

На правах рукописи



Назарова Екатерина Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА МЕСТ
УСТАНОВКИ УСТРОЙСТВ ПОПЕРЕЧНОЙ
КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
В СЕТЯХ 330 – 500 кВ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции
и электроэнергетические системы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иваново - 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель: **Савельев Виталий Андреевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шунтов Андрей Вячеславович**
доктор технических наук, профессор
ОАО «Специализированное проектно-конструкторское бюро по ремонту и реконструкции», генеральный директор

Герасимов Сергей Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации»,
заведующий кафедрой «Диспетчерское управление энергосистем»

Ведущая организация Проектный Центр «Севзапэнергосетьпроект»
ОАО «СевЗап НТЦ», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 30 марта 2012 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново ул. Рабфаковская д.34, корп. Б, аудитория 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново ул. Рабфаковская д.34, ученый совет ИГЭУ. Тел: (4932)38-57-12, факс (4932)38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Автореферат разослан

2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Мошкарин Андрей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Вопрос обеспечения устойчивой и надежной работы энергосистем остро стоит как в России, так и за рубежом, о чем свидетельствуют недавние системные аварии, сопровождающиеся нарушением электроснабжения значительного числа потребителей (например: на ПС Чагино в мае 2005 г.; отключение линий на ПС Южная в 2009 г. в г. Санкт-Петербурге вследствие загрязнения внешней изоляции; авария на ПС 330 кВ Восточная в августе 2010 г. в г. Санкт-Петербурге и другие).

Одним из способов обеспечения надежности электроснабжения потребителей является повышение пропускной способности линий электропередачи и наличие резервов мощностей. Условия рыночной экономики предполагают полное использование пропускной способности линий электропередачи, возлагая решение задачи обеспечения устойчивости на вспомогательные силовые устройства, обеспечивающие ее заданные или допустимые параметры. Сегодня предложен ряд путей решения этой проблемы. Однако, с увеличением единичной мощности электрооборудования систем электроснабжения изменяются требования, предъявляемые к настроечным параметрам регулирующих устройств, и, следовательно, возникают новые ограничения на режимы работы линий электропередачи (ЛЭП).

Применительно к сетям 500 – 750 кВ в России в восьмидесятых – девяностых годах 20 века интенсивно развивалось научное направление, связанное с использованием управляемых шунтирующих реакторов (УШР). В настоящее время в сетях различных классов напряжений установлено более 30 УШР. Однако, сегодня отсутствуют обобщенные технические требования, которым должны удовлетворять линейные управляемые реакторы, и, что особенно важно, не разработаны методики технико-экономического обоснования применения управляемых шунтирующих реакторов и не определены критерии выбора мест их установки в энергосистемах. Для выбора мест установки УШР необходимо проводить широкомасштабные исследования на физико-математической модели полной схемы сети с реализацией комплекса установившихся режимов. В связи с этим весьма **актуальна** разработка методики и формирование критерия для выбора мест установки УШР в высоковольтных сетях. Это позволит оценить целесообразность применения управляемого поперечного устройства компенсации реактивной мощности на той или иной подстанции по количественным параметрам системы.

Целью работы является научно-методическое обоснование выбора мест установки УШР в сетях 330 – 500 кВ для повышения их пропускной способности и обеспечения требуемого уровня надежности энергосистем.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих подходов для принятия решения об установке устройства поперечной компенсации в высоковольтных сетях.

2. Разработать критерии и методику выбора мест установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях 330 - 500 кВ на основе оценки параметров системы.

3. Реализовать предложенную методику в действующих энергосистемах, где остро стоит проблема обеспечения повышения пропускной способности линий электропередачи. Для этого необходимо:

- разработать эквивалентные схемы и физико-математические модели энергосистем с УШР в среде объектно – ориентированного программирования с помощью совместного использования среды компьютерного моделирования MATLAB и Dymola;
- исследовать установившиеся режимы работы в трех энергосистемах с установленными УШР - Кольско-Карельского транзита 330 кВ, транзита Север-Юг Казахстана 500 кВ, транзита Ново-Анжерская - Таврическая 500 кВ;
- провести анализ полученных данных в указанных энергосистемах, используя предложенную методику, и сформулировать обобщенный критерий выбора места установки управляемых шунтирующих реакторов применительно к сетям 330 - 500 кВ.

4. Оценить влияние настроечных параметров УШР на показатели статической устойчивости энергосистем.

5. Рассмотреть особенности применения разработанного критерия выбора места установки управляемых шунтирующих реакторов в городской сети.

В качестве **основных методов научных исследований** применялись численные эксперименты физико-математических моделей, как в эквивалентных, так и в полных схемах реальных энергосистем, которые выполнялись в специализированных программах расчета - таких как Dymola, MATLAB и RASTR. В физико-математическом описании моделей применены известные системы дифференциальных уравнений элементов электроэнергетической сети, численное решение которых позволяет выполнить расчеты переходных и установившихся режимов работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана методика, позволяющая выбрать места установки управляемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях, обеспечивающие более высокую стабилизацию напряжения и повышение пропускной способности ЛЭП, а также обеспечивают необходимые показатели устойчивости системы.

2. Предложен критерий выбора места установки УШР в сетях 330 - 500 кВ. Учитывающий, кроме значения мощности короткого замыкания в месте установки УШР, отклонение напряжения при тестовом возмущении и мощность реактора, что в свою очередь позволяет более точно определить места установки управляемого поперечного устройства компенсации и охва-

тить более широкий спектр возможных эксплуатационных режимов в энергосистеме.

3. Разработаны математические модели нескольких реальных энергосистем в среде объектно-ориентированного программирования на языке Modelica, позволяющие создавать более сложные компьютерные модели энергосистем и с использованием отработанного взаимодействия программных оболочек систем моделирования MATLAB и Dymola выполнять оценку запаса статической устойчивости энергосистемы.

Практическая ценность.

1. Применение разработанных физико-математических моделей реальных энергосистем в среде объектно-ориентированного программирования Modelica и предложенного алгоритма совместного использования программных оболочек Dymola и MATLAB при реконструкции и проектировании электрических систем, содержащих протяженные линии электропередачи 330 – 500 кВ, позволяют решать задачи нормализации уровней напряжения, повышения пропускной способности ЛЭП, оценки запаса статической и динамической устойчивости, а также улучшения показателей переходных процессов в аварийных режимах.

2. Методика и критерий выбора мест установки УШР предложены для внедрения в энергосистемах.

Реализация.

Результаты диссертационной работы реализованы в Кольско-Карельском транзите 330 кВ, транзите 500 кВ Север-Юг в Казахстане, транзите 500 кВ Ново-Анжерская - Таврическая в ОЭС Сибири и в энергосистеме 330 кВ «Ленэнерго».

Достоверность результатов и обоснованность научных положений полученных в диссертационной работе, подтверждается исследованиями и экспериментами, выполненными на физико-математических моделях действующих энергосистем.

В диссертационной работе проведены исследования, позволившие разработать методику и сформулировать критериальные условия выбора места установки УШР с целью повышения надежности электроснабжения путем нормализации уровней напряжения и повышения пропускной способности линий электропередачи. Также отработан механизм совместного использования программного обеспечения Dymola и MATLAB для расчета установившихся режимов, оценки запаса статической и динамической устойчивости систем. Указанные исследования **соответствуют** п. 10 «Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов» и п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» **паспорту научной специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».**

Объектом исследования являются протяженные высоковольтные транзитные линии напряжением 330 - 500 кВ.

Предмет исследования – установившиеся режимы работы реальных энергосистем напряжением 330 - 500 кВ, их оптимизация и управление для нормализации уровня напряжения и обеспечения требуемой пропускной способности линий путем выбора мест установки управляемых поперечных устройств компенсации реактивной мощности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора мест установки УШР в высоковольтных сетях.
2. Результаты анализа режимов работы протяженных энергосистем характеризующихся однонаправленным потоком мощности и их физико-математические модели с учетом применения УШР.
3. Критериальные условия выбора мест установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности в протяженных транзитных линиях электропередачи.
4. Алгоритм определения настроечных параметров УШР с целью обеспечения статической устойчивости энергосистем.

Личный вклад автора заключается:

1. В разработке новой методики выбора мест установки УШР в высоковольтных сетях.
2. В разработке физико-математических моделей энергосистем и в определении их параметров.
3. Автором предложены новые критериальные соотношения и сформулирован критерий выбора мест установки УШР в сетях 330 - 500 кВ. При выборе места установки УШР автор предлагает оперировать не только значением мощности трехфазного короткого замыкания системы относительно шин рассматриваемой подстанции, но и величинами изменения напряжения и мощности реактора при переходе к управляемой компенсации, а также мощностью стабилизации эквивалентной системы.
4. Автором проведена апробация и практическая реализация методики выбора мест установки УШР в ряде энергосистем.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на научных семинарах кафедры «Электрические системы и сети» СПбГТУ, на научно-технических конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах» 2005 - 2007 гг. (г. Санкт-Петербург), а также на семинарах международной научно-технической конференции ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (г. Варна, Болгария, 2010 г., г. Стара Лесна, Словакия, 2011 г.), на международной научно-технической конференции «СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ» (XVI «Бенардосовские чтения») 1 - 3 июня 2011г., на международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко (г. Ялта, Украина, 2010г., г. Решма, Ивановская область, 2011г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 печатных работ, по перечню ВАК РФ 2 печатных работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре главы и заключение, изложенные на 121 странице. Содержит 4 приложения, 25 рисунков, 45 таблиц, список литературы из 96 наименований. Общий объем работы 170 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы. Определена цель исследования, сформулированы задачи, решаемые для ее достижения и научная новизна. Выполнен обзор существующих типов управляемых шунтирующих реакторов, отражены их достоинства и недостатки.

В первой главе выполнен анализ проблемы обеспечения режимов высоковольтных протяженных линий электропередачи. Отмечены особенности обеспечения требуемой пропускной способности линий и резервирования мощностей в условиях рыночной экономики.

Показано, что одним из способов эффективного решения указанной проблемы является применение ЛЭП с правильным выбором места расстановки УШР и подбором их настроечных параметров, что обеспечит большую «гибкость» передающей системы и может найти применение в концепции FACTS. Предложена и разработана методика выбора мест установки УШР в высоковольтных сетях, используя количественные связи между определенными режимными параметрами. Предложены новые термины и критерии, такие как:

Технологически обоснованное значение коэффициента управления УШР. За технологически обоснованное принимается значение коэффициента по каналу отклонения напряжения, обеспечивающее стабилизацию напряжения в пределах $(U_{ном}; 1,05U_{ном})$ при изменении нагрузки электропередачи от режима холостого хода до максимальной рабочей величины.

Изменение напряжения δU и изменение мощности реактора δQ_r . Под изменением напряжения δU и изменением мощности реактора δQ_r понимается модуль разности соответствующих величин при изменении коэффициента управления по каналу отклонения напряжения от минимального до технологически обоснованного значения. Минимальное значение коэффициента управления по каналу отклонения напряжения практически соответствует использованию неуправляемых реакторов.

Мощность стабилизации эквивалентной системы $S_{кз3}$ – мощность трехфазного короткого замыкания искусственно присоединенной системы, которая обеспечивает такую же стабилизацию напряжения, как и предполагаемый к установке реактор.

Для разработки критерия выбора места установки за основные критерияльные величины и соотношения, были приняты следующие переменные:

- $\delta U/\delta Q_p$ (о.е.) – критериальное соотношение, которое показывает степень изменения напряжения на подстанциях системы при изменении мощности реактора на 1 о.е.;
- $Q_p/S_{кз}$, (МВА/ГВА) – критериальное соотношение, показывающее, включение какой мощности реактора эквивалентно присоединению искусственной энергосистемы с мощностью короткого замыкания 1ГВА.

Для таких реальных энергосистем, как ЭС Казахстана транзит Север-Юг 500 кВ, ОЭС Северо-Запада Кольско-Карельский транзит 330 кВ, ОЭС Сибири транзит Ново-Анжерская - Таврическая 500 кВ выполнен анализ установившихся режимов и разработаны эквивалентные схемы.

Рассмотрим более подробно особенности ОЭС Северо-Запада. Упрощенная схема Кольско-Карельского транзита 330 кВ представлена на рис. 1.

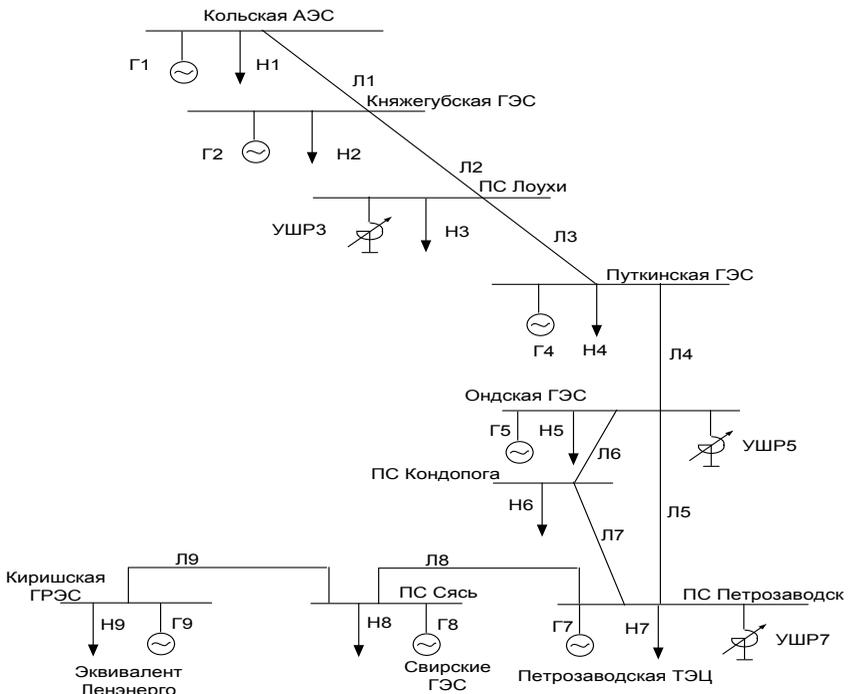


Рис. 1. Упрощенная схема Кольской и Карельской ЭС

Транзитная электропередача 330 кВ, связывающая Кольскую и Карельскую энергосистемы с Ленэнерго, характеризуется стабильным потоком мощности от Кольской АЭС в дефицитную Карельскую энергосистему и далее в систему Ленэнерго. Кольская и Карельская энергосистемы имеют плотный график нагрузки, с числом использования максимума нагрузки около

7000 часов. Основная проблема указанных энергосистем заключается в ограниченном использовании мощности электростанций из-за недостаточной пропускной способности транзита Колэнерго - Карелэнерго - Ленэнерго. Указанную проблему можно решить, установив ряд устройств поперечной компенсации реактивной мощности.

Во второй главе описаны основные математические модели элементов электроэнергетической системы, используемые в диссертации. Отмечены особенности и достоинства применяемых языков программирования MATLAB и Modelica, с использованием программы поддержки Dymola для решения поставленных задач в работе. Отмечены преимущества совместного использования указанных сред программирования и приведен алгоритм их взаимодействия.

Современные крупные энергообъединения моделируются системами алгебро-дифференциальных уравнений высокого порядка. Моделирование электрических сетей набором алгебраических уравнений в среде MATLAB в ряде случаев приводит к вычислительной неустойчивости методов интегрирования. При использовании объектно-ориентированного языка моделирования динамических систем некаузального типа - Modelica удастся избежать этой проблемы. Данный язык поддерживает объектно-ориентированное моделирование физических систем, используя концепции наследования и повторного использования компонентов.

Исходя из отмеченного для создания моделей исследуемых в диссертационной работе энергосистем было принято совместное использование системы MATLAB, как мощного средства анализа, и языка Modelica (совместно с программой поддержки Dymola), сочетающего в себе сильные стороны объектно-ориентированного программирования.

В программах расчета установившихся режимов в работе УШР моделируются следующим образом: задается значение модуля напряжения в точке присоединения УШР, а также минимальное и максимальное значения потребляемой им реактивной мощности, Q_{min} и Q_{max} , соответственно. При этом принимается, что напряжение в точке подключения реактора остается неизменным ($U = const$) при условии, что $Q_{min} < Q < Q_{max}$.

Предполагается, что параметры реактора могут регулироваться по отклонению напряжения ΔU , по отклонению частоты напряжения $\Delta \omega$ и по производной отклонения частоты $p\Delta \omega$ в точке присоединения реактора. Возможно и регулирование реактора по отклонению тока линии. За величину отклонения принимается разность между текущим и заданным значением переменной.

С учетом изложенного линеаризованный закон регулирования имеет вид:

$$(1 + pT_p) \Delta B_p = K_{\Delta U} \Delta U + K_I \Delta I + K_{\Delta \omega} \Delta \omega + K_{p\Delta \omega} p\Delta \omega,$$

где: T_p – постоянная времени реактора, с, ΔB_p – приращение проводимости реактора, о.е., $K_{\Delta U}$, K_I , $K_{\Delta \omega}$, $K_{p\Delta \omega}$ - коэффициенты регулирования по отклоне-

нию напряжения, по отклонению тока линии, по отклонению частоты напряжения и по производной частоты напряжения.

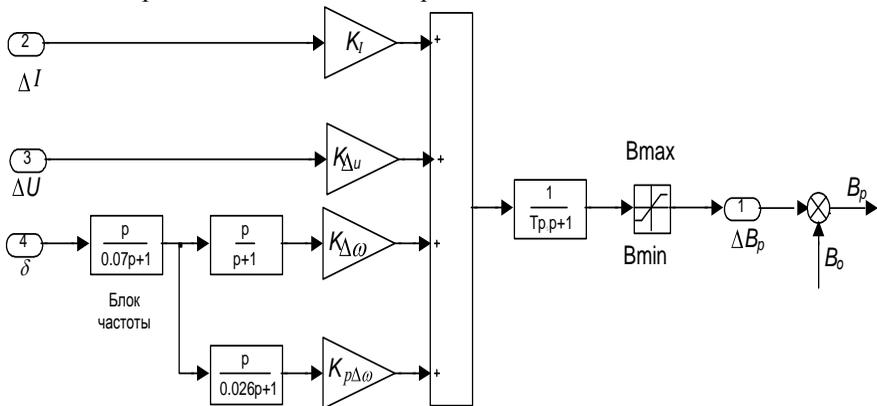


Рис. 2. Структура системы управления УШР

Данному закону регулирования соответствует структура системы управления реактора, представленная на рис. 2. Схема выполнена по аналогии с АРВ-СД синхронных генераторов. На сумматор системы управления приходят сигналы от выбранных каналов регулирования со своими значениями коэффициентов усиления (сигналы по каналам отклонения тока линии, напряжения и частоты, затем они преобразовываются в ряде дифференцирующих и инерционных звеньях). Выходной сигнал сумматора учитывает постоянную времени реактора, и после прохождения блока ограничений определяет величину приращения проводимости реактора. Величина приращения проводимости суммируется с заданным значением проводимости реактора. Таким образом, выходной сигнал сумматора соответствует значению проводимости реактора, полученному с использованием того или иного канала регулирования.

Предложенная математическая модель позволяет моделировать как быстродействующие УШР трансформаторного типа, так и УШР, управляемые подмагничиванием.

Система управления реактора позволяет осуществлять регулирование по четырем каналам. Однако, исследования показали, что в отличие от АРВ генераторов в системе управления реактора наиболее эффективным при регулировании режимов является применение канала по отклонению напряжения.

Для режимного регулирования и по степени влияния на показатели статической устойчивости системы применение каналов по отклонению частоты напряжения и по производной частоты напряжения оказывается неэффективным, так как данные каналы учитывают медленные электромеханические процессы, имеющиеся в системе, и не оказывают заметного влияния на

точность поддержания напряжения в точке подключения УШР.

Таким образом, в исследованиях, проводимых в диссертационной работе, применялась модель УШР с использованием канала по отклонению напряжения.

В третьей главе приведены результаты исследований установившихся режимов реальных транзитных линий электропередачи напряжением 500 кВ и 330 кВ при их различной нагрузке по предложенной в главе 1 методике.

На основе анализа данных установившихся режимов транзита Северо-Юг ЭС Казахстана были определены пограничные значения критериальных величин и сформулирован критерий выбора места установки УШР в сетях 500 кВ. Исследования Кольско-Карельского транзита напряжением 330 кВ позволили уточнить полученные условия.

Для иллюстрации рассмотрим применение предложенной методики выбора типа и места установки компенсирующего устройства на основе анализа установившихся режимов Кольско-Карельского транзита ОЭС Северо-Запада.

1. *Первый этап* методики заключается в разработке для заданной энергосистемы эквивалентной схемы с учетом схемно-режимных параметров исходной сети.

Таким образом, для Кольско-Карельского транзита была разработана эквивалентная схема 330 кВ (см. рис. 1) и создана компьютерная модель энергосистемы позволяющая рассчитать установившиеся режимы.

Численные эксперименты выполнялись для разных значений передаваемой мощности. В качестве основных режимов Кольско-Карельского транзита рассматривались два режима передачи мощности в сторону системы Ленэнерго. В режиме А загрузка линий составляла 20 - 40% $P_{\text{нам}}$. В режиме В передаваемая активная мощность по линиям транзита составляет 85 - 90% $P_{\text{нам}}$. С точки зрения компенсации избыточной реактивной мощности наиболее тяжелым является режим А.

2. *Второй этап* методики заключается в реализации численных экспериментов расчета режимов исследуемой энергосистемы в эквивалентной и полной схеме энергосистемы.

2.1. По результатам расчета в эквивалентной схеме энергосистемы установившихся режимов ставилась задача получить расчетные значения напряжения и мощности реакторов на подстанциях системы при изменении коэффициента управления реактора по каналу отклонения напряжения.

Варьирование K_{oi} осуществлялось в диапазоне от -1 ед.провод./ед.напр. до значения коэффициента управления равного или превышающего технологически обоснованное. Значение $K_{oi} = -1$ ед.провод./ед.напр. соответствует установке неуправляемых реакторов.

Анализ установившихся режимов показал необходимость установки устройств компенсации на ПС Лоухи, на Ондской ГЭС и на Петрозаводской ТЭЦ.

Расчет производился в относительных единицах (о.е.). В качестве базисной мощности принималась величина 1000 МВА, за базисное напряжение значение 330 кВ. При расчете режимов задавался модуль напряжения равный 1 о.е. и начальные значения мощности всех реакторов равные 0,18 о.е.

В таблице 1 отражены результаты расчета установившихся значений напряжения и мощности реакторов на промежуточных подстанциях Кольско-Карельского транзита для режима передачи мощности А. В таблице также приведены полученные значения изменения напряжения δU на подстанциях системы и мощности реакторов δQ_p полученные при переходе к управляемой компенсации. В графической форме полученные результаты представлены на рис. 3.

Таблица 1

Влияние коэффициента регулирования УШР по каналу отклонения напряжения на напряжение промежуточных подстанций и мощность реакторов в режиме А

<i>ед.провод./ ед.напр.</i>	Лоухи		Ондская ГЭС		Петрозаводская ТЭЦ	
	<i>U(о.е.)</i>	<i>Qp(о.е.)</i>	<i>U(о.е.)</i>	<i>Qp(о.е.)</i>	<i>U(о.е.)</i>	<i>Qp(о.е.)</i>
-100	1,002	-0,3494	1,001	-0,2907	0,999	-0,0827
-75	1,002	-0,3462	1,001	-0,2876	0,9987	-0,08595
-50	1,003	-0,3401	1,002	-0,282	0,9982	-0,09192
-25	1,006	-0,3242	1,004	-0,2685	0,997	-0,1061
-10	1,011	-0,291	1,006	-0,2441	0,9951	-0,1307
-5	1,016	-0,2602	1,009	-0,2244	0,9937	-0,1487
-1	1,025	-0,2049	1,013	-0,1932	0,9924	-0,1724
<i>δU (о.е.)/ δQ_p (о.е.)</i>	0,023	0,1445	0,012	0,0975	0,0066	0,0897

Анализ полученных данных показал следующее:

В режиме А, при слабой нагрузке линий электропередачи и при значении коэффициента регулирования $K_{ou} = -1$ ед.провод./ед.напр. реакторы обеспечивают допустимый уровень напряжения в системе на всех подстанциях.

При усилении регулирования мощность реактора на подстанциях Лоухи и Ондская ГЭС увеличивается. Это приводит к незначительному снижению напряжения. При усилении регулирования реактор на подстанции Петрозаводская выводится из работы, что обуславливает незначительное повышение напряжения в допустимом диапазоне $(0,95-1,05)U_{ном}$.

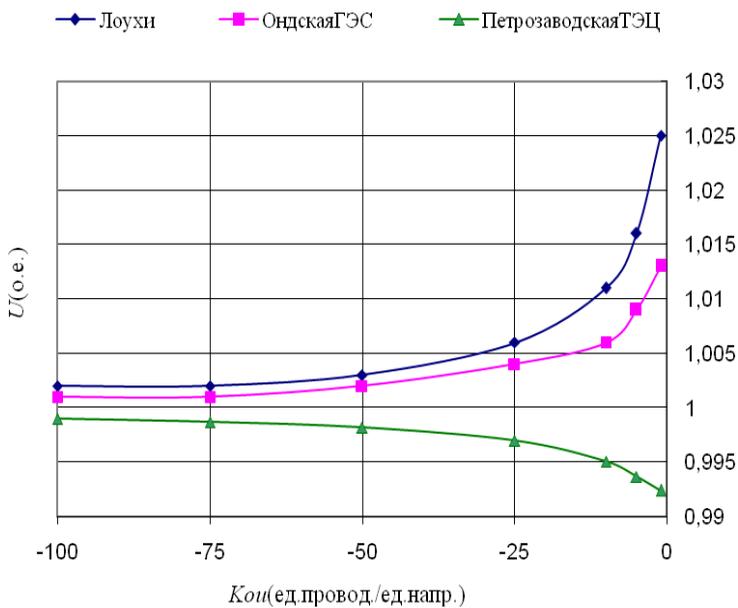
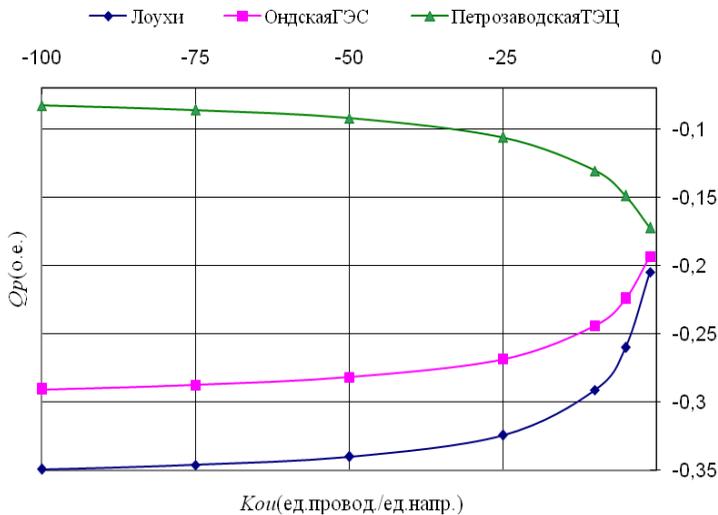


Рис.3. Графики изменения мощности реактора и напряжения на подстанциях Кольско-Карельского транзита в функции коэффициента управления реактора по каналу отклонения напряжения в режиме передачи мощности А

Полученные результаты расчет установившегося режима передачи мощности В представлены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние коэффициента регулирования УШР по каналу отклонения напряжения на напряжение промежуточных подстанций и мощность реакторов в режиме В

<i>Kou</i> , ед.провод./ ед.напр.	Лоухи		Ондская ГЭС		Петрозаводская ТЭЦ	
	<i>U(o.e.)</i>	<i>Qp(o.e.)</i>	<i>U(o.e.)</i>	<i>Qp(o.e.)</i>	<i>U(o.e.)</i>	<i>Qp(o.e.)</i>
-100	1,001	-0,3061	1,001	-0,2602	0,9991	0,09217
-75	1,002	-0,3038	1,001	-0,258	0,9989	-0,09489
-50	1,002	-0,2995	1,001	-0,2541	0,9984	-0,09986
-25	1,004	-0,2881	1,003	-0,2445	0,9973	-0,1119
-10	1,008	-0,2638	1,005	-0,2271	0,9953	-0,1335
-5	1,012	-0,241	1,007	-0,2129	0,994	-0,1499
-1	1,019	-0,1992	1,01	-0,19	0,9924	-0,1724
$\frac{\delta U (o.e.)}{\delta Qp (o.e.)}$	0,018	0,1069	0,009	0,0702	0,0067	0,08023

В режиме В – режиме больших нагрузок, при значении коэффициента регулирования $Kou = -1$ ед.провод./ед.напр. реактор на подстанции Петрозаводская ТЭЦ должен выводиться из работы, при этом уровень напряжения в системе повышается, но не превышает допустимого значения $1,05U_{ном}$.

При усилении регулирования уровень напряжения на подстанциях Лоухи и Ондская ГЭС понижается, но более плавно, чем в режиме А. Это обусловлено увеличением мощности реакторов, которые обеспечивают компенсацию меньшей избыточной емкостной мощности в энергосистеме.

Предельным технологически обоснованным значением коэффициента управления УШР по каналу отклонения напряжения было выбрано значение $Kou = -100$ ед.провод./ед.напр. в обоих исследуемых характерных режимах.

2.2. На следующем этапе необходимо количественно оценить величину отклонения напряжения ΔU , а также изменения напряжения δU и мощности реакторов δQp . Анализ полученных результатов позволит сформулировать *предварительные выводы* относительно типов компенсирующих устройств, установка которых целесообразна на подстанциях системы.

А. Рассмотрим критериальные величины в характерном режиме передачи мощности А.

При значении коэффициента управления реактора по каналу отклонения напряжения $Kou = -1$ ед.провод./ед.напр. отклонение напряжения ΔU не превышает пограничных 5%. Для всех подстанций величина изменения

напряжения δU при переходе от неуправляемой компенсации к управляемой *не превышает* 5% и составляет 2,3%, 1,2% и 0,6%, соответственно. Предварительная оценка величин ΔU и δU позволяет сделать предположение о возможности ограничиться установкой неуправляемых устройств компенсации на данных подстанциях.

Изменение напряжения δU обусловлено следующим изменением мощности реакторов δQ_p 144,5 МВА, 97,5 МВА и 89,7 МВА установленных на подстанциях. Таким образом, для поддержания заданного уровня напряжения, т.е. при усилении регулирования мощность реакторов меняется достаточно сильно.

В. Рассмотрим критериальные величины в характерном режиме передачи мощности В.

При значении коэффициента управления реактора по каналу отклонения напряжения $K_{ou} = -1$ ед.провод./ед.напр. уровень напряжения на этих подстанциях *не превышает* $1,05U_{ном}$, а величина изменения напряжения δU при переходе к управляемой компенсации *не превышает* 5% и составляет 1,8%, 0,9% и 0,67%, соответственно.

Таким образом, рассмотренные критериальные величины не превышают своих пограничных значений, что позволяет сделать предположение о возможности ограничиться установкой шунтирующих реакторов на рассматриваемых подстанциях.

Указанное изменение напряжения обусловлено изменением мощности реакторов δQ_p 106,9 МВА, 70,2 МВА и 80,23 МВА, соответственно, что составляет величину *большую*, чем принятое пограничное значение и является некоторой предпосылкой для установки управляемого устройства компенсации на подстанциях системы.

Подводя итог анализа критериальных величин отклонения ΔU и изменения напряжения δU , а также величины изменения мощности реактора для двух характерных режимов передачи мощности делаем *общий предварительный* вывод о некоторых предпосылках о возможности ограничиться установкой неуправляемых шунтирующих реакторов (ШР) на всех подстанциях.

2.3. На следующем этапе необходимо определить количественную величину критериального соотношения $\delta U/\delta Q_p$ (о.е.) и значение $S_{кз}$ для промежуточных подстанций системы.

В таблице 3 показаны результаты расчетов для подстанций Кольско-Карельского транзита, а также значения мощности короткого замыкания, приведенные к ступени напряжения 500 кВ.

Критериальное соотношение $\delta U/\delta Q_p$ показывает эффективность установки УШР, чем выше это значение, тем больше отклоняется уровень напряжения на подстанции системы при изменении мощности реактора. Для подстанций Кольско-Карельского транзита по полученным значениям $\delta U/\delta Q_p$ можно заключить, что наиболее эффективна установка УШР на под-

станции Лоухи, в то время как регулирование напряжения (т.е. применение УШР) на подстанциях Ондская ГЭС и Петрозаводская ТЭЦ является малоэффективным.

Таблица 3

Расчетные значения параметра $\delta U/\delta Q_p$ и $S_{кз}$ для подстанций Кольско-Карельского транзита, полученные в эквивалентных схемах энергосистем

Подстанция	$\delta U/\delta Q_p$ (о.е.)		$S_{кз}$, МВА	$S_{кз}$, МВА, приведенное к 500кВ
	Режим А	Режим В		
Лоухи	0,159	0,168	4 095	6 205
Ондская ГЭС	0,123	0,128	4 261	6 456
Петрозаводская ТЭЦ	0,0736	0,083	4 796	7 266

Согласно принятым в диссертационной работе критериальным условиям установка УШР необходима на тех подстанциях энергосистемы для которых выполняется следующее условие: значение критериального соотношения $\delta U/\delta Q_p$ в характерных режимах *превышает* значение 0,15 о.е., а значение мощности короткого замыкания для узла энергосистемы 500 кВ *меньше* 6,5 ГВА.

Для подстанций Петрозаводская ТЭЦ и Ондская ГЭС в обоих режимах данное условие не выполняется и поэтому на подстанциях целесообразно применить ШР.

Для подстанций Лоухи в обоих режимах значение критериального соотношения $\delta U/\delta Q_p$ *превышает* граничное 0,15 о.е., в то время как значение мощности короткого замыкания приведенное к 500 кВ составляет величину *меньшую* 6,5 ГВА, т.е. для данной подстанции обозначенное выше условие выполняется. Из этого можно сделать вывод о необходимости установки УШР.

Таким образом, на данном этапе анализ значений критериального соотношения $\delta U/\delta Q_p$ и значений мощности короткого замыкания показал, что на подстанции Лоухи целесообразно установить УШР, а на подстанциях Ондская ГЭС и Петрозаводская ТЭЦ необходимо применение ШР, что *подтверждает* сделанный ранее *предварительный* вывод.

2.4. Далее выполняются численные эксперименты в полной схеме сети. Один из подходов исследования заключается в сопоставлении мощности подключаемого реактора (с помощью которого достигается нормализация напряжения), с мощностью искусственно присоединенной в данном узле эквивалентной энергосистемы, которая характеризуется мощностью короткого замыкания. Технический эффект от включения реактора на промежуточной подстанции сопоставляется с эффектом присоединения эквивалентной системы, которая характеризуется определенной мощностью короткого замыка-

ния, за счет чего осуществляется такая же стабилизация напряжения при изменениях режима работы.

Для реализации указанного подхода необходимо выполнение следующих действий:

- Экспериментально определяется зависимость $\delta U_{\text{э}}/\delta Qp_{\text{э}}$ от $S_{k3\text{э}}$.
- По полученной зависимости $\delta U_{\text{э}}/\delta Qp_{\text{э}}$ от $S_{k3\text{э}}$ для каждой из подстанций энергосистемы, на которых предполагалась установка реактора определяется, значение мощности трехфазного короткого замыкания искусственно присоединенной системы, соответствующее заданному значению $\delta U/\delta Qp$, полученному в эквивалентной схеме энергосистемы.
- Определяются критериальные соотношения в виде отношения мощности реактора при выбранном технологически обоснованном значении коэффициента управления реактора по каналу отклонения напряжения к полному значению $S_{k3\text{э}}$.

Критериальное соотношение $Qp/S_{k3\text{э}}$ показывает, включение реактора какой мощности эквивалентно присоединению искусственной энергосистемы с мощностью стабилизации 1 ГВА.

На основе анализа ранее рассмотренных параметров необходимо определить значение мощности реактора, соответствующее присоединению искусственной энергосистемы с мощностью стабилизации 1 ГВА. Полученное значение покажет, установка УШР какой мощности будет эффективна на рассматриваемой подстанции по условиям регулирования режима.

Данные, полученные в полной схеме сети Кольско-Карельского транзита, сопоставляются с результатами, полученными в эквивалентной схеме для режима А. Ниже приведены результаты, полученные с помощью численного эксперимента в полной схеме транзита, путем присоединения к узлу в котором установлен УШР, искусственной системы с заданной мощностью короткого замыкания. На рис. 4 представлена зависимость критериального соотношения $\delta U_{\text{э}}/\delta Qp_{\text{э}}$ для различных значений мощности стабилизации искусственно присоединенной системы.

По значению критериального соотношения $\delta U/\delta Qp$, полученному в эквивалентной схеме транзита из графиков рис. 4 можно определить значение мощности короткого замыкания искусственно присоединенных энергосистем. В графах таблицы 4 представлены полученные значения критериального соотношения $\delta U/\delta Qp$ для режима А, мощность реактора в именованных единицах при технологически обоснованном значении коэффициента управления УШР, а также значение мощности стабилизации искусственно присоединенной эквивалентной системы. В таблице так же приведено значение критериального соотношения $Qp/S_{k3\text{э}}$, показывающее, реактор какой мощности способен поддерживать напряжение в узле энергосистемы так же, как искусственно присоединенная система с мощностью короткого замыкания 1 ГВА.

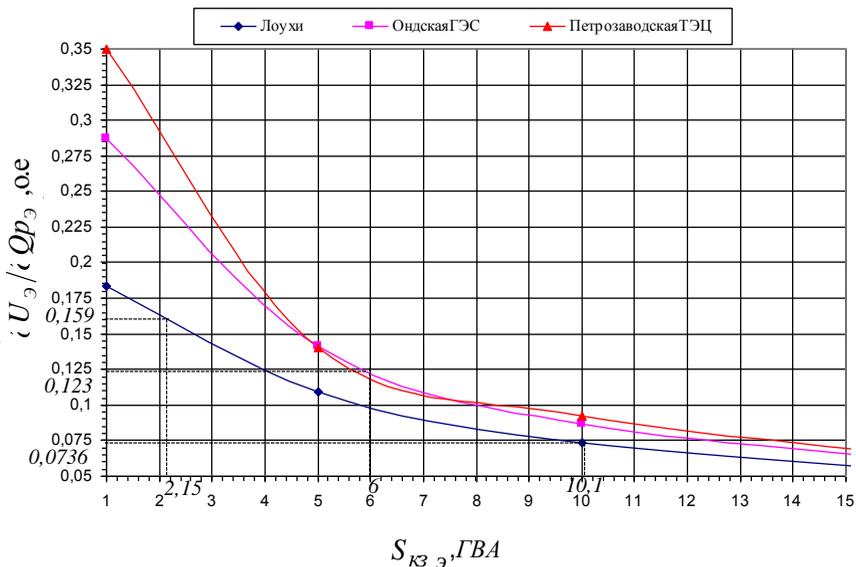


Рис.4. Зависимость $\delta U_{\text{э}}/\delta Q_{p_{\text{э}}}$ для различных значений мощности стабилизации искусственно присоединенной системы для подстанций Кольско-Карельского транзита

Таблица 4

Сводная таблица критериальных параметров Кольско-Карельского транзита ОЭС Северо-Запада

Подстанция	$\delta U/\delta Q_p$ о.е.	Q_p , МВА	$S_{кз_{\text{э}}}$, ГВА	$Q_p/S_{кз_{\text{э}}}$ (МВА/ГВА)	$S_{кз}$, МВА
Лоухи	0,159	349,4	2,15	162,5	4 095
Ондская ГЭС	0,123	290,7	4	73,6	4 261
Петрозаводская ТЭЦ	0,0736	82,7	10	8,27	4 796

Для подстанции Лоухи величина критериального соотношения $Q_p/S_{кз_{\text{э}}}$ составляет 162 МВА/ГВА. Т.е. присоединение искусственной системы с мощностью трехфазного короткого замыкания 1ГВА на этой подстанции эквивалентно включению реактора большой мощности величиной 162 МВА.

Для подстанций Ондская ГЭС и Петрозаводская ТЭЦ величина критериального соотношения $Q_p/S_{кз_{\text{э}}}$ составляет 73,6 и 8,27 МВА/ГВА, т.е. присоединение искусственной системы с мощностью трехфазного короткого

замыкания 1ГВА для этих подстанций эквивалентно включению реактора небольшой мощности, а именно 73,6 и 8,27 МВА.

Таким образом, на подстанции Лоухи необходимо установить УШР, а на подстанции Ондская ГЭС и Петрозаводская ТЭЦ можно ограничиться установкой ШР.

На основе анализа полученных данных в двух энергосистемах сформулирована **совокупность критериальных условий выбора** места установки УШР в энергосистеме с учетом приоритета их выполнения. Установка УШР целесообразна на тех подстанциях энергосистемы, для которых выполняются следующие условия:

1. Отклонение напряжения ΔU *превышает* величину 5% в характерных режимах передачи мощности при значении коэффициента управления реактора равном -1 ед.провод./ед.напр.

2. Изменение напряжения δU при варьировании коэффициента регулирования реактора по каналу отклонения напряжения от -1 ед.провод./ед.напр. до технологически обоснованного значения коэффициента управления УШР *превышает* 5%.

3. Установка УШР необходима на тех промежуточных подстанциях системы, которые характеризуются значением мощности короткого замыкания, приведенной к 500 кВ $S_{кз} \leq 6,5$ ГВА, при этом величина $\delta U/\delta Q_p$, определенная в условиях варьирования коэффициента управления реактора K_{ou} от -1 ед.провод./ед.напр. до технологически обоснованного значения должна удовлетворять соотношению $\delta U/\delta Q_p \geq 0,15$ о.е.

4. Установка УШР необходима на промежуточных подстанциях системы при величине $Q_p(MBA)/S_{кзЭ} (ГВА) \geq 180$ МВА/ГВА для системы 500 кВ, для системы 330 кВ более 75 МВА/ГВА.

При анализе установившихся режимов в энергосистеме, необходимо оценить отклонение напряжения на промежуточной подстанции системы, степень изменения мощности реактора для поддержания напряжения в указанном диапазоне, мощность трехфазного короткого замыкания энергосистемы относительно рассматриваемой промежуточной подстанции и мощность компенсирующего устройства, необходимого для установки. Сравнив полученные значения с критериальными, можно сделать вывод о необходимости установки УШР или ШР в системе. В случае, противоречий, полученных по анализу результатов ЭЭС, необходимо рассмотреть остальные критериальные параметры. При получении неоднозначных результатов, необходимо рассмотреть несколько режимов передачи мощности, выбрав из них самые неблагоприятные с точки зрения компенсации реактивной мощности.

Четвертая глава посвящена оценке влияния коэффициентов регулирования реактора по каналу отклонения напряжения на показатели статической устойчивости системы и выбору настроечных параметров УШР как для регулирования режимов, так и для обеспечения статической устойчивости.

Запас статической устойчивости сети оценивается по положению корней характеристического полинома энергосистемы. Такой подход позволяет выбрать оптимальное значение коэффициента управления УШР. Под *оптимальным* понимается такое значение коэффициента управления УШР, при котором система характеризуется максимальными показателями статической устойчивости.

Рассматриваемый подход к оценке запаса статической устойчивости энергосистемы, показал следующее:

1. Применение УШР с регулированием по каналу отклонения напряжения позволяет выбрать такое значение коэффициента управления, при котором система характеризуется максимальными показателями статической устойчивости.

2. Значение коэффициента регулирования, при котором достигаются максимальные показатели статической устойчивости, как правило, находится в диапазоне - 5 - 40 ед.провод./ед.напр. Такое значение коэффициента регулирования существенно меньше технологически обоснованной величины, выбор которой обусловлен режимными параметрами.

3. Применение УШР положительно влияет на апериодическую устойчивость системы.

В **Приложении 1** представлена полная схема ЭС Казахстана, баланс мощности на 2015 г., а также приведены характеристики режимов работы линий. В приложении представлены параметры эквивалентных схем трех рассмотренных энергосистем.

В **Приложении 2** приведено описание элементов энергосистемы в среде объектно-ориентированного программирования, на базе которых проводились численные эксперименты.

В **Приложении 3** приведены результаты исследований установившихся режимов работы ОЭС Сибири на примере транзита Ново-Анжерская - Таврическая 500 кВ для выбора мест установки УШР по предложенной методике.

Полученные данные хорошо согласуются с типом уже установленных в сети устройств, что указывает на достоверность методики и результатов исследования.

В **Приложении 4** приведены результаты эффективности применения устройств компенсации реактивной мощности в системе «Ленэнерго» с входящими в нее сетями 110 – 750 кВ МЭС «Северо-Запада», МРСК «Северо-Запада» и другими. На основе предложенной в диссертации методики выполнена расстановка устройств компенсации реактивной мощности и доказана возможность ограничиться применением неуправляемых устройств компенсации реактивной мощности в энергосистеме «Ленэнерго».

Показано, что применение управляемых устройств компенсации ре-

активной мощности с оптимальным значением коэффициента управления K_{ou} порядка - 10 - 20 ед.провод./ед.напр. и электромагнитной постоянной времени T_p порядка 4 с может быть оправданно только для небольшого, примерно на 10%, повышения запаса статической устойчивости энергосистемы.

Исследования динамической устойчивости показали, что система обладает большим запасом динамической устойчивости; т.е. предельное время отключения замыкания примерно в 2 раза больше нормируемого значения.

Полученные результаты исследований позволили расширить область применения критерия выбора мест установки УШР для устройств поперечной компенсации реактивной мощности, работающих в емкостном диапазоне.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика определения условий выбора мест установки УШР в сетях 330 - 500 кВ. Доказано, что установка устройств управляемой поперечной компенсации улучшает показатели качества регулируемого напряжения на зажимах ответственных потребителей.

2. Сформулированы критерии выбора мест установки УШР в сетях 330 - 500 кВ. Разработанные критерии выбора места установки УШР и технические требования, предъявляемые к их параметрам, могут использоваться при рассмотрении перспектив развития сетей с применением данных устройств.

3. Разработаны эквивалентные модели реальных энергосистем (Кольско-Карельского транзита 330 кВ, транзита Север-Юг Казахстана 500 кВ, транзита Ново-Анжерская - Таврическая 500 кВ) в среде объектно-ориентированного программирования. Использование алгоритма взаимодействия с программной оболочкой MATLAB может быть применено для решения более широкого спектра научных, эксплуатационных и исследовательских задач: таких как развитие сетей, обеспечения требуемой пропускной способности линий электропередачи, оценки запаса статической и динамической устойчивости, как в рассмотренных, так и в других энергосистемах.

4. Разработаны эквивалентные модели энергосистем и исследовано влияние места установки устройств поперечной компенсации реактивной мощности на показатели статической устойчивости систем и выполнен выбор настроечных параметров УШР.

5. Предложенный критерий выбора мест установки устройств компенсации реактивной мощности опробован в городской сети «Ленэнерго». Выполнен анализ установившихся режимов работы в перспективной схеме ее развития на 2015 г. и даны рекомендации по установке устройств компенсации реактивной мощности. На разработанной модели эквивалентной схемы системы рассчитаны показатели статической устойчивости и исследована динамическая устойчивость. Исследования показали, что рассмотренная схе-

ма сети «Ленэнерго» обладает высокими показателями как статической, так и динамической устойчивости.

Основные научные результаты отражены в следующих публикациях:

В изданиях по перечню ВАК

1. Назарова, Е.С. Анализ эффективности работы управляемых шунтирующих реакторов в сетях различных классов напряжения / Е.С. Назарова, Е.Н. Попков, А.А. Смирнов, В.А. Смирнов // Научно-технические ведомости СПбГПУ №4 – 1(52), 2007. – С.185–191.

2. Назарова, Е.С. О выборе настроечных параметров управляемых шунтирующих реакторов для повышения показателей статической устойчивости городской сети Ленэнерго / Е.С. Назарова, С.В. Смоловик // Технология ЭМС №4 (35). – Санкт-Петербург, 2010. – С.60–63.

В других изданиях

3. Назарова, Е.С. Исследование ударных электромагнитных моментов, воздействующих на валопровод генератора в аварийных режимах / Е.С. Назарова, С.В. Смоловик // XXXII Неделя науки СПбГПУ. Материалы межвузовской научно-технической конференции. 24-29 ноября 2003 г.- Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2004. – С.34.

4. Назарова, Е.С. Повышение эффективности регулирования возбуждения генераторов многоагрегатной автономной системы электроснабжения / Е.С. Назарова, С.В. Смоловик // Материалы VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» 26-27 мая 2004г. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2004. – С. 150.

5. Назарова, Е.С. Современные устройства поперечной компенсации реактивной мощности. XXXIII Неделя науки СПбГПУ / Е.С. Назарова, С.В. Смоловик // Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. 29 ноября - 4 декабря 2004 г. – Часть 2. – Санкт-Петербург: Издательство СПбГПУ, 2005. – С.11–12.

6. Назарова, Е.С. Обеспечение устойчивости узлов нагрузки на основе применения управляемых шунтирующих реакторов/ Е.С. Назарова, А.А. Смирнов, С.В. Смоловик // Электроэнергетическое оборудование: надежность и безопасность Труды СПбГТУ № 501. – СПб: изд-во СПбГПУ, 2006. – С.77–83.

7. Назарова, Е.С. Разработка критерия места установки управляемых шунтирующих реакторов в объединенных энергосистемах / Е.С. Назарова, С.В. Смоловик // Сборник докладов Девятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. – Санкт-Петербург, 2006. – С.138–142.

8. Назарова, Е.С. Оценка возможности применения управляемых шунтирующих реакторов как элементов FACTS / Е.С. Назарова, С.В. Смоловик // Сборник докладов научно-технической конференции «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». – ПЭИПК, Санкт-Петербург, 2010. – №33. – С.194–200.

9. Назарова, Е.С. Влияние устройств поперечной компенсации на статическую устойчивость транзитных электропередач / Е.С. Назарова, А.Н. Беляев, А.А. Смирнов // Электрика – №5– Курск, 2011. – С.3–9.

10. Назарова, Е.С. Задачи и пути повышения энергоэффективности в электроэнергетике / Е.С. Назарова, В.А. Савельев, В.В. Батаева // Методические вопросы исследования больших систем энергетики: Сб. науч. тр. Вып. 61. Математические модели и методы исследования надежности либерализованных систем энергетики – Отв. Ред. Н.И. Воропай. – Иркутск, 2011. – С.282–289.

11. Назарова, Е.С. Исследование колебательных процессов на автономной электростанции с мощными дизель-генераторами / Е.С. Назарова, В.А. Савельев // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения) Сб. науч. тр. Вып.1. «Электроэнергетика». – ИГЭУ, Иваново, 2011. – С.166–169.

12. Nazarova, E. Impact of Magnetically Controlled Shunt Reactors on Transient Stability of Oil-Production Enterprise Isolated Power Systems / E. Nazarova, A. Belyaev, A. Smirnov, A. Artimiev // ELEKTROENERGETIKA - INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM, Slovakia, 21. – 23. 9.2011.