

ЧИВЕНКОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ И МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С АВТОНОМНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Научный консультант: - доктор технических наук, профессор

ЛОСКУТОВ Алексей Борисович

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Южно-Уральский государственный университет» (г. Челябинск)

ХОХЛОВ Юрий Иванович

- доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет МЭИ» (г. Москва)

ПАНФИЛОВ Дмитрий Иванович

- доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные электроэнергетические системы» ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» (г. Самара)

СТЕПАНОВ Валентин Павлович

Ведущая организация – Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФГБУН Кольского научного центра РАН (г. Апатиты)

Защита состоится «13» марта 2015 г. в 14.00 часов, в аудитории 1258 на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева по адресу: 603950 г. Н.Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, с авторефератом на сайте университета по адресу http://www.ntu.ru/sites/default/files/file/dissertacii/2014/chivenkov_a_i

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 603950, г. Н.Новгород, ул. Минина, д. 24, корпус 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.02.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.т.н., доцент

А.С. Плехов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Рост численности населения планеты и требуемого внутреннего валового продукта по прогнозам экспертов ведёт к увеличению энергопотребления до 2030 в 1,3-1,5 раза. Анализ структуры Единой Национальной Электрической Сети (ЕНЭС) и установленного оборудования показывает: несмотря на то, что протяжённость распределительных сетей (0,4 – 110 кВ) почти в 20 раз превышает протяжённость магистральных сетей (220 – 1150 кВ), а сети напряжением (0,4 – 10) кВ составляют 80% распределительных сетей, на долю последних приходится большая часть электрических потерь. Однако доля установок регулирования параметров электрической энергии в них очень мала, а зачастую таковые вообще отсутствуют. Следует отметить, что процессы модернизации и ввода новых энергообъектов отстают от требований потребностей. Период строительства предприятий-гигантов прошёл, им на смену пришли более гибкие и мобильные производства, определяющие быстрый рост экономики страны. При этом удовлетворить спрос потребителей на электрическую энергию за счет централизованных источников не всегда оказывается возможным. Зачастую экономически более выгодно строительство собственных малых электрогенерирующих установок, чем подключение к централизованной сети. Одно из возможных решений проблемы – малая распределённая энергетика.

Интерес к распределённым энергетическим системам можно объяснить следующим: относительно невысокий уровень первоначальных затрат; быстрый и поэтапный ввод в эксплуатацию требуемых мощностей; полный контроль производства и потребления электроэнергии. Однако введение в ЕНЭС точек подключения новых источников требует создания автоматизированных узлов нагрузки с возможностью реализации регулирования транспортных потоков мощности в интеллектуальной распределительной электрической сети, оборудованных быстродействующими типовыми средствами сопряжения источников с различными выходными параметрами при соблюдении требований электромагнитной совместимости. Таким образом, исследование процессов в распределительных сетях с применением нового типа оборудования автоматизированных узлов нагрузки распределённой энергетике очевидно.

Одним из самых распространённых видов оборудования в электрических сетях являются трансформаторы. С целью регулирования напряжения силовые и преобразовательные трансформаторы комплектуются устройствами ПБВ или РПН. Устройства ПБВ не могут быть отнесены к устройствам регулирования величины напряжения, т.к. предназначены только для выполнения сезонных переключений, а устройства РПН трансформаторы электрических подстанций напряжением 6-10/0,4 кВ не комплектуются. Сложилась ситуация, когда низковольтные сети лишены типовых средств регулирования.

В настоящее время для регулирования и стабилизации напряжения, а также компенсации реактивной мощности, симметрирования нагрузки и других целей все шире применяются трансформаторно-тиристорные регуляторы переменного напряжения (тока). На их основе интенсивно разрабатываются новые ресурсо- и энергосберегающие системы электропитания приемников различного функционального

назначения. Конечно, при этом требуются повышенные финансовые затраты, разработка сложных структур схемотехнических решений силовой части и алгоритмов управления, не всегда обеспечивающих их надёжную и устойчивую работу в электрических сетях. Наличие в подобных установках коммутационных экстратоков также следует считать существенным недостатком.

Общее решение достижения максимальной эффективности электроснабжения потребителей практически найдено – это совместное применение силовых трансформаторов с быстродействующими устройствами РПН и статических полупроводниковых преобразователей.

Исследованию процессов регулирования параметров качества напряжения питающих сетей с применением установок регулирования и компенсации посвящены многие научные работы отечественных и зарубежных авторов, среди которых можно выделить таких как: Александров Г.Н., Алтунин Б.Ю., Астахов Ю.Н., Воропай Н.И., Герман Л.А., Железко Ю.С., Кобзев А.В., Кузнецов В.Г., Кулинич А.В., Лабунцов В.А., Липковский К.А., Панфилов Д.И., Розанов Ю.К., Руденко Ю.Н., Сергеевков Б.Н., Туманов И.М., Хохлов Ю.И., Шакарян Ю.Г., Шидловский А.К., Akagi H., Andersson G.I., Hingorani N. и многих других.

Однако имеющиеся на сегодняшний момент устройства не могут в полной мере выполнять функции согласования любых источников малой распределённой энергетики и, тем более, обеспечить их интеграцию по группе параметров (число фаз, величина напряжения, частота и др.) в единую сеть. Иными словами - требуется универсальный преобразователь (конвертор), допускающий подключение к входным цепям источников как постоянного, так и переменного напряжения с широким допустимым диапазоном их изменения.

Анализ отечественных и зарубежных источников показывает, что понимание общей проблематики сопряжения есть, имеются мелкосерийные и единичные экземпляры устройств, строго ориентированных на конкретный источник. Но отсутствие комплексного научного подхода сначала к определению перечня решаемых задач, а затем и требований к характеристикам устройства сопряжения не позволяет сформировать само устройство как самостоятельный и универсальный элемент, оценить его влияние на режим работы питающей сети.

Требуется не только обобщение и анализ накопленного опыта, но и внедрение прорывных инновационных решений, позволяющих перейти на качественно новый уровень и сформировать целый класс аналогичных устройств и новое научное направление в малой распределённой энергетике и электроснабжении.

Задача в такой постановке является актуальной и практически значимой.

Подобное устройство может быть построено на базе перспективного решения задачи согласования параметров различных источников электроэнергии - унифицированных систем управления энергопотоками UPFC (Unified Power Flow Controller).

Разработка комплексной системы сопряжения (КСС) параметров электрической энергии в системах малой распределённой энергетике, в состав которой входят силовой трансформатор с тиристорным устройством РПН и универсальный преобразователь напряжений (токов), может явиться решением поставленной задачи.

Такие комплексные системы сопряжения при наличии дополнительных источников вкуче с применением современных высокоскоростных преобразовательных и исполнительных устройств в составе оборудования активно- адаптивных узлов нагрузки позволят эффективно решать следующие задачи: снижение величины потерь в электрических сетях; частичное или полное покрытие дефицита электроэнергии; регулирование величины напряжения; симметрирование напряжений фаз и токов нагрузки; компенсация реактивной мощности и искажений формы напряжения; регулирование величин и направлений потоков мощности.

Связь диссертации с научными программами.

Исследования по данной проблеме проводились автором в рамках выполнения государственных контрактов:

1. Государственный контракт № 02.516.11.6045 по теме: «Разработка технических решений для обеспечения сопряжения потребителей и различных типов источников электрической энергии» шифр «2007-6-1.6-31-04-034»;

2. Государственный контракт № 16.516.11.6114 по теме: «Разработка технологии эффективного использования возобновляемых источников энергии в локальной системе электроснабжения потребителей» шифр 2011-1.6-516-047-096;

3. Государственный контракт № 16.516.11.6063 по теме: «Разработка новой технологии распределения электрической энергии в электроэнергетических системах (Распределенные электрические сети)» шифр 2011-1.6-516-008-186;

4. Государственный контракт № 14.516.11.0006 по теме: «Разработка технических решений для создания энергоэффективной системы электроснабжения автономного потребителя на основе комбинированного использования возобновляемых источников энергии и устройств оптимального управления» шифр 2013-1.6-14-516-0100-094;

5. Государственный контракт № 16.526.12.6016 по теме: «Разработка и создание типового ряда трансформаторно-тиристорных регуляторов напряжения и мощности с расщепленной первичной обмоткой трансформатора и ключами однонаправленного тока» шифр 2011-2.6-526-032-006.

6. Соглашение № 14.577.21.0098 о предоставлении субсидии по теме «Разработка автоматизированного узла регулирования транспортных потоков мощности в интеллектуальной распределительной электрической сети» шифр 214-14-579-0034 Минобрнауки России. уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0098).

Объект исследования – электротехнические комплексы и системы сопряжения параметров электроснабжения с автономными источниками энергии.

Предмет исследования – методы и средства автоматического регулирования параметров электрической энергии в распределительных электрических сетях низкого напряжения.

Цель диссертации - формирование научных основ и технических решений системы комплексного регулирования напряжения и потоков мощности, позволяющей автоматически управлять качеством электроэнергии, интегрировать разнохарактерные автономные источники энергии в централизованную электрическую сеть с оптимальным использованием органического топлива и местных энергетических ресурсов.

Для достижения поставленной цели решен следующий комплекс задач:

1. Исследование и анализ особенностей электротехнических комплексов и систем электроснабжения с автономными источниками энергии, методов и средств регулирования напряжения и мощности, схемных решений сопряжения цепей постоянного и переменного токов; разработка на их основе концепции комплексной системы сопряжения (КСС) с трансформаторно-тиристорным регулятором напряжения и универсальным преобразователем, позволяющей интегрировать автономные источники энергии с различными параметрами в централизованную сеть, управлять потоками активной и реактивной мощности, повышать качество электроэнергии в сети.

2. Разработка методов и средств регулирования напряжения с использованием трансформаторно-тиристорного регулятора с ключами однонаправленного тока: алгоритмов, схмотехнических решений, математических и имитационных моделей для исследования регулировочных характеристик, статических и динамических режимов работы, электромагнитной совместимости объектов.

3. Разработка научных основ сопряжения цепей постоянного и переменного токов, регулирования потоков активной и реактивной мощности с использованием универсального преобразователя на базе трехфазного инвертора напряжения с нулевым проводом: алгоритмов, схмотехнических решений, математических и имитационных моделей с целью исследования методов регулирования.

4. Исследование закономерностей регулирования потоков мощности распределительной сети и КСС, интегрированной с централизованной сетью электропитания.

5. Разработка принципов оптимизации распределительной электрической сети с использованием комплексной системы сопряжения в системах электроснабжения с автономными источниками энергии.

6. Реализация комплексной системы сопряжения и ее системы управления, проведение экспериментальных исследований.

При решении этих задач **в диссертационной работе впервые получены, составляют предмет научной новизны и выносятся на защиту** следующие наиболее важные результаты.

1. Концепция построения комплексной системы сопряжения характеристик разнотипных источников и их интеграции в единую распределительную сеть.

2. Научно-технические решения по созданию регуляторов напряжения и мощности с использованием трансформаторов с расщеплёнными обмотками высокого напряжения и устройства РПН с ключами однонаправленного тока, что является прорывным инновационным решением для целого класса аналогичных трансформаторно-тиристорных устройств.

3. Научные основы и технические решения построения универсального преобразователя на базе унифицированной системы управления энергопотоками UPFC, обеспечивающие сопряжение разнохарактерных источников питания.

4. Закономерности регулирования параметров электрической энергии КСС в распределительных сетях электроснабжения.

5. Методология определения оптимальных параметров распределительной сети с интегрированными источниками малой энергетики.

6. Методики технологии подготовки проектов прототипов систем управления устройствами преобразования параметров электроэнергии с применением промышленных компьютеров, позволяющие значительно сократить время проектирования и снизить материальные и финансовые затраты на их проведение.

Методы исследований. Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электромагнитных переходных процессов в электрических цепях, теория автоматического управления. В стационарных и динамических режимах работы исследования выполнялись с применением операторного метода решения дифференциальных уравнений, метода структурного моделирования, основанного на создании моделей отдельных блоков, и последующего синтеза всей системы, а также общего метода режимных расчетов. При определении опорных компенсирующих токов в режимах компенсации реактивной и регулирования активной мощностей использовались преобразования Кларка и Парка-Горева в приложении к модифицированной теории мгновенной мощности в стационарной системе $\alpha\beta$ -координат. Исследования выполнены с привлечением средств математического имитационного моделирования в программном пакете Matlab Simulink.

Практическая значимость результатов работы.

1. Разработан, изготовлен и внедрён на трансформаторной подстанции с цифровым программным управлением НГТУ им. Р.Е. Алексеева трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения и мощности с ключами однонаправленного тока, исключающий возможность возникновения коммутационных экстратоков.

2. Повышена надёжность работы и ресурс переключений устройства РПН за счёт применения новых схемотехнических решений и алгоритмов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения.

3. Предложен способ плавно-дискретного регулирования в пределах ступени регулирования ТТРН ОТ с фиксированными значениями углов коммутации тиристоров, что обеспечивает возможность определения высших гармонических составляющих на стадии проектирования, а, следовательно, предэксплуатационной установки параметров устройств компенсации коэффициента искажений.

4. Разработанная конструкция и алгоритмы управления ТТРН ОТ при использовании ступенчатого регулирования напряжения устройством РПН позволяют производить безаварийную коммутацию тиристорных ключей в произвольный момент времени без синхронизации с напряжением питающей сети.

5. Обеспечена возможность реализации автоматизированного централизованного диспетчерского управления оборудованием электрических подстанций путём применения информационных цепей проводных соединений, реализующих технологии пакетной передачи данных (Ethernet) для компьютерных сетей на физическом уровне.

6. Решены вопросы интеграции практически любых типов дополнительных и возобновляемых источников питания, включая источники с нестабильными параметрами, с общепромышленной сетью электропитания при применении универсального преобразователя параметров напряжения, имеющего входные цепи подклю-

ния источников питания, не критичные к характеру и величинам подводимых напряжений.

7. Выработаны рекомендации по определению параметров и формированию структуры системы управления, контроля и защиты, выполняемой на базе промышленных компьютеров и контроллеров с целью обеспечения максимального быстродействия и безаварийной работы силового оборудования при проведении испытаний опытных образцов элементов КСС.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационных исследований и разработок внедрены на предприятиях: ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) - Уралэлектротяжмаш» г. Екатеринбург, ОАО «ЭлектроИнтел» и ЗАО «НПО «Промэнерго» г. Нижний Новгород, использованы при выполнении государственных контрактов по направлению повышение эффективности электроснабжения, реализованы при проектировании оборудования трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ с цифровым программным управлением Нижегородского государственного технического университета.

По результатам материалов разработок в соавторстве получены патенты, коллективом кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» получены три международных награды.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на международных, всероссийских, межрегиональных и региональных конференциях и семинарах:

Международной научно-технической конференции «Проблемы преобразования электроэнергии» (г. Москва, МЭИ, Ассоциация АПЭМ, 1993 г.); II, VIII всерос. НТК «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, 1997, 2009 гг.); XXII-XXXII НТК «Актуальные проблемы электроэнергетики» (г. Н.Новгород, НГТУ, 2003-2013 гг.); международной НТК «Электромагнитная совместимость и электромагнитная безопасность» (г. Санкт-Петербург, 2004 г.); XII, XIII, XVII, XIX Нижегородских региональных конференциях «Сессия молодых ученых. Технические науки» (2007, 2008, 2012, 2014 гг.); XIII международной НТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2007 г.); V, VI, IX, XIII международных молодежных НТК «Будущее технической науки» (г. Н.Новгород, НГТУ, 2006, 2007, 2010, 2014 гг.); всерос. НТК «Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении ПТ» (г. Н.Новгород-Арзамас, 2008 г.); VII, VIII всерос. научных молодежных школах с международным участием «Возобновляемые источники энергии» (г. Москва, МГУ, 2010, 2012 гг.); международной НТК «Электроэнергетика глазами молодежи» (г. Самара, СамГТУ 2011 г.); всерос. НТК «Энергосбережение и энергоэффективность технологий передачи, распределения и потребления электрической энергии» (г. Москва, МЭИ, 2012 г.); IX международная НТК «Энергия-2014» (г. Иваново, ИГЭУ, 2014 г.); XVI международном научно-промышленном форуме «Великие реки» (г. Н. Новгород, 2014 г.); II международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности REENFOR-2014» (г. Москва, РАН, 2014 г.); XLIV международная научно-практическая конференция «Федоровские чтения-2014» (г. Москва, МЭИ, 2014 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 50 работах, 8 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 13 авторских свидетельств, патентов на изобретение и патентов на полезную модель.

Личный вклад соискателя. Приведенные в диссертации результаты являются составной частью проектных и научно-исследовательских работ, выполненных на кафедре «Электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, в ОАО «ЭлектроИнтел» и ЗАО «НПО «Промэнерго» г. Нижний Новгород, в ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) - Уралэлектротяжмаш» г. Екатеринбург под руководством и при участии автора, а также ряда инициативных работ. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: постановка задач, разработка теоретических и методических положений, физических и математических моделей и методов, обобщение результатов и рекомендации по применению предложенных решений.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем основного текста работы составляет 305 страниц, включая 155 рисунков, 15 таблиц и 29 страниц библиографического списка (251 наименование), одно приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы диссертации с точки зрения повышения эффективности электроснабжения потребителей и снижения мощности потерь в ЕНЭС, необходимости развития распределённых сетей, малой энергетики и интеграции возобновляемых источников энергии.

Показано, что применение возобновляемых источников энергии имеет множество преимуществ, но и создает некоторые проблемы. Основные из которых - задача транспорта электрической энергии потребителю, т.к. нестабильность её параметров во времени и неравномерность распределения на территории делает интегрирование этих источников в существующую электросеть затруднительным; в случае отличия выходных параметров генерирующих установок от параметров напряжения ЕНЭС эффективное использование возобновляемых источников энергии становится вообще невозможным.

Исследование режимов работы современных установок регулирования параметров качества напряжения сетей электропитания, решение вопросов по созданию на их основе комплексных автоматических систем сопряжения различных типов источников электрической энергии позволяют вплотную подойти к разработке Интеллектуальной Системы Электроснабжения (ИСЭЛ) - комплекса электротехнического оборудования, аппаратного и программного обеспечения, необходимого и достаточного для безопасного, рационального и эффективного управления электроснабжением, позволяющего управлять потоками активной и реактивной мощностей (в т.ч. с реверсом), а так же допускающего интеграцию малой и распределенной генерации в общую энергосистему.

Отмечены научная новизна, практическая ценность работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные структуры и параметры существующих систем и устройств электропитания переменных и постоянных напряжений (рис.1, рис.2).



Рис. 1. Источники переменного напряжения



Рис. 2. Источники постоянного напряжения

Определены существующие схемы подключения потребителей в распределительных сетях ЕНЭС, а также возможные системы интеграции с ЕНЭС электрогенерирующих установок малой энергетики и возобновляемых источников энергии, на основании чего сделан вывод об отсутствии типового оборудования их сопряжения.

Показано, что развитие базы силовых полупроводниковых приборов, способных коммутировать значительные величины токов и напряжений, цифровой электроники определило появление новых перспективных решений в области регулирования параметров сетей переменного тока.

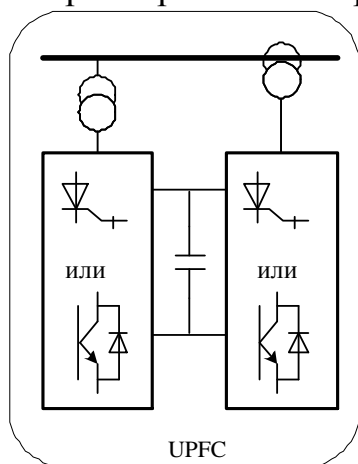


Рис. 3. Унифицированная система управления энергопотоками

Функциональное и объектное сопряжение существующих устройств статического синхронного компенсатора STATCOM (STATIC synchronous Compensator) и статического синхронного продольного компенсатора SSSC (Static Synchronous Series Compensator) привело к перспективным решениям согласования параметров различных источников электрической энергии (рис.3) - унифицированных систем управления энергопотоками UPFC (Unified Power Flow Controller). Причём UPFC могут быть выполнены и в бестрансформаторном варианте.

Рассмотрены существующие способы повышения эффективности электроснабжения потребителей и устройства их реализующие, приведена их классификация (табл.1).

На основании анализа информации как отечественных, так и зарубежных источников сделан вывод о широком применении в электрических сетях в качестве регулирующих и компенсирующих установок трансформаторов с устройствами РПН, активных фильтров (АФ), статических тиристорных компенсаторов (СТК).

На основании приведённой информации и анализа существующих схемотехнических решений построения систем бесперебойного электроснабжения для обще-

го случая определена структурная схема системы питания с использованием разнородных источников энергии (рис. 4).

Таблица 1 - Способы повышения эффективности электроснабжения потребителей

| Способы повышения эффективности электропитания потребителей | |
|---|---|
| Регулирование напряжения | изменением коэффициента трансформации трансформаторов |
| | изменением режимов работы вольтодобавочных трансформаторов |
| | изменением сопротивления линии (продольная компенсация) |
| | изменением реактивной мощности (поперечная компенсация) |
| Снижение колебаний напряжения | разделением нагрузок сдвоенным реактором |
| | разделением нагрузок расщепленными обмотками трансформаторов |
| | быстродействующими СТК |
| Снижение несинусоидальности напряжения | рациональным построением системы электроснабжения |
| | схемами коммутации нелинейных нагрузок |
| | корректирующими устройствами (ФКУ, АФ) |
| Снижение несимметрии напряжений | рациональным распределением нагрузки |
| | симметрирующими устройствами с электромагнитными связями (автотрансформаторы, трансформаторы) |
| | индуктивно-емкостными симметрирующими устройствами |
| | БК с неодинаковыми мощностями фаз |
| | трансформаторами с вращающимся магнитным полем |
| | введением добавочных ЭДС |

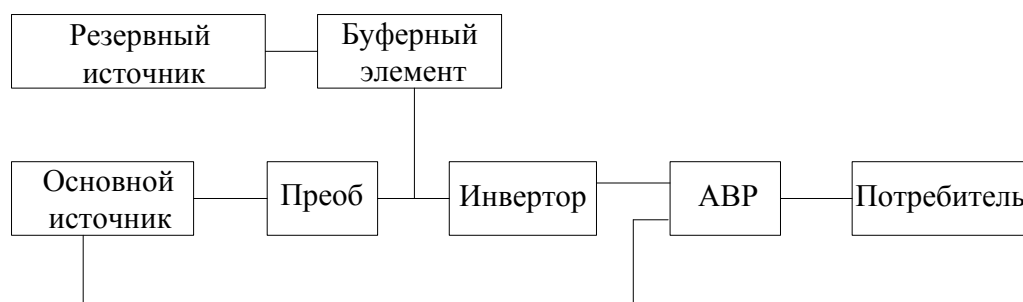


Рис. 4. Структурная схема системы бесперебойного питания

Показано, что резервные возобновляемые источники питания генерируют как постоянные, так и переменные напряжения, сильно отличающиеся по основным параметрам. Этот фактор значительно влияет на выбор типа и количество элементов структурной схемы.

Оптимальным вариантом может являться применение универсального преобразователя способного обеспечить сопряжение: цепей переменного тока; цепей постоянного тока с цепями переменного тока; цепей переменного тока с цепями постоянного. Причём входные и выходные параметры напряжений могут изменяться в широких допустимых диапазонах, т.е. универсальный преобразователь выполняет функции либо повышающего, либо понижающего преобразователя напряжений.

За счет применения предлагаемого устройства сопряжения разнородных источников структурная схема системы бесперебойного питания потребителей может быть минимизирована и стать универсальной – комплексное устройство сопряже-

ния, включающее в себя трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения (ТТРН) и универсальный преобразователь (УП) (рис.5).

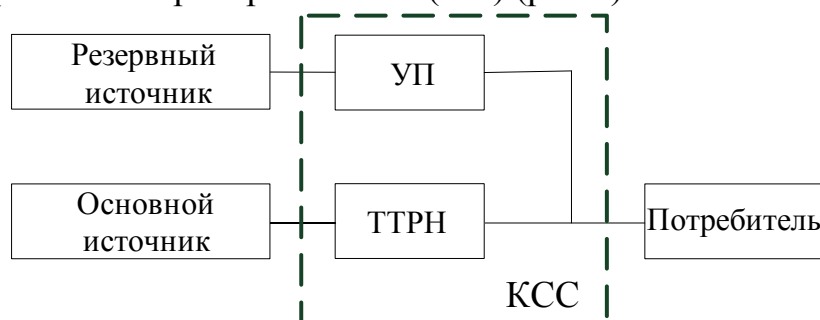


Рис. 5. Комплексная система сопряжения распределённого электропитания.

Основные функции УП - снижение нагрузки основного источника; компенсация реактивной мощности (поперечное регулирование), несинусоидальности напряжения и несимметрии токов нагрузки; .

Во второй главе приведены: анализ отечественных и зарубежных информационных источников, посвящённых исследованиям и разработкам оборудования для регулирования отдельных показателей качества параметров электрической энергии в сетях напряжением 6 – 35 кВ, которые содержат сетевые или специальные трансформаторы, конденсаторное и реакторное оборудование, полупроводниковые ключи; классификация бесконтактных тиристорных устройств РПН; решения построения ТТРН с цепями однонаправленных токов; разработка математических и имитационных моделей трансформаторно-тиристорного регулятора напряжений с ключами однонаправленных токов (ТТРН ОТ); результаты исследований, проведенных на моделях; рекомендации для проектирования ТТРН ОТ.

Показано, что в энергетических системах многих стран появляется необходимость поддержания баланса производства и потребления электроэнергии не только в энергосистеме в целом, но и в отдельных ее секторах. Эта необходимость связана с развитием и расширением частей энергосистемы, с недостаточной пропускной способностью линий электропередачи. Поддержание соответствия между потреблением и генерацией внутри регионов требует регулирования величины перетоков мощности. Снижение величины потерь в линиях электропередачи определяет установку электрогенерирующих установок в максимальном приближении к потребителю. Результатом является развитие малой распределённой энергетики и интеллектуальных электрических сетей напряжением 0,4 – 10 кВ, для реализации которых в узлах нагрузки требуется наличие устройств регулирования и сопряжения параметров качества электрической энергии, работающих в автоматическом режиме, основным узлом которых может являться трансформаторно-тиристорный регулятор на базе существующего или вновь разрабатываемого трансформаторного оборудования.

Предложено для повышения надёжности работы ТТРН за счёт снижения величины коммутационных токов тиристорных контакторов использовать трансформатор с расщеплёнными обмотками высокого напряжения и контактора с тиристорными ключами однонаправленного тока.

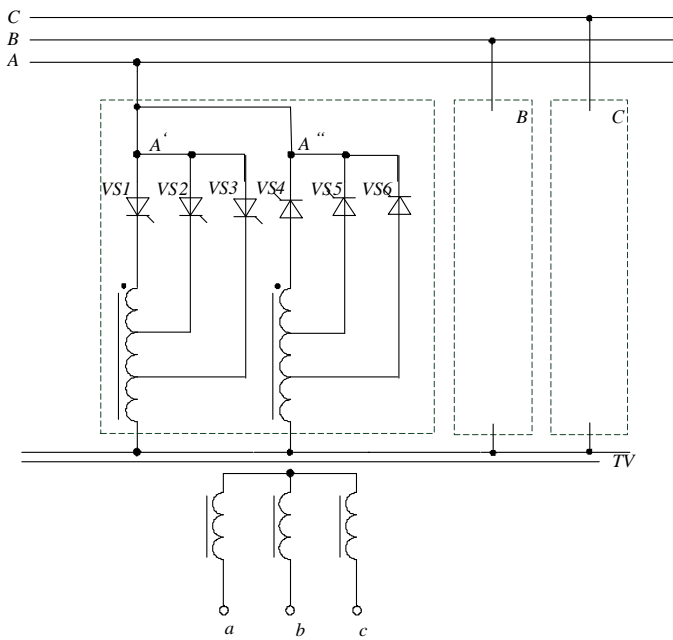


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема ТТРН ОТ

При разработке математической модели ТТРН ОТ использован общий метод режимных расчетов. В качестве математического аппарата применён метод структурного моделирования. Последовательность математических операций включила в себя: разработку схемы замещения электрической цепи трансформатора, магнитной цепи трансформатора; формирование систем уравнений электрической и магнитной цепей; разработка системы уравнений связи между электрической и магнитной системами.

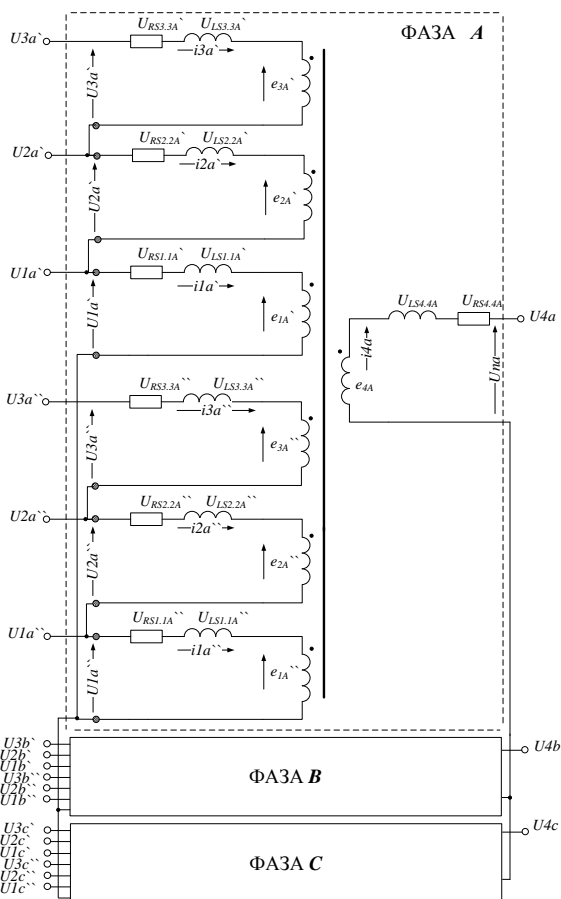


Рис. 7. Схема замещения электрической цепи силового трансформатора

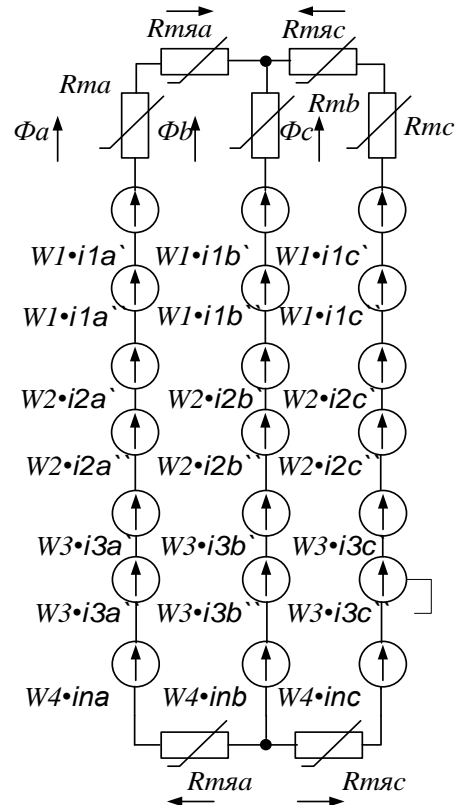


Рис. 8. Схема замещения магнитной цепи

$$\begin{aligned}
\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C &= 0; \\
w_1 i_{1A}' + w_1 i_{1A}'' + w_2 i_{2A}' + w_2 i_{2A}'' + w_3 i_{3A}' + w_3 i_{3A}'' + w_4 i_{HA} - w_1 i_{1B}' - w_1 i_{1B}'' - \\
&- w_2 i_{2B}' - w_2 i_{2B}'' - w_3 i_{3B}' - w_3 i_{3B}'' - w_4 i_{HB} = H_A (lc + 2l\alpha) - H_B lc; \\
w_1 i_{1B}' + w_1 i_{1B}'' + w_2 i_{2B}' + w_2 i_{2B}'' + w_3 i_{3B}' + w_3 i_{3B}'' + w_4 i_{HB} - w_1 i_{1C}' - w_1 i_{1C}'' - \\
&- w_2 i_{2C}' - w_2 i_{2C}'' - w_3 i_{3C}' - w_3 i_{3C}'' - w_4 i_{HC} = -H_C (lc + 2l\alpha) + H_B lc.
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
U_{LS2.2A} &\dot{=} -U_{2A} \dot{-} U_{RS2.2A} \dot{-} e_{2A} \dot{-}; U_{LS3.3A} \dot{=} -U_{3A} \dot{-} U_{RS3.3A} \dot{-} e_{3A} \dot{-}; \\
U_{LS1.1A} &\dot{=} -U_{1A} \dot{-} U_{RS1.1A} \dot{-} e_{1A} \dot{-}; \\
U_{LS2.2A} \ddot{=} &-U_{2A} \ddot{-} U_{RS2.2A} \ddot{-} e_{2A} \ddot{-}; U_{LS3.3A} \ddot{=} -U_{3A} \ddot{-} U_{RS3.3A} \ddot{-} e_{3A} \ddot{-}; \\
U_{LS1.1A} \ddot{=} &-U_{1A} \ddot{-} U_{RS1.1A} \ddot{-} e_{1A} \ddot{-}; \\
U_{LS2.2B} &\dot{=} -U_{2B} \dot{-} U_{RS2.2B} \dot{-} e_{2B} \dot{-}; U_{LS3.3B} \dot{=} -U_{3B} \dot{-} U_{RS3.3B} \dot{-} e_{3B} \dot{-}; \\
U_{LS1.1B} &\dot{=} -U_{1B} \dot{-} U_{RS1.1B} \dot{-} e_{1B} \dot{-}; \\
U_{LS2.2B} \ddot{=} &-U_{2B} \ddot{-} U_{RS2.2B} \ddot{-} e_{2B} \ddot{-}; U_{LS3.3B} \ddot{=} -U_{3B} \ddot{-} U_{RS3.3B} \ddot{-} e_{3B} \ddot{-}; \\
U_{LS1.1B} \ddot{=} &-U_{1B} \ddot{-} U_{RS1.1B} \ddot{-} e_{1B} \ddot{-}; \\
U_{LS2.2C} &\dot{=} -U_{2C} \dot{-} U_{RS2.2C} \dot{-} e_{2C} \dot{-}; U_{LS3.3C} \dot{=} -U_{3C} \dot{-} U_{RS3.3C} \dot{-} e_{3C} \dot{-}; \\
U_{LS1.1C} &\dot{=} -U_{1C} \dot{-} U_{RS1.1C} \dot{-} e_{1C} \dot{-}; \\
U_{LS2.2C} \ddot{=} &-U_{2C} \ddot{-} U_{RS2.2C} \ddot{-} e_{2C} \ddot{-}; U_{LS3.3C} \ddot{=} -U_{3C} \ddot{-} U_{RS3.3C} \ddot{-} e_{3C} \ddot{-}; \\
U_{LS1.1C} \ddot{=} &-U_{1C} \ddot{-} U_{RS1.1C} \ddot{-} e_{1C} \ddot{-}; \\
U_{LS4.4A} &= -U_{4A} - U_{RS4.4A} - e_{4A}; \\
U_{LS4.4B} &= -U_{4B} - U_{RS4.4B} - e_{4B}; \\
U_{LS4.4C} &= -U_{4C} - U_{RS4.4C} - e_{4C}.
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
e_{1(2)(3)ABC}^{(\sim)} &= -w_{1(2)(3)} \cdot \frac{d\Phi_{ABC}}{dt} + L_{S1.1(2.2)(3.3)pac} \cdot \frac{di_{1(2)(3)ABC}^{(\sim)}}{dt}; \\
e_{4ABC} &= -w_4 \cdot \frac{d\Phi_{ABC}}{dt} + L_{S4.4pac} \cdot \frac{di_{4ABC}}{dt} + L_{S4.4мех} \cdot \left(\frac{di_{4BCA}}{dt} + \frac{di_{4CAB}}{dt} \right),
\end{aligned} \tag{3}$$

Система уравнений фазы А в операторной форме

$$\left\{ \begin{aligned}
i_{2A}' &= \frac{U_{LS2.2A}'(p)}{pLS2.2}; \\
i_{3A}' &= \frac{U_{LS3.3A}'(p)}{pLS3.3}; \\
U_{LS2.2A}'(p) &= -U_{2A}'(p) - U_{RS2.2A}'(p) - e_{2A}'(p); \\
U_{LS3.3A}'(p) &= -U_{3A}'(p) - U_{RS3.3A}'(p) - e_{3A}'(p); \\
i_{1A}' &= \frac{U_{LS1.1A}'(p)}{pLS1.1}; \\
U_{LS1.1A}'(p) &= -U_{1A}'(p) - U_{RS1.1A}'(p) - e_{1A}'(p);
\end{aligned} \right. \left\{ \begin{aligned}
i_{2A}'' &= \frac{U_{LS2.2A}''(p)}{pLS2.2}; \\
i_{3A}'' &= \frac{U_{LS3.3A}''(p)}{pLS3.3}; \\
U_{LS2.2A}''(p) &= -U_{2A}''(p) - U_{RS2.2A}''(p) - e_{2A}''(p); \\
U_{LS3.3A}''(p) &= -U_{3A}''(p) - U_{RS3.3A}''(p) - e_{3A}''(p); \\
i_{1A}'' &= \frac{U_{LS1.1A}''(p)}{pLS1.1}; \\
U_{LS1.1A}''(p) &= -U_{1A}''(p) - U_{RS1.1A}''(p) - e_{1A}''(p); \\
i_{4A} &= \frac{U_{LS4.4A}(p)}{pLS4.4}; \\
U_{LS4.4A}(p) &= -U_{4A}(p) - U_{RS4.4A}(p) - e_{4A}(p).
\end{aligned} \right. \tag{4}$$

По полученным выражениям составлена структурная схема электрической цепи трансформатора фазы А (рис. 9)

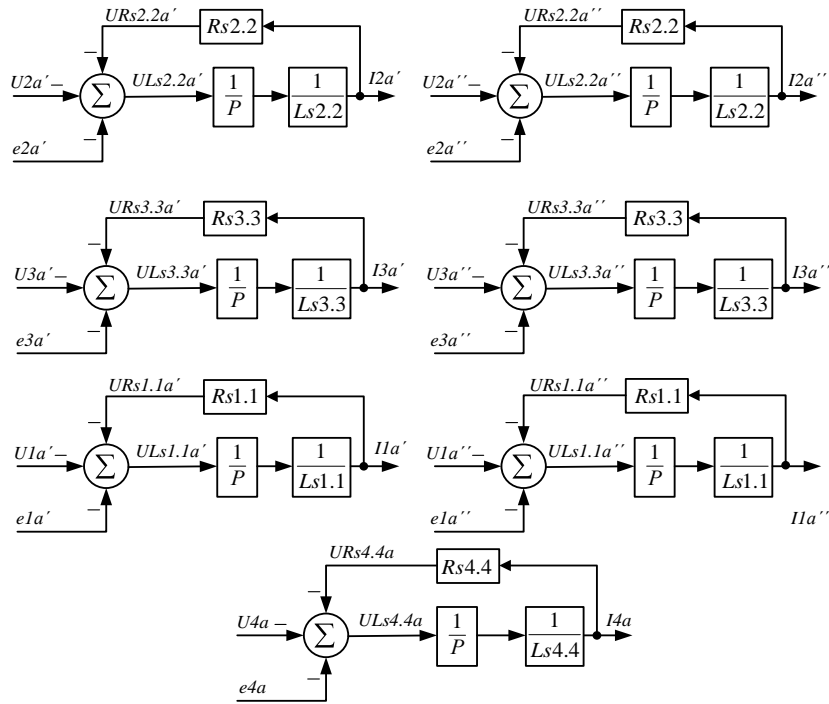


Рис. 9. Структурная схема электрической цепи трансформатора фазы А

Для построения структурной схемы магнитной цепи трансформатора система уравнений магнитных состояний отображена в операторной форме.

$$\Phi_A = -\Phi_B - \Phi_C;$$

$$B = f(H); \quad \Phi = B \cdot S;$$

$$H_A(p) = \frac{1}{lc + 2l\lambda} \cdot [w_1 i_{1A}^{\cdot}(p) + w_1 i_{1A}^{\cdot\cdot}(p) + w_2 i_{2A}^{\cdot}(p) + w_2 i_{2A}^{\cdot\cdot}(p) + w_3 i_{3A}^{\cdot}(p) + w_3 i_{3A}^{\cdot\cdot}(p) + w_4 i_{HA}(p) - w_1 i_{1B}^{\cdot}(p) - w_1 i_{1B}^{\cdot\cdot}(p) - w_2 i_{2B}^{\cdot}(p) - w_2 i_{2B}^{\cdot\cdot}(p) - w_3 i_{3B}^{\cdot}(p) - w_3 i_{3B}^{\cdot\cdot}(p) - w_4 i_{HB}(p)] + H_B(p)lc; \quad (5)$$

$$H_B(p) = \frac{1}{lc} \cdot [w_1 i_{1B}^{\cdot}(p) + w_1 i_{1B}^{\cdot\cdot}(p) + w_2 i_{2B}^{\cdot}(p) + w_2 i_{2B}^{\cdot\cdot}(p) + w_3 i_{3B}^{\cdot}(p) + w_3 i_{3B}^{\cdot\cdot}(p) + w_4 i_{HB}(p) - w_1 i_{1C}^{\cdot}(p) - w_1 i_{1C}^{\cdot\cdot}(p) - w_2 i_{2C}^{\cdot}(p) - w_2 i_{2C}^{\cdot\cdot}(p) - w_3 i_{3C}^{\cdot}(p) - w_3 i_{3C}^{\cdot\cdot}(p) - w_4 i_{HC}(p)] + H_C(p)(lc + 2l\lambda),$$

На основании полученных выражений построена структурная схема магнитной цепи трансформатора (рис. 10), входными параметрами которой являются токи обмоток трансформатора, а выходными – магнитные потоки. Выражения (3), определяющие взаимосвязи электрической и магнитной схем замещения, позволяют реализовать полную схему замещения (рис.11) трансформатора, нелинейность магнитной системы которого учитывается с помощью кусочно-линейной интерполяции заданной таблично основной кривой намагничивания трансформаторной стали 3404.

Управляемые вентили представлены в виде последовательной цепи: идеально-го ключа, управляемого логическим сигналом; дифференциального сопротивления

прямой ветви ВАХ – $R_{пр}$; источника постоянного напряжения $U_{п}$, определяющего пороговое напряжение и условий запирания по нулевому значению тока. Неуправляемые вентили представлены аналогичной моделью с условиями проводимости, определяемыми напряжением $U_{ак}$ и током $I_{ак}$.

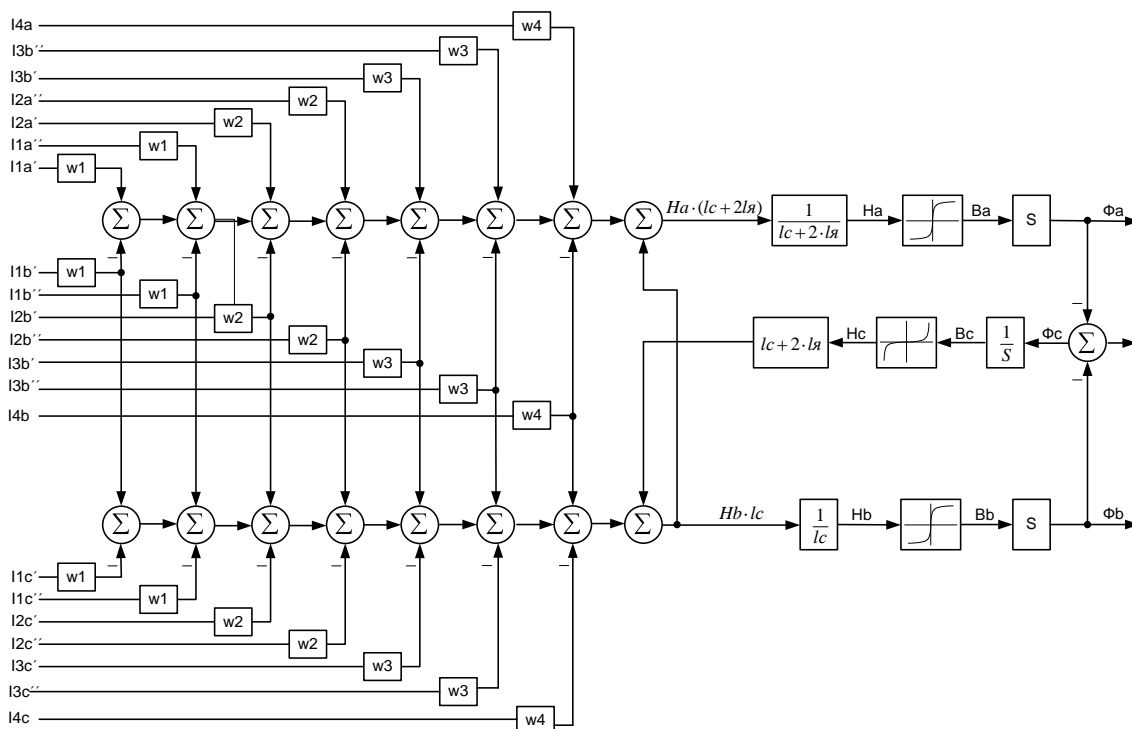


Рис. 10. Структурная схема магнитной цепи трансформатора

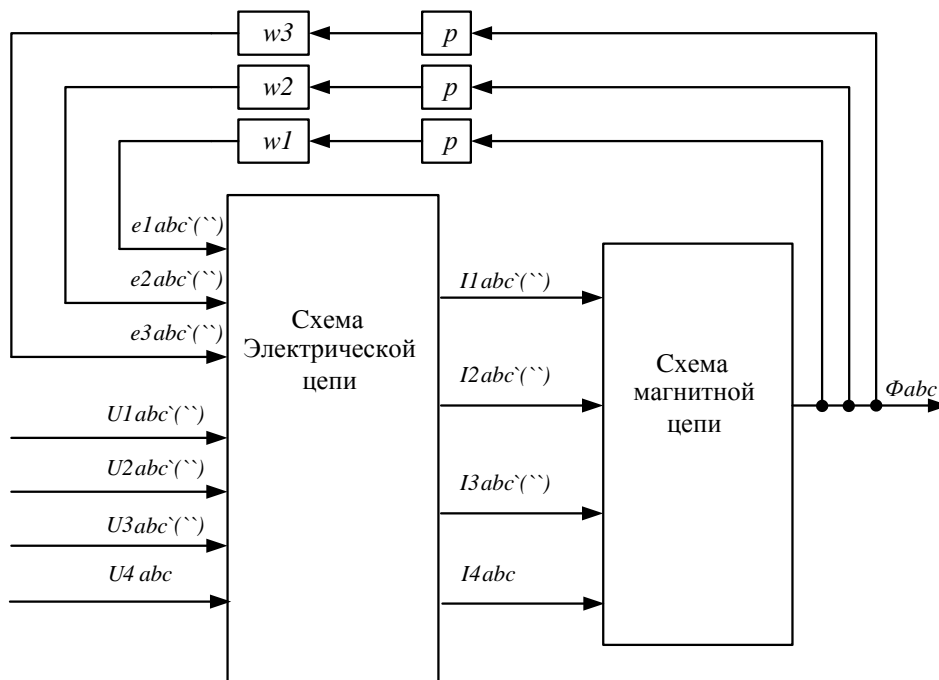


Рис. 11. Структурная схема модели трансформатора

Кабельная линия представляется последовательным соединением активного и индуктивного сопротивления R_e и X_e .

Разработанная математическая модель позволила построить имитационную модель, предназначенную для проведения исследований статических и динамических режимов ТТРН ОТ, определения оптимальных параметров элементов установки, выработки рекомендаций для определения структуры и алгоритмов работы системы управления. В качестве программного комплекса используется язык программирования для решения технических задач Matlab и интегрированная в него система имитационного моделирования Simulink. Выбор программного пакета Matlab обусловлен его преимуществами перед остальными программными средствами вычислений (GAUSS, Maple, Mathematica и другими), поскольку он обладает наиболее широкой библиотекой имитационных моделей по структуре аналогичных структурным моделям уравнений, описывающих электрические и электромагнитные объекты, а также высокой скоростью вычислений и устойчивостью процессов расчета.

В процессе проведения исследований подтверждена достоверность предварительных прогнозов характера протекания электромагнитных процессов ТТРН ОТ.

На рис. 12 - 16 и в табл. 2 приведены основные результаты для установленной мощности трансформатора 1000 кВА с напряжением обмоток 10/0,4 кВ и напряжением регулировочной ступени 10% номинального напряжения, которое возможно при установке тиристорных ключей на крайние отводы регулировочных обмоток трансформатора с типовым диапазоном регулирования $\pm 5\%$.

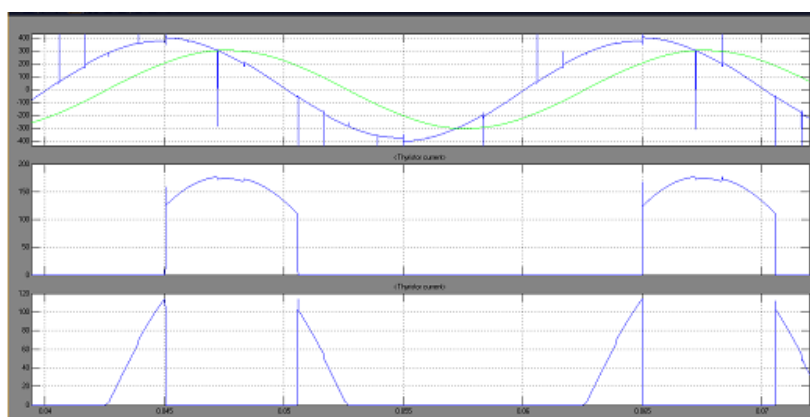


Рис. 12. Диаграммы напряжения и тока нагрузки, токов тиристоров в процессе регулирования

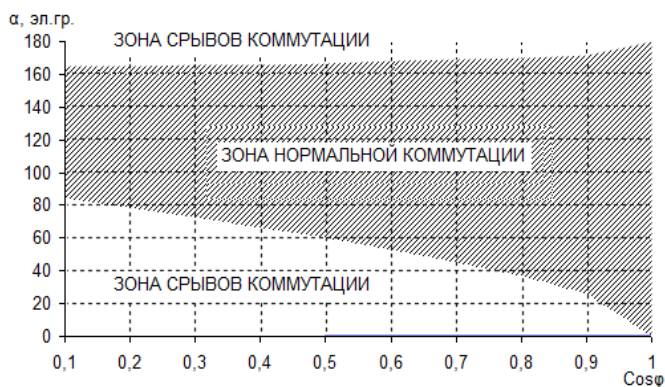


Рис. 13. Зависимость значений критических углов регулирования в режиме повышения напряжения от фазового угла нагрузки



Рис. 14. Зависимость значений критических углов регулирования в режиме понижения напряжения от фазового угла нагрузки

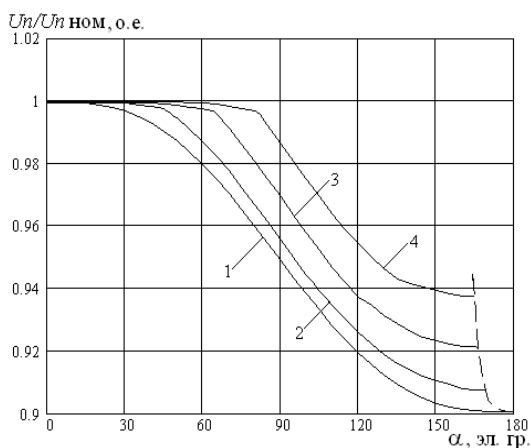


Рис. 15. Регулировочная характеристика в зависимости от характера нагрузки:

1 – $\cos\varphi = 1$; 2 – $\cos\varphi = 0,7$;
3 – $\cos\varphi = 0,4$; 4 – $\cos\varphi = 0,1$

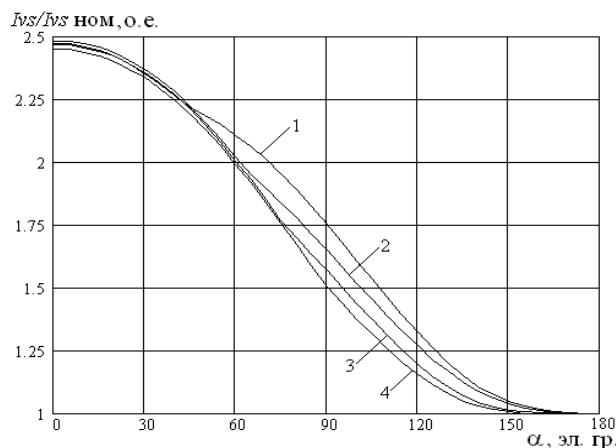


Рис. 16. Величина токовых перегрузок в зависимости от угла управления и характера нагрузки:

1 – $\cos\varphi = 1$; 2 – $\cos\varphi = 0,7$;
3 – $\cos\varphi = 0,4$; 4 – $\cos\varphi = 0,1$

Таблица 2 Максимальные значения амплитуд высших гармонических составляющих выходного напряжения ТТРН ОТ и сетевого тока

| Параметр | Характер нагрузки, $\cos\varphi$ | Максимальные значения амплитуд высших гармоник в % от амплитуды первой гармоники | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|--|-----|-----|-------|------|
| | | 3-я | 5-я | 7-я | 9-я | 11-я |
| - напряжение на выходе регулятора | 1 | 0,003 | 1,5 | 1,2 | 0,003 | 0,7 |
| | 0,7 | 0,005 | 2,4 | 1,6 | 0,005 | 1,1 |
| | 0,4 | 0,004 | 2,7 | 1,9 | 0,004 | 1,2 |
| | 0,1 | 0,004 | 2,7 | 1,9 | 0,004 | 1,2 |
| - сетевой ток | 1 | 0,007 | 2,9 | 2,2 | 0,006 | 1,3 |
| | 0,7 | 0,01 | 1,9 | 1,3 | 0,01 | 0,7 |
| | 0,4 | 0,006 | 1,8 | 1,3 | 0,006 | 0,7 |
| | 0,1 | 0,006 | 1,8 | 1,3 | 0,006 | 0,7 |

По результатам анализа данных исследований установлено:

- ТТРН ОТ обеспечивает ступенчатое регулирование напряжения и плавное в пределах регулировочной ступени;
- при дискретном регулировании напряжения и различном характере нагрузки коммутационные процессы не сопровождаются протеканием коммутационных сверхтоков;
- максимальная величина коммутационного тока по отношению к номинальному определяется кратностью напряжения ступени к напряжению короткого замыкания трансформатора;
- при импульсно-фазовом (плавном) способе регулирования и переключении на повышение напряжения длительность коммутации не превышает 0,1 мс при любом характере нагрузки;
- при активной нагрузке переключение тиристорov можно осуществлять с любым углом отпирания без срывов коммутации;

- при активно-индуктивной нагрузке определение угла отпирания тиристорov в режиме плавного регулирования должно производиться с учетом критических углов коммутации;

- при некорректной установке углов отпирания тиристорov срывы коммутационных процессов не приводят к аварийным режимам работы трансформатора и полупроводниковых приборов;

По результатам исследований определены:

- зоны углов управления тиристорами с устойчивой коммутацией;

- зависимости значений критических углов регулирования от фазового угла нагрузки;

- регулировочные характеристики напряжения на зажимах электроприемников и зависимости сетевых токов от угла коммутации вентилей и характера нагрузки;

- амплитуды высших гармонических составляющих токов питающей сети, выходного напряжения регулятора (анализ проводился до 11-ой гармоники включительно), не превышающие предельно допустимых значений по ГОСТ 54149 – 2010.

В третьей главе рассмотрены актуальные задачи применения нового поколения активного силового оборудования - унифицированных систем управления энергопотоками UPFC.

Положения Концепции развития интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью, разработанные в 2011 г. по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» ОАО «НТЦ электроэнергетики» с привлечением ряда отраслевых и академических институтов, можно объединить единой целью - разработка интеллектуальной активно – адаптивной сети, т.е. совокупности подключенных к генерирующим источникам и потребителям энергии элементов электрических сетей и систем управления, обеспечивающих автоматическое управление и регулирование электрических параметров взаимодействующих объектов в различных режимах работы.

Бурное развитие силовой полупроводниковой техники, возобновляемых источников электрической энергии, информационных технологий позволяют построить универсальное устройство, объединяющее функции уже существующих: параллельные устройства компенсации реактивной мощности; последовательные устройства регулирования параметров сети; устройства, сочетающие функции первых двух групп – продольно-поперечного включения; устройства ограничения токов короткого замыкания; последовательные и параллельные активные фильтры высших гармонических составляющих тока сети; накопители электрической энергии; преобразователи рода тока: переменный ток - в постоянный; постоянный ток - в переменный).

Как показывает анализ мирового развития производства и практического применения генерирующих установок на базе возобновляемых источников энергии, наиболее перспективными на настоящий момент являются ветроэлектростанции (ВЭГ) установки и с точки зрения полноты технических проработок, и с точки зрения стоимости произведённой электроэнергии. Известно, что параметры выходного напряжения возобновляемых источников энергии могут быть нестабильны, но применение современных компьютерных технологий систем управления адаптив-

ными устройствами силовой электроники – активно-адаптивного универсального преобразователя напряжений на базе UPFC позволяют решить эту проблему.

Выбор алгоритма работы УП определяется набором выполняемых функций, обеспечивающих бесперебойность электроснабжения с требуемыми параметрами качества напряжения.

Общие функции УП: определение характера и выходных параметров основного и резервных источников питания; определение параметров емкостных накопителей электрической энергии; определение режимов работы составных частей УП; контроль параметров аварийных режимов работы УП; прогнозирование параметров выходного напряжения УП; подключение основного или резервного источника питания; оптимизация величины выходной мощности основного или резервного источников питания.

Основным элементом, требующим исследований является универсальный преобразователь параметров напряжения, обеспечивающий возможность подключения к входным цепям как источников переменного, так и источников постоянного напряжения, формируя при этом на выходе трехфазное напряжение 380 В частотой 50 Гц. В качестве основного базового элемента универсального преобразователя выбран трехфазный инвертор напряжения, обеспечивающий работу в режимах активного выпрямителя и инвертора напряжения (AC/DC; DC/AC).

Для расширения функциональных возможностей инвертора напряжения использованы материалы патента на полезную модель автора № 125407 «Устройство заряда накопительных конденсаторов» опубликованные 27.02.2013 Бюл. №6 (рис.17).

Общая структура преобразователя строится при этом по принципу двойного преобразования с промежуточным звеном постоянного тока. Модифицированная схема инвертора напряжения обеспечивает заряд емкостного накопителя в режимах активного выпрямителя переменного напряжения или конвертора постоянного напряжения в зависимости от типов основного и резервного возобновляемого источника энергии, а базовая схема инвертора напряжения работает в штатном режиме, обеспечивая гарантированное питание потребителей стабилизированным напряжением (ACDC/DC/AC).

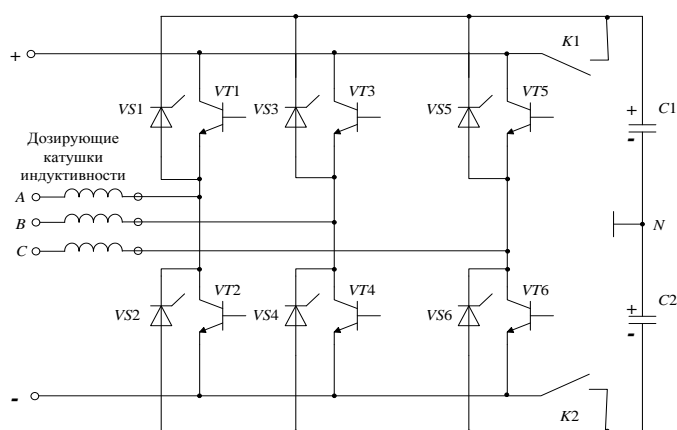


Рис 17. Схема модифицированного инвертора

Для обеспечения управления и синхронизации рабочих параметров элементов универсального преобразователя с параметрами ВИЭ и потребителей предложено построить систему управления на базе промышленного компьютера с применением пакета прикладных программ Matlab, включающего в себя специальные блоки библиотеки моделей Simulink и систему реального времени Real-Time Windows Target. Автоматическая генерация Real Time Windows Target испол-

няемого кода гарантирует отсутствие ошибок ручного программирования, обеспечивает широкие возможности для последующего циклического тестирования. Для отладки разрабатываемой системы управления преобразователем могут применяться: программное моделирование “Software in the Loop”; процессорно-программное моделирование “Processor in the Loop”; аппаратно-программное моделирование “Hardware in the Loop”. Комплекс указанных действий формирует интерактивный процесс разработки прототипа системы управления (рис.18).

Применение гибкой конфигурации прототипа системы управления УП открывает большие возможности по созданию новых алгоритмов для систем управления и их последующей отладки.

Обеспечение интерактивного процесса проектирования на первом этапе требует построения математического аппарата, позволяющего минимизировать время выполнения расчётов при проведении имитационных исследованиях.

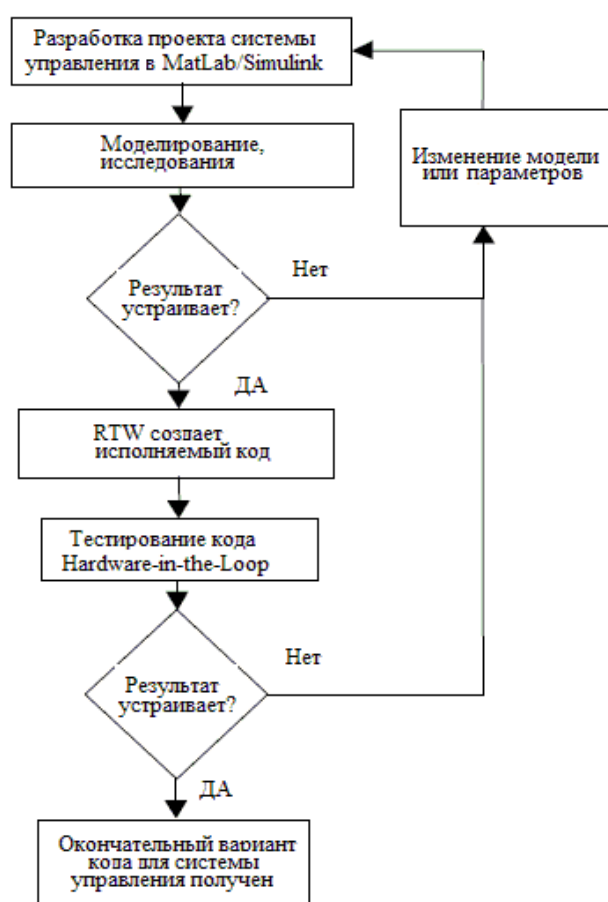


Рис. 18. Интерактивный процесс разработки прототипа системы управления

Любую несимметричную трёхфазную систему координат можно представить в виде трёх систем: нулевой, прямой и обратной последовательности фаз. При преобразовании несимметричной трёхфазной системы a, b, c в комплексную α, β, γ , параметр x_γ - определяет нулевую составляющую, а параметры x_α, x_β - прямую и обратную последовательности.

В трёхфазной четырехпроводной системе электропитания с нулевым проводом с учетом токов нулевой последовательности система фазных напряжений описывается уравнениями (6).

Использование матрицы преобразования Кларка для трёхфазных напряжений и токов позволяет сформировать соответствующие векторы для произвольного момента времени на комплексной плоскости α, β, γ .

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2}U_+ \sin(\omega t + \varphi_{u+}) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \varphi_{u0}) \\ u_b = \sqrt{2}U_+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{u+}) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \varphi_{u0}) \\ u_c = \sqrt{2}U_+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{u+}) + \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t + \varphi_{u0}) \end{cases}, \quad (6)$$

где U_0 - действующее значение напряжения нулевой последовательности фаз;
 φ_{u0} - фазовый угол сдвига напряжения нулевой последовательности фаз, от произвольного начала отсчёта.

Система фазных токов:

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \varphi_{i+}) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \varphi_{i0}) \\ i_b = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{i+}) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \varphi_{i0}) \\ i_c = \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{i+}) + \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \varphi_{i0}) \end{cases} \quad (7)$$

где I_0 - действующее значение тока нулевой последовательности фаз; φ_{i0} - фазовый угол сдвига тока нулевой последовательности фаз от произвольного начала отсчёта.

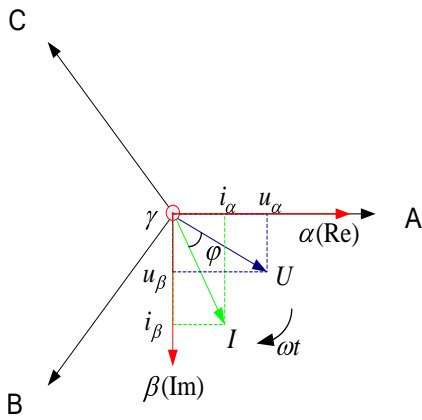


Рис. 19. - Векторы трёхфазного напряжения и тока в системе α, β, γ координат

Векторы напряжения и тока сдвинуты относительно друг друга на фазовый угол сдвига φ и синхронно вращаются в направлении по часовой стрелки (рис. 19). Составляющие полной мгновенной мощности представляются как:

мгновенная активная мощность

$$p = \vec{u}_{\alpha\beta\gamma} \cdot \vec{i}_{\alpha\beta\gamma} = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta + u_\gamma i_\gamma; \quad (8)$$

мгновенная реактивная мощность (9, 10)

$$\vec{q} = \vec{u}_{\alpha\beta\gamma} \times \vec{i}_{\alpha\beta\gamma} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{vmatrix} u_\beta & u_\gamma \\ i_\beta & i_\gamma \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} u_\gamma & u_\alpha \\ i_\gamma & i_\alpha \end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{vmatrix} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$|\vec{q}| = \sqrt{q_\alpha^2 + q_\beta^2 + q_\gamma^2}. \quad (10)$$

В матричном виде мгновенная передаваемая мощность представлена как:

$$\begin{bmatrix} q_\gamma \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u_\beta & u_\alpha & 0 \\ 0 & -u_\gamma & u_\beta \\ u_\gamma & 0 & -u_\alpha \\ u_\alpha & u_\beta & u_\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Соответственно матрица токов -

$$\begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} \begin{bmatrix} u_\gamma & u_\beta & -u_\alpha & 0 \\ u_\alpha & 0 & u_\gamma & -u_\beta \\ u_\beta & -u_\gamma & 0 & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_\gamma \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $U_{\alpha\beta\gamma}^2 = u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_\gamma^2$.

Каждую проекцию вектора тока в α, β, γ системе координат, можно условно разделить на активную и реактивную составляющую:

$$\text{Мгновенный ток нулевой последовательности: } i_\gamma = i_{\gamma p} + i_{\gamma q}. \quad (13)$$

Активная составляющая мгновенного тока нулевой последовательности:

$$i_{\gamma p} = \frac{u_\gamma}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} p. \quad (14)$$

Реактивная составляющая мгновенного тока нулевой последовательности:

$$i_{\gamma q} = \frac{u_\beta}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} q_\alpha - \frac{u_\alpha}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} q_\beta. \quad (15)$$

$$\text{Мгновенный ток в проекции на ось } \alpha: i_\alpha = i_{\alpha p} + i_{\alpha q}. \quad (16)$$

Активная составляющая мгновенного тока в проекции на ось α :

$$i_{\alpha p} = \frac{u_\alpha}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} p. \quad (17)$$

Реактивная составляющая мгновенного тока в проекции на ось α :

$$i_{\alpha q} = \frac{u_\gamma}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} q_\beta - \frac{u_\beta}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} q_\gamma. \quad (18)$$

$$\text{Мгновенный ток в проекции на ось } \beta: i_\beta = i_{\beta p} + i_{\beta q}. \quad (19)$$

Активная составляющая мгновенного тока в проекции на ось β :

$$i_{\beta p} = \frac{u_\beta}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} p. \quad (20)$$

Реактивная составляющая мгновенного тока в проекции на ось β :

$$i_{\beta q} = \frac{u_\alpha}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} q_\gamma - \frac{u_\gamma}{U_{\alpha\beta\gamma}^2} q_\alpha. \quad (21)$$

Такое разложение вектора тока позволяет строить гибкие системы управления и перераспределения направлений потоков мощности между источником и нагрузкой. За счёт исключения полностью или частично нежелательных составляющих в мгновенной передаваемой мощности, возможно формирование компенсационных токов на выходе УП, по требуемому закону. На рис. 20 представлена структурная схема системы формирования компенсационных токов.



Рис. 20. - Структурная схема системы формирования токов УП

работы устройства в двух режимах питания: работа на нагрузку при питании от резервного источника переменного тока – режим AC-DC-AC; работа на нагрузку при питании от источника постоянного тока (ветроэлектрогенератора, топливных элементов и т.п.) – режим DC-DC-AC.

Схема силовой части УП (рис. 21), на которой состояние механических ключей соответствует режиму питания от источника переменного трёхфазного напряжения (E_A, E_B, E_C).

Модель (рис.22) как и физический прототип содержит основные части: универсальный и типовой инверторы напряжения; емкостной накопитель (конденсаторные и аккумуляторные батареи); систему автоматического управления; нагрузку, Пакет Simulink позволяет динамически изменять параметры отдельных подсистем по ранее установленным зависимостям.

В режиме AC-DC-AC инвертор А1 выполняет функцию активного выпрямителя, работающего на емкостную нагрузку (конденсаторы С4-С7, аккумуляторные батареи G1 и G2 и инвертор А2).

В режиме DC-DC-AC инвертор А1 выполняет функцию преобразователя постоянного напряжения в постоянное (конвертора), работающего на ту же нагрузку. Система управления (Control System) имеет входы задания активных I_d и реактивных I_q составляющих токов, формируемых на выходе УП. Принято, что «1» на управляющем входе задания соответствует пассивному состоянию УП по отношению к основной питающей сети (регулирование, компенсация запрещены), а «0» - полной компенсации составляющей. Все остальные значения определяют коэффициент подавления соответствующей составляющей.

Для сокращения времени, затрат на проектирование и отладку УП необходимо создание его компьютерной модели, позволяющей проводить имитацию (виртуальное представление) в нем электрических процессов. Модели обеспечивают определение оптимальных параметров элементов и режимов работы. Имитационные модели элементов УП строились с использованием стандартных блоков из библиотек Simulink, SimPowerSystem, Signal Processing Blockset и других, обеспечивающих исследования

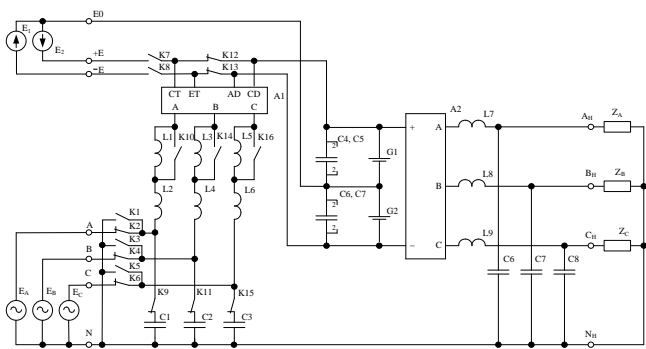


Рис. 21. Схема силовой части универсального преобразователя

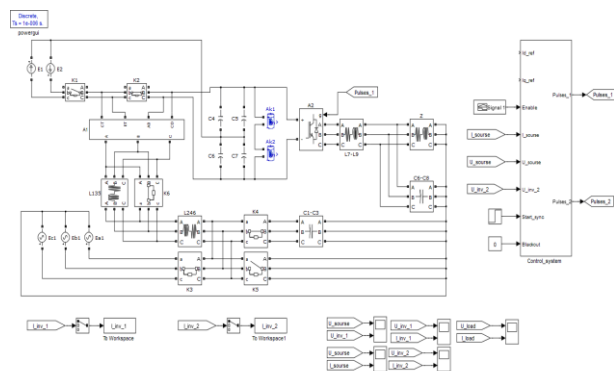


Рис. 22. Структура модели преобразователя в среде Simulink в режиме AC-DC- AC

Установленные величины задания в диапазоне от «1» до «2» переводят УП в режим потребления мощности. По отношению к реактивной составляющей тока сети УП выполняет функцию регулируемой компенсации (генерации) реактивной мощности. По сформированным активной и реактивной составляющим определяется полный ток на выходе УП. При нулевых значениях задания величина его соответствует первой гармонической составляющей тока основной сети. Полученные мгновенные значения тока могут быть использованы в качестве образцовой величины для выделения высших гармонических составляющих тока сети, что даёт возможность сформировать высшие гармонические составляющие токов в противофазе сетевым, т.е. поглотить их или осуществить фильтрацию.

Определено соответствие характера генерируемых (потребляемых) мощностей выходных цепей УП по отношению к величине заряда емкостного накопителя: генерируемая активная мощность - режим разряда емкостного накопителя; потребляемая активная мощность — режим заряда; генерируемая реактивная мощность — режим заряда; потребляемая реактивная мощность — режим разряда.

Данная закономерность при ограниченной емкости накопителя и выполнении условия поддержания постоянства напряжения на нём определяет соответствие характеристик токов и мощностей входных и выходных цепей УП, установленного между двумя независимыми линиями электропередачи, т.е. фактически определяет направления управляемых перетоков мощности. В таком случае следует установить взаимосвязи двух инверторов УП в системе взаимодействия по цепям управления. Инвертор, подсоединённый к основной питающей сети, принят «ведущим», т.к. его функциональное назначение является основным — оптимизация параметров основной сети. Модифицированный инвертор — «подчинённым».

Четвёртая глава посвящена вопросам исследования процессов регулирования параметров напряжения и токов КСС при параллельной работе ТТРН ОТ и УП с промышленной сетью 0,4 кВ. Исследования проводились в пакете прикладных программ Matlab с использованием моделей, рассмотренных в предыдущих главах.

Трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения с ключами однонаправленного тока.

Отечественной промышленностью выпускаются типовые силовые трансформаторы на напряжения 6/0,4 кВ и 10/0,4 кВ, которые имеют ступени регулирования $\pm 2 \times 2,5\%$ или $\pm 2,5\%$ величины номинального напряжения. Поэтому при исследованиях приняты величины напряжений регулировочных обмоток ТТРН ОТ соответ-

ственно 5% и 2,5%. При определении задач исследования учитывались факторы режимов работы трансформаторного оборудования в реальных сетях электроснабжения низкого напряжения. Двухтрансформаторные подстанции имеют радиальные схемы подключения потребителей, а в случае однотрансформаторных подстанций возможен вариант параллельной работы на общую нагрузку двух удалённых трансформаторов. Рассмотрен вариант работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения с удалённым трансформатором, имеющим одинаковые параметры с трансформатором ТТРН ОТ для двух вариантов величин напряжений регулировочных обмоток. В процессе определения взаимосвязи параметров выходных цепей обоих трансформаторов и нагрузки выявлены закономерности управления величинами потоков мощности отдельных участков рассматриваемой электрической сети в зависимости от величины углов управления тиристорами ТТРН. Фактически изучаемые процессы являются частными случаями регулирования величины перетоков мощности за счет изменения активной и реактивной составляющих. Управление перетоком реактивной мощности между ТТРН ОТ и неуправляемым трансформатором определяется классически. При превышении значения выходного напряжения ТТРН ОТ по отношению к напряжению в линии формируется опережающий ток. В этом случае ТТРН ОТ работает в емкостном режиме по отношению к участку сети второго трансформатора и происходит генерация реактивной мощности. При уменьшении значения выходного напряжения ниже напряжения в линии формируется отстающий ток и потребление реактивной мощности. Некоторые данные результатов моделирования при типовом значении $\cos \varphi = 0,7$ нагрузки показаны на рис.23 – 27.

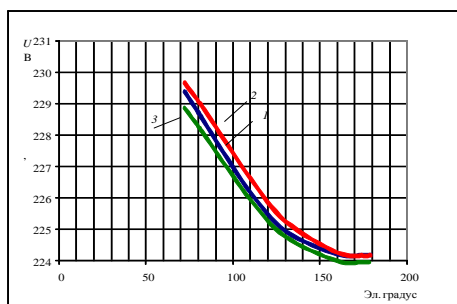


Рис.23. – Зависимость выходных напряжений трансформаторов и напряжения нагрузки от углов регулирования

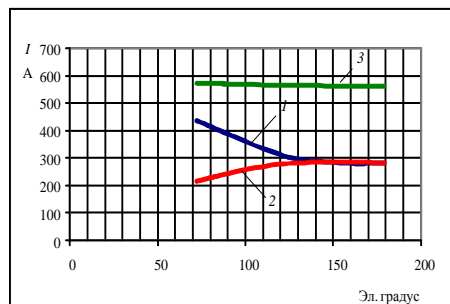


Рис. 24. Зависимость величин выходных токов трансформаторов и тока нагрузки от углов регулирования

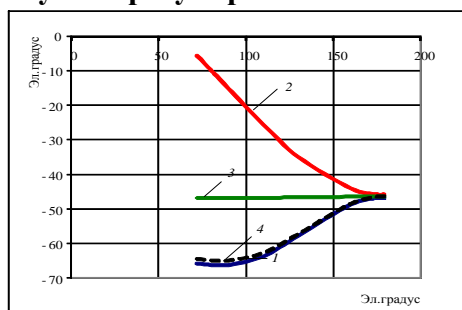


Рис. 25. – Зависимость величин фазовых углов сдвига первых гармоник токов

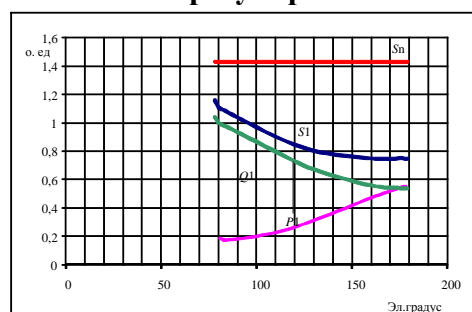


Рис. 26. – Зависимость полной мощности ТТРН ОТ и ее составляющих

Установлено, что при изменении величины напряжения ступени (2,5%, 5%) все характеристики идентичны и могут быть трансформированы путем пропорциональ-

ного изменения значений функций (1- параметры ТТРН ОТ, 2 – параметры нерегулируемого трансформатора, 3 - параметры нагрузки). Сравнительные характеристики величин высших гармонических составляющих токов сети ТТРН ОТ приведены на рис. 27 а, б для 3, 5, 7, 9 гармоник в зависимости от изменения значения угла регулирования тиристорами. Высшие гармонические составляющие токов, генерируемые ТТРН ОТ, в комплексном устройстве сопряжения могут быть компенсированы универсальным преобразователем, выполняющим функцию активного фильтра. С целью упрощения алгоритмов управления УП предлагается осуществлять регулирование напряжения с помощью ТТРН ОТ с дискретной градацией углов регулирования α в пределах напряжения регулировочной ступени. Количество установленных значений углов α на интервале регулирования определяется в каждой конкретной сети в зависимости от требуемой точности регулирования напряжения сети.

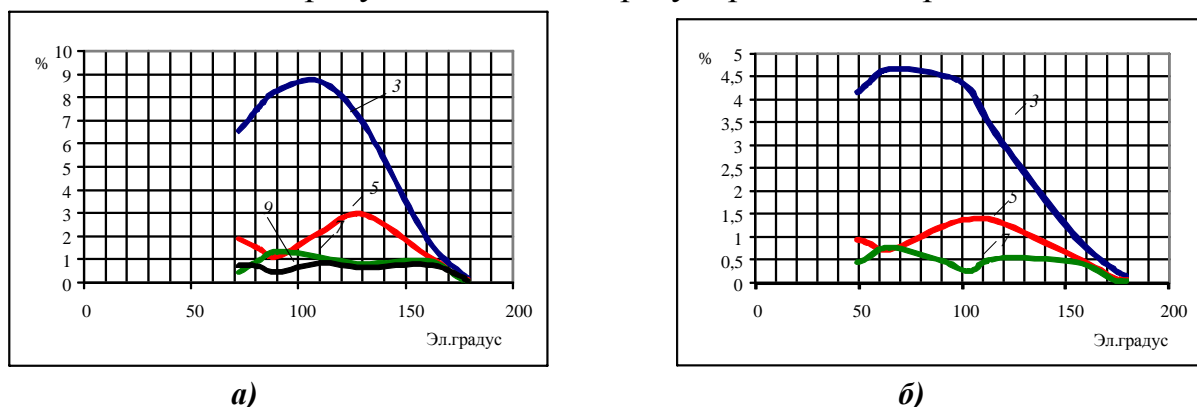


Рисунок 27. Величины токов высших гармонических составляющих токов ТТРН ОТ:
а – ступень регулирования 5%; б – ступень регулирования 2,5%

Такой подход даёт возможность заранее определить гармонический состав токов и обеспечить условия их компенсации на стадии проектирования УП. С этой целью проведён полный анализ высших гармонических составляющих, генерируемых ТТРН ОТ, в зависимости от величины углов коммутации тиристоров - α (рис.28) . В режиме плавного регулирования в каждый полупериод сетевого напряжения тиристорный коммутатор производит два переключения отводов регулировочных обмоток: в направлении понижения напряжения на интервале отрицательной мощности (α_1); в направлении на повышение напряжения на интервале положительной мощности (α_2).

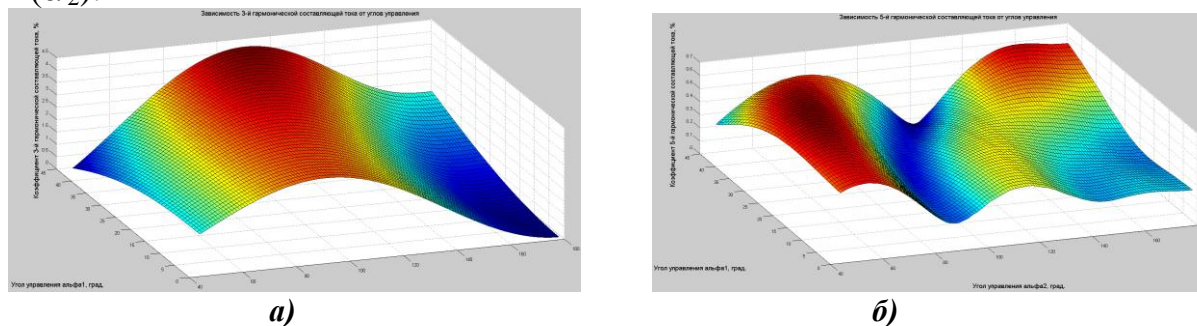


Рис. 28. Высшие гармонические составляющие токов нагрузки ТТРН ОТ:
а – 3 гармоника; б – 5 гармоника;

Универсальный преобразователь.

Основные функции универсального преобразователя в комплексном устройстве сопряжения: согласование параметров источников с различными параметрами

выходных напряжений; компенсация реактивной мощности сети и высших гармонических составляющих тока сети; симметрирование токов трёхфазных сетей.

УП в питающей сети подключается параллельно выходным цепям силового трансформатора или нагрузки и выполняет поперечное регулирование. При подключении УП к первичным обмоткам сериесного трансформатора, установленного в разрыв линии электропередач – продольное регулирование. Основные принципы обоих способов регулирования достаточно изучены.

Универсальный преобразователь разрабатывался как интеллектуальное активно-адаптивное устройство, обладающее способностью самонастраиваться по параметрам использованного резервного источника питания. При ограниченной электрической ёмкости емкостного накопителя для обеспечения устойчивой работы УП необходимо соблюдение стабильности напряжения на нём. Это определило направление разработки алгоритмов работы, устанавливающих соотношение активных и реактивных составляющих сгенерированной и потреблённой мощностей УП. Соответственно, инвертор, осуществляющий заданный закон компенсации или регулирования определён как ведущий, а инвертор, обеспечивающий поддержание неизменным напряжения на емкостном накопителе – ведомым.

Необходимо отметить, что генерация реактивной мощности в сеть приводит к разряду емкостного накопителя в промежуточной цепи постоянного тока, а потребление реактивной мощности – к его заряду.

Выявлена закономерность, позволяющая при помощи геометрических построений для заданной степени компенсации реактивной мощности в основной питающей сети определять величину и характер токов, потребляемых от резервного источника питания переменного напряжения. Графическое отображение указанного способа приведено на рис.29.

По вертикальной (мнимой) оси откладывается реактивная составляющая генерируемого тока, по горизонтальной – активная. Вектор I соответствует полной компенсации тока сети, т.е. нагрузка питается от резервного источника. Глубина компенсации регулируется изменением соответствующей составляющей.

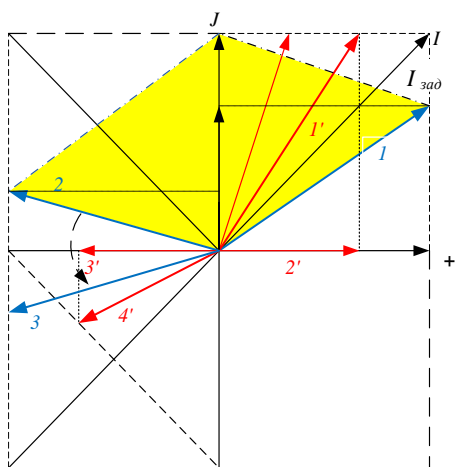


Рис. 29. Определение потребляемых составляющих токов УП по заданной величине генерируемого тока

В случае полной компенсации активной мощности и регулируемой реактивной, токи ведомого инвертора определяются по «правилу параллелограмма» и отображены на рисунке в последовательности 1, 2, 3.

При регулировании компенсации активной составляющей и неизменной реактивной конец вектора тока ведомого инвертора определяется на геометрическом месте точек в третьем квадранте, представляющем диагональ между предельными значениями отрицательных величин токов ведущего инвертора (1', 2', 3', 4').

Неизменное значение величины напряжения на емкостном накопителе может быть достигнуто при параллельном включении в его

структуре аккумуляторной батареи большой электрической ёмкости и конденсаторов. Такое решение позволяет осуществлять независимое регулирование компенсационных токов ведущего и ведомого инверторов.

Комплексное устройство сопряжения, построенное на базе ТТРН ОТ и универсального преобразователя позволяет осуществить интегрирование различных источников малой энергетики с ЕНЭС при минимальном количестве разнотипного установленного оборудования.

Пятая глава посвящена определению параметров источников питания распределённой сети с использованием КСС. Следует обратить внимание на то, что при интеграции КСС в структуры схем электропитания возможны два варианта: установка оборудования новой электрической подстанции; модернизация подстанции с уже имеющимся оборудованием. В первом случае устанавливается КСС с ТТРН ОТ и УП. Во втором случае, имеющееся трансформаторное оборудование может быть использовано после установки тиристорного устройства РПН на стороне высокого напряжения и УП на стороне низкого напряжения.

Исходя из описания структурных схем распределённой системы электроснабжения (РСЭ), определены возможные точки подключения в действующих сетях и требования к элементам РСЭ, а также дополнительные задачи, возлагаемые на РСЭ с учетом специфики питания потребителей для этого уровня напряжения. Из экономических и конструктивных соображений целесообразно ограничиться сетями 0,4-6-10 кВ. Наиболее благоприятным следует считать применение РСЭ на напряжении 0,4 кВ, при этом возникает несколько вариантов подключения: с учётом возможности передачи энергии от источника малой энергетики (ИМЭ) в сеть высокого напряжения (рис. 30 а, б, в, г) в случае модернизации оборудования; при интеграции новой подстанции с комплектным оборудованием КСС (рис. 30 д).

Уровни питающего напряжения 35 кВ и выше не рассматриваются в силу отсутствия на настоящий момент соответствующей элементной базы для непосредственной его реализации и самих источников малой энергетики (ИМЭ) на такие напряжения.

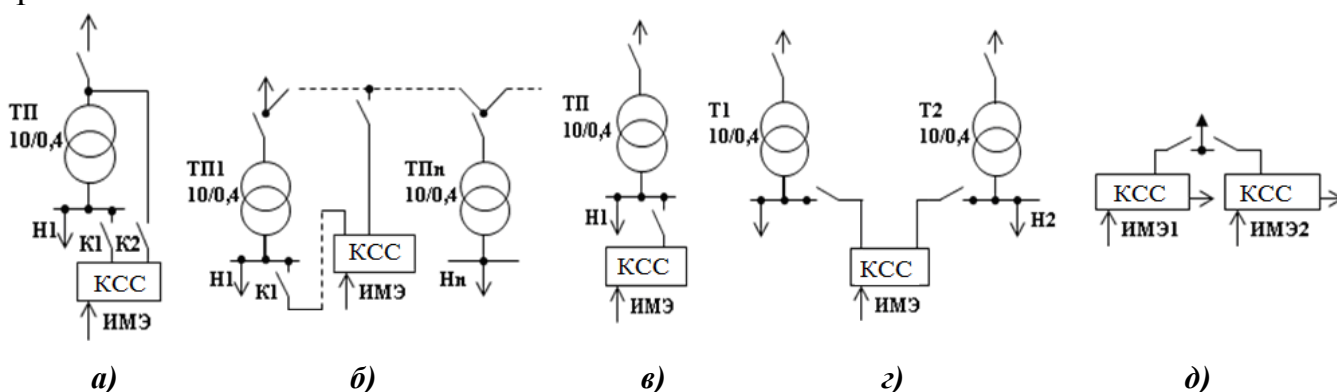


Рис. 30. Интеграция КСС в РСЭ

Главная задача КСС – объединить разнотипные ИМЭ в единый источник энергии и обеспечить его (их) функционирование параллельно с основным источником. Кроме того, в питающей сети, на всех приемных подстанциях которой имеются регулирующие устройства с достаточным регулировочным диапазоном, распределе-

ние реактивной мощности можно осуществлять по условиям экономичности работы самой питающей сети. Определяющими здесь являются условия минимума потерь активной мощности в сети при заданных ограничениях по наибольшему допустимому напряжению и рабочей реактивной мощности источников питания.

Рассмотрены два варианта использования КСС в РСЭ.

КСС – единственный источник. Основной источник S_0 , например, дизель-генератор или мини-ГЭС. Присоединение любого другого, кроме основного типа, будет разгружать основной в той степени, насколько имеются возможности генерации (например, ветрогенератор, S_v). При этом все недостатки ветрогенератора (как нестабильного источника) могут сказаться и на качестве электроэнергии в силу инерционности системы регулирования и самого основного источника. Выход - использование КСС. Мощность, на которую должны быть рассчитаны выходные цепи, определяется нагрузкой S_H . Было бы ошибкой считать, что располагаемая мощность $S_p = K_3 * S_0 + S_v$, т.к. значение мощности ветрогенератора S_v не гарантировано. Однако, учитывая, что загрузка основного составляет $K_3 = 0,7$ можно за счет временного повышения K_3 все-таки увеличить S_r (вопрос частичного снижения ресурса основного источника рассматривается в ТЭР). При этом, относительно длительные снижения мощности ветрогенератора должны компенсироваться за счет его штатной АБ, а при ее недостаточной емкости - дополнительной, в составе КСС. Алгоритм работы КСС в этом случае, должен учитывать как постоянство воздушного потока, так и характер нагрузки. При устойчивом воздушном потоке можно получить $S_p = K_3 * S_0 + S_v$, с увеличением загрузки основного источника до $S_0 / (S_H - S_v) < 0,9$ в «паузах» длительностью не более $t_{п}$. При $t > t_{п}$ осуществляется принудительная разгрузка за счет отключения части нагрузки. Как видно, за исключением дизель-генератора, мини-ГЭС или экзотических топливных элементов, все остальные вторичные источники будут требовать дополнительной емкости АБ и приводить к колебаниям загрузки основного источника при не нулевой вероятности отключения части нагрузки.

КСС работает параллельно с сетью. Если сеть является основным источником, то единственное, что изменится – емкость АБ. Ее наличие, скорее всего, будет не обязательным. Ожидаемого снижения мощности трансформатора подстанции или сечения питающих ТП проводов не произойдет по уже изложенным причинам. Исключением будет случай для потребителей 3-й категории.

Влияние КСС на режим работы питающей сети.

Рассмотрим изменение параметров режима работы питающей сети при подключении в одну из ее точек КСС. Учитывая территориальное расположение вторичных источников, можно предположить, что наиболее подходящими будут районные сети электроснабжения.

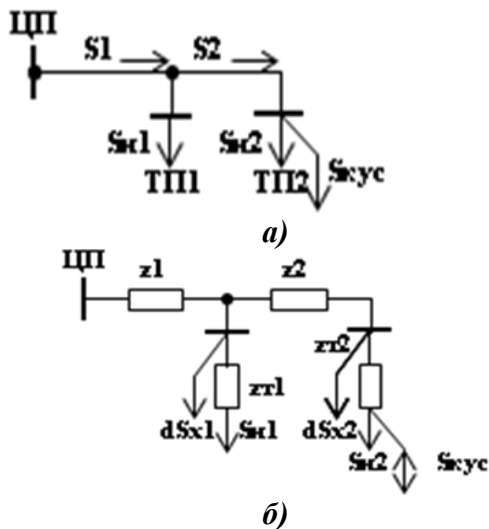


Рис. 31. Районная сеть 6-10 кВ (а) и ее схема замещения (б)

вой.

Схема с двухсторонним питанием при $S_{ксс} > S_{н2} + dS_{т2}$. (22)

Генерация $dS = S_{ксс} - S_{н2} - dS_{т2}$ в точку ТП1 приведет к некоторой разгрузке линии между ЦП и ТП1 и увеличению напряжения в точке присоединения ТП1. Регулирующий эффект зависит от соотношения $dS/S_{н1}$ и z_1/z_2 . Расчет режима – типовой. Из приведенного примера видно, что появление генерации приводит к перераспределению потоков мощностей и изменению режима напряжения.

В кольцевых сетях эффект будет аналогичным при выполнении (21), но более локализованным в силу особенностей расположения п/ст в распределительной сети. Если выполняется (22), то это может привести к изменению положения точек реверса активных и реактивных мощностей и появлению слабо загруженных участков. Все это необходимо учитывать до подключения КСС. А также тот факт, что нестабильность во времени генерируемой мощности (например ИМЭ – ветрогенератор) будет трансформироваться в соответствующее изменение режима по напряжению во все сети. Не проводя отдельного анализа можно с уверенностью сказать, что влияние КСС на режимы распределительной сети тем сильнее, чем больше мощность источников малой энергетики. Этот очевидный вывод подтверждает тезис о том, что при незначительной мощности (до 3-5 % от нагрузки ТП) КСС её влиянием на режимные вопросы можно пренебречь.

Оценим влияние КСС на режим напряжения на шинах 0,4 кВ. Допустим, что ТП2 подключена к системе бесконечной мощности. Тогда режим напряжения на шинах НН будет зависеть только от соотношения $S_{ксс}/S_{н2}$ и величины $z_{т2}$, а именно:

$$U_{нн2} = U_{вн2}^* - dU_2, \quad dU_2 = \text{mod}(z_2)[(P_2 - P_{ксс})^2 + (Q_2 - Q_{ксс})^2]^{0,5}/U_2.$$

Потеря напряжения уменьшается, что очевидно. Высвобождается трансформаторная мощность для подключения дополнительной нагрузки. Однако следует иметь в виду, что при аварийном отключении КСС придется отключать и часть нагрузки в соответствии с допустимой перегрузкой трансформатора.

В качестве примера рассмотрим простую схему питания районных потребителей 0,4 кВ (рис. 31).

К шинам подстанции №2 подключен КСС со своей нагрузкой/генерацией $S_{ксс}$. Подстанции однострановые: dS_{xi} , z_{Ti} соответственно потери холостого хода и сопротивление трансформатора i -ой п/ст. z_i – сопротивление i -го участка сети.

Схема с односторонним питанием при $S_{ксс} \leq S_{н2} + dS_{т2}$ (21)

Суммарная нагрузка ТП2 может меняться от холостого хода до $S_{н2}$. Расчет режима – типовой.

В целом отметим, что подключение КСС практически аналогично либо снижению нагрузки в узле, либо появлению дополнительного источника в сети. А расчеты режимов ничем не отличаются от типовых.



Рис. 32. Оптимизация параметров.

Для решения вопросов интеграции источников малой энергетики в существующие распределительные сети предложен алгоритм определения точек подключения КСС и их требуемого количества (рис. 32). В отличие от «типовой» задачи нахождения координат центра питания через картограмму нагрузок в нашем случае возникает еще одна – расположение КСС по отношению к источникам. В общем случае задачи конфликтуют в части минимизации потерь.

Решение – формирование целевой функции с учетом всех участков потерь. При этом цепям универсального преобразователя следует отдавать предпочтение. А на КСС возлагаются функции регулятора баланса мощностей.

Шестая глава содержит материалы технических решений по созданию опытного промышленного образца комплексной системы сопряжения параметров электрической энергии.

Трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения с ключами однонаправленного тока. Повышенная надёжность тиристорного устройства РПН, достигнутая за счёт исключения коммутационных экстратов, позволила построить схему системы электроснабжения с цепями протекания однонаправленных токов на стороне высокого напряжения трансформаторов с расщеплёнными обмотками (рис. 33)

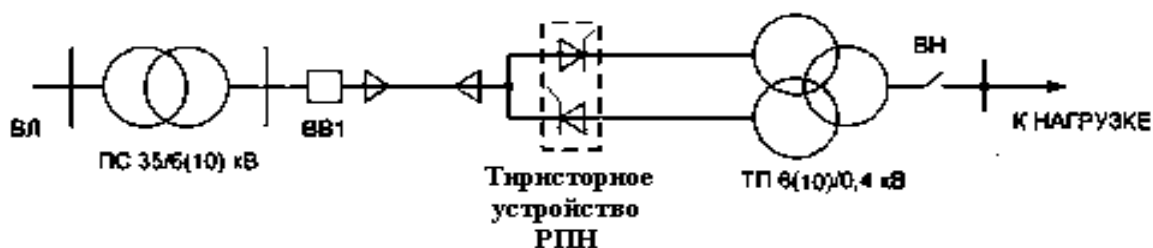


Рис. 33. Схема системы электроснабжения

Для определения целесообразности применения более эффективного оборудования проведена сравнительная оценка параметров типового трансформатора и трансформатора, оборудованного устройством РПН с вакуумными дугогасящими камерами типа VACUTAP 3xVTI 500-40,5-3, а также ТТРН ОТ мощностью 400 кВА (табл. 2).

Таблица 2

Таблица сравнения технико-экономических показателей

| СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|----------------|---|--------------------|-------------------------------|-------------|-----------------|-----------|------------|--|---------------------------|-------|
| Мощность, кВА | Схема и группа соединения обмоток | Степень защиты | Климатическое исполнение и категория размещения | U _к , % | Регулирование напряжения | | Масса общая, кг | Рх.х., Вт | ΣРк.з., Вт | Ориентировочная стоимость оборудования, тыс. руб. | | |
| | | | | | Тип переключающего устройства | Диапазон, % | | | | Трансформатора (без учета НДС и транспортных расходов) | Переключающего устройства | Сумма |
| 400 | Y/Y _n -0 | IP 21 | УХЛ2 | 5,0 | ПБВ | ±2*2,5 | 2200 | 960 | 4310 | 710 | - | 710 |
| | | | | 5,0 | РПН | ±5 | 2800 | 960 | 4310 | 710 | 1935 | 2645 |
| | | | | 5,2 | ТРН* | ±5 | 3400 | 1000 | 4900 | 944 | 2300 | 3244 |

Трансформаторы всех трёх сравниваемых вариантов выполнены в сухом исполнении без принудительного охлаждения. Следует отметить, что типовые трансформаторы и трансформатор с расщеплёнными обмотками практически не отличаются по габаритным показателям, а дополнительные площади на трансформаторной подстанции требуются для установки тиристорного устройства РПН и технологической системы управления (ТСУ). На основании проведённых исследований по выбору аппаратной платформы ТСУ были рассмотрены следующие направления: реализация ТСУ на микроконтроллерах; реализация ТСУ на промышленных контроллерах; реализация ТСУ на промышленных компьютерах.

Каждое из направлений имеет свои плюсы и минусы. Детальный анализ показал, что наименее затратным из предложенных решений является реализация ТСУ на микроконтроллерной базе, но это решение в полной мере себя оправдывает только в условиях серийного производства. Дополнительные обзоры современного рынка промышленного оборудования для построения систем управления операционных систем реального времени и быстродействующих измерительных модулей, позволяющих проводить анализ аналоговых сигналов с частотой дискретизации в десятки килогерц, определили решение - использование платформы фирмы National Instruments типа CompactRIO (рис.34).

ТСУ обеспечивает местное или дистанционное управление ТТРН ОТ в режимах дискретного и плавного регулирования с возможностью синхронного или пофазного регулирования выходного трёхфазного напряжения.

Универсальный преобразователь должен выполнять широкий спектр функций. Для их выполнения на первом этапе разработана структурная схема УП (рис. 35) и реализован экспериментальный образец силовой части преобразователя.

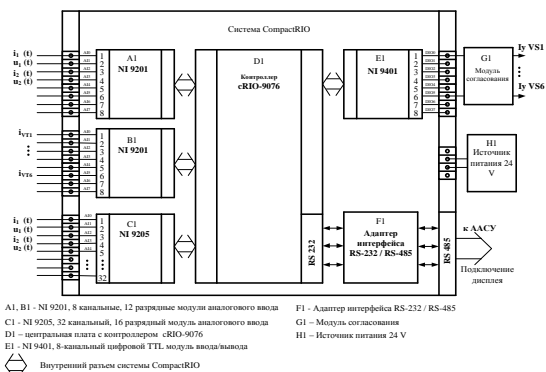


Рис. 34. - Структурная схема базового блока ТСУ



Рис. 35. – Структурная схема силовой части УП на базе UPFC и её системы управления

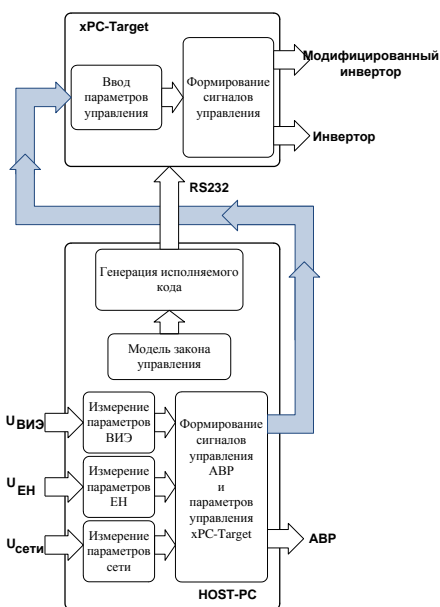


Рис. 36. Структурная схема прототипа системы управления УП

При решении комплексной задачи управления параметрами перетоков электрической энергии из одной питающей сети в другую с учётом возможной функциональной взаимозаменяемости подчинённого и ведущего инверторов возникает сложная задача по обработке информационного потока большого количества аналоговых, дискретных каналов измерения и управления. В тоже время, разработчикам предъявляются все более жесткие требования к срокам проектирования. На кафедре «Электроснабжение, электроэнергетика и силовая электроника» НГТУ им. Р.Е. Алексеева использован эффективный метод решения перечисленных задач в рамках единой среды разработки на платформе Matlab/Simulink. Этот метод позволил объединить в непрерывный интерактивный процесс различные этапы разработки системы: имитационное моделирование; разработка системы управления; отладка и тестирование. В процессе разработки рекомендованы структуры программно-аппаратного проектирования; программное моделирование, процессорно-программное моделирование, программно-аппаратное тестирование, использование xPC Target (рис. 36). Такой подход к решению сразу нескольких проблем проектирования позволяет непосредственно перейти к управлению реальным объектом сразу же после окончания исследований, исключая дополнительные затраты на адаптацию при внедрении разработанной системы.

Полученные результаты проектирования и конструкторских разработок применены при изготовлении экспериментальных образцов оборудования на промышленных предприятиях: ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) - Уралэлектротяжмаш» г. Екатеринбург, ОАО "ЭлектроИнтел" г. Нижний Новгород. Монтаж и испытания

комплексного устройства сопряжения выполнены на цифровой трансформаторной подстанции Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (рис. 37).



Рис. 37. Силовое оборудование подстанции НГТУ им. Р.Е. Алексеева

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Определена концепция построения комплексной системы сопряжения характеристик разнотипных источников и её интеграции с системами электроснабжения с автономными источниками энергии..

2. Получены научно-технические решения по созданию регуляторов напряжения и мощности с использованием трансформаторов с расщеплёнными обмотками высокого напряжения и устройства РПН с ключами однонаправленного тока, обеспечивающие протекание коммутационных процессов без экстратов при любых углах управления тиристорами.

3. Разработаны научные основы и технические решения построения универсального преобразователя, обеспечивающие сопряжение разнохарактерных источников электропитания с широким диапазоном изменений допустимых величин выходных напряжений и реализующие функции регулирования, симметрирования и компенсации параметров электрической энергии.

4. Установлены закономерности регулирования параметров напряжения и мощности электрической энергии с использованием КСС в распределительных сетях электроснабжения, позволяющие сократить количество разнотипного оборудования на многофункциональных электрических подстанциях низкого напряжения.

5. Разработана методология определения оптимальных параметров распределительной сети с адаптивной КСС автономных источников питания.

6. Применены передовые технологии подготовки проектов прототипов систем управления устройствами преобразования параметров электроэнергии с использованием промышленных компьютеров, позволяющие исключить физическое моделирование систем управления, значительно сократить время проектирования, снизить материальные и финансовые затраты на их проведение.

7. Впервые разработано, изготовлено, смонтировано и испытано опытное оборудование активно-адаптивной КСС на трансформаторной подстанции 6-10/0,4 кВ с цифровым программным управлением НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи и доклады, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Чивенков, А.И. Новый способ передачи переменного тока / А.И. Чивенков, А.В. Нажимов, И.Г. Крахмалин // Промышленная энергетика. 2010. - №7. - С. 27-31.
2. Чивенков, А.И. Тиристорный регулятор напряжения трансформаторов 6-10 кВ / А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, А.В. Нажимов, А.А. Асабин, М.С. Солдатова // Промышленная энергетика. 2010. - №8. - С. 30-33.
3. Чивенков, А.И. Снижение токовых коммутационных перегрузок в трансформаторно-тиристорных регуляторах переменного напряжения / А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, А. В. Нажимов, М.С. Солдатова // Промышленная энергетика. 2010. - №9. - С. 38-41.
4. Соснина, Е.Н. Вопросы сопряжения параметров источников малой распределённой энергетики / Е.Н. Соснина, А.И. Чивенков // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова г.Белгород. 2012. - № 2. – С.158-164
5. Чивенков, А.И. Автоматизированная система управления узлом нагрузки в рамках концепции построения интеллектуальных электрических сетей / А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, А.П. Антропов, С.А. Суяков // Промышленная энергетика. 2012. - №5. - С. 4-10.
6. Чивенков, А.И. Анализ применения и развития ветроустановок / А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, Е.А. Михайличенко // Промышленная энергетика. 2012. - №5. - С. 57-63.
7. Чивенков, А.И. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети / А.И. Чивенков, В.И. Гребенщиков, А.П. Антропов, Е.А. Михайличенко // Инженерный вестник Дона. 2013. - №1. - <http://www.ivdon.ru/magazine/issue/107?page=3>.
8. Чивенков, А.И. Опытная цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления и автоматическим плавным регулированием напряжения и мощности / Соснина Е.Н., Лоскутов А.Б., Дмитриев С.М., Чивенков А.И., Лоскутов А.А. // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 8-13.

Авторские свидетельства и патенты

9. А.с.964850. Устройство для симметрирования напряжения и компенсации реактивной мощности в трехфазной сети Б.И. / И.М.Туманов, В.Г.Рогацкий, А.Н.Левин, А.И.Чивенков. - №37, 1982.
10. А.с.1132336. Способ управления регулятором напряжения трансформатора под нагрузкой и устройство для его осуществления Б.И./ Б.Ю.Алтунин, А.А.Асабин, А.И.Чивенков, Л.А.Соловьев, В.С.Шлентов. - №48, 1984.
11. А.с.1350651. Устройство для дискретного регулирования переменного напряжения Б.И./ Б.Ю.Алтунин, А.А.Асабин, А.И.Чивенков - №41, 1987.
12. А.с.1388972. Регулируемый преобразователь переменного напряжения в переменное Б.И./ Б.Ю.Алтунин, А.А.Асабин, А.И.Чивенков, Л.А.Соловьев - №14, 1988.
13. А.с.1739452. Устройство для управления преобразователем переменного напряжения в переменное Б.И./ Б.Ю.Алтунин, А.А.Асабин, А.И.Чивенков, Л.А.Соловьев, Л.М.Пестряева - №21, 1992.
14. А.с.1767653. Регулируемый преобразователь переменного напряжения в переменное Б.И./ Б.Ю.Алтунин, Л.А.Соловьев, А.И.Чивенков - № 37, 1992.
15. Патент на полезную модель. Система бесперебойного энергоснабжения № 78012 (10.11.2008) А.И.Чивенков, А.А.Асабин, А.Б.Лоскутов
16. Пат. на изобретение. Способ передачи электрической энергии трехфазного напряжения на переменном токе и система для его реализации / А.И. Чивенков, И.Г.Крахмалин № 2337451 (27.10.2008).
17. Пат. на изобретение. Способ бесперебойного электроснабжения / А.А.Асабин, А.И. Чивенков А.Б.Лоскутов № 2355092; 2009.
18. Пат. на изобретение. Устройство заряда накопительного конденсатора / Чивенков А.Б., Гребенщиков В.И., Михайличенко Е.А., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. 2503113, МПК H02J7/10; заявл. 18.06.2013; опубл. 27.12.2013.
19. Пат. на полезную модель. Устройство регулирования напряжения под нагрузкой / А.В. Нажимов, А.И Чивенков № 88863, Бюл. № 32, (20.11.2009).
20. Пат. на полезную модель. Устройство управления тиристорным регулятором напряжения / В.П. Кириенко, А.А. Асабин, А.И Чивенков № 88486, Бюл. № 32, (10.11.2009).
21. Пат. на полезную модель. Система бесперебойного энергоснабжения / Чивенков А.И., Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н., Бедретдинов Р.Ш., Липужин И.А., Шалухо А.В., 137642, МПК H02J3/28; заявл. 21.08.2013; опубл. 20.02.2014.

Учебники и учебные пособия

22. Алтунин, Б.Ю. Трансформаторно-тиристорные регуляторы переменного напряжения : учеб. пособие / Б.Ю. Алтунин, А.И. Чивенков, С.Ю. Панфилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2014. – 100 с.

Публикации в других изданиях

23. Алтунин, Б.Ю. Анализ переходных процессов в тиристорном переключающем устройстве отводов трансформатора при дискретном управлении / Б.Ю.Алтунин, А.И. Чивенков, А.А.Асабин // Электропривод и автоматизация промышленных установок: сборник статей / - Горький, 1983. – С. 23-29.

24. Алтунин, Б.Ю. Тиристорные переключающие устройства для мощных преобразовательных трансформаторов / Б.Ю.Алтунин, А.И. Чивенков, А.А.Асабин // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов научно-технической конференции / - Горький, 1984. - С.31-33.
25. Алтунин, Б.Ю. Анализ режимов работы двенадцати пульсного выпрямителя с тиристорным регулированием на вторичной стороне трансформатора / Б.Ю.Алтунин, А.И. Чивенков, А.А.Асабин, И.В.Полетаев // сборник Рефератов НИ-ОКР обзоров, переводов, депонированных рукописей, серии "ЭЛ": статья / ВИМИ – 1985. - вып.9. – С. 18-20.
26. Асабин, А.А. Переходные процессы при переключении отводов вторичной обмотки тиристорным коммутатором / А.А.Асабин, Б.Ю.Алтунин, А.И. Чивенков // Электрооборудование промышленных установок: сборник статей / - Горький, 1985. - С. 21- 22.
27. Алтунин, Б.Ю. Коммутационные процессы при дискретном переключении отводов трансформатора на холостом ходу / Б.Ю.Алтунин, А.А.Асабин, А.И. Чивенков // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов научно-технической конференции / - Горький, 1986. – С 37-39.
28. Чивенков, А.И. Коммутационные процессы при дискретном переключении отводов трансформатора на холостом ходу / А.И. Чивенков, Б.Ю.Алтунин, А.А.Асабин // Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве: тезисы докладов VIII Всесоюзной научно-технической конференции / - Челябинск, 1989.
29. Чивенков, А.И. Математическая модель тиристорного контактора с пофазным регулированием преобразовательных трансформаторов/ А.И. Чивенков, Б.Ю.Алтунин // Проблемы преобразовательной техники: тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции / Институт Электродинамики АН УССР – Киев, 1991. - Часть IV.-С. 151-154.
30. Алтунин, Б.Ю. Резервное питание тиристорного переключающего устройства для ПТ / Б.Ю.Алтунин, А.И. Чивенков // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов научно-технической конференции / НГТУ - Н.Новгород, 1993. - С.54-55.
31. Алтунин, Б.Ю. Тиристорное переключающее устройство для мощных преобразовательных трансформаторов / Б.Ю.Алтунин, А.И. Чивенков, Л.А.Соловьев // Проблемы преобразования электроэнергии: тезисы докладов международной научно-технической конференции / МЭИ, Ассоциация АПЭМ – Москва, 1993. - С.82-83.
32. Туманов, И.М. Универсальный бесконтактный модуль для стабилизации и регулирования параметров электрической энергии в трехфазных электросетях / И.М.Туманов, А.А.Асабин, Ю.Ф.Вагапов, А.И. Чивенков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы II Всероссийской научно-технической конференции / Издательство Чувашского университета - Чебоксары, 1997. - С.97-101.
33. Туманов, И.М. Бестрансформаторный регулятор переменного напряжения синусоидальной формы / И.М.Туманов, А.А.Асабин, А.И. Чивенков // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы II Все-

российской научно-технической конференции / Издательство Чувашского университета - Чебоксары, 1997. - С.96-97.

34. Чивенков, А.И. Мощный широтноимпульсный регулятор переменного напряжения / А.И. Чивенков, А.А. Асабин // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов научно-технической конференции / НГТУ - Н.Новгород, 1997.

35. Слепченков, М.Н. Математическая модель трехфазного силового параллельного активного фильтра по току в dq-координатах / М.Н. Слепченков, А.И. Чивенков // Электромагнитная совместимость и электромагнитная безопасность: труды международной научно-технической конференции / - Санкт-Петербург, 2004. - С.67-71.

36. Слепченков, М.Н. Аналитическая модель для разработки контроллеров трехфазных силовых параллельных активных фильтров по напряжению / М.Н. Слепченков, К.В. Ларионов, А.И. Чивенков // Электрооборудование промышленных установок: Труды Нижегородского государственного технического университета. 2005. – С.67-72.

37. Чивенков, А.И. Тиристорное устройство РПН силовых трансформаторов с расщепленным токопроводом питающей сети / А.И. Чивенков, И.Г. Крахмалин, А.В. Нажимов // Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды Нижегородского государственного технического университета. 2006. - том 59. – С. 57-61.

38. Слепченков, М.Н. Модель трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения в SIMULINK / М.Н. Слепченков, А.И. Чивенков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды Нижегородского государственного технического университета. 2006. - том 59. – С. 80-84.

39. Чивенков, А.И. Исследование аварийных режимов ТПУ трансформаторов с расщепленными обмотками / А.И. Чивенков, И.Г. Крахмалин // Юбилейный том, посвященный 90-летию НГТУ: сборник трудов / НГТУ - Н.Новгород, 2007. –том 66. – С. 116-120.

40. Чивенков, А.И. Устройство сопряжения модульного типа / А.И. Чивенков, А.А. Асабин // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов научно-технической конференции / НГТУ - Н.Новгород, 2007. С. 63-65.

41. Чивенков, А.И. Определение структурной схемы устройства сопряжения модульного типа / А.И. Чивенков., А.А. Асабин, А.Б. Лоскутов, В.В. Севастьянов // Известия академии инженерных наук, Малая энергетика. 2008. - том 23. - С.211-219.

42. Чивенков, А.И. Результаты экспериментальных исследований макета трансформаторно-тиристорного регулятора переменного напряжения / А.И. Чивенков., А.А. Асабин // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды научно-технической конференции / НГТУ - Н.Новгород, 2008. - том 70 - С.16.

43. Нажимов, А.В. Тиристорный регулятор напряжения трансформаторов 6-10 кВ. / А.В. Нажимов, М.С. Солдатова, А.И. Чивенков // Будущее технической науки: тезисы докладов VIII Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ - Нижний Новгород, 2009. – С. 30-33.

44. Кириенко, В.П. Минимизированная структура устройства сопряжения / В.П. Кириенко, А.И. Чивенков // ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНО- И ПРИБОРОСТРОЕНИИ ПТ-2008: межвузовский сборник статей по материалам Всероссийской научно-технической конференции / - Н.Новгород-Арзамас, 2009.

45. Чивенков, А.И Структурный анализ схем устройств сопряжения параметров электрической энергии / А.И Чивенков // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции ДНДС-2009 / - Чебоксары, 2009. –С. 319-328.
46. Лоскутов, А.Б. Технические решения сопряжения потребителей и разнородных источников электрической энергии / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.И.Чивенков // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции ДНДС-2009 / - Чебоксары, 2009. – С. 352-358.
47. Суяков, С.А. Алгоритмы управления трехфазным автономным инвертором напряжения с применением современной аналоговой элементной базы / С.А. Суяков, С.А. Голубев, А.И.Чивенков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды Нижегородского государственного технического университета. 2009. - том 77 - С. 26- 31.
48. Нажимов, А.В. Схема управления трансформаторно-тиристорным регулятором напряжения с ключами однонаправленного тока / А.В. Нажимов, А.С. Волков, А.И.Чивенков // Актуальные проблемы электроэнергетики: Труды Нижегородского государственного технического университета. 2009. - том 77- С.46- 52.
49. Суяков, С.А. Сравнительный анализ принципов управления автономным инвертором напряжения / С.А. Суяков, А.И.Чивенков // Будущее технической науки: тезисы докладов IX Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ - Нижний Новгород, 2010. – С.82-83.
50. Суяков, С.А. Вопросы автоматизации сопряжения параллельных источников энергии с различными параметрами / С.А. Суяков, А.П. Антропов, А.И.Чивенков // Электроэнергетика глазами молодежи: Научные труды Международной научно-технической конференции, сборник докладов / Самара, 2011. - Том 1 - С. 271-275.