

На правах рукописи

БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И УСТОЙЧИВОСТЬ ТРАНЗИТНЫХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С НОВЫМ
УПРАВЛЯЕМЫМ СИЛОВЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

Специальность: 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор
Смоловик Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Попов Виктор Васильевич

доктор технических наук,
профессор
Зеленохат Николай Иосифович

доктор технических наук,
профессор
Савельев Виталий Андреевич

Ведущая организация: ОАО «Институт Энергосетьпроект»

Защита состоится «30» марта 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд. 325).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Топливо-энергетический комплекс играет огромную роль в жизнеобеспечении населения и является важнейшей структурной составляющей развития производительных сил страны и ее регионов. В энергетической стратегии России на период до 2030 года ставится цель достижения максимальной эффективности использования топливо-энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для роста экономики и повышения качества жизни. Особое внимание должно уделяться ускоренному технологическому обновлению энергетики, обеспечивающему выход ее на современные, отвечающие уровню развитых стран, рубежи энергоэффективности и энергосбережения.

Одной из стратегических целей развития электроэнергетики в рассматриваемой перспективе является повышение эффективности функционирования и обеспечение устойчивого развития электроэнергетики на базе современных технологий. Для выполнения инновационной программы отрасли необходимо осуществить комплекс научных исследований и разработок, среди которых можно выделить такие направления как развитие межсистемных электрических передач с повышенной пропускной способностью и гибких электрических передач переменного тока (FACTS).

Проблемы увеличения пропускной способности системообразующих связей, ограничиваемой по условиям устойчивости и роста потерь в системах, приводящего к снижению эффективности использования мощных линий электропередачи, решаются во всем мире за счет повсеместного внедрения устройств автоматического регулирования возбуждения сильного действия, а также регулируемых устройств компенсации реактивной мощности, таких как статические тиристорные компенсаторы (СТК) и управляемые шунтирующие реакторы (УШР). Сказанное подчеркивает актуальность разработки комплексных методов обоснования необходимости применения устройств управляемой поперечной компенсации (УУПК) для межсистемных транзитных линий электропередачи переменного тока, а также создание новых непротиворечивых законов управления (для АРВ и АРЧМ генераторов, устройств FACTS и т.п.), избирательно воздействующих на опасные для устойчивости составляющие движения, в том числе крутильные колебания валопроводов.

Структурная политика в сфере энергообеспечения исходит из необходимости совершенствования структуры производства, передачи и потребления энергоресурсов и предусматривает, в частности, формирование новых нефтегазодобывающих регионов на севере, юге и востоке России. В то же время, основным нефтедобывающим районом России на рассматриваемую перспективу останется Западная Сибирь, а после 2011 г. масштабная добыча нефти начнется в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в ряде других регионов. Основной приоритет при проектировании систем электроснабжения новых месторождений, во многих случаях автономных, отдается обеспечению бесперебойной, надежной и качественной выработке электроэнергии, а также живучести энергокомплекса при всех возможных вариантах аварийных ситуаций.

Важным направлением в электроэнергетике в современных условиях является развитие распределенной генерации на базе строительства электростанций небольшой мощности, в первую очередь небольших ТЭЦ с парогазовыми, газотурбинными установками и т.п. Указанные обстоятельства требуют решения проблем анализа динамических свойств автономных электроэнергетических систем (ЭЭС) нефтедобывающих комплексов с преобладающей двигательной нагрузкой, включающих в себя дизельные, газотурбинные и газопоршневые первичные двигатели, и построением алгоритмов управления, адекватных этим свойствам с целью обеспечения статической и динамической устойчивости, а также механической прочности валопроводов агрегатов электрических станций.

Использование указанных разработок позволит повысить обоснованность решений, принимаемых при проектировании ЭЭС, синхронных машин, а также устройств противоаварийного и режимного управления.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и совершенствовании методов и алгоритмов для решения научно-технической проблемы анализа и выявления особых динамических свойств транзитных электропередач переменного тока и автономных электроэнергетических систем с преобладающей двигательной нагрузкой, а также обеспечения статической и динамической устойчивости их режимов за счет оптимального управления силовым оборудованием и синтеза новых законов регулирования во всем диапазоне возможных режимов в условиях ограничений на варьируемые параметры системы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие логически связанные задачи

- 1) разработаны методологические основы анализа собственных динамических свойств транзитных электропередач переменного тока и автономных энергосистем с преобладающей двигательной нагрузкой, доведенные до единого инструментария, пригодного к использованию в инженерной практике;
- 2) выполнено теоретическое обоснование эффективности применения устройств управляемой поперечной компенсации в объединенных и автономных энергосистемах;
- 3) усовершенствованы методы анализа динамической устойчивости автономных энергосистем с двигательной нагрузкой на основе совместного применения методов численного интегрирования и энергетических критериев;
- 4) выявлены специфические динамические свойства автономных электроэнергетических систем, связанные с крутильными колебаниями валопроводов газотурбинных агрегатов и колебательными процессами генераторов с дизельным приводом, а также определены требования к совместной работе силового оборудования и средств автоматического регулирования;
- 5) подтверждена целесообразность внедрения в системы управления частотой и активной мощностью агрегатов электрических станций дополнительных каналов регулирования по взаимным углам между ЭДС генераторов с использованием систем глобального позиционирования;

- б) оценены возможности применения методов робастного управления в системах регулирования нового силового оборудования для обеспечения высоких демпферных свойств во всем диапазоне возможных режимов в условиях неопределенности параметров системы и ограничений на варьируемые параметры.

Решение этих задач составляет основное содержание диссертации.

Методы исследования. При построении моделей энергосистем и анализе их динамических свойств использовался аппарат линейной алгебры, в том числе, технологии работы с разреженными матрицами. При выборе параметров автоматических регуляторов использовались специальные функции качества и методы минимизации. Разработка перспективных законов управления построена на аппарате теорий робастного управления, нечеткой логики и нейронных сетей. Для оценки достоверности численного моделирования сопоставлялись результаты компьютерных расчетов при использовании различных программных продуктов, а также использовались литературные данные и результаты натурных испытаний.

Научная новизна. Разработаны методологические основы анализа и выявления особых динамических свойств транзитных электропередач переменного тока и автономных электроэнергетических систем с преобладающей двигательной нагрузкой, а также построения алгоритмов управления, адекватных этим свойствам. К основным научным результатам, которые получены лично автором, включены в диссертацию и представляются к защите, относятся следующие.

1. Методические основы анализа собственных динамических свойств транзитных электропередач и автономных энергосистем, базирующиеся на построении областей D -разбиения для произвольных параметров систем регулирования и конфигурации ЭЭС, а также выработанные на их основе предложения по усовершенствованию традиционных системных стабилизаторов современных АРВ-СД и систем регулирования управляемых шунтирующих реакторов для демпфирования квазиустановившихся и переходных процессов.
2. Принципы определения минимально необходимого состава и технических характеристик УУПК для достижения достаточной управляемости в широком диапазоне режимов работы транзитных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, в том числе с устройствами продольной компенсации (УПК), а также обеспечения требуемых запасов статической и динамической устойчивости автономных энергосистем с преобладающей двигательной нагрузкой.
3. Математический аппарат анализа динамической устойчивости, основанный на совместном применении методов численного интегрирования системы нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений и правила площадей, а также разработанные на его основе мероприятия по увеличению запасов динамической устойчивости в автономных электроэнергетических системах с преобладающей двигательной нагрузкой.
4. Физические основы, механизм возникновения и принципы подавления опасных величин скручивающих моментов крутильных колебаний валов.

проводов газотурбинных первичных двигателей электрических станций, а также колебательных процессов, вызванных неравномерностью вращающего момента дизель-генераторов в условиях работы многоагрегатных систем автономного электроснабжения.

5. Обоснование дальнейшего развития принципов управления частотой и активной мощностью по взаимным параметрам с использованием спутниковых систем единого времени для недопущения развития крупных системных аварий.
6. Методика упрощенного математического моделирования газотурбинных и газопоршневых первичных двигателей, а также предложения по совершенствованию моделей паровых турбин на основе результатов натурных испытаний для исследования статической и динамической устойчивости.
7. Обоснование целесообразности применения современных методов управления (робастных технологий и алгоритмов искусственного интеллекта) в системах регулирования силового оборудования (УПК, УШР, СТК, а также АРВ генераторов) транзитных электропередач переменного тока для обеспечения высоких демпферных свойств во всем диапазоне возможных режимов в условиях неопределенности параметров системы и ограничений на варьируемые параметры.

Практическая ценность и внедрение результатов.

Теоретические исследования и разработанные алгоритмы управления новым силовым оборудованием ЭЭС могут применяться в научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организациях при решении задач перспективного развития энергосистем, проектирования транзитных электропередач высокого и сверхвысокого напряжения, выбора средств режимного и противоаварийного управления автономных энергосистем нефтедобывающих комплексов, разработки мероприятий по улучшению динамических свойств ЭЭС.

Разработанное программное обеспечение с использованием языка моделирования гибридных динамических систем сверхвысокого уровня Modelica (библиотека элементов ЭЭС), программы численных расчетов MATLAB/Simulink и среды аналитических вычислений Maple позволяет решать указанные задачи при высокой степени автоматизации вычислений как в автономном режиме, так и во взаимодействии друг с другом и сторонними математическими приложениями.

Основные результаты исследований использованы при проектировании крупных транзитных электропередач класса 500 кВ и автономных ЭЭС островных территорий и нефтедобывающих комплексов. Среди них можно отметить следующие

- разработка технических требований на применение установок управляемой поперечной компенсации для транзитной электропередачи «Север-Юг» республики Казахстан (ОАО KEGOC, 2004 г.);
- сетевые исследования процессов дизель-генераторов различной мощности в автономных энергосистемах островов Кос, Парос, Хиос (Греция, ОАО «Электросила», 2003-2007 гг.);

- обоснование эффективности применения и разработка технических требований к управляемым шунтирующим реакторам 500 кВ на примере их установки на подстанциях Новоанжерская, Барабинская, Таврическая, (Федеральная сетевая компания РАО ЕЭС / ОАО «Электрические управляемые реакторы», 2004 г.);
- разработка технических требований к оборудованию газотурбинных и газопоршневых электростанций, а также противоаварийной автоматики энергосистем Ванкорского и Тарасовского месторождений (ОАО Роснефть, 2005-2006 гг.);
- обоснование целесообразности установки управляемых шунтирующих реакторов на шинах Игналинской АЭС для компенсации избыточной реактивной мощности (ОАО «Электрические управляемые реакторы», 2006 г.);
- разработка критериев и анализ технико-экономических показателей эффективности работы УШР в сетях различных классов напряжений, выдача рекомендаций по установке УШР в энергосистемах Сибири (Томскэнерго, 2006 г.);
- анализ причин разрушения муфт между генератором и редуктором агрегатов ЭЭС «Вал Гамбурцева» и разработка мероприятий, предотвращающих появление опасных величин скручивающих моментов (ОАО Роснефть, 2008 г.);
- оптимизация режимов работы газопоршневой электростанции НПС нефтепровода Ванкор – Пурпе и исследование пусковых режимов мощных асинхронных электродвигателей (ОАО «Роснефть», 2010 г.).

Теоретические материалы диссертации и разработанное на их основе программное обеспечение нашли применение в учебном процессе. В ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» с его использованием ведется курсовое и дипломное проектирование, выполняются циклы лабораторных работ по курсам «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах», «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах», «Компьютерные технологии в науке и образовании». Помимо этого, программное обеспечение используется аспирантами при выполнении исследований по заданным темам.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата при проведении исследований и доказательстве теоретических положений, результатами компьютерных расчетов, данными натурных испытаний.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах

- международной конференции IEEE Power Engineering Society «Power Tech Conference» (Болонья, 2003 г; Санкт-Петербург, 2005 г.);

- конференции российской северо-западной секции института инженеров электротехники и электроники «SPb-IEEE Con» (Санкт-Петербург, 2003-2005 гг.);
- международном научном симпозиуме «Elektroenergetika» (Стара Лесна, Словакия, 2007 и 2011 гг.);
- четвертой международной конференции «Liberalization and modernization of power systems: Coordinated Monitoring and Control towards Smart Grids» (Иркутск, 2009 г.);
- всероссийской научно-технической конференции «Наука – производство – технологии – экология» (Киров, 2001 г.);
- научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, безопасность» (Екатеринбург, 2001 г.);
- 16th International Power System Conference «PSC2001» (Тегеран, 2001 г.);
- IX международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки» (Санкт-Петербург, 2002 г.);
- 9-ой всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 2003 г.);
- научно-технической конференции «Устойчивость и надежность электроэнергетических систем» (Санкт-Петербург, 2005 г.);
- научно-технического симпозиума EPRI (Пекин, 2005 г.);
- всероссийском научном семинаре «Энергетическая безопасность России» (Санкт-Петербург, 2006 г.);
- научно-практической конференции «Научные исследования и инновационная деятельность» (Санкт-Петербург, 2007-2008 гг.);
- всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 1997-2008 гг.).

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертации опубликованы в 38 печатных работах, в том числе в 15 статьях (из них 13 статей в изданиях, рекомендованных ВАК), 20 научных докладах. Библиографическое описание основных работ приведено в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 230 наименований. Основная часть работы изложена на 252 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков и 17 таблиц.

Автор глубоко признателен д.т.н., проф. Г.А. Евдокунину и д.т.н., проф. С.В. Смоловику за научные консультации и совместную работу по планированию исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации с точки зрения повышения эффективности функционирования и обеспечения устойчивого развития электроэнергетики на базе современных технологий.

Сформулированы задачи исследования, связанные с разработкой методов анализа и выявления особых динамических свойств транзитных электропередач переменного тока и автономных электроэнергетических систем с преобладающей двигательной нагрузкой. Отмечены научная новизна, практическая ценность работы, а также структура представленной работы.

Первая глава посвящена проблемам внедрения нового управляемого силового оборудования электроэнергетических систем.

Рассмотрены вопросы применения устройств управляемой поперечной компенсации на транзитных электропередачах высокого и сверхвысокого напряжения, а также в автономных системах электроснабжения. Показано, что разработка принципов выбора минимально необходимого объема и технических характеристик управляемых устройств компенсации в широком диапазоне режимов транзитных электропередач с учетом находящегося в работе оборудования является важной задачей, обеспечивающей, помимо прочего, существенный экономический эффект.

Проанализированы проблемы обеспечения динамической устойчивости автономных ЭЭС нефтегазовых месторождений. Указано на необходимость разработки комплекса мероприятий для обеспечения надежности энергоснабжения и обеспечения требуемого качества электроэнергии. Выявлена потребность в разработке математического аппарата анализа динамической устойчивости, основанного на совместном применении методов численного интегрирования и правила площадей. Кроме того, отмечено, что в связи со стремлением к снижению массогабаритных показателей конструкция современных генераторов с газотурбинными и газопоршневыми приводами является достаточно напряженной и механические воздействия на элементы агрегата при аварийных воздействиях приближаются к предельным.

Показана целесообразность применения систем глобальных измерений, как элемента концепции активно-адаптивных сетей, в алгоритмах управления энергообъединений, основным принципом функционирования которых является сбор информации в различных точках крупных ЭЭС в режиме реального времени и извлечение данных критичных для работы энергосистемы в целом.

Рассмотрены перспективы робастного принципа управления новым силовым оборудованием в современных условиях, поскольку экономические отношения между субъектами рынка электрической энергии накладывают существенные ограничения на возможности совместной координации настроек регуляторов с целью увеличения пределов передаваемой мощности и улучшения показателей качества переходных процессов. При этом показано, что основной задачей, решаемой теорией робастного управления, является универсализация стратегии регулирования по отношению к изменяющемуся объекту.

Определенное внимание уделено развитию методов математического моделирования электроэнергетических систем для расчетов статической и динамической устойчивости, а также выбора оптимальных законов регулирования силового оборудования. Показана целесообразность совместного использования системы MATLAB, как мощного средства анализа, и языков моделирования динамических систем сверхвысокого уровня, сочетающих сильные стороны объектно-ориентированного программирования, а также визуальное проектирование системы любой степени сложности. Таким образом, решение указанных задач для транзитных электропередач переменного тока и автономных электроэнергетических систем с преобладающей двигательной нагрузкой может быть выполнено на основе однотипного набора методов.

Во второй главе рассмотрены вопросы математического моделирования силовых элементов ЭЭС и их составных частей.

Ускоренное технологическое обновление отрасли, являющееся одной из ключевых задач энергетической стратегии России, подразумевает подробное исследование свойств внедряемых силовых устройств и их систем управления во взаимодействии с уже работающим в ЭЭС оборудованием. Появление новых задач требует разработки ряда моделей элементов электроэнергетических систем или радикального уточнения ранее предложенных в практику расчетов с учетом их возможного применения с новыми алгоритмами управления.

На основе известных опытов натурных испытаний разработаны предложения по совершенствованию полной и упрощенной моделей паровой турбины для расчетов статической и динамической устойчивости ЭЭС, в том числе для оценки эффективности законов управления на основе глобальной системы измерения взаимных углов генераторов, синхронизируемой при помощи спутниковых систем единого времени.

Для аналитических исследований и разработки замкнутых законов управления в энергосистемах автором была предложена структура математической модели турбины в виде нелинейного апериодического звена первого порядка

$$T_s \frac{dP_T}{dt} + P_T = u[t - \tau, x(t - \tau)], \quad (1)$$

где P_T – мощность турбины, u – управляющий сигнал, x – вектор координат системы, $T_s = f(du/dt, u)$ – нелинейная функция, описывающая зависимость постоянной времени модели турбины от скорости изменения и величины сигнала, $\tau = g(du/dt, u)$ – время чистого запаздывания при отработке управляющего сигнала.

В модели турбины (1) учитываются следующие условия

$$\begin{aligned} T_s &= T_{s \text{ откр}} \text{ при } du/dt \geq 0, \quad T_s = T_{s \text{ закр}} \text{ при } du/dt < 0, \\ \tau &= \tau_{\text{откр}} \text{ при } du/dt \geq 0, \quad \tau = \tau_{\text{закр}} \text{ при } du/dt < 0, \\ -\alpha 1 &< dP_T/dt < \alpha 2, \quad -\rho 1 < u < \rho 2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $T_{s \text{ откр}}$, $T_{s \text{ закр}}$, $\tau_{\text{откр}}$, $\tau_{\text{закр}}$, $\alpha 1$, $\alpha 2$, $\rho 1$, $\rho 2$ – заданные положительные числа.

Показано, что в системе уравнений полной модели также должны быть введены различные постоянные времени на открытие и закрытие клапанов, ограничения на изменение и скорость изменения сигнала, а также постоянная задержка выходного сигнала по аналогии с (2).

В отраслях нефтяной и газовой промышленности назрела необходимость перехода к активному энергосбережению, одним из направлений которого является строительство газотурбинных или газопоршневых электростанций, для управления которыми применяются автоматизированные системы управления. Для их синтеза необходимо достаточно полное моделирование поведения реальной установки с учетом ее динамических особенностей.

Разработаны методики математического моделирования газотурбинных и газопоршневых установок для расчетов динамической устойчивости и выбора средств противоаварийной автоматики в автономных энергосистемах (рис. 1).

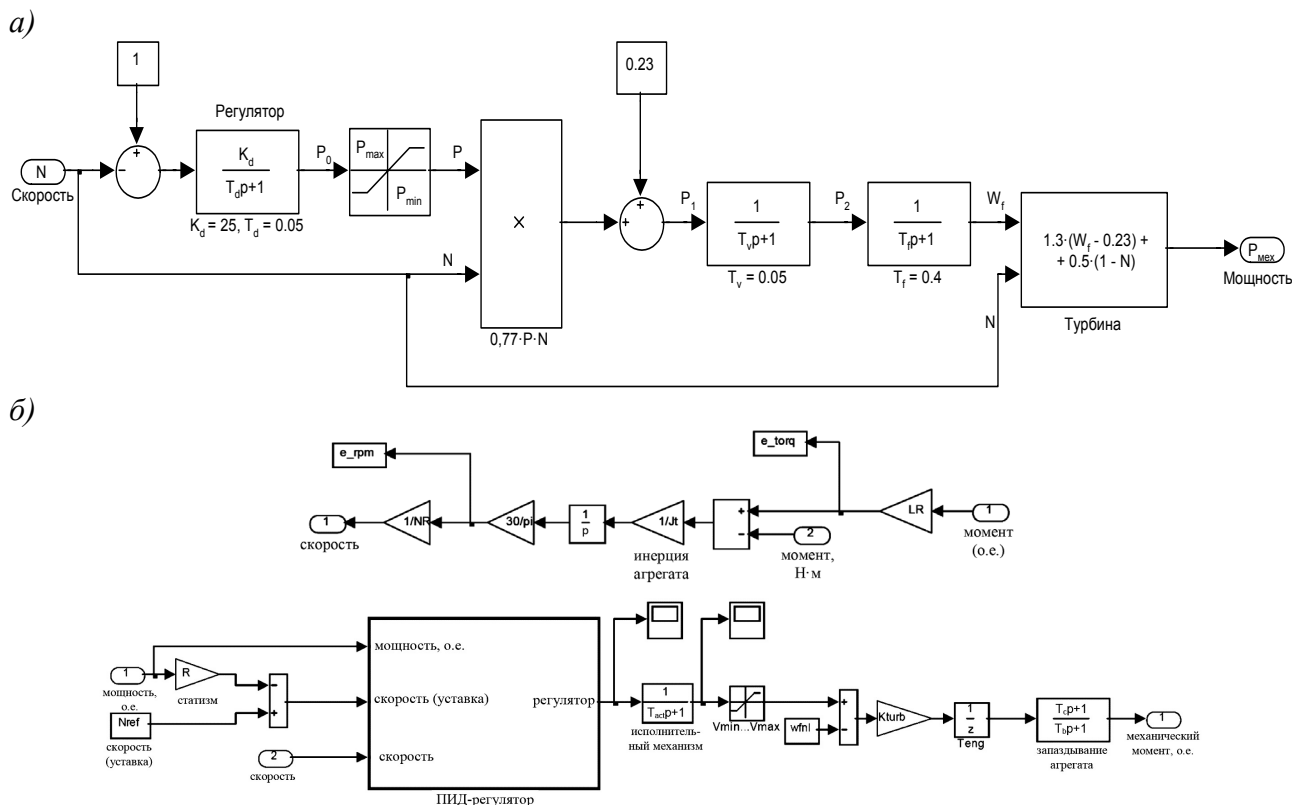


Рис. 1. Математические модели регуляторов частоты вращения газотурбинного (а) и газопоршневого (б) агрегатов

Кроме того, разработана методика математического моделирования устройств управляемой продольной и поперечной компенсации (в том числе, УШР и СТК) с различными законами регулирования для исследования режимов и устойчивости транзитных электропередач переменного тока и произведена реализация всех описанных элементов ЭЭС на языке моделирования динамических систем сверхвысокого уровня Modelica.

Третья глава диссертации посвящена вопросам оптимизации автоматических регуляторов силовых устройств различного вида для демпфирования электромеханических переходных и квазиустановившихся процессов.

Развитие силовой электроники, микропроцессорной техники и широкополосных каналов связи приводит в современных ЭЭС к взаимодействию различных управляемых силовых устройств между собой. Сюда можно отнести устройства продольной (TCSC, UPFC и т.д.) и поперечной (УШР, СТК, СК и т.п.) компенсации, широко внедряемые в настоящее время высокоманевренные газо-

турбинные и газопоршневые агрегаты, а также системы управления по взаимным параметрам. Неудачный выбор законов управления или неточная настройка регуляторов, учитывая большие потенциальные возможности силовой части систем управления, существенным образом влияет на протекание переходных процессов, снижая пределы динамической устойчивости и приводя к непредсказуемому развитию аварий в условиях многократных возмущений.

Для решения задач анализа динамических свойств ЭЭС и оптимизации автором была разработана процедура прямого построения кривых D -разбиения на основе расчета корней характеристического уравнения. Сущность предложенного метода состоит в варьировании двух *любых* параметров исходной модели системы в некотором диапазоне величин, ее численной линеаризации для каждой комбинации значений параметров, расчете собственных значений матрицы переменных состояния и визуализации полученной информации. Такой информацией могут быть кривые не только равного затухания, по аналогии с классическим D -разбиением, но и области равных частот колебаний как многочастотного движения в целом, так отдельных ее составляющих. Данная процедура может быть использована для модели ЭЭС любой степени сложности, при этом необходимо установить только требуемые диапазоны варьирования пары оптимизируемых параметров.

В работе приведены многочисленные примеры обоснования технических характеристик управляемых устройств на основе представленной методологии. В частности, сформулированы условия обеспечения статической устойчивости при установке управляемого шунтирующего реактора на шины крупной электростанции для компенсации реактивной мощности отходящих ЛЭП в условиях совместной работы УШР с АРВ генераторов (рис. 2). Показано, что с точки зрения колебательной устойчивости в условиях многочастотного движения увеличение по модулю коэффициента регулирования по отклонению напряжению K_{0up} и уменьшение постоянной времени системы регулирования УШР T_p приводит к существенному улучшению качества регулирования только одной из составляющих движения (рис. 2, а). Однако влияние указанных параметров на другие составляющие весьма ограничено (рис. 2, б), поэтому дальнейшее улучшение характеристик УШР с точки зрения колебательной устойчивости представляется нецелесообразным.

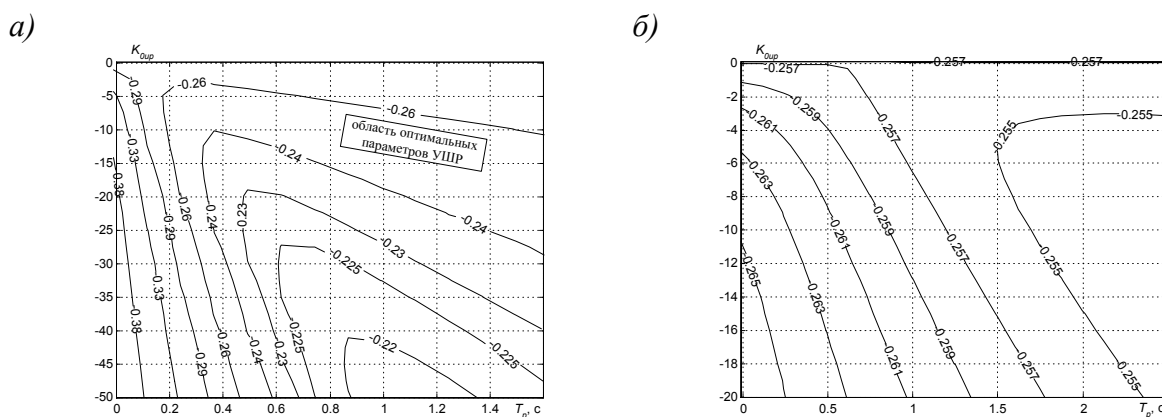


Рис. 2. Кривые равного затухания различных составляющих движения в плоскости быстрогодействия УШР T_p и коэффициента регулирования по отклонению напряжению K_{0up}

Система возбуждения генераторов станции адекватно демпфирует послеаварийные качания и вмешательства дополнительного устройства в этот процесс не требуется, а основной задачей, возлагаемой на управляемый реактор является компенсация избыточной зарядной мощности ЛЭП в нормальных режимах работы системы. На основании выполненных расчетов статической и динамической устойчивости сформулированы необходимые технические требования к системам регулирования УШР.

Рассмотрены условия демпфирования колебаний, вызванных неравномерностью вращающего момента первичного двигателя (совпадением так называемой оборотной частоты дизель-генератора и собственной частоты колебаний ротора) в условиях автономной работы многоагрегатных систем электроснабжения.

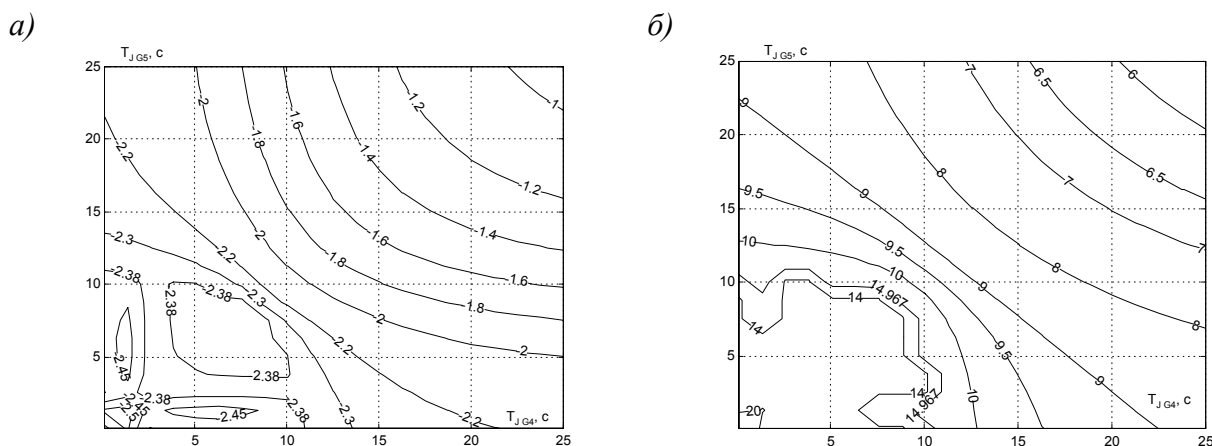


Рис. 3. Влияние механических инерционных постоянных дизель-генераторов на степень затухания (а) и частоту колебаний (б)

К генераторам подобных систем предъявляются достаточно высокие требования по параметрам регулирования в стационарных режимах работы, в первую очередь, по амплитуде колебаний мощности ($\pm 7,5\%$) и напряжения ($0,6\%$) при заданном возмущающем воздействии (6% номинального момента). Сложившаяся практика борьбы с колебаниями мощности предполагает в качестве основного мероприятия повышение величины механической инерционной постоянной (рис. 3).

Однако, аналогичный эффект может быть достигнут при помощи автоматического регулирования возбуждения. В автономной энергосистеме, характеризующейся жесткими электрическими связями, применение дополнительной обратной связи по производной тока статора является наиболее

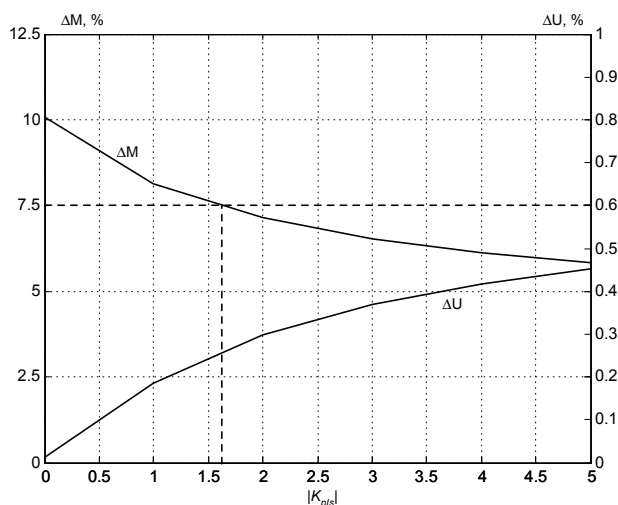


Рис. 4. Влияние обратной связи по производной тока статора АРВ генератора на размах колебаний мощности агрегата и напряжения на шинах станции

простым и эффективным путем подавления колебаний мощности (рис. 4). Показано, что подавление колебаний электромагнитной мощности генератора за счет регулирования возбуждения приводят к увеличению колебаний напряжения на шинах приемной станции. Даны рекомендации по выбору настроек дополнительного системного стабилизатора, обеспечивающие удовлетворение всех ограничений, в том числе в условиях параллельной работы нескольких дизель-генераторов.

Выполнено обоснование целесообразности применения алгоритмов управления частотой и активной мощностью на основе системы глобальных измерений при тяжелых системных авариях. Показано, что в современных условиях развитие технологической базы, с одной стороны, и формирование рынка электроэнергии, с другой, приводят к необходимости совершенствования традиционных систем управления за счет введения в их структуру управляющих сигналов по взаимным параметрам.

В качестве дополнительного управляющего воздействия, подаваемого на вход электрогидравлических преобразователей турбин, автором были предложены сигналы управления по взаимному углу, его первой и второй производным

$$i_{ynp} = k_{\delta} \Delta \delta_{12} + k_s s_{12} + k_{s'} \frac{ds_{12}}{dt}, \quad (3)$$

где $\Delta \delta_{12}$, s_{12} , $\frac{ds_{12}}{dt}$ – отклонение взаимного угла, взаимное скольжение и взаимное ускорение; k_{δ} , k_s , $k_{s'}$ – коэффициенты регулирования.

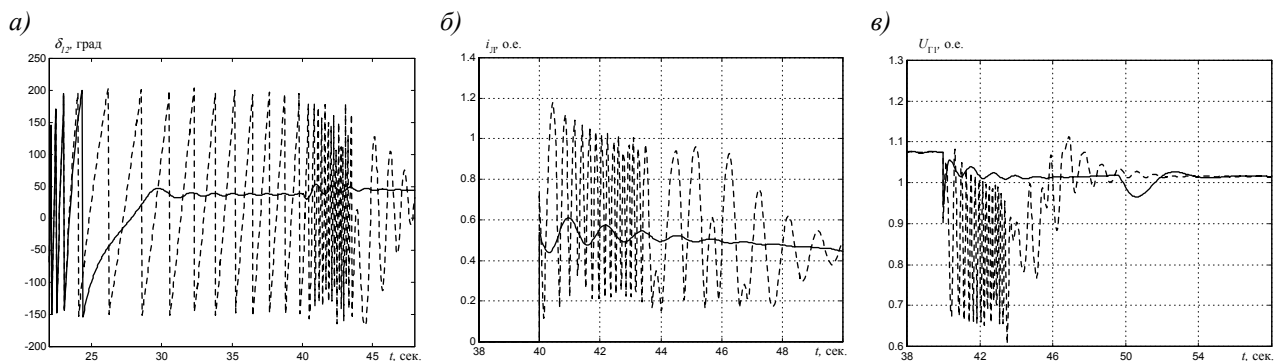


Рис. 5. Влияние непрерывного управления по взаимному углу на переходные процессы в двухмашинной ЭЭС

(а) взаимный угол между генераторами с учетом периодизации; (б) ток в линии связи (ВЛ);
(в) напряжение на шинах станции

Проведены численные исследования предложенного алгоритма для эквивалентных двух- и трехмашинной моделей ЭЭС, показывающие его эффективность при синхронизации частей энергообъединения в условиях многомашинного асинхронного хода, возникающего при тяжелых системных авариях, в частности при отключениях межсистемных ЛЭП. Основным эффектом удержания взаимного угла между роторами генераторов является почти трехкратное снижение уравнительного тока при включении линии связи и связанное с этим уменьшение колебаний напряжения на шинах станций (рис. 5). Применение в системах управления частоты и активной мощности дополнительных стабилизирующих воздействий по взаимным параметрам позволит существенно облег-

чить быструю ресинхронизацию генераторов, что в некоторых случаях приведет к сохранению в работе слабосвязанных частей энергосистемы и не допущению дальнейшего утяжеления оставшихся в работе линий.

Обоснование применения современных алгоритмов *робастного* (грубого или способного работать в изменяющихся схемно-режимных условиях) управления для проектирования регуляторов элементов энергосистем (АРВ генераторов, системы управления УШР, УПК и т.п.) производилось на моделях ЭЭС различной степени сложности. Поскольку оптимальность регулятора достигается для определенного объекта, его изменение в процессе функционирования или переход к другому объекту ведут к потере оптимальности и, возможно, устойчивости. Целесообразность применения робастных систем регулирования (на примере методики линейно-квадратичного Гауссова управления с восстановлением регулятора пониженной размерности или *LQG/LTR*) демонстрируется на примере подавления крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов в электропередаче с УПК и УШР, свойства которой при использовании традиционных регуляторов являются хорошо известными.

Процедура проектирования робастного стабилизатора состоит из двух основных этапов – получения фильтра и расчета регулятора. На первом шаге с помощью фильтра Калмана обеспечивается выделение значений переменных состояния x из выходных сигналов объекта регулирования y , а на втором шаге реализуется линейный регулятор вида $u = -K_c x$, где K_c – матрица оптимальных коэффициентов регулирования, u – вектор входных переменных системы. Представление линеаризованной модели системы в форме пространства состояния в качестве связи между входными u и выходными y переменными имеет следующий вид

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + \Gamma w,$$

$$y = Cx + v,$$

где w и v – средневзвешенные сигналы белого шума с ковариацией (весовыми коэффициентами) Q_f и R_f , соответственно. Здесь Γ – набор параметров LQG/LTR-процедуры для синтеза стабилизатора с желаемыми характеристиками. Уравнения фильтра Калмана для оценки состояния

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + K_f[y - C\hat{x}] + Bu,$$

$$K_f = P_f C^T R_f^{-1},$$

где P_f – решение уравнения Риккати вида

$$P_f A^T + A P_f - P_f C^T R_f^{-1} C P_f + \Gamma Q_f \Gamma^T = 0.$$

Этап проектирования регулятора представляет собой решение задачи оптимального управления, состоящей в получении матрицы коэффициентов для всех переменных состояния K_c . Критерием качества работы является минимум интеграла

$$J = \int_0^\infty [q y^T Q_c y + u^T R_c u] dt,$$

где Q_c и R_c – положительно определенные матрицы, также являющиеся весовыми коэффициентами; $q > 0$ – скалярный параметр расчета (параметр робастности).

Оптимальный закон управления

$$u = -K_c x$$

$$K_c = R_c^{-1} B^T P_c$$

где P_c определяется из другого алгебраического уравнения Риккати

$$A^T P_c + P_c A - P_c B R_c^{-1} B^T P_c + q C^T Q_c C = 0.$$

Конфигурация динамического робастного регулятора $K(p)$ полученная с помощью представленной методики показана на рис. 6.

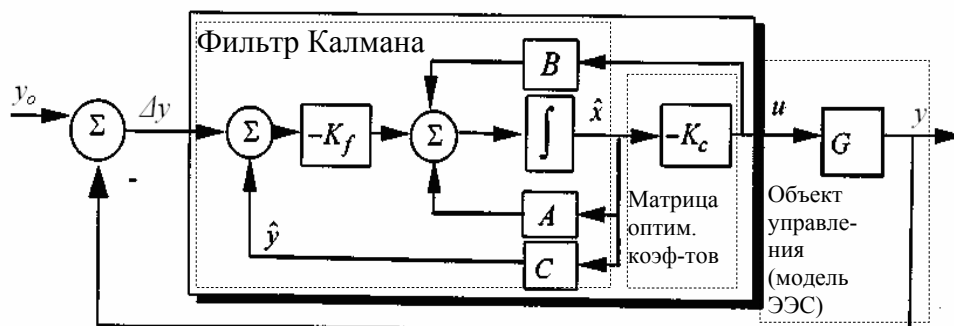


Рис. 6. Структура LQG/LTR-стабилизатора

y_0 – уставка регулируемой переменной; Δy – отклонение регулируемой переменной от уставки; $\hat{y}$ – оценка значения выходной переменной в фильтре Калмана; $\hat{x}$ – оценка значения переменной состояния в фильтре Калмана; K_f – матрица коэффициентов фильтра Калмана; G – передаточная функция линеаризованной модели системы

Основной недостаток современных методов теории управления, таких как LQG или H_∞ , состоит в том, что дифференциальный порядок получаемых регуляторов должен быть, по крайней мере, равен порядку рассматриваемого объекта управления. В этой связи существенное развитие получили методы его понижения с целью упрощения процедуры проектирования и, таким образом, уменьшения размерности окончательного варианта регулятора. Сокращенная модель объекта должна достаточно хорошо аппроксимировать поведение полной модели. Таким образом, математическая формулировка задачи состоит в получении приближения низкого порядка $G_r(p)$ для заданной линейной системы высокого порядка $G(p)$, такой, что бесконечная норма их разности $\|G - G_r\|_\infty$ являлась бы минимальной.

Для этого в работе применяется известная процедура сбалансированного понижения порядка модели Шура. Определим целевую функцию указанной процедуры следующим образом. Необходимо рассчитать модель пониженного порядка

$$G_r(p) = C_r(pI - A_r)^{-1} B_r,$$

из полной модели n -го порядка

$$G(p) = C(pI - A)^{-1} B,$$

так чтобы

$$\|G - G_r\|_{\infty} \leq 2 \sum_{i=k+1}^n \sigma_i$$

где σ_i – сингулярные значения $G(j\omega)$, то есть, квадратные корни собственных значений показателей управляемости и наблюдаемости

$$\sigma_i := \sqrt{\lambda_i(PQ)},$$

где $\lambda_i(PQ)$ – i -ое наибольшее собственное значение PQ , а P и Q – решения следующих уравнений Ляпунова

$$PA^T + AP + BB^T = 0 \text{ (показатель управляемости),}$$

$$QA + A^TQ + C^TC = 0 \text{ (показатель наблюдаемости).}$$

Отметим, что A, B, C – матрицы уравнений состояния полной модели $G(p)$, в то время как A_r, B_r, C_r – аналогичные матрицы системы пониженного порядка $G_r(p)$.

Разработанный LQG -регулятор с передаточной функцией (4) имеет дифференциальный порядок, равный порядку объекта управления

$$K_{LQG} = \begin{bmatrix} A - K_c B - K_f C & K_f \\ -K_c & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

С помощью процедуры сбалансированного понижения порядка модели Шура указанное значение может быть существенно уменьшено, причем основным критерием является сохранение на прежнем уровне показателей демпфирования составляющих колебаний, полученных для полной модели ЭЭС. В работе показано, что двукратное понижение порядка системы регулирования практически не вызывает ухудшения характеристик системы. Таким образом, модель регулятора пониженного порядка является оптимальным компромиссом с точки зрения значения погрешности между исходной и новой моделью. Более того, робастный системный стабилизатор пониженного порядка, полученный при конкретных схемно-режимных условиях может сохранять свои качественные показатели даже при изменении параметров электроэнергетической системы.

В четвертой главе диссертации выполнено обоснование необходимости применения устройств управляемой поперечной компенсации на транзитных электропередачах 500 кВ.

Установка шунтирующих реакторов традиционной конструкции (ШР), решая поставленные перед ними задачи, оказывает неблагоприятное влияние на пропускную способность линий электропередачи, а также приводит к повышенным потерям активной мощности в сетях. Для ведения режима суточного графика загрузки транзитной электропередачи возникает необходимость в регулировании уровней напряжений путем коммутации части шунтирующих реакторов (например, при строительстве второй цепи ВЛ). Коммутации реакторов, как известно, вызывают значительные изменения напряжения. С этой точки зрения наиболее «тяжелым» местом являются подстанции (ПС), значительно удаленные от генерирующих источников, поскольку на шинах этих ПС при ступенчатом регулировании числа включенных ШР имеют место скачки напряжения 15-20 кВ. Для стабилизации уровней напряжений возникает необходимость применения управляемых устройств. При этом основная задача заключается в разработке

общих принципов определения минимально необходимого состава и технических характеристик УУПК для достижения достаточной управляемости в широком диапазоне режимов работы транзитных линий электропередачи (рис. 7).

Для оценки требуемого объема устройств поперечной компенсации должны быть выполнены расчеты зависимостей мощностей компенсирующих устройств (ШР и УШР) и их количества, установленных на подстанциях 500 кВ рассматриваемого транзита, от величины передаваемой мощности при заданном напряжении на этих подстанциях.

Необходимость установки устройств управляемой поперечной компенсации реактивной мощности на той или иной ПС транзита тем выше, чем больше диапазон изменения требуемой реактивной мощности при варьировании режима работы протяженной электропередачи (рис. 8). На тех же ПС, где величина потребляемой реактивной мощности УШР меняется весьма незначительно, достаточно использование необходимого количества ШР традиционной конструкции.

В диспетчерском управлении чаще всего принимается, что коммутация неуправляемых реакторов производится «по мощности», передаваемой по транзиту (то есть, отключение/включение ШР происходит при достижении конкретного, заранее заданного значения передаваемой мощности), не принимая во внимание возможные изменения напряжений в реальных ситуациях по отношению к чисто расчетным случаям. При поиске оптимальной стратегии вместо управления «по мощности» следует рассматривать управление «по напряжению».

Наиболее целесообразной призна на следующая стратегия коммутации неуправляемых реакторов (рис. 9). Во всем диапазоне рабочих режимов, когда коммутация одного ШР на любой

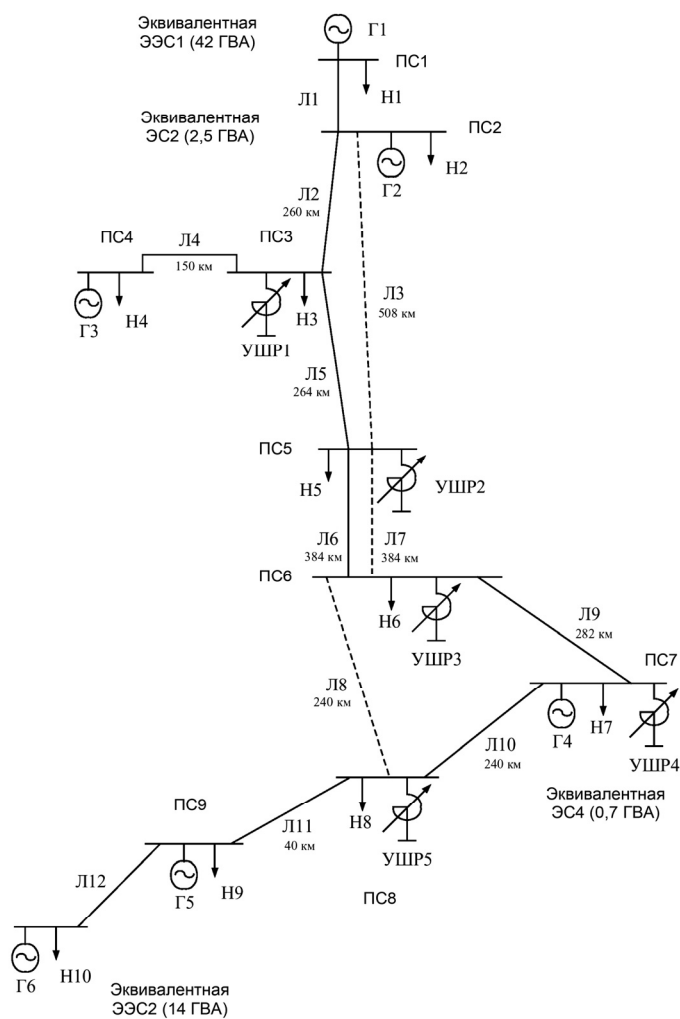


Рис. 7. Упрощенная схема рассматриваемого примера транзитной электропередачи

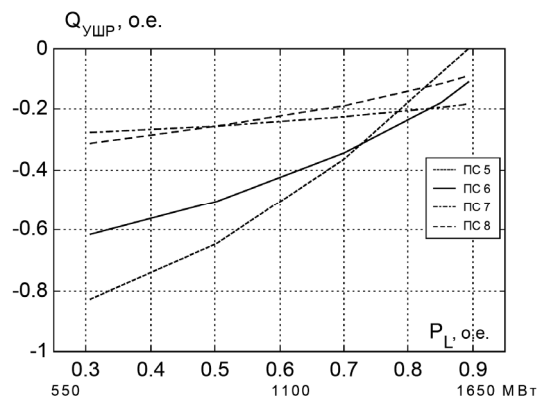


Рис. 8. Оценка общего объема устройств компенсации в перспективной схеме транзита без генерации реактивной мощности

из ПС не приводит к недопустимому увеличению напряжения более 525 кВ, возможно поддержание напряжения не ниже значения 500 кВ для уменьшения потерь мощности. При дальнейшем увеличении передаваемой по транзиту мощности напряжение на промежуточных ПС поддерживается на уровне 475 кВ для обеспечения возможности коммутаций ШР.

Кроме того, необходима проверка возможности функционирования транзита в диапазоне рабочих режимов при полном отсутствии коммутаций неуправляемых реакторов (рис. 10). Требуемый уровень напряжений внутри этого диапазона мощностей может быть обеспечен частично за счет управления потребляемой реактивной мощностью (по одному УШР на двух ПС, при этом обеспечивается заданная точность регулирования), а при выведении УШР из работы за счет его естественного падения до допустимого уровня 475 кВ при дальнейшем увеличении передаваемой мощности (в этой связи считается необходимым, чтобы уставка УШР по напряжению находилась на достаточно высоком уровне 515-520 кВ).

При этом определяются дополнительные области рабочих режимов транзита за счет установки нескольких УШР на промежуточных подстанциях (для ПС, где такая установка целесообразна, в соответствии с рис. 8). В большинстве же случаев совместная работа неуправляемых устройств и **одного УШР мощностью 180 МВар** на каждой промежуточной ПС является достаточным условием нормального функционирования транзитной электропередачи 500 кВ.

Применение рассмотренного в главе 3 метода анализа динамических свойств систем показало, что колебательная устойчивость транзита не ухудшается от внедрения управляемых устройств поперечной компенсации даже со значительными коэффициентами регулирования, в то время как качество напряжения на всех промежуточных ПС улучшается весьма существенно.

Полученные результаты свидетельствуют также о сравнительно небольшом влиянии постоянной времени УШР на колебательные свойства системы (в пределах 10% при изменении постоянной времени устройства в 10 раз). Поэтому разработка специальных и дорогостоящих мероприятий, направленных на уменьшение эквивалентной постоянной времени системы регулирования УШР, не является целесообразной.

Показано, что применение регулирования УШР по отклонению тока линии электропередачи позволяет при точной настройке получить степень устойчивости, равную или более высокую, чем при регулировании по отклонению напряжения. Однако, область настройки является крайне узкой и выбор коэффициен-

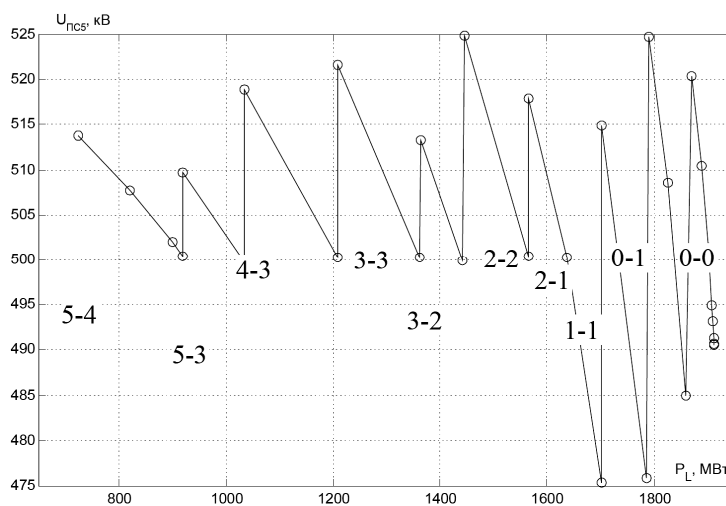


Рис. 9. Поддержание напряжения на ПС не менее 500 кВ в рабочих режимах посредством коммутации ШР

тов регулирования по току, обеспечивающих допустимые показатели устойчивости при изменении схемно-режимных условий, весьма затруднен. Изложенное не позволяет рекомендовать этот вид регулирования для транзитных электропередач со значительными изменениями потоков активной мощности.

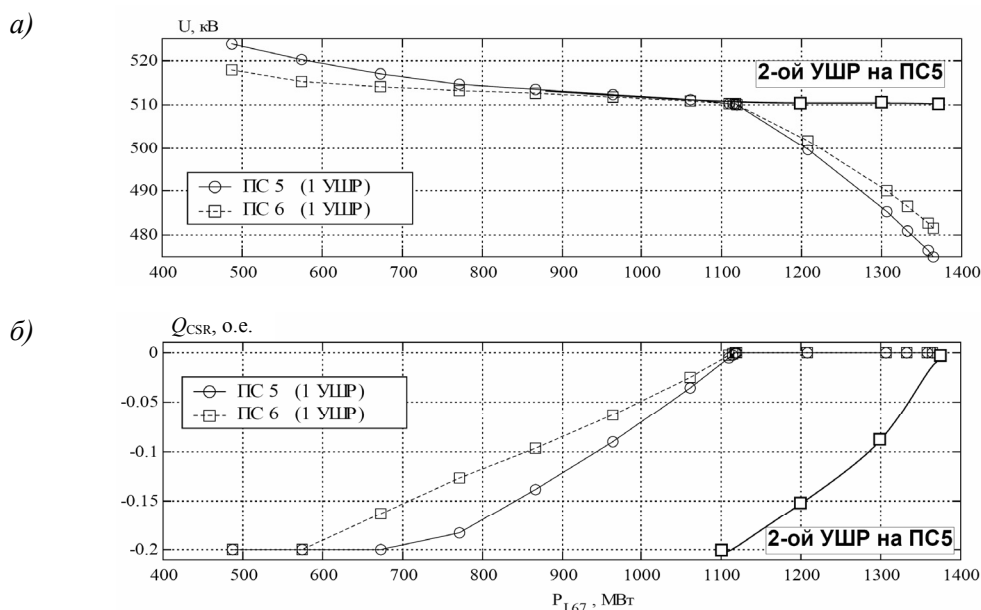


Рис. 10. Регулирование напряжения (а) во всем диапазоне рабочих режимов за счет изменения мощности УШР (б)

Возможным средством улучшения демпферных свойств рассматриваемых систем является введение в закон управления УШР, по аналогии с АРВ-СД синхронных генераторов, ряда стабилизирующих параметров, например, отклонения и производной частоты напряжения в точке подключения реактора. Получаемые настроечные параметры УШР по частоте обладают чрезвычайно высокой степенью робастности (то есть слабой зависимостью от изменения режима работы) и могут быть рекомендованы для управления во всем диапазоне передаваемых по транзиту мощностей. При этом достигается улучшение показателей демпфирования по сравнению со случаем применения неуправляемых устройств компенсации более чем в 2 раза.

Кроме того, показано, что установка управляемых устройств компенсации не приводит к ухудшению уровня динамической устойчивости рассматриваемых электропередач и, в то же время, позволяет улучшить качество напряжения на шинах промежуточных ПС в послеаварийных режимах.

В пятой главе рассмотрены вопросы снижения скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов автономной электростанции.

В последние годы возникла потребность в анализе причин появления повышенных вибраций, а также разрушения муфт между генератором и редуктором, которые имели место на газотурбинных агрегатах автономных энергосистем нефтедобывающих комплексов при питании части двигательной нагрузки напрямую от шин генераторного напряжения в результате коротких замыканий (КЗ) и последующих переходных процессов. В работе разработаны расчетные модели автономных ЭЭС с двигательной нагрузкой и первичными двигателями различных типов (дизельными, газотурбинными и газопоршневыми), позво-

лившие выявить специфические динамические свойства таких энергосистем и определить величины скручивающих моментов, воздействующих на муфты. Формирование таких моделей потребовало увеличения объема исходной информации. На основании серий расчетов предложены и обоснованы мероприятия, предотвращающие появление опасных величин скручивающих моментов.

Появление дополнительной составляющей крутильных колебаний с частотой, в несколько раз превышающей частоту электромеханических колебаний, приводит к тому, что даже незначительные изменения времени отключения КЗ могут обусловить увеличение скручивающего момента между ротором генератора и турбиной (рис. 11).

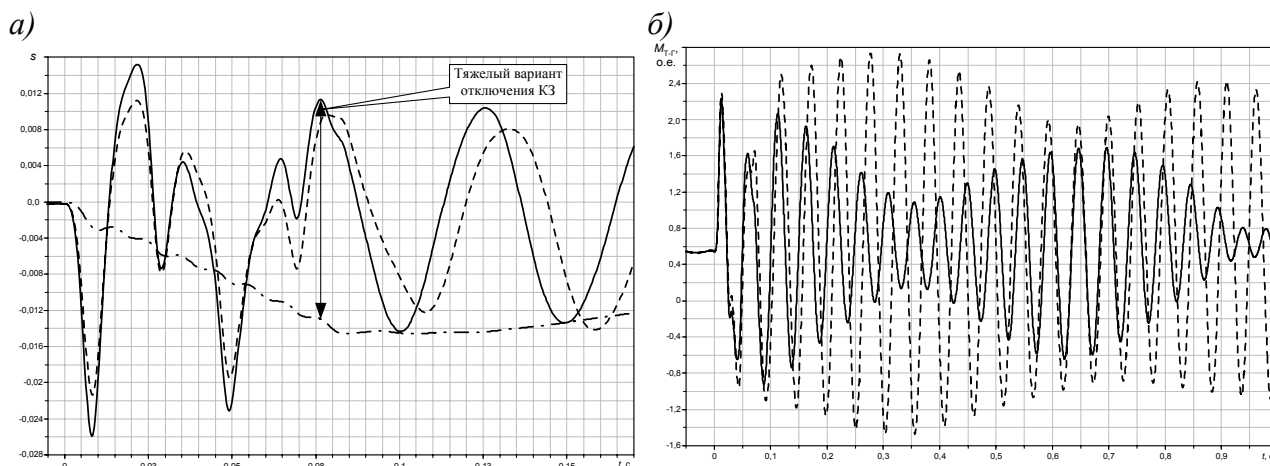


Рис. 11. Расхождение скольжений эквивалентных синхронных генераторов (—), (---) и двигателя (- . -) в аварийном режиме (а) и его влияние на величины скручивающих моментов в послеаварийном режиме (б)

Показано, что снижение амплитуд скручивающего момента между ротором генератора и турбиной в аварийном режиме может быть достигнуто за счет установки разделительного трансформатора (рис. 12, а). Увеличение его индуктивного сопротивления будет приводить к уменьшению токов короткого замыкания, а как следствие, максимальных значений скручивающих моментов и, в то же время, отрицательно влиять на динамическую устойчивость системы (предельная длительность двухфазного короткого замыкания может снижаться до 0,06 с).

Максимальная эффективность снижения амплитуд скручивающего момента в послеаварийном режиме достигается за счет совместного применения разделительного трансформатора и последовательного электрического торможения генераторов (рис. 12, б). Повышение динамической устойчивости при электрическом торможении может быть дополнительным положительным фактором при его совместной работе с разделительным трансформатором, компенсируя появление в аварийном режиме дополнительного продольного индуктивного сопротивления в цепи.

Количественные характеристики указанных выше устройств для обеспечения динамической устойчивости системы в целом и устойчивости рассматриваемого узла нагрузки в частности определены расчетным путем.

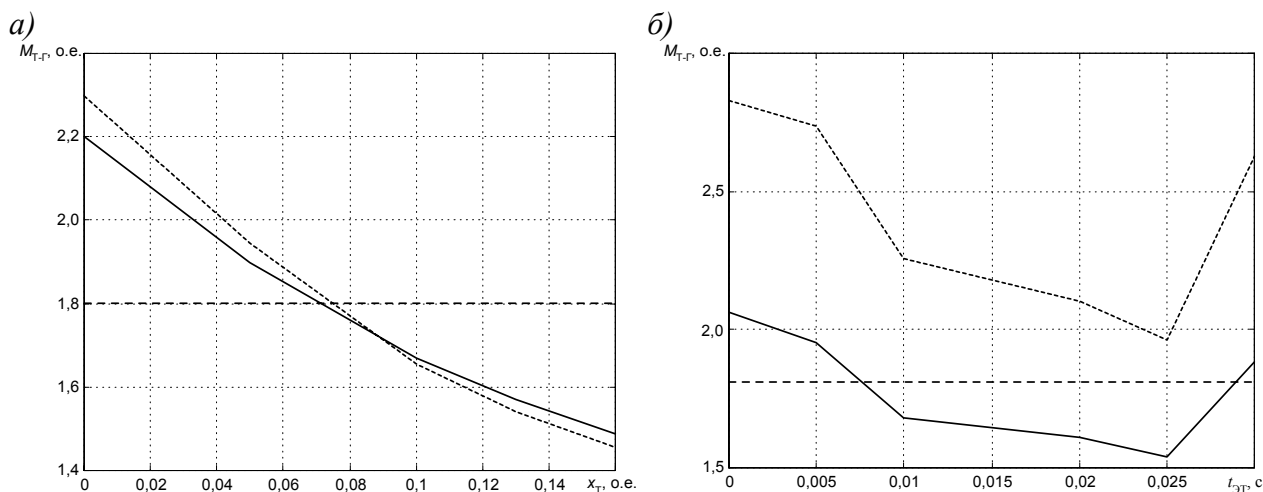


Рис. 12. Зависимость скручивающих моментов в аварийном режиме от величины индуктивного сопротивления разделительного трансформатора (а) и в послеаварийном режиме от момента включения устройств электрического торможения (б)

Шестая глава посвящена совершенствованию методов анализа динамической устойчивости и разработке мероприятий по ее повышению в автономных системах электроснабжения.

Предложенный в работе математический аппарат оценки запасов динамической устойчивости с помощью правила площадей учитывает изменение параметров машин во времени (угловые положения роторов, скорости, мощности и т.д.), поскольку они рассчитываются программой анализа процессов во временной области. Такая информация не только дает возможность выявить критические машины, но и позволяет оценить пределы устойчивости – предельные времена отключения КЗ и предельные взаимные углы роторов.

При возникновении возмущения с помощью программы расчетов переходных процессов во временной области производится анализ заданной аварийной ситуации для достаточно малых времен отключения коротких замыканий (рис. 13) и далее выполняются следующие действия:

1) идентифицируются критические машины по взаимному отклонению угловых положений роторов;

2) вычисляется взаимное ускорение между критической машиной и машиной, принятой за базисную, по следующей формуле

$$\delta_{12}'' = \frac{d^2}{dt^2}(\delta_1 - \delta_2) = \frac{\omega_c}{T_{J1}}(P_{T1} - P_1) - \frac{\omega_c}{T_{J2}}(P_{T2} - P_2)$$

где δ_{12} – взаимный угол между поперечной осью базисного генератора и поперечной осью критической машины; ω_c – синхронная частота; T_{J1} – механическая инерционная постоянная базисного генератора; T_{J2} – механическая инерционная постоянная критической машины; P_{T1} – механическая мощность на валу базисного генератора; P_{T2} – мощность механизма, приводимого во вращение критической машиной; P_1 – электромагнитная мощность базисного генератора; P_2 – электромагнитная мощность критической машины;

3) аппроксимируется значение взаимного ускорения δ_{12}'' для площадок ускорения и торможения на интервале от начала возмущения до значения взаимного угла, равного π ;

4) интегрируя аппроксимированные значения взаимного ускорения δ_{12}'' на интервалах времени, соответствующих ускорению и торможению роторов, по взаимному углу с помощью правила площадей определяем, является ли система динамически устойчивой;

5) экстраполируя значения взаимного ускорения машин по отдельности для участков кривой, соответствующим ускорению и торможению, находим значение взаимного угла, при котором будет выполняться равенство, отвечающее границе динамической устойчивости системы ($\Delta t_{кз} = 0,206$ с). Полученное значение $\delta_{12кр}$ будет являться критическим для данного возмущения;

6) аппроксимируя значения взаимного угла на интервале времени, соответствующем его росту после приложения возмущения, находим значение критического времени $t_{кр}$, отвечающему значению $\delta_{12кр}$, определенному ранее. Величина $t_{кр}$ является предельным временем действия рассматриваемого возмущения до потери системой динамической устойчивости.

На основе разработанного метода, представляющего собой расширение традиционного для теоретического анализа динамической устойчивости правила площадей, могут быть сформулированы минимально необходимые технические требования к энергетическому оборудованию и противоаварийной автоматике автономных ЭЭС нефтегазовых месторождений для обеспечения устойчивости работы генераторов и электродвигателей, а также снижения рисков нарушения электроснабжения при авариях в энергосистеме.

В частности, показано, что большинство вновь проектируемых систем с высокоманевренными агрегатами обладает очень низкими показателями динамической устойчивости, а предельная длительность коротких замыканий на шинах станции в зависимости от дальнейшего развития аварии составляет $0,035 \div 0,12$ с из-за чрезвычайно быстрого изменения взаимных углов между роторами синхронных машин, обусловленного ускорением роторов генераторов станции и торможением двигателей нагрузки. За счет введения устройств последовательного электрического торможения (ЭТ) возможно обеспечение требуемого нормативами запаса динамической устойчивости автономной ЭЭС месторождения даже для «легких» агрегатов с низкой инерционной постоянной. При уменьшении величины активного сопротивления устройства почти в 3 раза минимально необходимая длительность его включения возрастает не более чем на 25%. При включении устройства ЭТ происходит значительное мгновенное увеличение электромагнитной мощности генератора, которое, тем не менее, является допустимым по условиям эксплуатации. Обоснована целесообразность включения устройств ЭТ непосредственно в статорные цепи каждого генератора в отдельности для обеспечения требуемого уровня динамической устойчивости. Применение быстродействующих тиристорных устройств для более раннего включения ЭТ в аварийной ситуации (например через 0,03 с после КЗ) также позволит увеличить запас динамической устойчивости.

При сложных авариях отключение части (суммарным объемом 20-25%) только асинхронной нагрузки достаточно для обеспечения динамической устойчивости системы с предельным временем КЗ без появления «лавины напряжения». Данное мероприятие необходимо производить совместно с электрическим торможением части или всех генераторов станции в объеме, определяемом расчетным путем. Включение секционных выключателей может значительно (от 20 до 70%) ухудшить уровень динамической устойчивости.

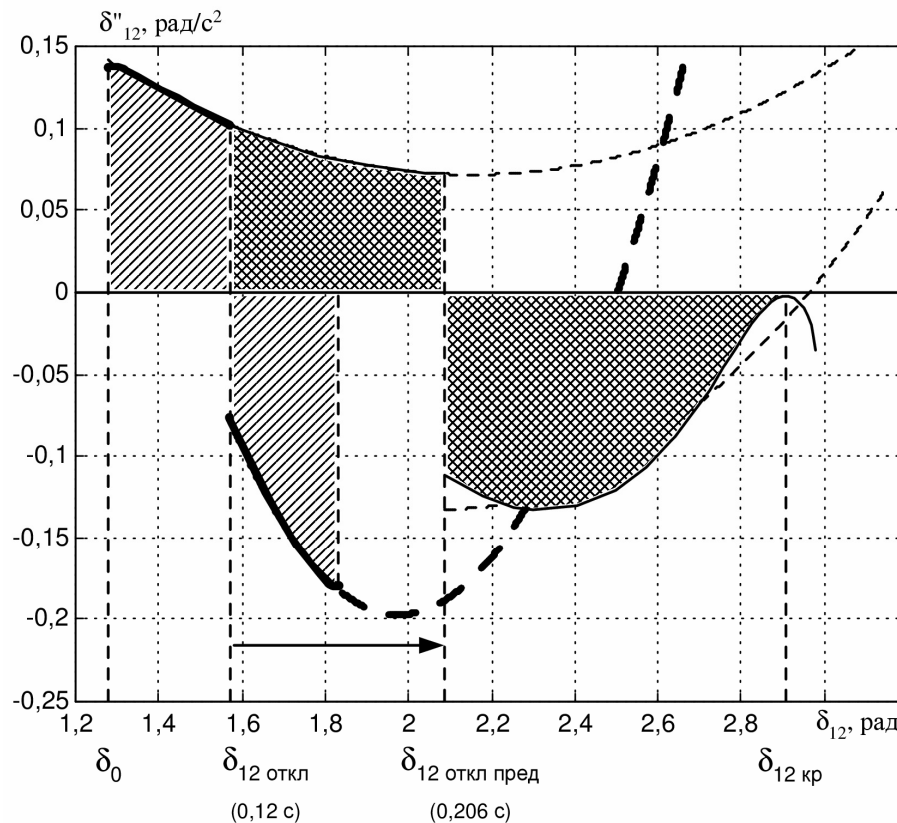
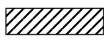


Рис. 13. Оценка динамической устойчивости системы на основе расширенного правила площадей

Толстыми линиями и  показаны кривые при $\Delta t_{КЗ} = 0,12$ с., тонкими линиями и  – при $\Delta t_{КЗ} = 0,206$ с. Сплошная линия получена из расчета переходного процесса, пунктирная – посредством его дальнейшей аппроксимации

Применение компенсаторов реактивной мощности, состоящих из УШР и батареи статических конденсаторов, на шинах нагрузки, наиболее уязвимой с точки зрения появления лавины напряжения, позволяет в сложных аварийных ситуациях увеличить уровень динамической устойчивости (допустимые длительности коротких замыканий) как минимум в 1,5 раза. За счет стабилизации уровня напряжения опрокидывания двигателей в этих узлах не происходит, а нарушение динамической устойчивости имеет место на первом колебании углов при значительно большей длительности короткого замыкания (0,1 с вместо 0,04 с).

На основе расчетов статической устойчивости и построения кривых переходных процессов при больших возмущениях показано, что многие послеаварийные режимы характеризуются достаточно длительными электромеханическими качаниями роторов синхронных машин (генераторов и двигателей), а в

ряде случаев (например, при низких инерционных постоянных агрегатов) являются колебательно неустойчивыми. В этой связи продемонстрирована возможность оптимизации регуляторов частоты и мощности генераторов автономных ЭЭС, а также определены количественные характеристики регуляторов приводных механизмов для существенного увеличения запасов колебательной статической устойчивости.

Предложены варианты оптимизации алгоритмов плавного пуска асинхронных двигателей (АД) с учетом эффективного токоограничения и особенностей моментно-скоростных характеристик электромагнитного момента современных АД на основе применения набора экспоненциально возрастающих или убывающих функций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны методологические основы анализа динамических свойств транзитных электропередач и автономных энергосистем, базирующиеся на построении областей D -разбиения для произвольных параметров систем регулирования и конфигурации ЭЭС. На их основе выработаны предложения по усовершенствованию традиционных системных стабилизаторов современных АРВ-СД и систем регулирования управляемых шунтирующих реакторов для демпфирования квазиустановившихся и переходных процессов.

2. Обоснована эффективность применения устройств управляемой поперечной компенсации в объединенных и автономных энергосистемах. Разработаны принципы определения минимально необходимого состава и технических характеристик УУПК для достижения достаточной управляемости в широком диапазоне режимов работы транзитных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения, в том числе с устройствами продольной компенсации, а также обеспечения требуемых запасов статической и динамической устойчивости автономных энергосистем с преобладающей двигательной нагрузкой. Показано, что весь диапазон рабочих режимов транзитных электропередач может быть обеспечен только за счет плавного изменения потребления реактивной мощности управляемых шунтирующих реакторов и выполнения дополнительных коммутаций традиционных ШР не требуется. Сформулированы условия обеспечения апериодической и колебательной статической устойчивости при установке управляемого шунтирующего реактора на шины крупной электростанции для компенсации реактивной мощности отходящих ЛЭП в условиях совместной работы УШР с АРВ генераторов. Показана нецелесообразность чрезмерного уменьшения эквивалентной постоянной времени системы регулирования УШР. Получено подтверждение положения о том, что система возбуждения генераторов станции адекватно демпфирует послеаварийные качания и вмешательства дополнительного устройства в этот процесс не требуется, а основной задачей, возлагаемой на управляемый реактор, является компенсация избыточной зарядной мощности ЛЭП в нормальных режимах работы системы. На основании выполненных расчетов статической и динамической устойчиво-

сти сформулированы необходимые технические требования к системам регулирования УШР.

3. Усовершенствован математический аппарат анализа динамической устойчивости, основанный на совместном применении методов численного интегрирования системы нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений и правила площадей для двухмашинной модели ЭЭС, позволяющий, в частности, существенно сократить объем расчетов при поиске предельных времен отключений коротких замыканий в электрической системе произвольной сложности. Отработка основных положений производилась на упрощенных моделях автономных ЭЭС нефтегазовых месторождений при полном моделировании синхронных и асинхронных машин с использованием уравнений Парка-Горева, автоматических регуляторов напряжения и различных приводных механизмов (дизельных, газотурбинных и газопоршневых). Предложены варианты оптимизации алгоритмов плавного пуска асинхронных двигателей с учетом эффективного токоограничения и особенностей моментно-скоростных характеристик электромагнитного момента современных АД на основе применения набора экспоненциальных функций.

4. Обосновано направление дальнейшего совершенствования существующих алгоритмов управления частотой и активной мощностью на основе глобальной системы измерения взаимных углов генераторов, синхронизируемой при помощи спутниковых систем единого времени. Разработан алгоритм управления переходными процессами частей энергообъединения для осуществления автоматического включения межсистемных ЛЭП. Проведены численные исследования предложенного алгоритма для эквивалентных моделей ЭЭС, показывающие его эффективность для синхронизации частей энергообъединений в условиях многомашинного асинхронного хода, возникающего в результате тяжелых системных аварий.

5. Выявлены специфические динамические свойства автономных электроэнергетических систем, связанные с крутильными колебаниями валопроводов газотурбинных агрегатов. На основе разработанных математических моделей автономных ЭЭС нефтедобывающих комплексов с преобладающей двигательной нагрузкой и учетом крутильных колебаний валопроводов агрегатов электрических станций выполнен анализ причин разрушения муфт между генератором и редуктором, имевших место при коротких замыканиях и последующих переходных процессах. Выявлено, что работа высокоманевренных агрегатов с малыми значениями инерционных постоянных и большими значениями жесткостей связей участков валопровода агрегата непосредственно на местную нагрузку может привести к появлению опасных величин скручивающих моментов. Указанные обстоятельства усугубляются при совместной работе нескольких генераторов с различными параметрами в автономной энергосистеме с преобладанием двигательной нагрузки. Показано, что величина скручивающего момента, действующего на элемент конструкции агрегата, есть сложная функция параметров, поэтому она не должна определяться по амплитудному значению электромагнитного момента генератора. Разработаны мероприятия по снижению амплитуд скручивающих моментов между ротором генератора и

турбиной в аварийном и послеаварийном режимах, а также определены параметры устройств для обеспечения динамической устойчивости системы в целом и устойчивости узлов двигательной нагрузки в частности.

6. На базе результатов натурных испытаний паровых турбин разработаны предложения по совершенствованию полной и упрощенной математических моделей паровой турбины для расчетов статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем, в том числе для оценки эффективности различных законов управления установок с парогазовым циклом. Разработаны методики упрощенного математического моделирования дизельных, газотурбинных и газопоршневых установок для расчетов динамической устойчивости и выбора средств противоаварийной автоматики в автономных энергосистемах.

7. Рассмотрены условия демпфирования колебаний, вызванных неравномерностью вращающего момента первичного двигателя (дизель-генератора) в условиях автономной работы многоагрегатных систем электроснабжения. Устойчивость и надежность работы таких ЭЭС обеспечивается за счет применения различных систем управления. Важное место среди них занимают системы автоматического регулирования возбуждения генераторов. Достижение высоких демпферных свойств реализуется благодаря использованию в АРВ дополнительных параметров стабилизации. Установлена высокая эффективность использования канала регулирования возбуждения по производной тока статора. Показано, что подавление колебаний электромагнитной мощности генератора за счет регулирования возбуждения приводят к увеличению колебаний напряжения на шинах приемной станции. Даны рекомендации по выбору настройки канала регулирования по производной тока статора, обеспечивающих удовлетворение всех ограничений.

8. Обоснован общий подход к проектированию адаптивных робастных регуляторов заданной структуры для демпфирования электромеханических переходных процессов в ЭЭС и крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов. На основе методики математического проектирования регуляторов разработана структура робастного LQG/LTR-стабилизатора АРВ генератора, УШР и УПК для демпфирования составляющих крутильных колебаний. В качестве входного сигнала регулятора используется только один сигнал обратной связи (отклонение частоты вращения ротора). Такая конфигурация является простой и практически реализуемой, вследствие использования легко измеримых величин. На основе процедуры сбалансированного понижения порядка модели Шура получена методика понижения дифференциального порядка робастного стабилизатора. Показано, что разработанный робастный стабилизатор обеспечивает значительное улучшение демпферных свойств системы на частотах крутильных колебаний и даже при двукратном уменьшении порядка стабилизатора показатели качества переходных процессов остаются практически на прежнем уровне.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Беляев, А.Н. Повышение динамической устойчивости автономных энергосистем нефтегазодобывающих комплексов на основе электрического торможения / А.Н. Беляев // **Научно-технические ведомости СПбГПУ** .– СПб., 2008 .– №4(63): Основной выпуск .– С. 163-169.
2. Беляев, А.Н. Снижение скручивающих моментов в системе газотурбинного привода генераторов автономной электростанции / А.Н. Беляев // **Известия РАН. Энергетика** .– 2010 .– № 2 .– С. 124-132.
3. Беляев, А.Н. Демпфирование составляющих крутильных колебаний в автономных энергосистемах с преобладающей двигательной нагрузкой за счет «сильного» регулирования устройств продольной емкостной компенсации / А.Н. Беляев, А.А. Смирнов, С.В. Смоловик // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики** .– Казань, 2011 .– № 7-8 .– С. 71-82.
4. Беляев, А.Н. Исследование пусковых режимов асинхронных двигателей для оптимизации работы нефтеперекачивающих станций с газопоршневыми агрегатами соизмеримой мощности / А.Н. Беляев, А.А. Смирнов, С.В. Смоловик // **Научно-технические ведомости СПбГПУ** .– СПб., 2011 .– №1(117): Наука и образование .– С. 80-88.
5. Беляев А.Н. О применении устройств управляемой поперечной компенсации для транзитных электропередач класса 500 кВ / А.Н. Беляев [и др.] // **Электричество** .— М., 2009 .– №2 .– С. 2-13.
6. Беляев А.Н. Робастный адаптивный регулятор для демпфирования межрайонных колебаний в электроэнергетической системе / А.Н. Беляев [и др.] // **Электричество** .– М., 2011 .– №6 .– С. 2-10.
7. Беляев А.Н. Демпфирование крутильных колебаний в электроэнергетической системе на основе принципов робастного управления / А.Н. Беляев, Б.Т. Кадхем, С.В. Смоловик // **Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики** .– Казань, 2009 .– №1-2 .– С.61-70.
8. Беляев А.Н. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения с помощью нейронечеткого моделирования / А.Н. Беляев, С.В. Смоловик // **Электричество** .– М., 2002 .– №3 .– С. 2-9.
9. Беляев, А.Н. Регулирование синхронных генераторов с дизельным приводом / А.Н. Беляев, О.В. Епифанова, С.В. Смоловик // **Научно-технические ведомости СПбГТУ** .– СПб., 2006 .– №5, т.1 .– С. 74-79.
10. Беляев, А.Н. Управляемые источники реактивной мощности для обеспечения устойчивости узлов нагрузки нефтегазодобывающих комплексов / С.Т. Андрус, А.Н. Беляев // **Научно-технические ведомости СПбГТУ** .– СПб., 2008 .– №1 .– С.92-97.
11. Беляев А.Н. Подавление крутильных колебаний валопровода в электропередаче с продольной емкостной компенсацией / А.Н. Беляев, Б.Т. Кадхем, С.В. Смоловик // **Научно-технические ведомости СПбГТУ** .– СПб., 2008 .– №1 .– С.102-109
12. Беляев А.Н. Формы крутильных колебаний валопровода турбоагрегата / А.Н. Беляев [и др.] // **Научно-технические ведомости СПбГПУ** .– СПб., 2008

– №4 (63) – С. 169-180.

13. Беляев, А.Н. Smart grid. Разработка приложений / А.Н. Беляев [и др.] // **Научно-технические ведомости СПбГПУ** .– СПб., 2011 .– №6.1(138): Информатика, телекоммуникации, управление .– С.115-121.

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

15. Беляев А.Н., Смоловик С.В. Системы глобальных измерений в алгоритмах управления энергообъединений // Труды 9-ой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность», Томск, 2003.

16. Беляев А.Н., Кабанов И.А., Смоловик С.В., Шхати Х.В. Сравнение современных подходов к моделированию электроэнергетических систем // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Наука - производство - технологии – экология». Киров: Изд-во ВятГТУ. 2001.

17. Беляев А.Н., Насери А., Смоловик С.В. Рациональный выбор весовых функций в процессе построения робастного регулятора возбуждения синхронных генераторов // Высокие интеллектуальные технологии образования и науки. Материалы IX международной научно-методической конференции – СПб: СПбГТУ, 14-15 февраля 2002.

18. Беляев А.Н., Епифанова О.В., Смоловик С.В. Оптимизация работы тихоходных дизель-генераторов большой мощности в автономных системах электроснабжения // Труды СПбГТУ «Электроэнергетическое оборудование: надежность и безопасность», № 501, с. 48-57.

19. Беляев А.Н., Смоловик С.В. Применение методов нейро-нечеткой идентификации для автоматизации процесса проектирования адаптивных регуляторов возбуждения. Труды научно-технической конференции «Энергосистема: управление, качество, безопасность», Екатеринбург, 2001. с. 148-154.

20. Беляев А.Н., Ивановский Р.И., Карпов Ю.Г., Смоловик С.В. Противоаварийное управление в электроэнергетических сетях // Материалы Всероссийского научного семинара «Энергетическая безопасность России» 12 апреля 2006 г., СПб, СПбГПУ.

21. Беляев А.Н., Смоловик С.В. Обзор развития крупных системных аварий: роль «человеческого фактора» // Материалы научно-технической конференции «Устойчивость и надежность электроэнергетических систем», 10-15 октября 2005 г., СПб.

22. Беляев А.Н., Кадхем Б.Т., Смоловик С.В. Расчет переходных процессов генераторов и крутильных колебаний валопровода с продольной емкостной компенсацией // Материалы научно-практической конференции «Научные исследования и инновационная деятельность». СПб: СПбГПУ, 2007. с. 113-120.

23. Беляев А.Н., Смоловик С.В., Фролов О.В. Обоснование целесообразности установки управляемых реакторов на станциях для компенсации избыточной реактивной мощности // Материалы научно-практической конференции «Научные исследования и инновационная деятельность». СПб. СПбГПУ, 2007. с. 78-86.

24. Беляев А.Н., Кадхем Б.Т., Смоловик С.В. Влияние степени компенсации на величины скручивающих моментов при коротких замыканиях на зажимах генератора // Материалы научно-практической конференции «Научные исследования и инновационная деятельность». СПб: СПбГПУ, 2008. с.66-71.
25. Беляев А.Н., Андрус С.Т. Совершенствование методов анализа динамической устойчивости при обосновании технических требований к оборудованию газотурбинных электростанций нефтедобывающих комплексов // Материалы научно-практической конференции «Научные исследования и инновационная деятельность». СПб. СПбГПУ, 2008, с. 25-29.
26. Belyaev A.N., Smolovik S.V. Development of the fuzzy PSS automated design method // Proceedings of 16th International Power System Conference (PSC2001) on 22-24 Oct. 2001 in Tehran.
27. Belyaev A.N., Smolovik S.V. An improvement of AC electrical energy transmission system with series compensation by implementation of controllable shunt reactors // Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Vol. 3.
28. Belyaev A.N., Smolovik S.V. Steady-state and transient stability of 500 kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors // Power Tech Conference Proceedings, 2005 IEEE Russia.
29. Belyaev A.N., Smolovik S.V., Shuhati H.W. Analysis of voltage behavior during network connection of different types of distributed generation units // Proceedings of "SPb-IEEE Con'03", 2003, St-Petersburg IEEE chapters conference.
30. Belyaev A.N., Maslov A.V. An improvement of Russian long-length AC electrical energy transmission systems by implementation of Controllable Shunt Reactors // Proceedings of "SPb-IEEE Con'04", 2004, St-Petersburg IEEE chapters conference.
31. Belyaev A.N., Karpov Yu.G, Smolovik S.V., Sotnikov K.A. Object-Oriented Modeling for Electrical Grid Risk Assessment // Proceedings of "SPb-IEEE Con'05", 2005, St-Petersburg IEEE chapters conference.
32. Belyaev A.N., Smolovik S.V. The human factor role on large system crashes // Proceedings of the Fourth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007, Stará Lesná, Slovakia. Technical University of Košice.
33. Belyaev A.N., Nazarova E.S., Smolovik S.V., Frolov O.V. Magnetically controlled shunt reactor application for AC HV and EHV transmission lines. // Proceedings of the Fourth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007, Stará Lesná, Slovakia. Technical University of Košice.
34. Belyaev A.N., Kadhem B.T., Shuhati H.W., Smolovik S.V. Torsional natural frequencies and mode shapes for different turbine-generator shaft // Proceedings of the Fourth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007, Stará Lesná, Slovakia. Technical University of Košice.
35. Belyaev A., Yadykin I., Smolovik S. Adaptive Robust Controller for Electromechanical and Interarea Oscillations Damping in the Power Systems // Proceedings of 4th International Conference «Liberalization and modernization of power systems: Coordinated Monitoring and Control towards Smart Grids», July 13-17, 2009, Irkutsk, Russia.

36. Belyaev A.N., Smirnov A.A., Nazarova E.S., Artemiev M.S. Impact of Magnetically Controlled Shunt Reactors on Transient Stability of Oil-Production Enterprise Isolated Power Systems // Proceedings of the Sixth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2011, Stará Lesná, Slovakia. Technical University of Košice.

37. Беляев А.Н., Смоловик С.В. Программирование на примере электротехнических и электроэнергетических задач: Учебное пособие. СПб: СПбГПУ, 2006. 120 с.

38. Беляев А.Н., Горюнов Ю.П., Смирнов А.А., Смоловик С.В. Анализ развития крупных системных аварий: Учебное пособие по курсу «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах». СПб. СПбГПУ, 2006. 72 с.