

На правах рукописи

Нажимов Андрей Викторович

**ТРАНСФОРМАТОРНО-ТИРИСТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР  
НАПРЯЖЕНИЯ С КЛЮЧАМИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО  
ТОКА**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2011

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» ГОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
**Кириенко Владимир Петрович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Микитченко Анатолий Яковлевич**

кандидат технических наук, доцент  
**Ваняев Валерий Владимирович**

Ведущая организация ЗАО "НПО "Промэнерго"  
(г. Нижний Новгород)

Защита состоится **2011 г. В 14 часов** в аудитории **№1258** на заседании диссертационного совета Д 212.165.02 в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева (603950, ГСП-41, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24, НГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.165.02 или по факсу (831)436-93-79.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Автореферат диссертации размещен на сайте: [http://www.nntu.ru/rus/aspir\\_doktor/avtoreferat](http://www.nntu.ru/rus/aspir_doktor/avtoreferat)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ января 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

**В.В. Соколов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Проблема регулирования переменного напряжения на зажимах мощных электроприемников связана с использованием механических устройств регулирования под нагрузкой (РПН). Установка таких устройств, например, для каждого в отдельности трансформатора цеховых трансформаторных подстанций (ЦТП) привела бы к весьма существенному увеличению капитальных затрат на электрооборудование ЦТП. Эффективность механических устройств РПН ограничена, так как на их ресурс работы оказывает сильное влияние механический износ контактов. Для преодоления этого недостатка разработаны и исследованы бесконтактные трансформаторно-тиристорные устройства РПН различного схмотехнического исполнения. Основные работы в данном направлении велись под руководством А.В. Кобзева, К.А. Липковского, Б.Н. Сергеевкова, Б.Ю. Алтунина, И.М. Туманова, Г. Гута, Р. Бейкера. Все трансформаторно-тиристорные регуляторы напряжения под нагрузкой могут быть разделены на устройства, содержащие:

- силовой или преобразовательный трансформатор с отводами, коммутируемыми тиристорными ключами переменного тока;
- вспомогательный вольтодобавочный трансформатор с первичной обмоткой, коммутируемой тиристорными ключами переменного тока.

Бесконтактные устройства РПН по сравнению с механическими обладают большей долговечностью, высокой точностью регулирования и быстродействием. Однако существующие схемные решения регуляторов переменного напряжения на базе полупроводниковых приборов также не лишены недостатков, наиболее значительным из которых является возникновение коммутационных токовых перегрузок.

Требования к повышению долговечности, эффективности работы, быстродействию существующих устройств и разрешению проблем, связанных с коммутационными токовыми перегрузками регуляторов, привели к необходимости разработки новых бесконтактных устройств регулирования напряжения трансформаторов, обеспечивающих безаварийную работу. Создание таких устройств позволит повысить качество электроэнергии при условии обеспечения непрерывного и, по возможности, оптимального режима работы всей системы электропитания.

Значительное внимание уделяется вопросам снижения материалоемкости. При питании электроустановок промышленных предприятий от мощных энергосистем приходится значительно повышать сечение токоведущих частей и габаритные размеры аппаратов защиты по условиям динамической и термической устойчивости в аварийных режимах, что значительно увеличивает капитальные затраты. Одним из способов уменьшения стоимости изготовления и эксплуатации электрических установок является ограничение токов аварийных режимов за счет расширения функциональных возможностей трансформаторно-тиристорных устройств с РПН.

**Целью** диссертационной работы является разработка нового трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения с расщепленной первичной обмоткой силового трансформатора и ключами однонаправленного тока (ТТРН ОТ).

Для достижения поставленной цели автором решались следующие **задачи**:

- анализ методов и существующих устройств регулирования напряжения трансформаторов, а также методов и устройств ограничения токов в аварийных режимах работы;
- разработка схемотехнических решений построения силовой части ТТРН ОТ;
- создание математических и имитационных моделей ТТРН ОТ для исследования регулировочных характеристик, статических и динамических режимов работы, гармонического состава выходного напряжения и сетевого тока;
- проектирование системы управления ТТРН ОТ на основе современных программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС).

**Методы исследования** определяются спецификой рассматриваемого ТТРН ОТ. В соответствии с этим исследования электромагнитных процессов устройства в стационарных и динамических режимах работы 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. Исследование коммутационных процессов, несимметричных и аварийных режимов работы ТТРН ОТ выполнены с привлечением средств имитационного математического моделирования на ЭВМ в программном пакете Matlab Simulink. Теоретические положения работы подтверждены экспериментом.

#### **Научная новизна.**

1. Предложены способы регулирования напряжения ТТРН ОТ как за счет изменения коэффициента трансформации силового трансформатора путем переключения числа витков первичных обмоток, так и за счет изменения угла управления вентилей, отличающиеся тем, что управление ключами однонаправленного тока осуществляется в различных ветвях расщепленных обмоток высокого напряжения, и позволяющие реализовать принципы дискретного и импульсно-фазового регулирования.

2. Предложен алгоритм управления вентилями ТТРН ОТ, отличающийся тем, что условия переключения тиристорных ключей определяются контурами коммутационных токов обеих ветвей расщепленных обмоток трансформатора с различными ЭДС в режимах повышения и понижения выходного напряжения, позволяющий снизить токовые перегрузки тиристорных ключей при коммутации.

3. Разработаны математические модели и программный комплекс в пакете Matlab Simulink для расчета стационарных, динамических и аварийных режимов работы ТТРН ОТ, позволяющие учесть электромагнитные связи обмоток трансформатора и нелинейность кривой намагничивания. Впервые

исследованы режимы переключения на повышение и понижение напряжения при различном характере нагрузки.

#### **Практическая ценность.**

1. Разработано новое устройство регулирования напряжения под нагрузкой, содержащее силовой трансформатор с расщепленными первичными обмотками и ключи однонаправленного тока, позволяющее, наряду с регулированием напряжения, ограничивать коммутационные токовые перегрузки и токи аварийных режимов работы, уменьшить расход электротехнических материалов, повысить точность регулирования и увеличить ресурс электрических переключений ключевых элементов регулятора за счет использования силовых полупроводниковых приборов.

2. Создан макет физической модели ТТРН ОТ с целью сравнения результатов математического и физического моделирования. Результаты проведенных экспериментальных исследований гармонического состава выходного напряжения и коммутационных процессов совпали с результатами теоретических расчетов и математического моделирования.

3. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Промышленная электроника» НГТУ им. Р.Е.Алексеева при чтении лекций, проведении лабораторных и научно-исследовательских работ по курсам: «Основы преобразовательной техники», «Преобразователи электрической энергии», «Трансформаторно-тиристорные регуляторы переменного тока».

#### **Реализация результатов работы.**

Результаты проведенных исследований и программный комплекс в пакете Matlab Simulink для исследования на ЭВМ работы ТТРН ОТ в стационарных, динамических и аварийных режимах нашли применение в практике проектирования трансформаторных подстанций предприятием ЗАО "НПО "Промэнерго" (г. Нижний Новгород) и приняты для использования при модернизации питающей подстанции на ФГУП «НИИ химии и технологии полимеров имени академика В.А. Каргина с опытным заводом» (г. Дзержинск). Разработанный макет физической модели ТТРН ОТ реализован в качестве базы для лабораторных работ студентов кафедры «Промышленная электроника» НГТУ им. Р.Е.Алексеева по курсу «Трансформаторно-тиристорные регуляторы переменного тока».

#### **На защиту выносятся следующие основные положения.**

1. Устройство ТТРН ОТ для ограничения коммутационных токовых перегрузок и токов аварийных режимов работы.

2. Математические модели для исследования электромагнитных процессов в ТТРН ОТ в стационарных, динамических и аварийных режимах работы.

3. Программный комплекс в пакете Matlab Simulink для расчета основных характеристик и моделирования работы ТТРН ОТ.

4. Способы регулирования напряжения ТТРН ОТ.

5. Система управления ТТРН ОТ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались на: V Международной молодежной научно-технической конференции "Будущее технической науки", Нижний Новгород, 2006; "Актуальные проблемы электроэнергетики", Нижний Новгород, 2006; XIII Международной научно-технической конференции "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика", Москва, 2007; Нижегородской сессии молодых ученых (технические науки), Татинец, 2007; Международной молодежной научно-технической конференции "Будущее технической науки", Нижний Новгород, 2007; Нижегородской сессии молодых ученых (технические науки), Татинец, 2008.

**Публикации.** По результатам научных исследований опубликовано 18 печатных работ (3 из которых в издании, рекомендованном ВАК РФ). Получен патент на полезную модель № 88863 РФ, МПК Н 02 J 3/00. Устройство регулирования напряжения под нагрузкой, Опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 101 наименование. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков и 9 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования.

**В первой главе** выполнен анализ состояния проблем регулирования переменного напряжения и ограничения токов в аварийных режимах работы, который показал необходимость разработки принципиально новых методов ограничения токов аварийных режимов работы и создания новых надежных устройств регулирования напряжения трансформаторов на базе современных полупроводниковых приборов.

Предложен новый подход к ограничению коммутационных токов и токов аварийных режимов работы, в основе которого положен принцип однонаправленного протекания тока по линиям питающей сети и расщепленным первичным обмоткам трансформатора.

На базе описанного подхода предложено устройство, обеспечивающее бесконтактное регулирование величины трехфазного напряжения трансформатора и снижение токов в аварийных режимах работы (рис. 1).

Характерной особенностью представленного регулятора является однонаправленное протекание токов по расщепленным первичным обмоткам силового трансформатора *TV*. Возникающие в процессе коммутации контурные токи замыкаются через открытые вентили соседних фаз. В отличие от классической схемы регулятора с тиристорными ключами переменного тока, данные токи ограничиваются не только сопротивлением регулировочной обмотки, но также полными сопротивлениями двух сетевых обмоток, что позволяет снизить возникающую перегрузку до 2,5 кратного значения номинального тока.

Предлагаемый подход делает невозможным постоянное протекания тока короткого замыкания (КЗ) в цепи и образование контуров глухого КЗ. Суть его заключается в использовании однонаправленного протекания тока по линии питающей сети. Разделение токов разной полярности выполняется ключами однонаправленного тока.

Такое исполнение защищает от воздействия токов глухого КЗ участок с токоведущим кабелем. При КЗ установившийся ток в кабельной линии будет протекать только в течение одного полупериода соответствующего направлению включения диода, обеспечив снижение тока более чем в 1,41 раза по отношению к току аварийного режима в классической схеме системы питания.

Устройство РПН ТТРН ОТ представляет собой блок тиристоров для бесконтактного переключения регулировочных отводов силового трансформатора. Коммутация осуществляется на стороне высокого напряжения трансформатора, что является предпочтительным в мощных системах с большими токами нагрузки.

Возможно использование рассмотренного ТТРН ОТ в трехпроводных сетях напряжением 6(10) кВ. При этом из схемы исключается блок диодов БД, а входные зажимы ключей каждой фазы расщепленных обмоток силового трансформатора объединяются.

**Во второй главе** разработаны математические модели трехфазного трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения с ключами однонаправленного тока и программный комплекс для исследования на ЭВМ режимов работы устройства.

Установлено, что в режимах работы с постоянным углом управления вентилями устройство представляет собой силовой трансформатор с расщепленными обмотками, первичные обмотки которого через линию питающей сети соединяются с блоком диодов. При этом не происходит переключения регулировочных отводов. В режимах работы с регулируемым углом управления вентилями происходят переключения регулировочных отводов. В данных режимах работы можно рассматривать схему ТТРН ОТ как схему с переменной структурой. Следовательно, вывод аналитических зависимостей, описывающих работу устройства, затруднен. Предложено

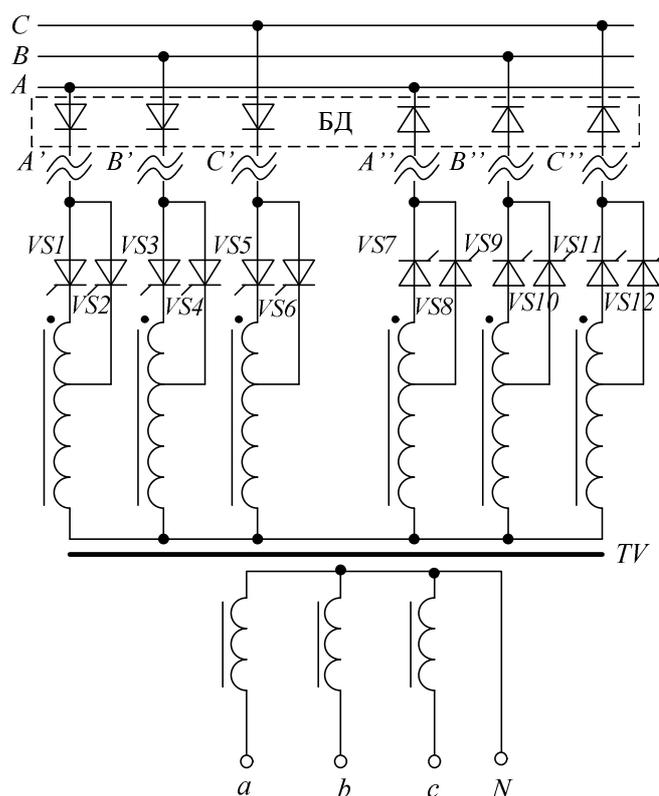


Рис. 1. Принципиальная схема ТТРН ОТ

использовать метод структурного моделирования с допущениями, приведенными ниже.

1. Магнитное поле устройства плоскопараллельно. Расчет плоскопараллельного магнитного поля соответствует расчету разветвленной магнитной цепи. Сложное поле устройства делится на две части: рабочее (основное) поле и поле рассеяния. Потокосцепления рассеяния контуров являются линейными функциями токов контуров и не зависят от насыщения магнитной цепи.

2. Магнитные сопротивления схемы замещения магнитной цепи являются сосредоточенными. Характеристики намагничивания отдельных элементов магнитной цепи совпадают со средней кривой намагничивания предельного гистерезисного цикла. Не учитываются емкостные связи в трансформаторе и токи утечки изоляции.

3. Тиристоры и диоды представлены в виде резисторов, сопротивление которых в проводящем состоянии много меньше, а в непроводящем - много больше сопротивления нагрузки.

В соответствии с приведенными на рис. 2 магнитной и электрической схемами замещения силового трансформатора ТТРН ОТ приняты следующие условные обозначения: индексы «А», «В», «С», «А'», «В'», «С'» указывают фазы первичной расщепленной обмотки трансформатора прямого и

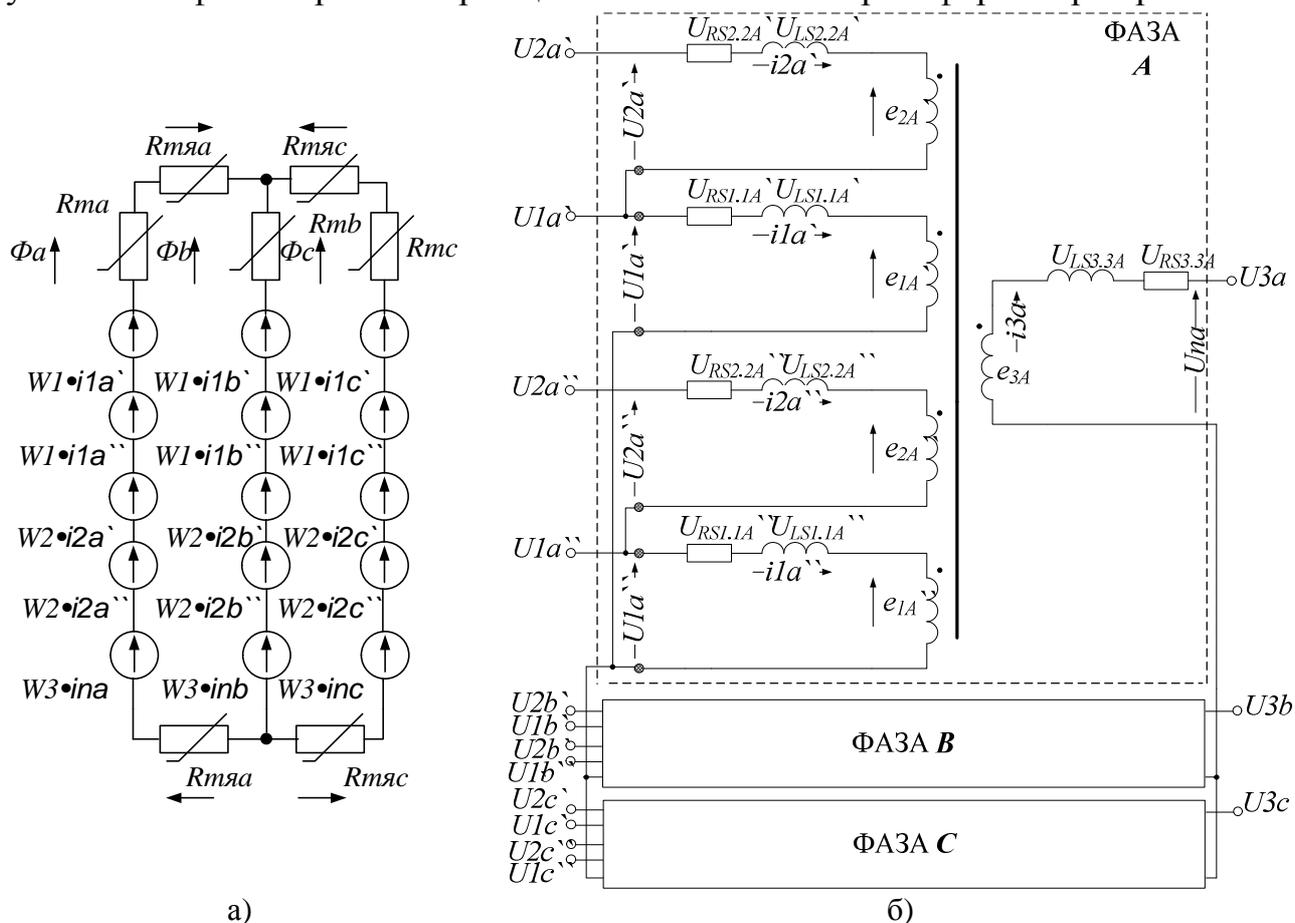


Рис. 2. Схемы замещения силового трансформатора  
а – магнитная; б - электрическая

обратного направления протекания тока соответственно; индексы «а», «b», «с» указывают фазы вторичной обмотки трансформатора; индексы «1», «2», «3» показывают принадлежность физической величины к первичной сетевой обмотке, регулировочному отводу или вторичной обмотке соответственно.

Уравнения магнитного состояния имеют вид (1), а уравнения связей между отдельными ветвями схемы замещения, с учетом сопротивлений рассеяния, имеют вид (2):

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

$$\begin{cases} U_{LS2.2A}' = -U_{2A}' - U_{RS2.2A}' - e_{2A}'; U_{LS1.1A}' = -U_{1A}' - U_{RS1.1A}' - e_{1A}'; \\ U_{LS2.2A}'' = -U_{2A}'' - U_{RS2.2A}'' - e_{2A}''; U_{LS1.1A}'' = -U_{1A}'' - U_{RS1.1A}'' - e_{1A}''; \\ U_{LS2.2B}' = -U_{2B}' - U_{RS2.2B}' - e_{2B}'; U_{LS1.1B}' = -U_{1B}' - U_{RS1.1B}' - e_{1B}'; \\ U_{LS2.2B}'' = -U_{2B}'' - U_{RS2.2B}'' - e_{2B}''; U_{LS1.1B}'' = -U_{1B}'' - U_{RS1.1B}'' - e_{1B}''; \\ U_{LS2.2C}' = -U_{2C}' - U_{RS2.2C}' - e_{2C}'; U_{LS1.1C}' = -U_{1C}' - U_{RS1.1C}' - e_{1C}'; \\ U_{LS2.2C}'' = -U_{2C}'' - U_{RS2.2C}'' - e_{2C}''; U_{LS1.1C}'' = -U_{1C}'' - U_{RS1.1C}'' - e_{1C}''; \\ U_{LS3.3A} = -U_{3A} - U_{RS3.3A} - e_{3A}; U_{LS3.3B} = -U_{3B} - U_{RS3.3B} - e_{3B}; U_{LS3.3C} = -U_{3C} - U_{RS3.3C} - e_{3C}. \end{cases} \quad (2)$$

Структурные схемы магнитной и электрической цепей трансформатора, составленные на основе (1) и (2), представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

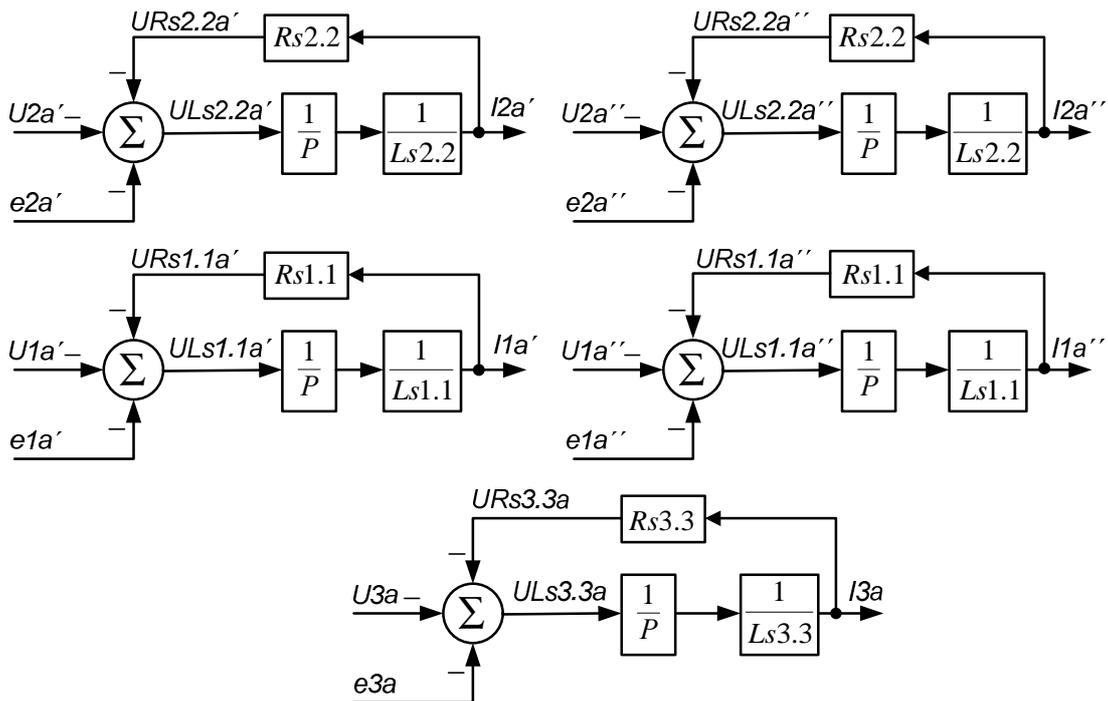


Рис. 3. Структурная схема электрической цепи фазы А трансформатора

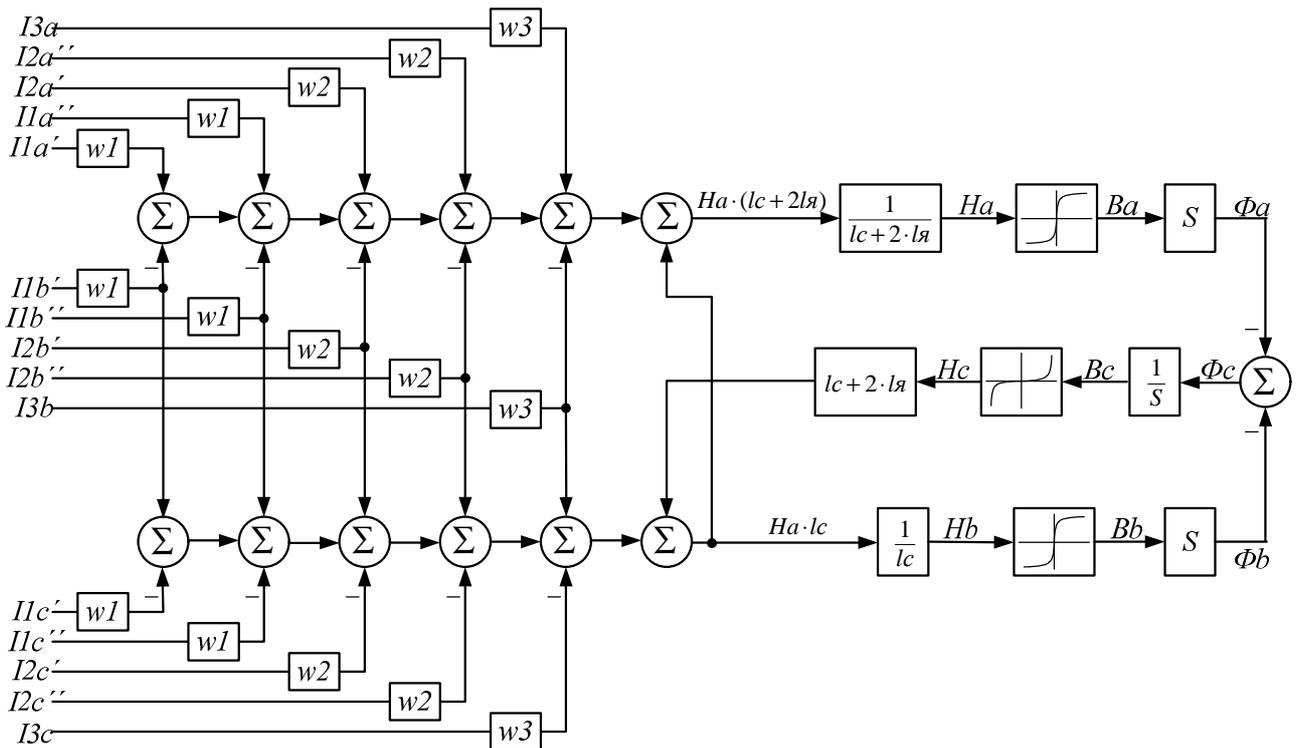


Рис. 4. Структурная схема магнитной цепи трансформатора

Общая структурная схема замещения трансформатора (рис. 5), на основании (3), объединяет электрическую и магнитную цепи. Выражения для  $e_{1,2,3}$  определяют связь между магнитной и электрической схемами замещения:

$$\begin{aligned}
 e_{1(2)ABC}^{(\cdot\cdot)} = & -w_{1(2)} \cdot \frac{d\Phi_{ABC}}{dt} + L_{S1.2одн} \cdot \frac{di_{2(1)ABC}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \\
 & + L_{S1.2рас} \cdot \frac{di_{2(1)ABC}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + L_{S1.1(2.2)рас} \cdot \frac{di_{1(2)ABC}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \\
 & + L_{S1.1(2.2)меж} \cdot \left( \frac{di_{1(2)BCA}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \frac{di_{1(2)BCA}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \frac{di_{1(2)CAB}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \frac{di_{1(2)CAB}^{(\cdot\cdot)}}{dt} \right) + \\
 & + L_{S1.2меж} \cdot \left( \frac{di_{2(1)BCA}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \frac{di_{2(1)BCA}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \frac{di_{2(1)CAB}^{(\cdot\cdot)}}{dt} + \frac{di_{2(1)CAB}^{(\cdot\cdot)}}{dt} \right); \\
 e_{3ABC} = & -w_3 \cdot \frac{d\Phi_{ABC}}{dt} + L_{S3.3меж} \cdot \left( \frac{di_{3BCA}}{dt} + \frac{di_{3CAB}}{dt} \right).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Получена математическая модель силового трансформатора с расщепленными обмотками высокого напряжения. Разработана имитационная модель ТТРН ОТ, позволяющая исследовать полный комплекс режимов, включая стационарные, динамические и аварийные.

**Третья глава** посвящена исследованию электромагнитных процессов в режимах работы ТТРН ОТ с постоянным углом управления.

Исследованы несимметричные режимы, обусловленные несимметрией питающих напряжений, и неполнофазные режимы.

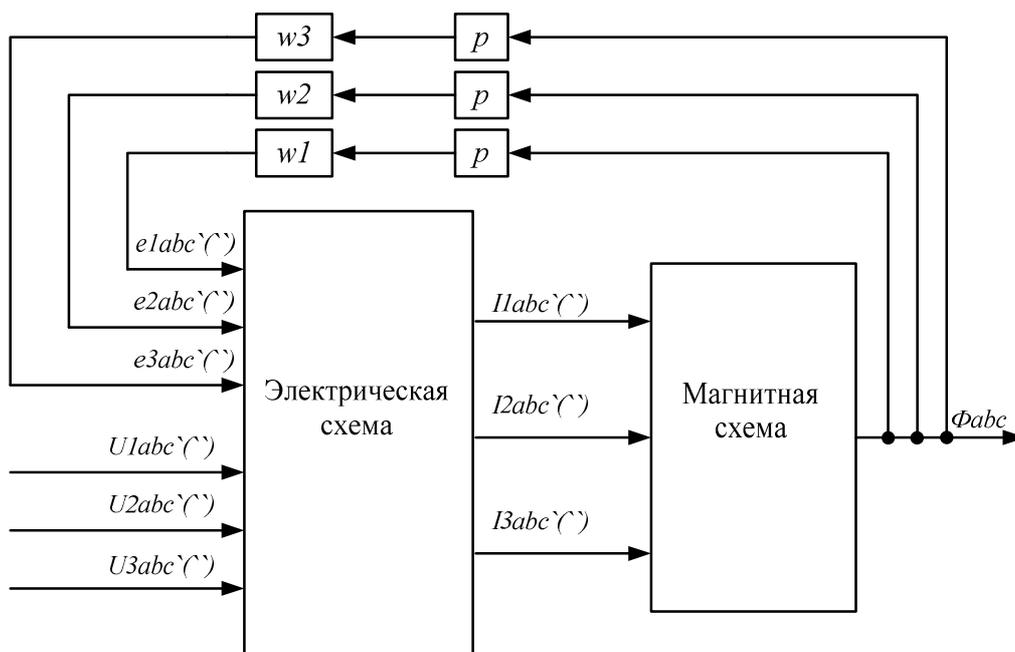


Рис. 5. Структурная схема, объединяющая электрическую и магнитную схемы замещения трансформатора

Режимы нерабочего состояния фаз питающей сети:

- в случае нерабочего состояния одной фазы питающей сети регулятор ведет себя аналогично типовой схеме системы питания, представляющей собой силовой трансформатор, первичные обмотки которого подключены напрямую к трехпроводной сети;

- в неполнофазных режимах работы регулятора, возникающих после вентильной группы при отключении одной из ветвей кабельных линий питающей сети разных фаз, наблюдается увеличение действующих значений токов первичных обмоток трансформатора до значений токов КЗ;

- допустимыми являются только двухфазные режимы работы регулятора при полностью отключенной одной фазе питающей сети.

Режимы КЗ на стороне высокого напряжения:

- ток КЗ протекает по линиям питающей сети лишь в течение полупериода питающего напряжения, что обеспечивает снижение действующего значения тока КЗ;

- при трехфазном и двухфазном КЗ между линиями питающей сети разного направления протекания тока ток КЗ в исследуемой схеме в 1,5 раза меньше, чем в типовой схеме системы питания;

- при трехфазном КЗ между линиями питающей сети одного направления протекания тока ток КЗ в исследуемой схеме в 4,3 раза меньше, чем в типовой схеме системы питания;

- при двухфазном КЗ между линиями питающей сети одного направления протекания тока ток КЗ в 6 раз меньше, чем в типовой схеме системы питания.

Установлено, что при возникновении КЗ на стороне низкого напряжения ток КЗ будет трансформироваться в первичную обмотку трансформатора. Действующие значения токов первичных обмоток трансформатора в

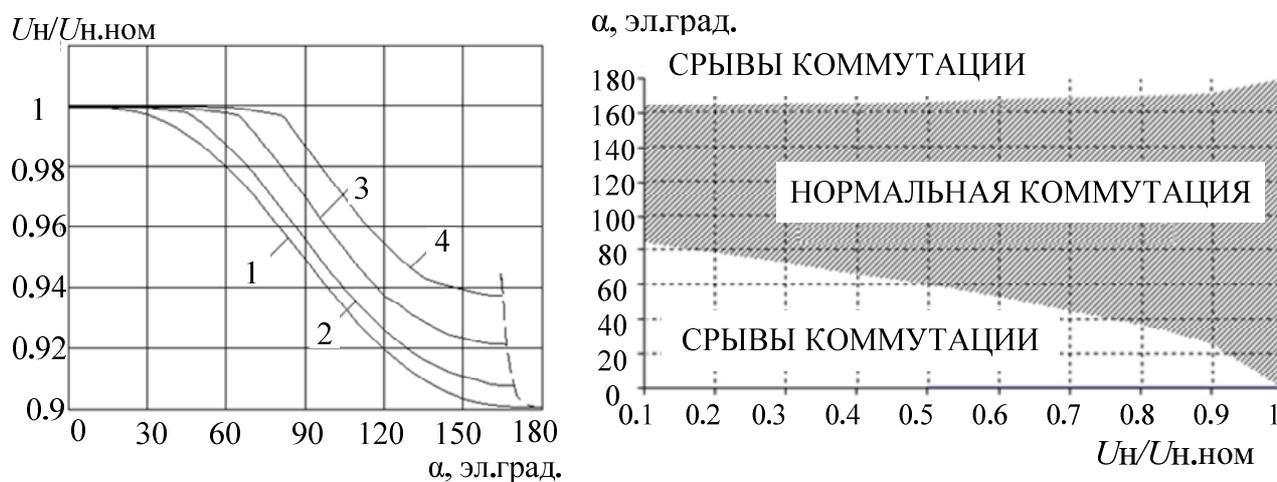
рассматриваемых режимах снижаются в 1,41 раза по сравнению с типовой схемой системы питания.

Рассмотрены установившиеся значения токов КЗ, поскольку они являются определяющими при расчетах сечения линии питающей сети и при выборе коммутационного оборудования по условиям термической устойчивости.

**В четвертой главе** проведен анализ коммутационных процессов в ТТРН ОТ с использованием как дискретного, так и импульсно-фазового управления.

В режиме повышения напряжения при импульсно-фазовом управлении импульсы на отпирание тиристоров отводов повышенного напряжения  $VS2$ ,  $VS8$  подаются в зоне положительной мощности и следуют с задержкой во времени относительно управляющих импульсов на отпирание тиристоров отводов пониженного напряжения  $VS1$ ,  $VS7$ . При открытии тиристора  $VS2$  ( $VS8$ ) образуется контур короткого замыкания регулировочной ступени. Коммутация тиристоров в данном случае имеет естественный характер и происходит под действием тока короткого замыкания ступени, который направлен встречно проводимости тиристора  $VS1$  ( $VS7$ ).

Получены регулировочные характеристики выходного напряжения от угла управления вентилей и характера нагрузки (рис. 6), а также зависимость значений критических углов регулирования от фазового угла нагрузки.



а) Регулировочная характеристика

б) Зоны коммутации

Рис. 6. Регулировочная характеристика выходного напряжения ТТРН ОТ в режиме повышения напряжения от угла управления вентилей и характера нагрузки ( $1 - \cos\varphi = 1$ ;  $2 - \cos\varphi = 0,7$ ;  $3 - \cos\varphi = 0,4$ ;  $4 - \cos\varphi = 0,1$ ) и зависимость значений критических углов управления в режиме повышения напряжения от фазового угла нагрузки

В режиме понижения напряжения при импульсно-фазовом управлении тиристор пониженного напряжения  $VS1$  ( $VS7$ ) отпирается с задержкой во времени относительно управляющих импульсов тиристора  $VS2$  ( $VS8$ ). При этом во время открытого состояния тиристора  $VS2$  ( $VS8$ ) к тиристоры  $VS1$  ( $VS7$ ) приложено обратное напряжение регулировочной ступени и не выполнены

условия для его открывания. Это в свою очередь создает условия для отпирания тиристора  $VS7(VS1)$  при работающем тиристоре  $VS2(VS8)$  в зоне положительной мощности, возникает контур протекания тока. В классической схеме регулятора напряжения с тиристорными ключами переменного тока в режиме понижения напряжения возникающий контурный ток ограничивается лишь сопротивлением регулировочной обмотки. Поскольку сопротивление регулировочной обмотки составляет, как правило, сотые доли сопротивления сетевой обмотки трансформатора, величина тока значительно превышает номинальное значение, что может привести к аварии.

В схеме ТТРН ОТ коммутационные контурные токи ограничиваются полными сопротивлениями двух расщепленных обмоток, и их максимальные действующие значения не превышают 2,5 кратного номинального значения (рис. 7).

Полученные зависимости при регулировании на понижение напряжения с активно-индуктивной нагрузкой в зоне положительной мощности показывают, что при определенных (критических) углах управления происходят срывы коммутационного процесса, и контурные токи, возникающие в процессе коммутации, не спадают до нулевых значений. При этом срывы коммутационных процессов не приводят к аварийным режимам работы. Значения критических углов управления от характера нагрузки приведены в табл. 1.

Установлено, что величина коммутационных токов обратно пропорциональна углу управления  $\alpha$ . Наибольшие перегрузки (2,3÷2,5 кратное значение номинального тока) наблюдаются при  $\alpha < 30$ .

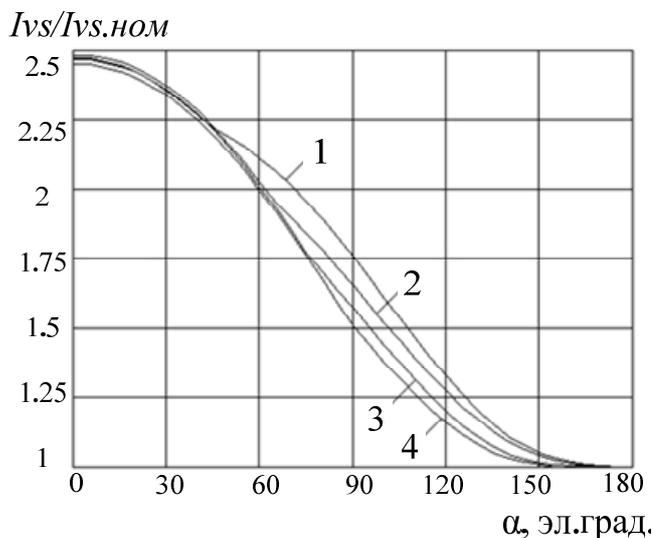


Рис. 7. Зависимость токовых перегрузок тиристоров от угла управления и характера нагрузки  
(1 –  $\cos\varphi=1$ ; 2 –  $\cos\varphi=0,7$ ; 3 –  $\cos\varphi=0,4$ ; 4 –  $\cos\varphi=0,1$ )

Таблица 1

Значения критических углов управления от характера нагрузки

$\cos\varphi$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\alpha$	85	83	80	76	72	68	64	59	54	45

Определено влияние характера нагрузки на величину коммутационных токов. При увеличении  $\cos\varphi$  нагрузки токовые перегрузки увеличиваются и принимают максимальное значение при  $\cos\varphi=1$ . В большей степени это влияние сказывается при углах управления от 90 до 120 эл. град. Отличие коммутационных токов в данном случае при  $\cos\varphi=1$  и  $\cos\varphi=0,1$  составляет 14%.

Проведен гармонический анализ выходного напряжения и сетевого тока регулятора с величиной напряжения регулировочной обмотки равной 10% от напряжения сетевой обмотки. Получены амплитуды высших гармоник кривых выходного напряжения ТТРН ОТ и сетевого тока при различном характере нагрузки в режиме импульсно фазового управления.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что амплитуды высших гармоник выходного напряжения регулятора не превышают нормально допустимых по ГОСТу значений, а 3-я и 9-я гармоники отсутствуют.

Таблица 2

Гармонический анализ выходного напряжения и сетевого тока ТТРН ОТ

Исследуемая характеристика	Характер нагрузки, $\cos\varphi$	Значения амплитуд высших гармоник в % от амплитуды первой гармоники		
		5-я	7-я	11-я
- напряжение на выходе регулятора	1	1,5	1,2	0,7
	0,7	2,4	1,6	1,1
	0,4	2,7	1,9	1,2
	0,1	2,7	1,9	1,2
- сетевой ток	1	2,9	2,2	1,3
	0,7	1,9	1,3	0,7
	0,4	1,8	1,3	0,7
	0,1	1,8	1,3	0,7

В пятой главе рассматривается проектирование системы управления ТТРН ОТ с учетом разработанных ранее основных принципов управления и оптимальных углов отпираания тиристоров. Разработана схема системы управления на основе современных программируемых аналоговых интегральных схем (ПАИС).

Разработана физическая модель ТТРН ОТ меньшей мощности с напряжением регулировочной обмотки, составляющим 35% от напряжения сетевой обмотки для снижения влияния погрешности измерения при проведении гармонического анализа выходного напряжения физической модели. Адаптированы параметры математической и физической моделей с целью проведения сравнительных экспериментальных исследований для установления адекватности их работы.

В ходе работы были получены регулировочные характеристики выходного напряжения регулятора при импульсно фазовом способе управления для различного характера нагрузки, проведен анализ гармонического состава выходного напряжения физической и математической моделей (табл. 3).

Анализ показал, что отличие регулировочных характеристик для физической и математической моделей при различном характере нагрузки составляет не более 5%. Отличие результатов гармонического анализа составляет 15%.

Таблица 3

Максимальные значения амплитуд высших гармоник кривых выходного напряжения ТТРН ОТ

Выходное напряжения	Характер нагрузки, $\cos\phi$	Максимальные значения амплитуд высших гармоник в % от амплитуды первой гармоники		
		5-я	7-я	11-я
Математическая модель	1	7,8	4,9	3,3
	0,7	9,5	6,2	4,65
Физическая модель	1	7,9	3,9	4,4
	0,7	9,2	8,6	5,5

Ряд факторов, существенно влияющих на получение описанных выше значений, представлен ниже.

1. Не идеальная форма напряжений питающей сети, в то время как в математической модели питающая сеть моделируется идеальными источниками напряжения синусоидальной формы. Кроме того, амплитуда данных гармонических составляющих физической модели непрерывно изменяется во времени, что вызывает дополнительные трудности измерения.

2. Измерительные приборы обладают собственной и методической погрешностями, поэтому все измерения на физической модели содержат ошибку измерения.

3. Допущения, принятые при построении математической модели, также влияют на отличия в результатах физического и математического моделирования.

Получены удовлетворительные результаты сравнения моделирования на физической и математической моделях, позволяющие утверждать об их адекватности.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании сравнительного анализа устройств регулирования напряжения трансформаторов показана необходимость разработки регуляторов с применением современных полупроводниковых приборов. В качестве решения проблемы ограничения коммутационных токов устройств РПН на базе полупроводниковых приборов был предложен способ уменьшения величины возникающих перегрузок за счет использования ключей однонаправленного тока. Предложенный способ основан на разделении протекания токов разной полярности по расщепленным первичным обмоткам трансформатора и линии питающей сети. Возникающий контур коммутационного тока замыкается через открытый вентиль ветви расщепленной обмотки той же фазы, обеспечивая снижение возникающей перегрузки за счет увеличения сопротивления в контуре на удвоенное значение сопротивления сетевой первичной обмотки.

2. Предложено устройство регулирования напряжения под нагрузкой, представляющее собой трансформаторно-тиристорный регулятор напряжения с

расщепленной первичной обмоткой силового трансформатора и ключами однонаправленного тока (ТТРН ОТ). Данный регулятор обеспечивает снижение величины коммутационных токов до 2,5 кратного значения номинального тока.

3. Разработаны математические модели для исследования стационарных, динамических и аварийных режимов работы ТТРН ОТ. Полученные модели позволяют учитывать магнитные связи между обмотками трансформатора, магнитные свойства материала сердечника, а также параметры линий питающей сети. Все математические модели реализованы для расчета на ЭВМ в виде программного комплекса в пакете Matlab Simulink.

4. Определены зоны разрешенной коммутации вентилей без возникновения сверхтоков и перенапряжений. Получены регулировочные характеристики ТТРН ОТ при различном характере нагрузки. Установлена зависимость коммутационных токов от характера нагрузки и угла управления. Проведен гармонический анализ выходного напряжения преобразователя, в ходе которого установлено, что амплитуды высших гармоник выходного напряжения регулятора не превышают нормально допустимых по ГОСТу значений.

5. Исследованы аварийные режимы и их влияние на величину токов устройства для обеспечения надежной работы ТТРН ОТ. Исследования позволили сделать вывод о снижении величины аварийных токов от 1,4 до 6 раз по сравнению с существующими схемами систем электропитания. Причем при обеспечении протекания тока разного направления по разным кабельным линиям питающей сети снижение тока составит от 4,3 до 6 раз по сравнению с существующими схемами систем электропитания.

6. Разработан блок системы управления ТТРН ОТ на базе современных микросхем ПАИС, и дано описание алгоритмов его работы. Система управления позволяет автоматически поддерживать заданный уровень выходного напряжения, учесть зоны разрешенной коммутации вентилей в зависимости от характера нагрузки, обеспечить защиту элементов ТТРН ОТ от действия коммутационных токов и токов аварийных режимов работы. Разработана физическая модель ТТРН ОТ. Проведены исследования на физической модели, доказывающие адекватность результатов, полученных математическим и физическим моделированием.

7. На основании сравнительного анализа способов и устройств отключения и ограничения токов аварийных режимов работы показано, что все они ведут к существенному увеличению капитальных затрат при изготовлении и эксплуатации электрических установок. Ограничение величины токов аварийных режимов работы ТТРН ОТ выполняется за счет разделения протекания токов разной полярности, для чего дополнительно вводится блок диодов, включенный непосредственно перед линиями питающей сети обоих направлений протекания токов.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

*Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Нажимов, А.В. Новый способ передачи переменного тока / А.В. Нажимов, А.И. Чивенков, И.Г. Крахмалин – Промышленная энергетика, 2010. - №7. – С. 27 – 31.

2. Нажимов, А.В. Тиристорный регулятор напряжения трансформаторов 6-10кВ / А.В. Нажимов, А.И. Чивенков, А.Б. Лоскутов, А.А. Асабин, М.С. Солдатова // Промышленная энергетика, 2010. - №8. – С. 30 – 33.

3. Нажимов, А.В. Снижение токовых коммутационных перегрузок трансформаторно-тиристорного регулятора переменного напряжения / А.В. Нажимов, А.И. Чивенков, М.С. Солдатова // Промышленная энергетика, 2010. - №9. – С. 38 – 41.

*Патенты и свидетельства о регистрации*

4. Патент на полезную модель № 88863 РФ, МПК Н 02 J 3/00. Устройство регулирования напряжения под нагрузкой / Нажимов А.В, Чивенков А.И. // Оpubл. 20.11.2009, Бюл. № 32.

*Научные работы, опубликованные в других изданиях*

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

6. Нажимов, А.В. Математическое моделирование трехфазного трансформаторно-тиристорного регулятора переменного напряжения. / А.В. Нажимов // Труды Нижегородского государственного технического университета, "Актуальные проблемы электроэнергетики", том 59. - Нижний Новгород, - 2006. - С. 108-109.

7. Нажимов, А.В. Ограничение токов короткого замыкания в трехфазных питающих сетях с расщепленным токопроводом / А.В. Нажимов // Тринадцатая Международная научно-техническая конференция студентов и Аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика". - Москва, - 2007. - С. 246 – 247.

8. Нажимов, А.В. Компьютерное моделирование трансформаторно-тиристорных устройств силовой электроники. / А.В. Нажимов // "Современные наукоемкие технологии" - 2007. - №5 - С. 98-99.

9. Нажимов, А.В. Тиристорное устройство регулирования переменного напряжения для ограничения токов аварийных режимов работы / А.В. Нажимов // Материалы XII Нижегородской сессии молодых ученых (технические науки). - Нижний Новгород, - 2007. - С. 104-105.

10. Нажимов, А.В. Способы регулирования напряжения тиристорным устройством РПН силовых трансформаторов с расщепленным токопроводом

питающей сети / А.В. Нажимов // Тезисы докладов VI Международной молодежной научно-технической конференции "Будущее технической науки". - Нижний Новгород, - 2007. - С. 94-95.

11. Нажимов, А.В. Основные принципы работы регулятора переменного напряжения в сетях с расщепленным токопроводом. / А.В. Нажимов // Четвертая международная научно-практическая конференция "Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития" в двух частях. Часть 1. - Томск, - 2007. - С. 292-293.

12. Нажимов, А.В. Реализация систем управления устройствами преобразовательной техники на персональных компьютерах / А.В. Нажимов // Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах.: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Новочеркасск, - 2007. - С. 7-8.

13. Нажимов, А.В. Результаты экспериментальных исследований тиристорного регулятора напряжения для питающей сети с расщепленными обмотками на физической модели. / А.В. Нажимов, А.И. Чивенков, А.А. Круглов // Тезисы докладов VI Международной молодежной научно-технической конференции "Будущее технической науки". - Нижний Новгород, - 2007. - С. 93-94.

14. Нажимов, А.В. Моделирование системы управления регулятором переменного напряжения. / А.В. Нажимов // Современные наукоемкие технологии, - 2008. - №2 - С. 107-108.

15. Нажимов, А.В. Режимы работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения при питании от трехфазной сети. / А.В. Нажимов, А.И. Чивенков, Е.А. Сальникова // Тезисы докладов VII Международной молодежной научно-технической конференции "Будущее технической науки". - Нижний Новгород, - 2008. - С. 60-61.

16. Нажимов, А.В. Имитационное моделирование трехфазных многообмоточных трансформаторов / А.В. Нажимов // XXI Международная научная конференция "Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21". - Саратов, - 2008. - С. 161-162.

17. Нажимов, А.В. Тиристорный регулятор для ограничения токов короткого замыкания как звено системы распределения электрической энергии / А.В. Нажимов // Материалы XIII Нижегородской сессии молодых ученых (технические науки). - Нижний Новгород, - 2008. - С. 137-138.

18. Нажимов, А.В. Схема управления трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения с ключами однонаправленного тока / А.В. Нажимов, А.И. Чивенков, А.С. Волков // Труды Нижегородского государственного технического университета, "Актуальные проблемы электроэнергетики", том 59. - Нижний Новгород, - 2009. – С. 46-52.

**Личный вклад автора.** В работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежат: разработка математических моделей и расчет электромагнитных процессов [1, 2, 3, 4, 5]; разработка и настройка имитационных моделей [3, 15]; обобщение результатов [13]; синтез системы управления [18].