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС) в установившихся и в переходных режимах в определяющей мере связаны с происходящим научно-техническим прорывом в области силовой электроники. Прогресс силовых электронных приборов определяется все большим приближением их свойств к *характеристикам идеального ключа*, который имеет: 1) большой ток (коммутируемый ток, действующее, максимальное и среднее значения, ударный ток); 2) высокое напряжение (импульсное повторяющееся, неповторяющееся напряжение, длительное постоянное); 3) быстрое переключение (пренебрежимо малое время включения и выключения). Достижения в создании больших кремниевых пластин позволили быстро поднять рабочее напряжение *силовых полупроводниковых устройств* (СППУ) свыше 1 кВ, а тока – более 100 А.

Табл.1

Задача	Проблема	Корректирующее действие	Устройство FACTS
Поддержание заданных ограничений по напряжению	Низкое напряжение при большой нагрузке	Выдача реактивной мощности	СТК СТАТКОМ
		Уменьшение реактивного сопротивления ЛЭП	УПК
	Высокое напряжение при малой нагрузке	Потребление реактивной мощности	СТК СТАТКОМ
	Высокое напряжение после АПВ	Потребление реактивной мощности, предотвращение перегрузки	СТК СТАТКОМ
	Низкое напряжение после ликвидации возмущения	Выдача реактивной мощности, предотвращение перегрузки	СТК СТАТКОМ
Ограничение токовых нагрузок	Перегрузка ЛЭП	Увеличение пропускной способности	УПК, ССПК ОРПМ ФПУ
Управление потоком мощности	Параллельные потоки	Корректировка реактивных сопротивлений линий	УПК, ССПК ОРПМ
		Корректировка угла сдвига фаз	ОРПМ ССПК, ФПУ
	Инверсия потока	Корректировка угла сдвига фаз	ОРПМ ССПК, ФПУ
Ограничение тока КЗ	Большой ток КЗ	Ограничение тока КЗ	УПК ОРПМ
Повышение устойчивости	Ограниченная пропускная способность	Уменьшение реактивного сопротивления ЛЭП. Поддержание напряжения	УПК, ССПК СТК СТАТКОМ ОРПМ

Создание промышленных образцов тиристоров породило большие надежды на их широкое использование в электроэнергетике путем замены ртутных вентилях с целью существенного улучшения технико-экономических характеристик преобразовательных устройств. Неполная управляемость тиристора стимулировала изобретение различных схем *принудительной коммутации (самокоммутации)*. Повышение номинальных параметров тиристоров позволило охватить практически весь мощностной диапазон преобразовательного оборудования. При этом наибольшее распространение получили тиристорные управляемые выпрямители, ведомые сетью инверторы и непосредственные преобразователи частоты (циклоинверторы). Самокоммутируемые инверторы (автономные инверторы) нашли широкое применение в различных областях промышленности и электроэнергетики.

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. на рынке появились включаемые и выключаемые управлением тиристоры (GTO – *Gate Turn-Off Thyristor*, а затем IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistors*). Эти силовые полупроводниковые приборы позволили существенно расширить гамму преобразователей для мощного высоковольтного оборудования. Обладая хорошими частотными свойствами, низким значением мощности управления, включаемые и выключаемые управлением тири-

стор характеризуются относительно низким падением напряжения проводящем состоянии при рабочих напряжениях до 2 кВ.

Возможности технологии современной силовой электроники позволили реализовать идею создания силовых интегральных схем (СИС) – «разумных» интегральных модулей. Это стало возможным благодаря низким потерям и малой мощности управления МОП-приборов. Удалось также разработать технологию и создать силовые ключевые элементы на одном кристалле или общей керамической подложке. При этом современные СИС снабжены «драйверами» – формировавателями импульсов управления, соответствующей диагностикой, защитой, элементами автоматического выбора режима работы нагрузок, что делает их действительно интеллектуальными схемами.

Современные достижения силовой электроники в сочетании с передовой технологией управления позволили обеспечить как экономическую эффективность преобразования параметров электрической энергии, так и оптимизацию управления технологическими, в том числе, электроэнергетическими процессами. В общем случае технология FACTS предполагает работу с трехфазными мощностями от десятков до сотен МВт. Устройства FACTS представляют собой электроустановки, состоящие из преобразователей переменного тока в постоянный и/или постоянного тока в переменный и/или высокомошных переключателей (коммутаторов) переменного тока. Преобразователь на основе силовых электронных приборов включает вентили и вспомогательное оборудование, а каждый из вентиляей, в свою очередь, состоит из силовых устройств, демпфирующих и логическими схемами. Номинальные характеристики силовых устройств большой мощности варьируется в диапазоне 1 – 5 кА и 5 – 10 кВ, при этом эксплуатационные характеристики схемы могут составлять от 25 до 50% номинальной мощности. Из этого следует, что преобразователи и коммутаторы переменного тока должны представлять собой сборки большого числа силовых устройств. Преобразователи, переключатели переменного тока и устройства соединяются последовательно и/или параллельно для достижения желаемых характеристик и показателей устройств FACTS.

Например, функции компенсатора реактивной мощности наиболее эффективно может выполнять СТАТКОМ, созданный на основе инвертора напряжения. В нашей стране (ОАО «ВНИИЭ») создан первый отечественный макетный образец компенсатора реактивной мощности с цифровым управлением на основе трехфазного мостового преобразователя напряжения. На рис. 3 представлены схема компенсатора и диаграммы напряжения и тока в емкостном режиме. Учитывая, что он может изменять реактивную мощность от  $-Q$  до  $+Q$ , происходит обмен реактивной мощностью сети и конденсаторного накопителя.

**В третьей главе** рассмотрены актуальные задачи активной фильтрации в электрических сетях; особенности управления активными фильтрами в электрических сетях; эффективность применения активных фильтров; предложения по объектам установки активных фильтров в электрических сетях.

Традиционные устройства компенсации реактивной мощности, коммутируемые выключателями, имеют ряд существенных недостатков. Кроме того, в настоящее время очень актуальна проблема повышения качества электроэнергии. Тенденция роста нелинейных нагрузок в общем составе потребителей электроэнергии, являющихся источниками высших гармоник, усугубляет эту проблему. Применяемые для повышения качества электроэнергии пассивные фильтры пере-

менного тока имеют высокие потери и не обеспечивают эффективное снижение высших гармоник. Решение указанных проблем возможно путем применения активных и гибридных фильтров, выполненные на основе силовой полупроводниковой техники. Появление нового многофункционального типа устройства, так называемого активного фильтра (АФ), или компенсатора неактивной мощности (КНМ), способного работать, как в режиме компенсации реактивной мощности сети, так и в режиме компенсации высших гармоник тока сети, помогает решить одновременно две упомянутых выше проблемы.

КНМ является универсальным устройством воздействия на режимные параметры электрических сетей. При этом он выполняет три главные функции: компенсацию высших гармоник, компенсацию реактивной мощности и выдачу ак-

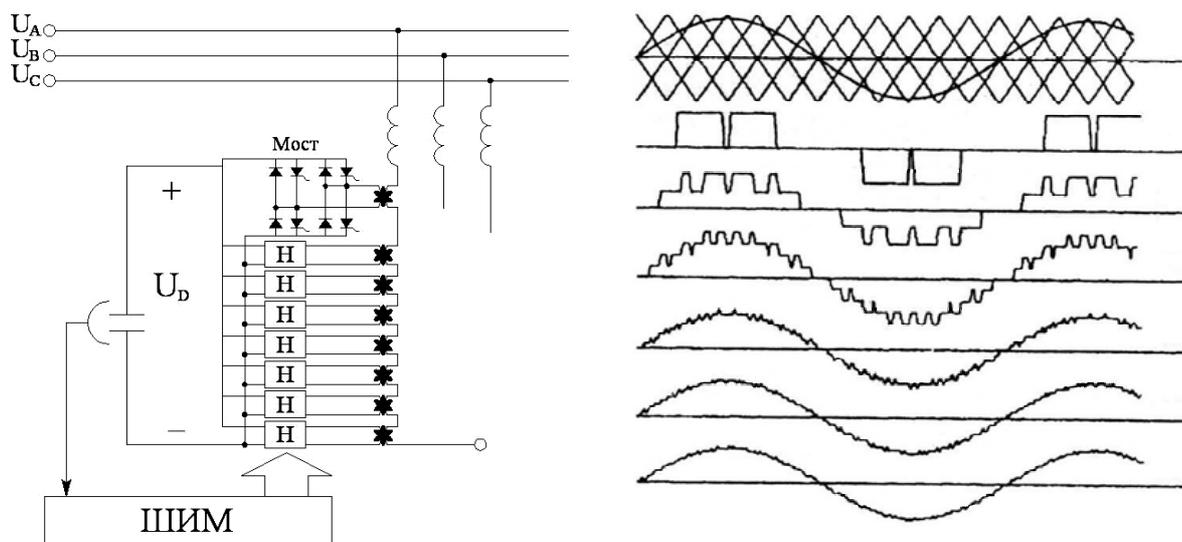


Рис. 3. Схема компенсатора (а) и диаграммы напряжения с каскадным соединением преобразователей (б)

тивной мощности, и в некоторых случаях – симметрирование параметров трехфазных сетей.

Активные фильтры высших гармоник являются сравнительно новым классом устройств, улучшающих качество электроэнергии сразу по нескольким показателям. Такой преобразователь может подключаться параллельно или последовательно нелинейному электроприемнику. Для исключения или минимизации реактивной мощности всех гармоник тока, включая основную, такой преобразователь работает в режиме как бы генератора антигармоник, что исключает или ограничивает их поступление в сеть электроснабжения.

Таким образом, происходит защита сети от негативного влияния высших гармоник тока, устранение провалов, фликера и несимметрии напряжения, а также повышение коэффициента мощности на основной частоте. Последняя функция соответствует традиционным компенсаторам или регуляторам реактивной мощности. Кроме того, при необходимости может осуществляться и регулирование потока не только реактивной, но и активной мощности.

АФ состоит из преобразователя переменного/постоянного тока с индуктивным или емкостным накопителем энергии на стороне постоянного тока (рис. 4). Преобразователь может работать как в режимах выпрямления (квадранты I и IV), так и в режимах инвертирования (квадранты II и III). Полная управляемость ключевых элементов в данном случае позволяет обеспечить работу в квадрантах III и

IV, где требуется принудительная коммутация ключей в отличие от естественной коммутации в квадрантах I и II. Благодаря этому свойству такие преобразователи называют четырехквadrантными.

АФ представляет собой преобразователь напряжения с дросселями на стороне переменного тока преобразователя и обеспечивает компенсацию высших гармоник тока сети путём генерирования высших гармоник тока в сеть, в противофазе с высшими гармониками тока сети. Управление компенсацией токов высших гармоник сети осуществляется путём слежения за токами в сети  $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$ ,  $i_{Lc}$  (рис. 5) до точки включения АФ.

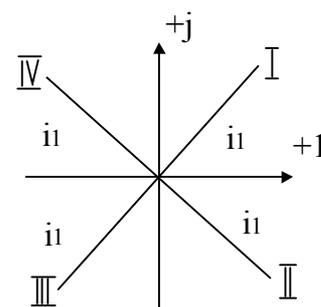
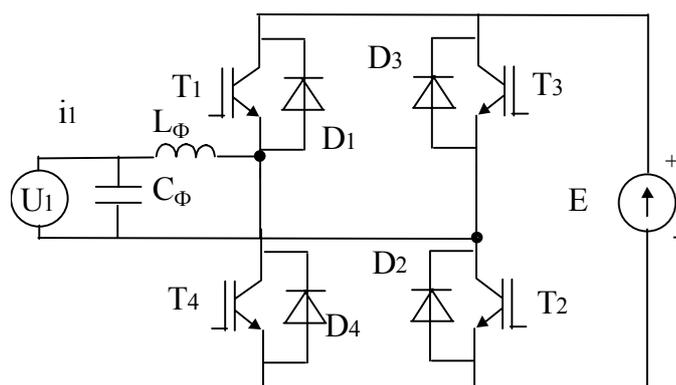
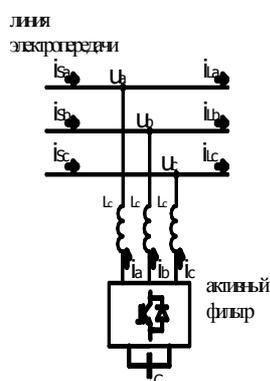


Рис. 4. Четырехквadrантный преобразователь с емкостным накопителем: а – принципиальная схема, б – диаграммы токов и напряжений

Рис. 5. Подключение активного фильтра к сети



На рис. 6 представлена упрощённая структурная схема АФ. На блок-схеме показаны датчики напряжения и тока сети, датчики тока в дросселях фильтра. Сигналы с датчиков поступают на входы системы управления. Выход системы управления подключён к драйверу преобразователя напряжения. Сигналы с драйвера поступают на управляющие входы ключевых элементов преобразователя напряжения или тока АФ.

Функция системы управления АФ заключается в вычислении высших гармоник фазных токов сети и последующей генерации сигналов управления драйвером преобразователя, для создания высших гармоник тока в фазах преобразователя.

В задачах обеспечения качества электроэнергии (КЭ) при использовании АФ в электрических сетях и промышленных предприятиях определяющими являются показатели качества электроэнергии (ПКЭ): установившееся отклонение напряжения, коэффициент несимметрии напряжения, коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения и т.п. Приведены предложения и рекомендации по объектам установки АФ, а также возможные и приоритетные функции, выполняемые АФ (компенсатором неактивной мощности), в сетях различных напряжений.

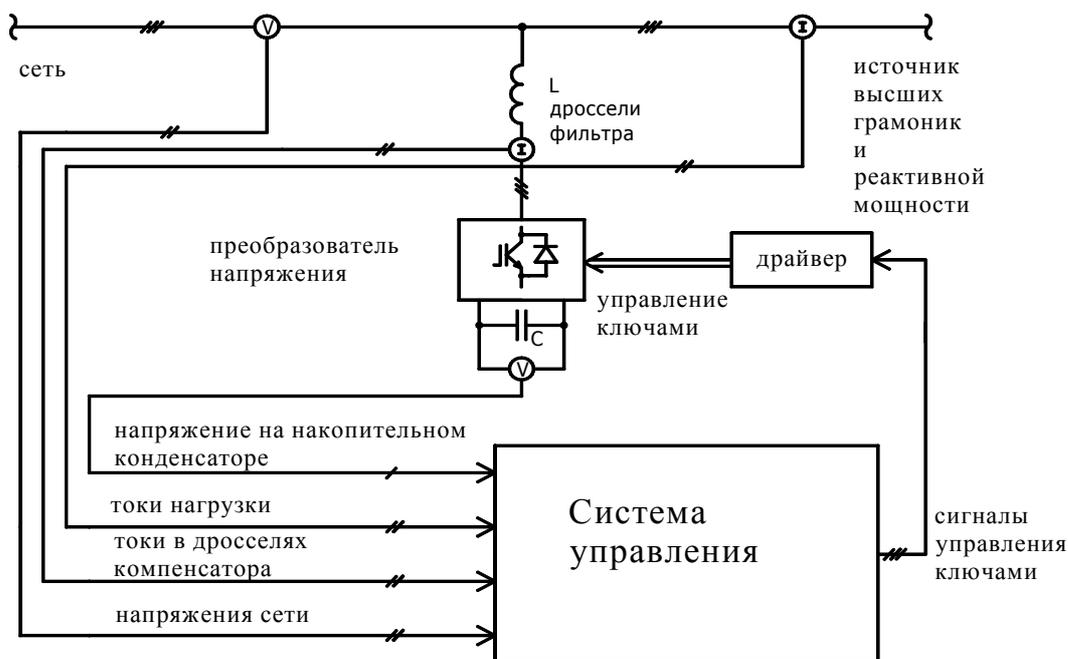


Рис. 6. Упрощённая структурная схема АФ

**В четвертой главе** рассмотрены характеристики и особенности задачи расчетов электрических сетей со следующими устройствами FACTS: со статическим компенсатором реактивной мощности (СТК); с последовательным конденсатором с тиристорным управлением; со статическим синхронным компенсатором (СТАТКОМ); с объединенным регулятором потока мощности.

Для определения эффективности нового поколения регуляторов FACTS электроэнергетических систем необходимо модернизировать большую часть инструментов анализа, используемых при планировании режимов и в процессе функционирования ЭЭС. Надежный расчет потоков мощности в реальных магистральных и распределительных сетях электропередачи – далеко не тривиальная проблема, и из-за ее практической природы было предложено множество вычислительных методов.

В качестве основного метода расчета потоков мощности в ЭЭС в работе принят метод Ньютона-Рафсона, который является наиболее успешным практическим методом благодаря своим характеристикам сходимости.

В случае системы нелинейных алгебраических уравнений

$$f(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $f(\mathbf{x})$  представляет собой систему из  $n$  нелинейных уравнений, а  $\mathbf{x}$  является вектором из  $n$  неизвестных, используется разложение

$$f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x} - \mathbf{x}^{(0)}) + O(n^2). \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(0)})$  – матрица (якобиан) частных производных первого порядка векторной функции  $f(\mathbf{x})$  по элементам вектора  $\mathbf{x}$ , вычисленная в опорной точке

$\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(0)}$ ,  $O(n^2)$  – члены более высокого порядка, определяется касательная гиперповерхность к функции  $f(\mathbf{x})$ .

Уравнение (1) имеет удобный вид для расчета вектора  $\mathbf{x}$  в предположении, что  $\mathbf{x}^{(1)}$  является значением вектора, рассчитанным на первом шаге итерации (при этом значение  $\mathbf{x}^{(1)}$  должно быть достаточно близким к начальному приближению  $\mathbf{x}^{(0)}$ ). На основании справедливости этого допущения можно пренебречь всеми членами более высокого порядка в уравнении (1), т.е.

$$f(\mathbf{x}^{(1)}) \approx f(\mathbf{x}^{(0)}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(0)})(\mathbf{x}^{(1)} - \mathbf{x}^{(0)}). \quad (2)$$

Обобщая выражение (2) на случай  $i$ -й итерации, получаем

$$f(\mathbf{x}^{(i)}) \approx f(\mathbf{x}^{(i-1)}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^{(i-1)})(\mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{x}^{(i-1)}), \quad (3)$$

где  $i = 1, 2, \dots$ . Если предположить, что  $\mathbf{x}^{(i)}$  с заданной точностью близко к решению  $\mathbf{x}^*$ , то  $f(\mathbf{x}^{(i)}) \approx f(\mathbf{x}^*) = 0$  и

$$\mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{x}^{(i-1)} - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^{(i-1)})f(\mathbf{x}^{(i-1)}). \quad (4)$$

Решение  $\mathbf{x}^{(i)}$  (4) выражается в виде приращения

$$\Delta \mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{x}^{(i-1)},$$

т.е.

$$\Delta \mathbf{x}^{(i)} = -\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^{(i-1)})f(\mathbf{x}^{(i-1)}), \quad (5)$$

$$\mathbf{x}^{(i)} = \mathbf{x}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{x}^{(i)}. \quad (6)$$

Итерации повторяются столько раз, пока не будет достигнута нужная точность, при этом в уравнении (5) используются значения вектора  $\mathbf{x}$  на предыдущей итерации по отношению к (6). В энергетических расчетах вычисления прекращаются, например, при получении значения  $\Delta \mathbf{x}^{(i)}$ , находящегося в пределах некоторого заданного допуска  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 10^{-10}$ ,  $\varepsilon = 10^{-12}$  и т.д.).

Отметим основное требование и одну из основных трудностей выполнения итерационного процесса – *обратимость* и *обращение* якобиана  $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(i)})$ , соответственно. Методы математического моделирования, используемые для формирования процессов в управляемом силовом оборудовании, можно разделить на две основных категории:

- методы последовательного поиска решений,
- методы одновременного поиска решений.

Последовательный подход выгоден в плане упрощения реализаций алгоритмов Ньютона-Рафсона. Однако его главный недостаток заключается в том, что фазы и амплитуды напряжения на шинах (в узлах) являются единственными качественными переменными состояния ЭЭС, вычисляемыми с помощью этого метода. При этом в конце каждой итерации возникает подзадача переопределения переменных состояния управляемых силовых устройств. В результате таких переопределений итерационный процесс теряет свойство квадратической сходимости.

Используемый в качестве альтернативы *унифицированный подход* объединяет переменные состояния ЭЭС без управляемого силового оборудования и переменные состояния, описывающие данное управляемое силовое оборудование (устройства FACTS) в единое множество состояний. При этом электрическая сеть описывается в единственной системе координат для объединенных итеративных ре-

шений при помощи алгоритма Ньютона-Рафсона (отсутствует переопределение переменных). В силу этого свойства унифицированный метод сохраняет характеристики квадратической сходимости.

Итак, унифицированный подход объединяет переменные состояния электрической сети переменного тока ( $\mathbf{x}_c$ ) и переменные состояний устройств FACTS ( $\mathbf{x}_p$ ) ЭЭС в единую систему уравнений:

$$\begin{cases} f_c(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_p) = 0, \\ f_p(\mathbf{x}_c, \mathbf{x}_p) = 0. \end{cases}$$

Увеличение размеров якобиана  $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^{(i-1)})$  в этом случае по сравнению с вариантом, когда регуляторы энергосистемы отсутствуют, пропорционально количеству и типу таких регуляторов. На рис. 7 в общих чертах показана структура модифицированного якобиана.

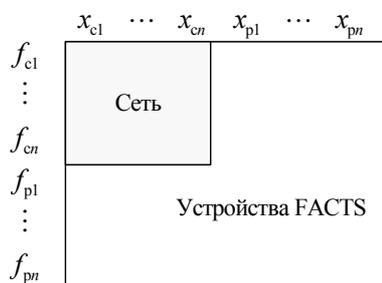


Рис. 7. Структура якобиана ЭЭС с устройствами FACTS

**Пятая глава** посвящена современным методам синтеза регуляторов FACTS; модальному синтезу устройств FACTS с целью демпфирования колебаний мощности; координации работы устройств FACTS на основе методов нечеткой логики; синтезу регуляторов FACTS на основе теории самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией.

Модальный синтез регуляторов с экстраполяцией.

Модальный синтез устройств FACTS с целью демпфирования колебаний мощности В регуляторе демпфирования колебаний мощности – РДКМ (POD – Power Oscillation Damping) входными сигналами являются локальные сигналы в виде активной мощности и напряжения на линии в месте подключения, выходом РДКМ является сигнал компенсации (рис. 8).

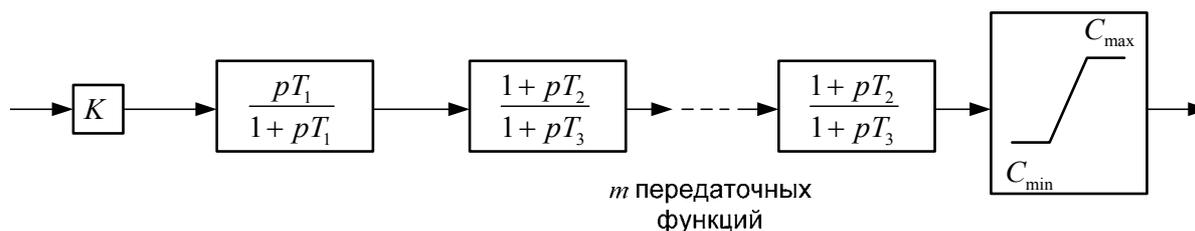


Рис. 8. Структурная схема РДКМ

В общем случае управление демпфированием в ЭЭС осуществляется путем изменения мощности, передаваемой по электропередаче. При подходящей компенсации (управлении) демпфирующий момент пропорционален коэффициенту усиления устройства FACTS. Так как устройства FACTS непосредственно входят в структуру электропередачи, предпочтительным (с технико-экономической точки зрения) является подход с использованием в регуляторах локальных сигналов (т.е. сигналов в точке подключения устройства FACTS). Для нахождения подходящей локальной обратной связи при синтезе РДКМ можно использовать метод вычетов. Этот метод является простым и легко реализуемым на практике.

РДКМ включает в себя передаточные функции блока усиления, изодромного и набора  $m_c$  фильтров, вносящих в зависимости от соотношения  $T_2$ ,  $T_3$  опережение (форсирование) или запаздывание (рис. 8).

В общем случае передаточная функция устройства FACTS имеет вид

$$H(p) = K_p \frac{pT_1}{1 + pT_1} \left( \frac{1 + pT_2}{1 + pT_3} \right)^{m_c} = K_p H_1(p), \quad (7)$$

где  $K_p$  – положительный коэффициент усиления;  $H_1(p)$  – передаточная функция блока стабилизации;  $T_1$  – постоянная времени форсирования;  $T_2$  и  $T_3$  – постоянные времени опережения и запаздывания соответственно.

Будем считать, что передаточная функция РДКМ на основе устройства FACTS (7) имеет следующую реализацию в пространстве состояний

$$p\mathbf{x}(p) = A_H \mathbf{x}(p) + b_H v(p), \quad y(p) = c_H^T \mathbf{x}(p) + d_H v(p). \quad (8)$$

При этом

$$H(p) = c_H^T \Omega_H(p) b_H + d_H, \quad \Omega_H(p) = (pI_n - A_H)^{-1}. \quad (9)$$

В работе показано, что матрица состояний  $\tilde{A}$  замкнутой системы может быть записана в виде

$$\tilde{A} = \left( \begin{array}{c|c} A + b d_H c^T & b c_H^T \\ \hline b_H c^T & A_H \end{array} \right). \quad (10)$$

В результате преобразований малые изменения собственного значения  $\lambda_i$  могут быть аппроксимированы линейной зависимостью

$$\Delta \lambda_i = \mathcal{R}_i \Delta K_p H_1(\lambda_i), \quad (11)$$

где  $\mathcal{R}_i$  – вычет разомкнутого контура, соответствующий собственному значению  $\lambda_i$  матрицы  $A$  (здесь  $\lambda_i$  – характеризует моду, на которую должен влиять демпфирующий регулятор).

Поскольку РДКМ предназначен для улучшения степени демпфирования выбранной  $i$ -й моды колебаний, величина  $\Delta \lambda_i$  должна иметь отрицательное вещественное значение для сдвига вещественной части собственного значения  $\lambda_i$  в сторону отрицательной полуплоскости комплексной плоскости без изменения частоты моды колебаний. На рис. 9 показан процесс сдвига собственного значения  $\lambda_i$  при работе РДКМ.

Для формирования сигнала обратной связи в ЭЭС с устройствами FACTS можно использовать несколько локальных сигналов (активная мощность в линии и напряжение в точке подключения устройства FACTS). Из (11) следует, что при одинаковом коэффициенте усиления обратной связи бóльшее значение вычета приводит к бóльшему изменению соответствующей моды колебаний. Следовательно, наилучшим сигналом обратной связи для управления смещением собственного значения  $\lambda_i$  является сигнал, соответствующий максимальному значению вычета рассматриваемой моды колебаний.

После выбора сигнала обратной связи для управления смещением собственного значения необходимо определить коэффициенты опережения и задержки сигнала регулятора FACTS. Как показано на рис. 9, угол  $\varphi_0$  характеризует компенсационный угол, необходимый для смещения собственного значения. Данный

угол формируется с помощью фильтра, параметры которого  $T_2$  и  $T_3$  могут быть определены на основе следующих уравнений:

$$\varphi_0 = 180^\circ - \arg(\mathcal{R}_i), \quad \alpha_c = \frac{T_3}{T_2} = \frac{1 - \sin(\varphi_0/m_c)}{1 + \sin(\varphi_0/m_c)}, \quad T_2 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha_c}}, \quad T_3 = \alpha_c T_2.$$

Здесь  $\arg(\mathcal{R}_i)$  – фазный угол вычета  $\mathcal{R}_i$ ;  $\omega_i$  – частота исследуемой моды колебаний в рад/с;  $m_c$  – количество изодромных фильтров (как правило  $m_c = 2$ ). Угол компенсации каждого фильтра должен лежать в пределах  $30^\circ - 50^\circ$ .

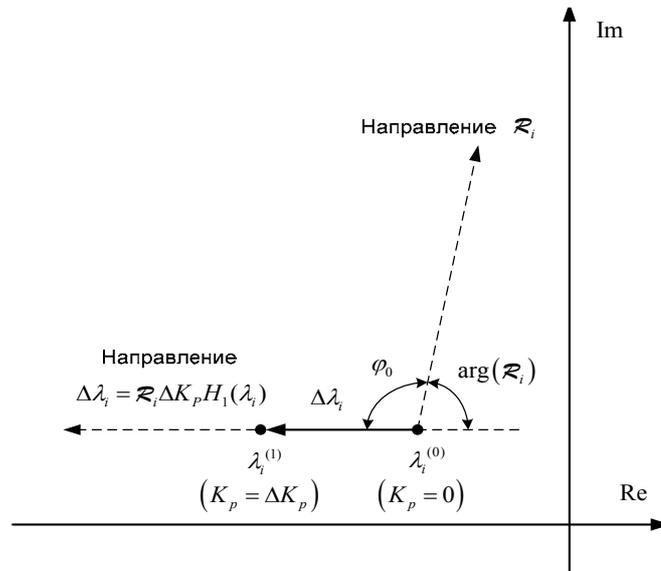


Рис. 9. Сдвиг собственного значения при работе РДКМ

При обеспечении подходящей компенсации эффективность регулятора FACTS пропорциональна его коэффициенту усиления  $K_p$ . Однако в силу многосвязности ЭЭС изменение  $K_p$  приводит к изменению всех мод колебаний. Поэтому для оптимизации процесса демпфирования всех мод наиболее подходящее значение  $K_p$ , как правило, определяется с помощью метода корневого годографа.

С увеличением  $K_p$  (рис. 9) собственное значение смещается из начальной точки  $\lambda_i^{(0)}$  в точку  $\lambda_i^{(1)}$ , которой соответствует новый вычет, требующий в соответствии с (5.5) настройку параметров передаточной функции РДКМ  $H_1(p)$ . Однако, на практике синтез РДКМ может быть осуществлен на основе собственных значений разомкнутого контура, т.к. обычно небольшое увеличение  $K_p$  приводит к незначительным изменениям угла вычета.

Таким образом модальный синтез управления ЭЭС с устройствами FACTS с целью демпфирования колебаний перетоков мощности заключается в использовании преобразования уравнений линейной модели энергосистемы к диагональному виду. На основе этих преобразований строится матрица связности, определяющая взаимосвязь переменных состояния и мод колебаний и характеризующая чувствительность собственных значений к изменениям диагональных элементов матрицы состояний (вычеты передаточной функции). Далее формируются уравнения синтеза передаточной функции устройства FACTS, обеспечивающего требуемую степень демпфирования колебаний перетоков мощности.

### Координация работы устройств FACTS на основе методов нечеткой логики

Для минимизации нежелательного взаимодействия (взаимовлияния) устройств FACTS, используемые для их синтеза методы и процедуры должны учитывать факт такого взаимодействия. Обычно применяемый линейный подход к синтезу регуляторов на основе устройств FACTS учитывает, как правило, одну рабочую точку. При изменении режима ЭЭС необходимо корректировать параметры регулятора. Кроме того, на параметры ЭЭС оказывает влияние работа самих устройств FACTS. Нелинейность моделей ЭЭС, их параметрическая неопределенность и непредсказуемые в аварийных ситуациях изменения их режимов работы существенно затрудняют задачу синтеза координированного (согласованного) управления. Для учета подобных особенностей в условиях, отягощенных наличием информации о системе в основном качественного характера, хорошо подходят методы нечеткой логикой (fuzzy logic). Нечеткая логика является наиболее рациональным подходом к синтезу регуляторов на основе качественной информации о системе. Кроме того, регуляторы с нечеткой логикой не требуют знания полной математической модели исследуемой системы, являются робастными (грубыми) к действию параметрических и структурных возмущений и способны функционировать в широком диапазоне режимов работы системы. Ко всему этому регуляторы с нечеткой логикой, обеспечивающие согласованное управление ЭЭС, могут обладать всеми преимуществами регуляторов демпфирования колебаний мощности, синтезированных на основе модальных методов.

Для конкретизации условий рассмотрим трехмашинную ЭЭС с ЛЭП 220 кВ и двумя последовательными компенсаторами FACTS (рис. 10). Здесь для демпфирования колебаний перетоков мощности используются последовательно включенные преобразователи напряжения ОРПМ (UPFC). Они располагаются на электропередачах между шинами 2 и 3, а также между шинами 6 и 7.

Для управления демпфированием в ОРПМ, как правило, используется только управление напряжением. В качестве входного сигнала демпфера колебаний (ДК) примем поток активной мощности, проходящий через ОРПМ. Выходной сигнал этого регулятора FACTS может быть выражен следующим образом:

$$\underline{U}_{ОРПМ} = U_{ОРПМ} e^{j\alpha} = U_{ОРПМ} e^{j(-90^\circ + \arg(\underline{I}_{ОРПМ}))},$$

где  $\alpha$  – фазный угол последовательного (поперечного) источника напряжения ОРПМ;  $\arg(\underline{I}_{ОРПМ})$  – угол тока, протекающего через ОРПМ;  $\underline{U}_{ОРПМ}$  – сигнал напряжения для управления демпфированием колебаний.

При работе ОРПМ в режиме демпфирования колебаний мощности вектор напряжения  $\underline{U}_{ОРПМ}$  перпендикулярен вектору тока  $\underline{I}_{ОРПМ}$ .

Структурная схема координированного управления демпфированием показана на рис. 11. Как видно, нечеткие ДК являются промежуточными элементами, входы которых  $P_{ОРПМ1}$  и  $P_{ОРПМ2}$  соответствуют активной мощности передаваемой через ОРПМ 1 и 2, а выходами – сигналы управления, подаваемые на ОРПМ.

Работа согласованного регулятора FACTS с нечеткой логикой (нечеткого согласованного регулятора FACTS) включает в себя три последовательно выполняющихся этапа: фазификацию (размытие или fuzzification); нечеткий логический вывод (FIS – fuzzy inference system); дефазификацию (defuzzification).

Блок-схема нечеткого регулятора FACTS приведена на рис. 12. Рассмотрим этапы функционирования нечеткого регулятора FACTS.

Фазификация – это процесс отображения входных переменных в виде нечетких (лингвистических) переменных. Другими словами, фазификация преобразует точные (четкие) числовые значения сигналов в степени принадлежности к нечетким множествам. Нечеткие множества представлены в системе нечеткой логики нечеткими функциями принадлежности (ФП). Функция принадлежности – это кривая, определяющая каким образом каждая точка входного множества отображается в показатель (или степень) принадлежности. Значения степени принадлежности, возвращаемые функцией принадлежности всегда находятся в интервале  $[0, 1]$ . Нулевая степень принадлежности соответствует случаю, когда значение

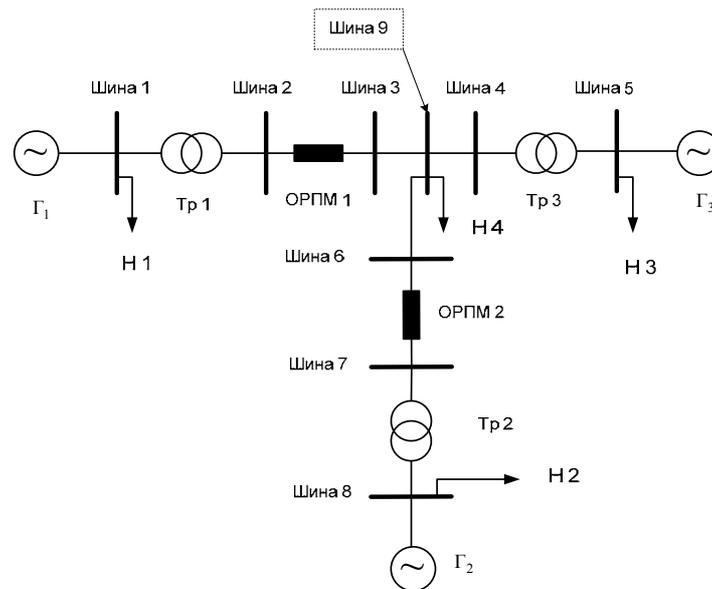


Рис. 10. Модель трехмашинной ЭЭС с ОРПМ

полностью не принадлежит нечеткому множеству. Степень принадлежности, равная единице, соответствует полной принадлежности нечеткому множеству.

Существует несколько типов функций принадлежности. Функцией принадлежности может быть любая кривая, форма которой зависит от простоты, удобства, скорости и эффективности.

Простейшие функции принадлежности формируются с помощью прямых линий. Такие функции характеризуются простотой и достаточностью для точного анализа энергосистем. Воспользуемся в наших целях трапециевидными и треугольными функциями, изображенными на рис. 13. Здесь размытыми лингвистическими переменными являются: **В** (*big* – большие значения), **М** (*medium* – средние значения) и **С** (*small* – малые значения).

Функция принадлежности к множеству малых значений имеет вид

$$\mu_S(x_{in}) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_{in} < K_1 - N_1, \\ \frac{-1x_{in} + K_1}{N_1}, & \text{if } K_1 - N_1 \leq x_{in} \leq K_1, \\ 0, & \text{if } x_{in} > K_1, \end{cases}$$

где  $x_{in}$  – входные переменные нечеткого согласованного регулятора, а именно  $P_{UPFC1}$  и  $P_{UPFC2}$ .

В работе представлены аналогичные выражения для функций принадлежности к множествам больших и средних значений.

Коэффициенты  $K_1$  и  $N_1$  в этих выражениях определяются в зависимости от рабочего диапазона ОРПМ эмпирическим путем (так называемым методом проб и ошибок). Данные коэффициенты можно оптимизировать с помощью адаптивной нейро-нечеткой системы заключений ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System).

После размытия входных сигналов переходят к выбору управления на основе размытых переменных. В системе логического вывода происходит формулировка отображения заданного входного сигнала в выходной сигнал с применением правил нечеткой логики. Такая система включает в себя правила определения выходных решений. Данные правила могут быть получены на основе информации

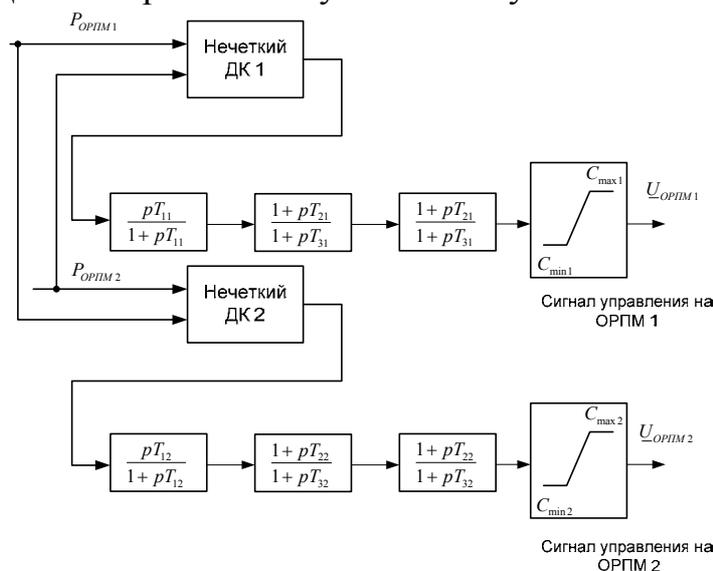


Рис. 11. Координированные ДК с нечеткой логикой

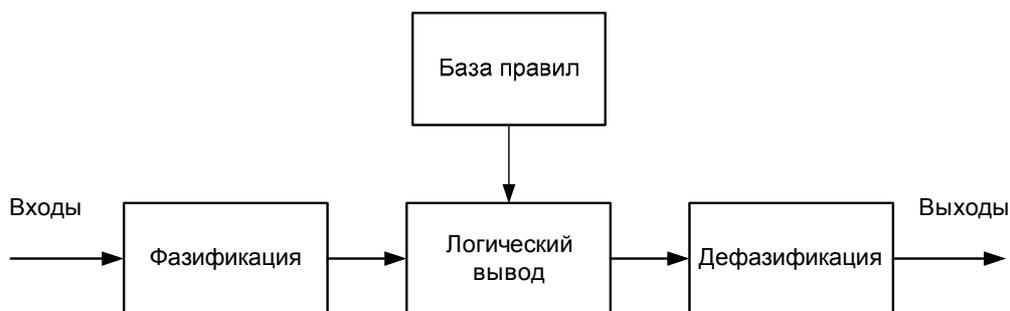


Рис. 12. Блок-схема регулятора FACTS с нечеткой логикой

о системе. Кроме того, система логического вывода назначает степени принадлежности выходным лингвистическим параметрам. Так как каждый входной сигнал размывается на три нечеткие переменные, нечеткий регулятор включает в себя 9 правил. Оба ОРПМ используют одну и ту же систему логического вывода с коммутацией входных сигналов, как показано на рис. 13.

После обработки входных переменных и формирования лингвистических переменных нужно сформировать сигналы управления. Данный процесс называется дефазификацией (переход от нечетких переменных к четким). Дефазификация осуществляется с использованием центроидного метода (метода простого

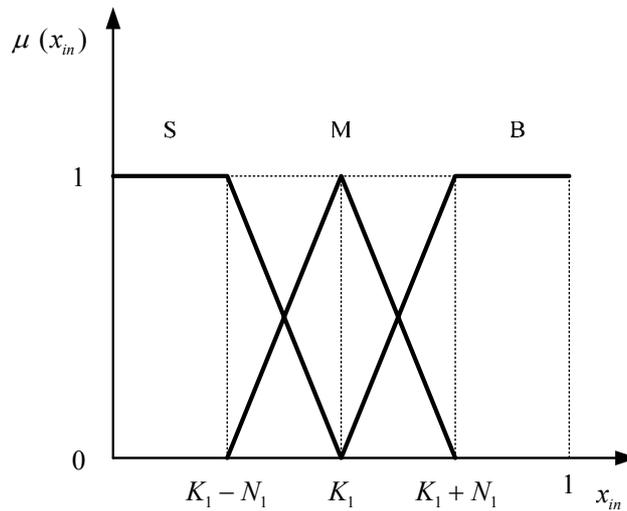


Рис. 13. Функции принадлежности

суммирования), в соответствии с которым выходной сигнал согласованного регулятора с нечеткой логикой  $v_{fuzzy}$  определяется выражением

$$v_{fuzzy} = \left( \sum_{i=1}^9 \mu_i v_i \right) \left( \sum_{i=1}^9 \mu_i \right)^{-1},$$

где  $v_i$  – соответствует значению сигнала управления, для которого степень принадлежности равна единице.

Синтез контроллера FACTS на основе теории самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией Перспективным направлением для электроэнергетики является создание самонастраивающихся, адаптивных, самоорганизующихся систем управления. Рассмотрим возможность решения этой проблемы на основе *самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией* (СОРЭ). По самому принципу действия СОРЭ относится к системам с дискретным временем. СОРЭ оперирует с дискретными моделями объектов управления и использует алгоритмы циклических наблюдателей Калмана. Применение *критерия обобщенной работы* в теории СОРЭ позволяет конструировать оптимальные контроллеры. Контроллеры FACTS, построенные на основе СОРЭ и размещенные в узлах ЭЭС, при соблюдении определенных условий могут обеспечить устойчивую согласованную работу контуров управления, образуя самоорганизующуюся систему. В дальнейшем будем именовать такие контроллеры СОРЭ-FACTS.

В СОРЭ-FACTS время функционирования разбивается на короткие *циклы* длительностью  $t_{\text{ц}}$ . Циклы, в свою очередь, разбиваются на шаги  $\Delta t_{\text{ш}}$ . Каждый цикл  $t_{\text{ц}}$  содержит целое число шагов  $\Delta t_{\text{ш}}$ . Внутри циклов отсчитывается относительное время  $\theta = k\Delta t_{\text{ш}}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Длительность циклов и шагов может варьироваться.

Для сокращения обозначения функций дискретного относительного времени будем указывать для аргумента лишь номер  $k$ :

$$\mathbf{x}(k\Delta t_{\text{ш}}) = \mathbf{x}[k].$$

В качестве модели объекта управления в СОРЭ-FACTS используется рекуррентное соотношение

$$\mathbf{x}[k+1] = \Psi[k]\mathbf{x}[k], \quad (12)$$

где  $\mathbf{x}[k]$  – вектор состояния ЭЭС,

$$\Psi[k] = \begin{pmatrix} 1 & k\Delta t_{\text{ш}} & \frac{1}{2}(k\Delta t_{\text{ш}})^2 & \dots & \frac{1}{(r-1)!}(k\Delta t_{\text{ш}})^{r-1} \\ 0 & 1 & k\Delta t_{\text{ш}} & \dots & \frac{1}{(r-2)!}(k\Delta t_{\text{ш}})^{r-2} \\ 0 & 0 & 1 & \dots & \frac{1}{(r-3)!}(k\Delta t_{\text{ш}})^{r-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

– фундаментальная матрица. Степень  $r$  в (13) заранее неизвестна и определяется в процессе функционирования СОЭ-FACTS.

Математическая модель (12), (13) соответствует полиномиальной тейлоровской аппроксимации, которой эквивалентна в непрерывном случае модель в виде цепочки интеграторов, не охваченных обратными связями (рис. 14). Возможна аппроксимация посредством других полиномов. Однако тейлоровская аппроксимация наиболее органично связана с циклическим обобщенным наблюдателем Калмана, имеющимся в составе СОЭ-FACTS. Этот обобщенный наблюдатель помимо циклического полиномиального тейлоровского фильтра Калмана содержит в себе реляционную базу данных, блок априорного и апостериорного поиска порядка математической модели с наибольшей адекватностью (степень  $r$ ) и исполнительные модули обобщенного наблюдателя, которые также используют тейлоровскую аналитическую аппроксимацию.

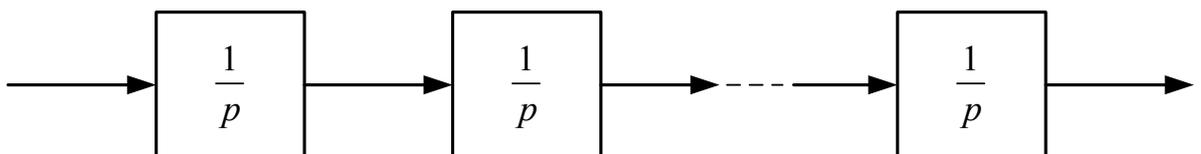


Рис. 14. Модель объекта управления СОЭ-FACTS

Структурная схема алгоритма СОЭ-FACTS представлена на рис. 15. Сигнал измерения  $z$  поступает в модуль 2 дискретного циклического наблюдателя Калмана, в котором для каждого из значений  $r = 2, 3, \dots$  (13) осуществляется:

– одношаговое предсказание (экстраполяция)  $\mathbf{x}$

$$\mathbf{x}[k+1|k] = \Psi[k]\mathbf{x}[k], \quad (14)$$

– одношаговое предсказание ковариационной матрицы ошибок оценивания

$$\Sigma[k+1|k] = \Psi[k]\Sigma[k]\Psi^T[k], \quad (15)$$

– вычисление матричного коэффициента усиления

$$K[k+1] = \frac{1}{\Sigma_{11}[k+1|k] + \sigma_u^2} \begin{pmatrix} \Sigma_{11}[k+1|k] \\ \vdots \\ \Sigma_{1r}[k+1|k] \end{pmatrix}, \quad (16)$$

– коррекция прогноза

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{x}[k+1|k] + K[k+1](z[k+1] - \mathbf{x}_1[k+1|k]), \quad (17)$$

$$\mathbf{x}_1[k+1|k] = \mathbf{c}^T \mathbf{x}[k+1|k],$$

– коррекция ковариационной матрицы ошибок оценивания

$$\Sigma[k+1] = \Sigma[k+1|k] - K[k+1] \begin{bmatrix} \Sigma_{11}[k+1|k] & \cdots & \Sigma_{1r}[k+1|k] \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Решения ковариационных уравнений (15), (16), (18) при  $r=2, 3, \dots$ , как отмечено выше, может табулироваться и храниться в виде унифицированной базы данных в модуле оперативной памяти **1**. Там же может храниться база данных наилучших времен цикла  $t_{\text{ц}}$  и экстраполяции  $t_{\text{эп}}$ , которые в общем случае не совпадают со значением  $t_{\text{ц}}$ .

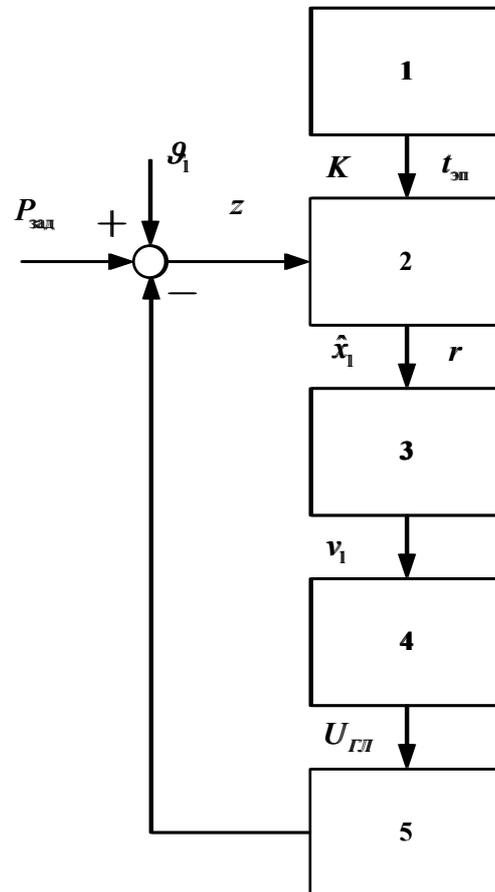


Рис. 15. Структурная СОЭ-FACTS:

**1** – модуль оперативной памяти обобщенного наблюдателя; **2** – модуль циклического наблюдателя Калмана; **3** – исполнительный модуль; **4** – экстраполятор нулевого порядка; **5** – объект управления

В конце каждого цикла оценка отклонения активной мощности от заданного значения экстраполируется в блоке **2** для всех  $r=2, 3, \dots$  по формуле

$$\hat{x}_1[k] = \mathfrak{E}_1[k] + \mathfrak{E}_2[k] t_{\text{оп}} + \dots + \frac{1}{(r-1)!} \mathfrak{E}_r[k] t_{\text{оп}}^{r-1}. \quad (19)$$

Наилучшая аппроксимация (19) контролируемого процесса передается в исполнительный модуль 3, где рассчитывается оптимальное управление на следующий  $(k+1)$ -й шаг реального времени по формуле

$$\begin{aligned} v_1[k+1] = & 2\alpha \left[ (1 + \beta t_{\text{оп}}) \hat{x}_1[k] + \left( 1 + \frac{1}{2} \beta t_{\text{оп}} \right) \hat{x}_1[k] t_{\text{оп}} + \dots \right. \\ & \left. + \frac{1}{(r-1)!} \left( 1 + \frac{1}{r} \beta t_{\text{оп}} \right) \hat{x}_1[k] t_{\text{оп}}^{r-1} \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

В экстраполяторе нулевого порядка 4 реализуется простейшая разностная схема

$$U_{\text{ГЛ}}[k+1] = U_{\text{ГЛ}}[k] + v_1[k+1] \cdot t_{\text{ц}}. \quad (21)$$

Выходной сигнал экстраполятора нулевого порядка соответствует напряжению контроллера FACTS. Он подается на блок 5 (рис. 15), замыкая управление на объект.

Использование алгоритмов циклической фильтрации Калмана и критерия обобщенной работы позволяет достаточно эффективно конструировать на основе СОЭ оптимальные контроллеры FACTS. Теория СОЭ, на наш взгляд, является реальной теорией, где использованы принципы построения систем управления с привлечением элементов искусственного интеллекта (базы моделей, правила принятия решений выбора моделей).

В экстраполяторе нулевого порядка 4 реализуется простейшая разностная схема

$$U_{\text{ГЛ}}[k+1] = U_{\text{ГЛ}}[k] + v_1[k+1] \cdot t_{\text{ц}}. \quad (22)$$

Однако, необходимо обратить внимание на трудности при разработке алгоритмов управления на основе теории СОЭ. Теория СОЭ использует эвристические приемы и до конца не решены некоторые математические вопросы, естественные для других теорий построения систем управления. К таким вопросам относятся доказательства сходимости алгоритмов управления при выборе шага дискретизации, описание множества возмущений, при которых алгоритмы работают с достаточной степенью помехоустойчивости. Исследования показали, что контроллеры, сконструированные на базе СОЭ, недостаточно эффективно работают при интенсивных скачкообразных возмущениях (особенности функционирования циклических фильтров Калмана). Для контроллеров, построенных по принципам СОЭ, достаточно сложно решать задачи, связанные с обеспечением традиционных для линейных систем критериев качества (запасы устойчивости, качества), основанных на работе в частотной области. Методы СОЭ с трудом обобщаются на многомерные системы. При этом обобщении разработчики сталкиваются со всеми сопутствующими проблемами развязывания каналов в системах управления (decouplin problem).

**Шестая глава** связана с анализом возможностей применения устройств FACTS в ЕНЭС России: установкой устройства СТАТКОМ на ПС 330/400 кВ Выборгская ОЭС Северо-Запада; рекомендациями по применению устройств на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра; для обеспечения межсистемной связи между ОЭС Сибири и Востока на основе Забайкальского Преобразовательного Комплекса.

Единая национальная электрическая сеть (ЕНЭС) формирует ЕЭС России, объединит на параллельную работу основные электростанции и узлы нагрузки и обеспечивает передачу электроэнергии между ними, а также связь ЕЭС России с энергосистемами других стран. Актуальными проблемами функционирования («узкими местами») ЕЭС России являются:

- недостаточная пропускная способность межсистемных и системообразующих ЛЭП, ограничивающая возможность удовлетворения требованиям свободного рынка электроэнергии при соблюдении условий надежного энергоснабжения; ограниченные возможности параллельной работы ОЭС Сибири с Европейской частью ЕЭС, а также получения и выдачи мощности из Тюменской энергосистемы; недостаточные пропускные способности ряда сечений между ОЭС Центра и энергосистемами Северного Кавказа, со странами Закавказья; отсутствие возможности осуществления параллельной работы ОЭС Сибири и ОЭС Востока и др.; возможные ограничения в ближайшей перспективе в сечениях ОЭС Центра, ОЭС Средней Волги и ОЭС Урала, в ОЭС Северо-Запада; а также ограничения по выдаче «запертых» мощностей ряда электростанций (Печорской ГРЭС, Кольской АЭС и др.);

- слабая управляемость электрических сетей и недостаточный объем устройств регулирования напряжения и реактивной мощности, как следствие этого повышенные до опасных значений уровни напряжения в сетях в периоды сезонного и суточного снижения нагрузки, пониженные – в режимах максимума нагрузки; часто для нормализации уровней напряжения практикуется вынужденное отключение системообразующих линий электропередачи напряжением 330-750 кВ, что снижает надёжность работы ЕЭС;

- неоптимальное распределение потоков мощности по параллельным линиям электропередачи различного класса напряжения, как следствие этого - недоиспользование существующих электрических сетей, рост потерь в сетях, увеличение затрат на передачу энергии; такая ситуация имеет место в ряде ОЭС, в частности, в сетях 330/220/110 кВ Северо-Запада, в сетях 500/ 220/110 кВ ОЭС Центра (Мосэнерго) и др.

Основные причины проблем, возникающих при передаче энергии на переменном токе, обусловлены влиянием реактивных сопротивлений линий и мощностей потребителей на стабильность значения и фазы напряжения в разных пунктах линии электропередач. В результате могут возникать значительные отклонения напряжения в установившихся, колебания напряжения в переходных процессах, способных приводить к аварийным ситуациям и затруднять (или исключать) управление потоками передаваемой мощности. При этом возрастают потери мощности в электрических цепях, ограничивается пропускная способность линии электропередачи.

В результате анализа «узких мест» в ЕНЭС России был намечен перечень первоочередных объектов, на которых целесообразно применять устройства FACTS:

- устройство СТАТКОМ - ПС 400/330 кВ Выборгская (ОЭС Северо-Запада) (рис. 16), ПС 500 кВ Златоуст, Бекетово, Вятка (ОЭС Урала), ПС 330 кВ Петрозаводск (ОЭС Северо-Запада), ПС 220 кВ Плесецк, Микунь (ОЭС Северо-Запада), Светлая, Таксимо (ОЭС Сибири);

- управляемая установка продольной компенсации (УУПК) - ВЛ 500 кВ Саяно-Шушенская ГЭС – Новокузнецкая, БогАЗ – Камала, БогАЗ – Тайшет (ОЭС Сибири), Бекетово – Бугульма, Воткинская ГЭС – Вятка, Вятка – Звезда (ОЭС Урала);

- фазоповоротное устройство (ФПУ) - ПС 220 кВ Советско-Соснинская (ОЭС Сибири), ПС 220 кВ Бузулук (ОЭС Урала);

- вставка постоянного тока нового типа (ВПТН) - ПС 220 кВ Могоча (ОЭС Сибири).

В работе представлены результаты исследований по оценке технической и экономической эффективности применения устройств FACTS на ряде перечисленных объектов. На основе результатов этих исследований в рамках Приказа РАО «ЕЭС России» от 29.05.06 № 380 «О создании управляемых линий электропередачи и оборудования для них» и Приказа ОАО «РАО ЕЭС России», ОАО «СО ЕЭС» и ОАО «ФСК ЕЭС» № 302/256/216 от 27.06.2008 принято решение об установке пилотного образца СТАТКОМ 50 МВА на ПС 400/330 кВ Выборгская.

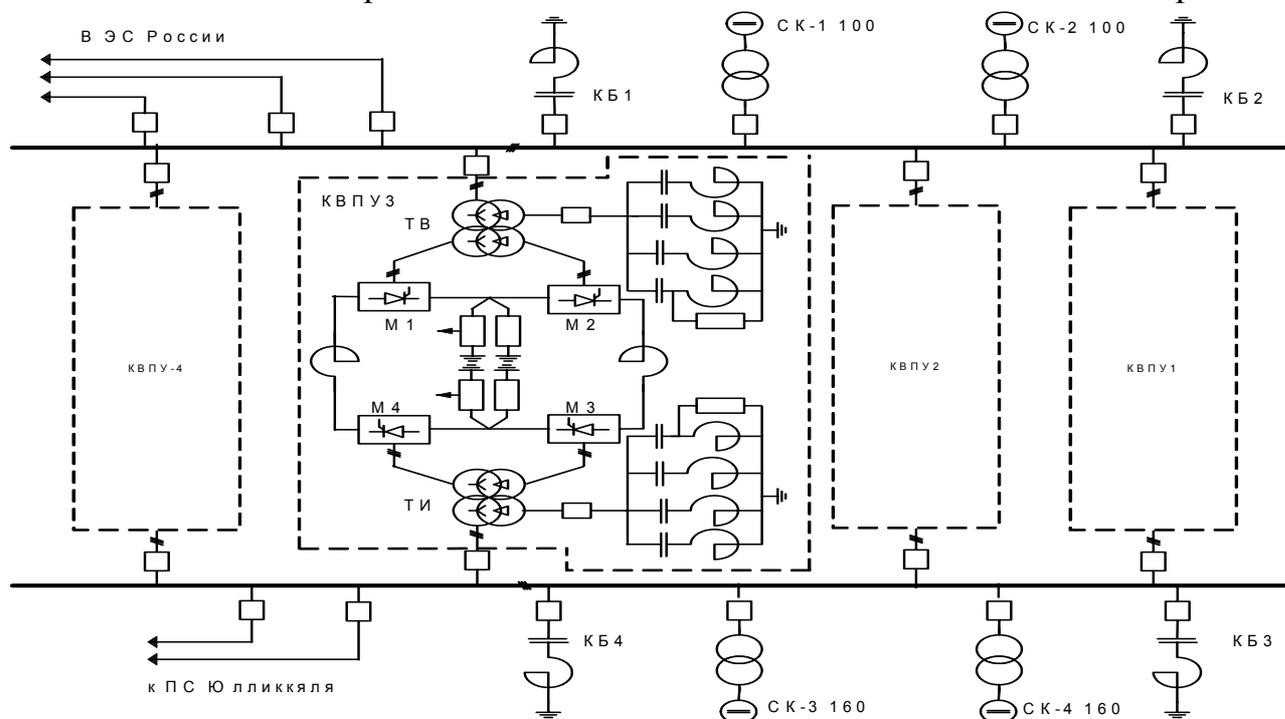


Рис. 16. Схема ВПК на ПС 400/330 кВ Выборгская

В результате реализации этого проекта предполагается решить следующие основные задачи:

- пилотную апробацию установки, являющейся основой для создания класса энергетических устройств нового поколения: вставок и передач постоянного тока, регуляторов потоков мощности, устройств активной фильтрации;

- получения необходимого опыта использования СТАТКОМ как элемента системного управления режимами.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа характеристик основных элементов гибких электропередач переменного тока (FACTS), основой которых является статический источник (генератор и/или потребитель) реактивной мощности (ИРМ), дана оценка возможностей их применения в современной электроэнергетике при решении следующих актуальных задач: регулирования напряжения; симметрирования нагрузки; повышения предела динамической устойчивости; демпфирования различ-

ных колебаний в ЭЭС; ограничения временных перенапряжений; компенсации реактивной мощности на преобразовательных подстанциях электропередач и вставок постоянного тока (ППТ и ВПТ); повышения пропускной способности ЛЭП.

2. На основе сравнительного анализа эффективности различных устройств FACTS в зависимости от решаемых задач (управления потоками мощности, управления напряжением, обеспечения статической или динамической устойчивости) разработаны рекомендации по их использованию в ЭЭС России и приведены примеры их применения.

3. На основе исследований основных характеристик силовых полупроводниковых устройств для мощных преобразователей на полностью управляемых ключах показана возможность их применения для построения высокоскоростных преобразователей электроэнергетического назначения, в том числе, применяемых в устройствах FACTS.

4. Разработаны и исследованы принципы управления активной фильтрацией на основе элементов силовой электроники для решения проблем повышения качества электроэнергии в ЭЭС.

5. На основе анализа и исследований методов и инструментальных средств расчета режимов функционирования ЭЭС для определения эффективности устройств FACTS предложен унифицированный подход, который объединяет переменные состояния ЭЭС без управляемого силового оборудования и переменные состояния, описывающие данное управляемое силовое оборудование (устройства FACTS) в единое множество состояний, обеспечивающий описание исследуемого объекта в единой системе координат и сохранение квадратической сходимости итеративных решений при использовании алгоритма Ньютона-Рафсона.

6. Для решения задачи демпфирования колебаний перетоков мощности предложен модальный подход к синтезу управления ЭЭС с устройствами FACTS, заключающийся в преобразованиях уравнений линейной модели ЭЭС к диагональному виду.

7. Для решения проблемы координированного и адаптивного управления (регулирования) ЭЭС предложено использовать теорию самоорганизующихся оптимальных регуляторов с экстраполяцией (СОРЭ), оперирующих с дискретными моделями объектов управления и использующих алгоритмы циклических наблюдателей Калмана.

8. На основе разработанных методов синтеза устройств FACTS предложена технология многоуровневого управления режимами ЭЭС, которая может быть использована при перспективном планировании электрических сетей для решения различных задач: минимизации нежелательного взаимодействия (взаимовлияния) устройств FACTS, демпфирования колебаний перетоков мощности, координированного и адаптивного управления (регулирования) ЭЭС.

8. Впервые выполненные исследования по обоснованию необходимости установки опытно-промышленных образцов статического синхронного компенсатора СТАТКОМ на ПС 330/400 кВ Выборгская в ОЭС Северо-Запада показали, что установка СТАТКОМ позволит: обеспечить поддержание напряжения на шинах 400 кВ и перетока реактивной мощности в энергосистему Финляндии в требуемых границах; отработать СТАТКОМ для дальнейшего внедрения технологии FACTS; создать на базе СТАТКОМ статические устройства, позволяющие постепенно заменить СК и тем самым облегчить обслуживание оборудования ПС.

9. Исследованы актуальные проблемы функционирования ЭЭС России и транспорта электроэнергии позволили и выявлен ряд «узких мест», которыми, в

частности, являются: ограниченные возможности параллельной работы ОЭС Сибири с Европейской частью ЕЭС, а также получения и выдачи мощности из Тюменской энергосистемы; недостаточные пропускные способности ряда сечений между ОЭС Центра и энергосистемами Северного Кавказа, со странами Закавказья; отсутствие возможности осуществления параллельной работы ОЭС Сибири и ОЭС Востока и др. Показано, что в ближайшей перспективе возможны ограничения в сечениях ОЭС Центра, ОЭС Средней Волги и ОЭС Урала, в ОЭС Северо-Запада; имеются также ограничения по выдаче «запертых» мощностей ряда электростанций (Печорской ГРЭС, Кольской АЭС и др.).

10. Впервые выполненные исследования по обоснованию необходимости установки опытно-промышленных образцов статического синхронного компенсатора СТАТКОМ на ПС 330/400 кВ Выборгская в ОЭС Северо-Запада показали, что установка СТАТКОМ позволит: обеспечить поддержание напряжения на шинах 400 кВ и перетока реактивной мощности в энергосистему Финляндии в требуемых границах; отработать СТАТКОМ для дальнейшего внедрения технологии FACTS; создать на базе СТАТКОМ статические устройства, позволяющие постепенно заменить СК и тем самым облегчить обслуживание оборудования ПС.

11. Разработаны рекомендации по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра, что позволит получить следующий технический эффект: увеличить максимально допустимый переток мощности в межсистемном сечении ОЭС Урала - ОЭС Средней Волги, Центра на 340 МВт в сторону ОЭС Центра и на 520 МВт в сторону ОЭС Урала; перераспределить перетоки мощности по ВЛ 500 и 220 кВ, входящих в межсистемное сечение, уменьшив на 10 % загрузку последних.

12. Впервые выполнены исследования по решению проблем повышения надежности электроснабжения тяговых подстанций участка Транссибирской железной дороги и получения дополнительного системного эффекта от взаиморезервирования энергосистем Восточной Сибири и западного региона ОЭС Востока. В качестве решения проблемы рассмотрена организация межсистемной связи между ОЭС Сибири и Востока на основе вставки несинхронной связи (ВНС) - Забайкальского Преобразовательного Комплекса на подстанции Могоча, входящей в состав Читинской энергосистемы ОЭС Сибири. Рассмотрены различные способы реализации несинхронного объединения двух ОЭС: преобразователи напряжения на базе полностью управляемых вентилях (СТАТКОМ), асинхронизированные электромеханические преобразователи частоты (АС ЭМПЧ), вставки и электропередачи постоянного тока традиционного исполнения (ВПТ и ППТ), электромеханические устройства на базе поворотного трансформатора.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Монографии и книги**

1. *Алферов Н.Г., Розанов Ю.К., Ситников В.Ф.* Расчет систем управления электронными прерывателями и регуляторами. – М.: Изд-во МЭИ, 1993.

### **Научные статьи и доклады, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

2. *Ситников В.Ф.* Деятельность ОАО «Институт Энергосетьпроект» в современных условиях и задачи по развитию проектного комплекса // Электрические станции, 2007. № 5, - с. 3-7.

3. **Ситников В.Ф., Скопинцев В.А.** Оценка надежности главной схемы электрических соединений электростанции // Электрические станции, 2007. № 3, - с. 47-52.

4. **Ситников В.Ф.** Силовая электроника в системах электроснабжения переменного тока // Электричество.-2008, №2, с. - 33-38.

5. **Ситников В.Ф., Рябчицкий М.В., Смирнов М.И.** Выбор силовых электронных ключей для преобразователей в электроэнергетике // Электротехника.- 2007, №4, - с. 35-40.

6. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В.** Координация работы устройств FACTS в магистральных сетях на основе методов нечеткой логики // Электротехника.- 2008, №1, - с. 57-61.

7. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В.** Оптимальные регуляторы на основе устройств FACTS для децентрализованного управления крупными ОЭС // Электротехника.- 2008, №2, - с. 55-61.

8. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Опыт внедрения технологии FACTS за рубежом (часть 1) // Энергохозяйство за рубежом. Приложение к журналу «Электрические станции». 2007. № 2, - с. 27-48.

9. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Опыт внедрения технологии FACTS за рубежом (часть 2) / Энергохозяйство за рубежом. Приложение к журналу «Электрические станции». 2007. № 3, - с. 46-64.

10. **Ситников В.Ф., Чемоданов В.И., Бобылева Н.В., Адамоков Р.К.** Основные направления развития электроэнергетики России в период до 2020 г. // Электрические станции, 2007. № 5, - с. 8-12.

11. **Ситников В.Ф., Воронин В.А., Новиков Н.А., Хвоцинская З.Г., Макаровский С.Н., Тузлукова Е.В., Вишинский Н.И.** Несинхронная связь ОЭС Сибири и Востока на основе Забайкальского преобразовательного комплекса на подстанции Могоча // Электрические станции, 2007. № 5, - с. 46-51.

12. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Автоматическое управление электропередачами постоянного тока на основе самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией // Электротехника, 2007. № 10, - с.15-29.

13. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В.** Модальный синтез регуляторов на основе устройств FACTS // Электротехника, 2007. № 10, - с. 22-29.

14. **Ситников В.Ф., Рябчицкий М.В., Смирнов М.И.** Схемы полупроводниковых преобразователей для систем электропередачи // Электрические станции, 2007. № 4, - с. 40-44.

15. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В.** Оптимальные регуляторы на основе устройств FACTS для децентрализованной модели ОЭС // Вестник МЭИ. – 2009 – Вып. 2, - с. 47-51.

16. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Демпфирование колебаний перетоков мощности с помощью устройств FACTS с управляющими системами на основе модального синтеза // Вестник ИГЭУ. – 2001. – Вып. 3. - с. 43-47.

17. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Оптимальное размещение устройств FACTS в крупных электроэнергетических системах с помощью генетических алгоритмов (ANFIS-технологии) // Вестник ИГЭУ. – 2001 – Вып. 4. – с. 25-29.

18. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Способы автоматического управления электропередачами постоянного тока // Вестник ИГЭУ. – 2002 – Вып. 5. – с. 137-144.

19. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В.** Синтез оптимальных регуляторов для устройств FACTS с целью повышения управляемости и устойчивости ЭЭС // Вестник ИГЭУ. – 2002 – Вып. 5. – с. 131-136.

20. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Скопинцев В.А.** Вероятностно-статистический подход к ресурсной оценке электросетевого оборудования// Вестник ИГЭУ. – 2002 – Вып. 6. – с. 18-23.

21. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Морошкин Ю.В., Коротков А.В.** Синтез управления гибкими линиями электропередачи на основе функций Ляпунова// Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 5. – с. 104-109.

22. **Мисриханов М.Ш., Скопинцев В.А., Ситников В.Ф., Ермилова Л.В., Федоров Ю.Г., Филимонова О.С.** Комплексная оценка надежности главной схемы электрических соединений тепловой электростанции// Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 5. – с. 13-19.

23. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Хвоцинская З.Г., Макаровский С.Н., Тузлукова Е.В., Воронин В.А., Вишинский Н.И.** Гибкая электрическая связь между ОЭС Сибири и ОЭС Востока на основе Забайкальского преобразовательного комплекса на подстанции Могоча// Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 5. – с. 37-42.

24. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Тузлукова Е.В., Хвоцинская З.Г., Злобина М.А., Иващенко Т.Е.** Возможности применения фазопоротных устройств в ЕНЭС России// Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 5. – с. 42-44.

25. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Хвоцинская З.Г.** Проектные разработки по установке устройств СТАТКОМ на ПС Выборгская и Златоуст// Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 5. – с. 55-63.

26. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Хвоцинская З.Г.** Разработка рекомендаций по применению устройств FACTS на межсистемных связях ОЭС Урала, Средней Волги и Центра// Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 6. – с. 32-36.

27. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Силовые полупроводниковые устройства (обзор) // Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 6. – с. 98-117.

28. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Синхронизация преобразователей электропередачи постоянного тока // Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 6. – с. 155-161.

29. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В.** Координация работы устройств FACTS на основе методов нечеткой логики // Вестник ИГЭУ. – 2005 – Вып. 6. – с. 162-165.

#### Публикации в других изданиях

30. **Z. Hvoshinskaya, V. Sitnikov, V. Kochkin, ..., YU. Shakaryan, ..., N. Shulginov** Prospects of FACTS devices application in the power grid of Russia// 42 CIGRE Session, SC B4 «HVDC and power electronics», 2008 (<http://www.cigre.org>).

31. **V. Sitnikov, D. Povh, D. Retzmann, M. Weinhold, E. Teltsch** Solution for large power system interconnections // Conf. CIGRE, St. Petersburg, 2003.

32. **V. Sitnikov, W. Breuer, D. Povh, D. Retzmann, M. Weinhold** Benefits of FACTS for large power systems // Conf. CIGRE, St. Petersburg, 2003.

33. **Ситников В.Ф., Скопинцев В.А.** Экономический подход к управлению надежностью передачи энергии потребителям//Материалы научно-технической конференции 10-15 октября 2005г. «устойчивость и надежность электроэнергетических систем» ОАО «ФСК ЕЭС», Санкт-Петербург - 2005.

34. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Технология модального синтеза устройств FACTS для демпфирования колебаний перетоков мощности // Сборник трудов межд. научно-техн. конференции «Электротехника 2030», ВЭИ, Москва, 2007.

35. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Координация устройств FACTS в магистральных электрических сетях на основе методов нечеткой логики // Сборник трудов межд. научно-техн. конференции «Электротехника 2030», ВЭИ, Москва, 2007.

36. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Оптимизация размещения устройств FACTS в магистральных электрических сетях с помощью генетических алгоритмов (ANFIS-технологии) // Сборник трудов межд. научно-техн. конференции «Электротехника 2030», ВЭИ, Москва, 2007.

37. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Модальный синтез устройств FACTS // Сб. трудов межд. научно-техн. конференции SICPRO, ИПУ РАН, Москва, 2008.

38. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Основы технологии FACTS // Электро-Info, декабрь 2007, с. 61-69.

39. **Ситников В.Ф., Скопинцев В.А., Новиков С.В.** Проблемы инноваций для обеспечения надежности проектируемых объектов электрической сети // Электросетевой сервис, 2008. № 2, - с. 31-39.

40. **Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф.** Управление преобразователями электропередачи постоянного тока на основе самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией // Электро-Info, апрель 2009, с. 62-68.

41. **G. Tsfasman, Z. Hvoshinskaya, N. Novikov, V. Sitnikov, V. Kochkin, L. Mamikonyants, YU. Shakaryan, V. Dyachkov, N. Shulginov** Prospects of FACTS devices application in the power grid of Russia // 42<sup>st</sup> CIGRE Session, SC B4 «HVDC and Power Electronics», 2008 (<http://www.cigre.org>).

42. **Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н., Ситников В.Ф.** Проблемы и задачи по внедрению технологии FACTS в магистральные электрические сети // Материалы международной научно-технической конференции 27-30 мая 2008г. «Консолидация усилий электроэнергетики и электротехники в условиях роста инвестиций. Перспективные технологии и электрооборудование», ВЭИ, Москва – 2008.

43. **Канищев В.Т., Мисриханов М.Ш., Новиков С.В., Ситников В.Ф., Скопинцев В.А.** Инновационное обеспечение качества проектирования, управления эксплуатацией и технического обслуживания электрических сетей // Электро-Info, июнь 2009, с. 34-39.