

На правах рукописи



ВИНТОНЯК Никита Павлович

**МОДУЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОГРУЗКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ
ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ
ДВУХТРАНСФОРМАТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Научный руководитель — кандидат технических наук
Семенов Валерий Дмитриевич

Официальные оппоненты: Панфилов Дмитрий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
первый заместитель генерального директора,
научный руководитель
Энергетического института
им. Г.М. Кржижановского
(ОАО «ЭНИН», г. Москва)

Буркин Евгений Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры промышленной и
медицинской электроники Национального
исследовательского Томского
политехнического университета
(ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск)

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский
государственный технический университет»

Защита состоится «13» декабря 2018 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634034, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на сайте ТУСУРа:

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/q6qh5xxm>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зыков Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ежегодно в мировой промышленности выпускаются сотни тысяч автоматических выключателей различной мощности. С развитием техники автоматические выключатели получили широкое распространение, и в данный момент используются практически в любой сфере деятельности человека.

Одной из основных характеристик автоматического выключателя является ток мгновенного расцепления, проверяемый путем короткого замыкания. При испытаниях автоматических выключателей (прогрузке), в зависимости от их мощности, ток короткого замыкания варьируется от единиц кА до десятков кА. При расцеплении контактов автоматический выключатель должен погасить возникающий дуговой разряд и сохранить свою работоспособность. Наихудшим условием для расцепления контактов автоматического выключателя является постоянный ток, т.к. при его протекании нет моментов перехода тока через ноль, что увеличивает время дугового разряда. При этом на контактах автоматического выключателя могут возникать значительные перенапряжения, вызванные паразитными параметрами токоведущих шин. Несоответствие заявленного тока мгновенного расцепления автоматического выключателя с действительным, может привести к серьезным неисправностям энергетической системы.

Для имитации короткого замыкания используются испытательные комплексы для прогрузки автоматических выключателей, которые в общем случае состоят из источника питания, органов управления и измерительной системы. К таким комплексам предъявляется ряд требований по величине напряжения и тока прогрузки, длительности его формирования, способности работы на постоянно «обрывающуюся» нагрузку (размыкающиеся контакты автоматического выключателя) и степени автоматизации процесса прогрузки автоматических выключателей.

Несмотря на растущую необходимость по проверке защитных характеристик автоматических выключателей постоянного тока большинство существующих испытательных комплексов предназначены для формирования переменного тока прогрузки, и в большинстве случаев, не способны формировать постоянный ток прогрузки на уровне десятков кА из-за ограничений источника питания. Поэтому тема разработки источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока величиной вплоть до 26 кА является актуальной.

Степень разработанности

Анализ требований, предъявляемых к современному испытательному комплексу для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, показывает, что, несмотря на наличие наработок по измерениям и автоматизации процесса прогрузки автоматических выключателей

постоянного тока, основным узлом обеспечивающим энергию прогрузки, и влияющим на его технические характеристики, является источник питания постоянного тока.

Несмотря на то, что в промышленности представлено обширное количество источников питания постоянного тока, большинство из них не способны формировать постоянный ток прогрузки на уровне 26 кА в течение длительного времени, либо обладают неприемлемыми массогабаритными показателями, и в большинстве случаев не предназначены для работы на постоянно «обрывающуюся» нагрузку.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование модульного источника питания испытательного комплекса, позволяющего проводить все необходимые испытания по прогрузке автоматических выключателей постоянного тока, и обладающего улучшенными массогабаритными и эксплуатационными показателями.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Обосновать выбор силовой части модульного источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока с точки зрения уменьшения габаритных размеров.

2. Построить «наглядные» эквивалентные схемы выбранной силовой части модульного источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, позволяющие провести её сравнение с аналогами.

3. Построить имитационную модель выбранной силовой части модульного источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, позволяющую получить её статические и динамические характеристики, и оценить адекватность предложенных эквивалентных схем.

4. Выявить особенности работы модульного источника питания испытательного комплекса в режиме «обрыва» тока нагрузки, разработать рекомендации по проектированию модульной структуры источника питания испытательного комплекса, и её защите от перенапряжений, возникающих при размыкании автоматических выключателей постоянного тока.

5. Практически реализовать и экспериментально проверить работоспособность модульного источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока до 26 кА.

6. Разработать методику проектирования программного обеспечения микроконтроллерных систем прямого цифрового управления силовыми преобразователями.

Объектом исследования является модульный источник питания автоматизированного испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока на основе двухтрансформаторных преобразователей.

Предметом исследования являются массо-габаритные характеристики двухтрансформаторных преобразователей и электромагнитные процессы, протекающие в модульной структуре источника питания испытательного комплекса при прогрузке автоматических выключателей постоянным током при «резком» обрыве тока нагрузки.

Научная новизна

1. Впервые обоснована целесообразность применения двухтрансформаторного мостового преобразователя в качестве модульного источника питания испытательного комплекса, который удовлетворяет всем требованиям процесса прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, и позволяет уменьшить габаритные размеры электромагнитных элементов на 4÷19% по сравнению с аналогами.

2. Разработана модернизированная схема двухтрансформаторного мостового преобразователя с последовательно-параллельным включением N -трансформаторно-выпрямительных модулей, которая позволяет согласовать характеристики полупроводниковых ключей входного инвертора и выходного синхронного выпрямителя, обеспечивая равномерное распределение тока между трансформаторно-выпрямительными модулями.

3. Впервые доказано, что схемы двухтрансформаторного мостового преобразователя и двухтрансформаторного мостового преобразователя с N -трансформаторно-выпрямительными модулями «сводятся» к эквивалентным схемам, включающим в себя источник напряжения и идеальный трансформатор, или источник напряжения с ШИМ-регулированием, выпрямитель, и выходной фильтр, индуктивность которого определяется индуктивностями намагничивания трансформаторов, приведенными к вторичной обмотке.

4. Впервые установлено, что на параллельно включенных модулях источника питания при «резком» обрыве тока нагрузки возникают перенапряжения, опасные для полупроводниковых ключей, вызванные паразитными индуктивностями токоведущих шин соединяющих модули, в то время как эти перенапряжения отсутствуют, если источник питания выполнен в виде одного модуля на полную мощность нагрузки.

5. Предложена новая методика расчета защитного модуля, который позволяет ограничить величину перенапряжений, возникающих в модульном источнике питания при «резком» обрыве тока нагрузки, на требуемом уровне.

6. Разработана новая методика проектирования программного обеспечения микроконтроллерных систем прямого цифрового управления силовыми преобразователями, обеспечивающая максимальное быстродействие, за счет «обработки» возникающих событий непосредственно в прерываниях.

Практическая значимость диссертационной работы

1. Разработана эквивалентная схема двухтрансформаторного мостового преобразователя и двухтрансформаторного мостового преобразователя с N -

трансформаторно-выпрямительными модулями, позволяющая «наглядно» исследовать процессы, протекающие в индуктивностях намагничивания и рассеивания трансформаторов, а также в элементах выходной цепи, что в свою очередь позволят формировать предъявляемые к ним требования, с точки зрения статических и динамических свойств преобразователя.

2. Получены относительные зависимости параметров двухтрансформаторного мостового преобразователя с N -трансформаторно-выпрямительными модулями от их количества, что позволяет рассчитать изменение его характеристик при распределении тока/мощности нагрузки между трансформаторно-выпрямительными модулями.

3. Разработана модифицированная методика расчета индуктивностей токоведущих шин в среде имитационного моделирования COMSOL Multiphysics, позволяющая проводить измерения в сложных трехмерных конструкциях токоведущих шин с несколькими контурами протекания тока.

4. Разработана схема и методика расчета параметров защитного модуля источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, позволяющая ограничить величину перенапряжений при их размыкании на требуемом уровне.

5. Разработана методика проектирования программного обеспечения микроконтроллерных систем прямого цифрового управления силовыми преобразователями, которая может быть использована как при разработке сложных систем управления источниками питания, так и при реализации систем логического управления.

6. Разработан испытательный комплекс для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, на основе модульного источника питания с выходным током до 26 кА.

Методы исследований

Для решения поставленных задач были использованы элементы теории электрических и магнитных цепей, теория подобия, методы схемотехнического моделирования с использованием пакетов имитационного моделирования MATLAB-Simulink, программа для моделирования физических процессов COMSOL Multiphysics, программа инженерных и научных расчетов Mathcad а также физическое макетирование.

Положения, выносимые на защиту

1. Эквивалентная схема двухтрансформаторного мостового преобразователя и двухтрансформаторного мостового преобразователя с N -трансформаторно-выпрямительными модулями адекватно отражает статические и динамические свойства преобразователя с погрешностью не более 1,5%.

2. Модернизированная схема двухтрансформаторного мостового преобразователя с N -трансформаторно-выпрямительными модулями позволяет равномерно распределить мощность нагрузки между трансформаторно-выпрямительными модулями и согласовать параметры

силовых полупроводниковых ключей, как со стороны питающей сети, так и со стороны нагрузки.

3. Схема и методика расчета параметров защитного модуля испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока позволяет ограничить величину перенапряжений, возникающих в структуре модульного источника питания при размыкании автоматических выключателей постоянного тока, на требуемом уровне.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректной постановкой задачи, адекватностью разработанных моделей, а также результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований на имитационной и физической моделях.

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы использованы в испытательном комплексе для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока, созданной в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники. Результаты диссертационной работы внедрены в АО «СПО «Арктика». Также результаты работы внедрены в компании ООО «Вип Электроника», при проведении НИОКР «Установка для прогрузки автоматических выключателей». Также результаты работы внедрены в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники в учебный процесс и используются в индивидуальных заданиях и курсовых проектах по дисциплинам «Основы преобразовательной техники», «Энергетическая электроника», «Полупроводниковые ключи в силовых схемах» и «Импульсные модуляционные системы». Кроме того, результаты диссертационной работы используются при реализации проектов группового проектного обучения, а также при подготовке выпускных квалификационных работ.

Личный вклад автора

Материалы диссертации являются обобщением работ автора, выполненных в период с 2013 по 2018 года, и отражают его личный вклад в решаемую задачу. Основные научные результаты получены автором самостоятельно. Опубликованные работы написаны в соавторстве с руководителем и другими сотрудниками, принимавшими участие в разработке и практической реализации испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока. Совместно с научным руководителем выполнена постановка задач диссертационного исследования, анализ и обсуждение результатов теоретических и практических исследований. Автором совместно с Кабириным В.А. и Калининым Р.Г. разработан и изготовлен испытательный комплекс для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока с выходным током 26 кА, практические и теоретические исследования которого проведены автором самостоятельно.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2015 г.), а также на Всероссийских и международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (г. Томск): «Научная сессия ТУСУР-2014», «Научная сессия ТУСУР-2015», «Научная сессия ТУСУР-2016».

Публикации

По основным научным результатам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работ, в том числе, 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных высшей аттестационной комиссией РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка 143 использованных источников и приложения. Работа изложена на 231 страницах машинописного текста, иллюстрируется 111 рисунками и 12 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформирована цель и определены задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая значимость выполненных исследований, методы исследований и апробация результатов исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и краткий обзор структуры диссертации.

В первой главе, «Обзор научно-технической литературы по испытательным комплексам для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока и силовым преобразователям их источников питания», проведен обзор научно-технической литературы по испытательным комплексам (ИКАВ) для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока (АВ) и силовым преобразователям их источников питания (ИПИК). В результате обзора сформирована обобщенная функциональная схема ИКАВ и выявлено, что ключевым узлом, определяющим его основные характеристики, является ИПИК. При применении ИПИК в структуре ИКАВ к нему предъявляется ряд требований:

- способность формировать в непрерывном режиме постоянный выходной ток не менее 26 кА, при напряжении 5-12 В;
- обеспечивать точность установки и качество выходного напряжения и тока прогрузки АВ, коэффициент пульсации 2-5%;
- обеспечивать заданную скорость нарастания и длительность формирования тока прогрузки АВ;
- способность работы на постоянно «обрывающуюся» нагрузку (резкий переход из состояния короткого замыкания в состояние холостого хода).

Проводится сравнение характеристик существующих ИКАВ, построенных на базе различных ИПИК, в ходе которого выделяются их достоинства и недостатки, а также делается вывод, о том, что не один из них не подходит для автоматизированного проведения всего комплекса испытаний по прогрузке АВ.

Предложен автоматизированный ИКАВ, на основе модульного ИПИК, построенного на базе высокочастотного транзисторного преобразователя, отвечающий всем требованиям процесса прогрузки АВ.

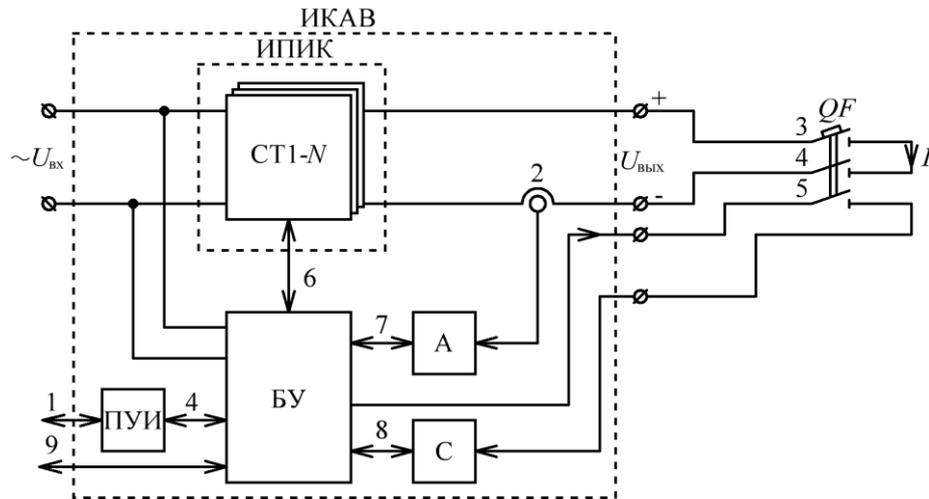


Рисунок 1 – Функциональная схема предлагаемого ИКАВ

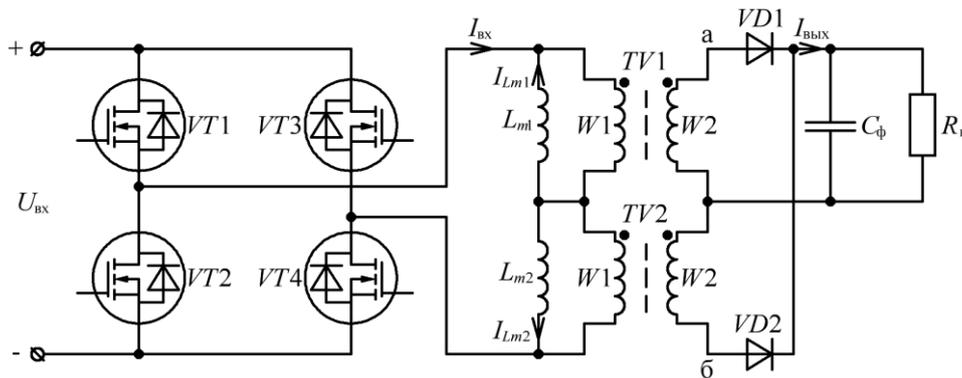
На рис. 1 представлена функциональная схема предложенного ИКАВ, который состоит из модульного ИПИК, построенного на базе нескольких параллельно соединённых стабилизаторов тока (СТ1-*N*), преобразующих входное переменное напряжение ($U_{вх}$) в регулируемое выходной ток (I), цифрового амперметра (А) и секундомера (С), измеряющих времятоковые характеристики АВ, микропроцессорного блока управления (БУ) и микропроцессорного пульта управления и индикации (ПУИ), с которым взаимодействует оператор ИКАВ (1). БУ соединяется с «внутренними» элементами ИКАВ (4-8) и «внешними» источниками сигналов (9) по цифровому интерфейсу связи, что позволяет интегрировать ИКАВ в автоматизированные системы управления технологическими процессами.

В результате анализа структуры и характеристик предложенного ИКАВ были поставлены задачи по реализации его модульного ИПИК, которые решены в последующих главах диссертационной работы.

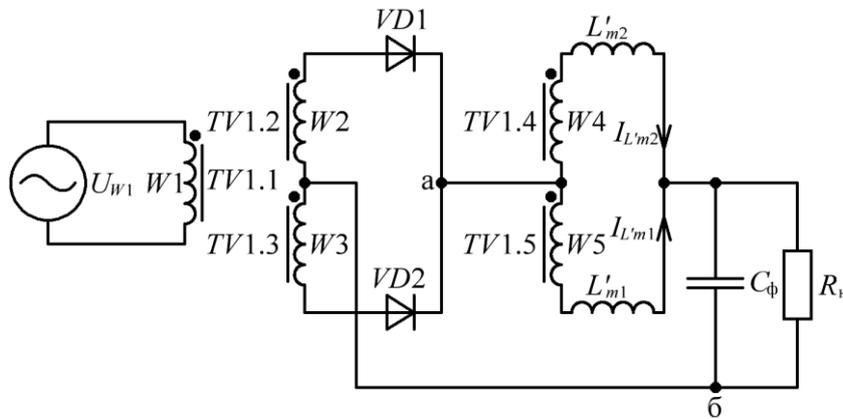
Вторая глава, «Модульный источник питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока на основе высокочастотного транзисторного преобразователя», посвящена задачи выбора силовой части модульного ИПИК, отвечающей требованиям процесса прогрузки АВ и обладающей наименьшими габаритными размерами электромагнитных элементов (ГРЭЭ). В первой части второй

главы были рассмотрены схемы двухтактных транзисторных преобразователей с мостовым инвертором и фазовым управлением, а именно:

- мостового преобразователя с двухобмоточным трансформатором и мостовым выпрямителем (МПДТ);
- мостового преобразователя со средней точкой вторичной обмотки трансформатора (МПСТ);
- мостового преобразователя с двухобмоточным трансформатором и удвоителем тока (МПУТ);
- двухтрансформаторного мостового преобразователя с выпрямителем по схеме со средней точкой трансформаторов (ДТМП).



a



б

Рисунок 2 – Функциональная схема ДТМП с учетом индуктивностей намагничивания трансформаторов – *a*. Эквивалентная схема выходной цепи ДТМП – *б*

В результате анализа работы двухтактных транзисторных преобразователей с мостовым инвертором получены «простые» эквивалентные схемы выходной цепи МПУТ и ДТМП (рис. 2, *б*), позволяющие «наглядно» наблюдать процессы, протекающие в дросселях МПУТ и индуктивностях намагничивания ДТМП (рис. 3, *б*), и сформировать общие требования к фильтрующим элементам рассмотренных преобразователей.

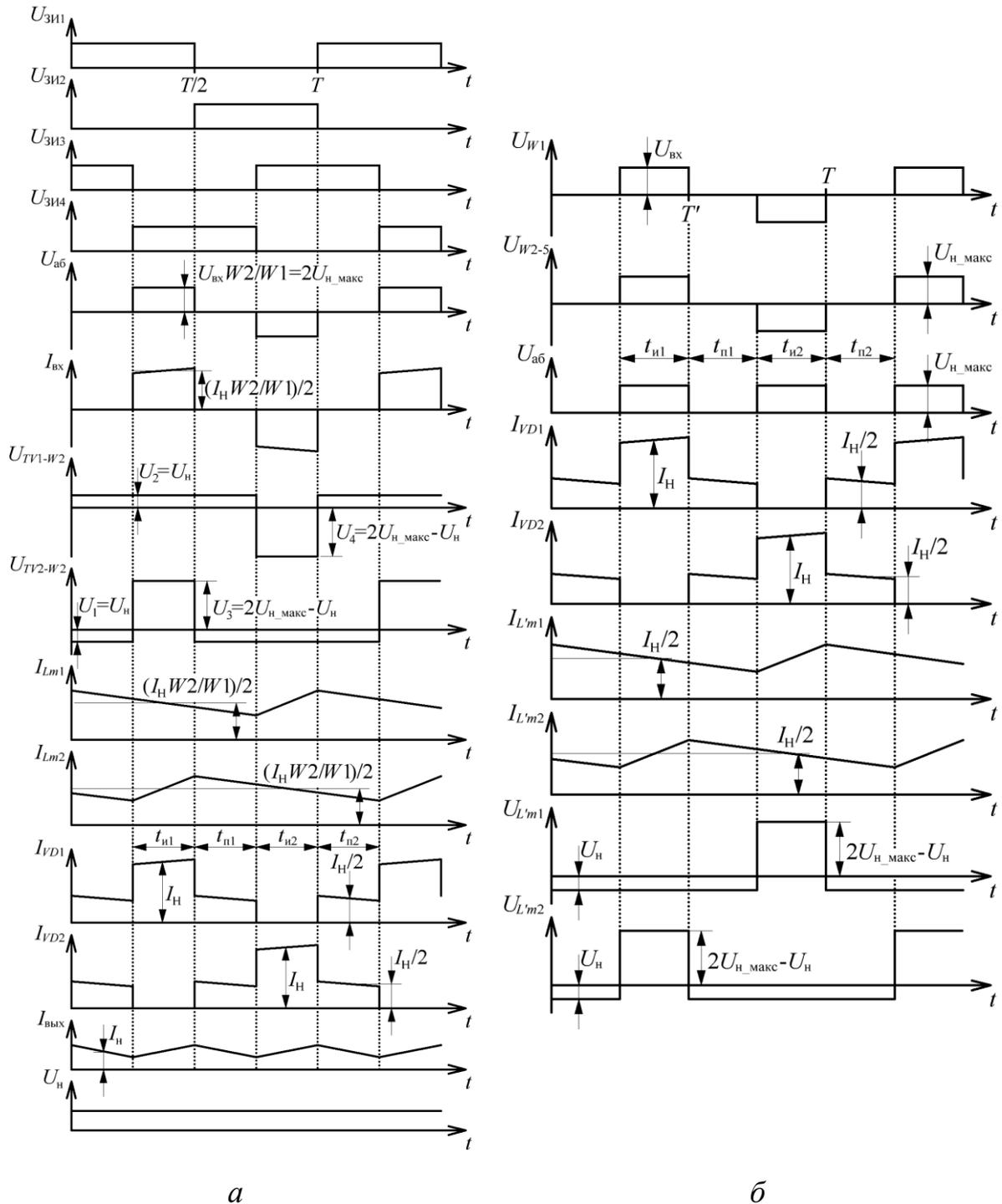


Рисунок 3 – Диаграммы работы ДТМП – *a*. Диаграммы работы эквивалентной схемы выходной цепи ДТМП – *б*

Полученные эквивалентные схемы состоят из переменного источника ЭДС (U_{W1}), идеального трансформатора ($TV1$) с пятью обмотками ($W1-W5$), выпрямителя ($VD1-VD2$), дросселей (L'_{m1} и L'_{m2}) и емкости фильтра (C_{Φ}). При этом переменный источник ЭДС (U_{W1} , рис. 2, *б*), эквивалентной схемы ДТМП, отражает работу инвертора ДТМП ($VT1-4$, рис. 2, *a*), подавая высокочастотное переменное напряжение (с частотой преобразования) на первичную обмотку трансформатора ($W1$, рис. 3, *б*). Обмотки

трансформатора $W2-W3$ и выпрямитель $VD1-VD2$, образуют «цепь постоянного тока», на выходе которой формируется выпрямленное (однополярное) напряжение, с удвоенной частотой преобразования ($U_{аб}$, рис. 3, б). Обмотки трансформатора $W4-W5$ и индуктивности намагничивания трансформаторов ДТМП (L'_{m1} и L'_{m2}), «приведенные» к вторичным обмоткам, образуют «цепь переменного тока», причем:

$$L'_{m1} = L'_{m2} = \frac{L_{m1}}{n_{TW}^2} = \frac{L_{m2}}{n_{TW}^2}, \quad (1)$$

где $n_{TW} = W_1/W_2 = U_1/U_2 = I_2/I_1 = \sqrt{L_1/L_2}$ – коэффициент трансформации трансформаторов ДТМП.

Полученные эквивалентные схемы рассмотренных преобразователей позволили «свести» их к эквивалентным схемам с LC -фильтром (рис. 4), и во второй части второй главы, произвести сравнение ГРЭЭ, путем расчета их габаритной мощности с одинаковыми требованиями к качеству выходного напряжения и тока ИПИК (рассчитываются по аналогии с непосредственным преобразователем напряжения понижающего типа, при условии непрерывности тока дросселя).

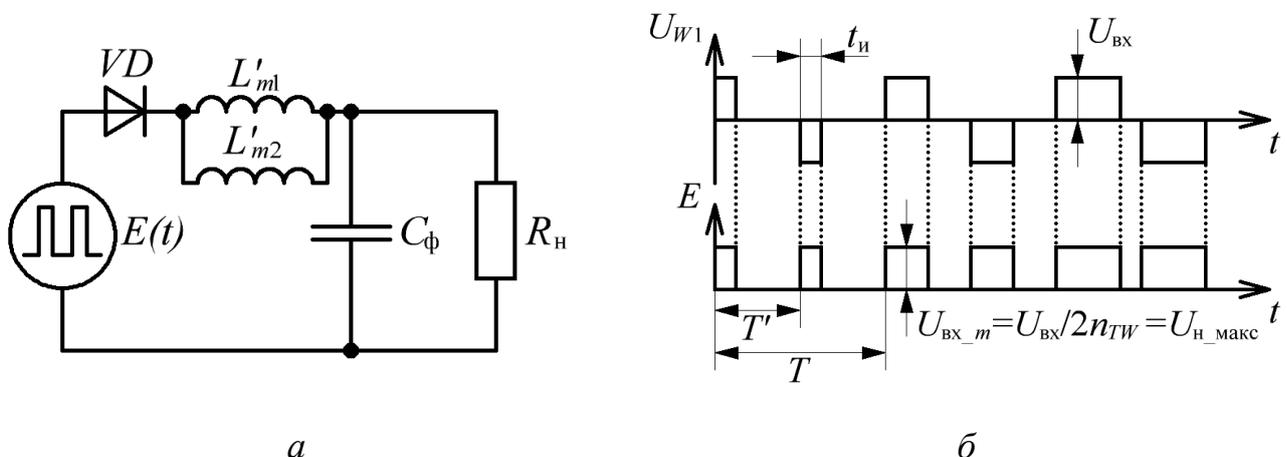


Рисунок 4 – Эквивалентная схема выходной цепи ДТМП по постоянному току – а. Диаграммы работы эквивалентной схемы выходной цепи ДТМП по постоянному току – б

При этом габаритная мощность трансформаторов (S_{TV}) рассчитывается как сумма произведений действующих токов и напряжений обмоток трансформатора, а габаритная мощность дросселей (S_L) рассчитывается как произведение действующего тока в дросселе и напряжения на дросселе. Суммарная габаритная мощность электромагнитных элементов преобразователя (S_{Σ}) равна сумме габаритных мощностей трансформаторов и дросселей входящих в его состав.

Таблица 1 – Суммарная габаритная мощность электромагнитных элементов двухтактных преобразователей с мостовым инвертором

№	Схема	S_{TV} , Вт	S_L , Вт	S_{Σ} , Вт
1	МПДТ	$2 \times P_H$	$0,5 \times P_H$	$2,5 \times P_H$
2	МПСТ	$2,414 \times P_H$	$0,5 \times P_H$	$2,914 \times P_H$
3	МПУТ	$2 \times P_H$	$2 \times (0,5 \times P_H)$	$3 \times P_H$
4	ДТМП	$2 \times (1,207 \times P_H)$	-	$2,414 \times P_H$

Суммарные габаритные мощности электромагнитных элементов рассмотренных преобразователей представлены в табл. 1, данные которой позволяют сделать вывод о том, что ГРЭЭ ДТМП меньше, чем у остальных рассмотренных преобразователей. При этом индуктивность намагничивания каждого трансформатора ДТМП удовлетворяет условие:

$$L_{m1} = L_{m2} \geq 2 \times n_{TW}^2 \times L_{\phi}, \quad (2)$$

где L_{ϕ} – требуемая величина индуктивности эквивалентного LC-фильтра, Гн.

В случае невозможности выполнения условия (2), вызванного ограничениями реальных параметров сердечников трансформаторов (геометрическими размерами, магнитной проницаемостью и т.п.), индуктивность «внутреннего» сглаживающего дросселя ДТМП, т.е. индуктивности намагничивания «приведенные» к вторичным обмоткам трансформаторов, увеличивается за счет внешнего дросселя - L'_{ϕ} . При этом ГРЭЭ ДТМП всегда меньше чем у МПСТ и МПУТ, и соизмеримы с МПДТ при выполнении условия:

$$L'_m \geq 0,828 \times L_{\phi} \quad (3)$$

В третьей части второй главы проведен обзор технических решений, позволяющих увеличить выходной ток модульного ИПИК на базе ДТМП до нескольких десятков кА. В результате обзора разработана модернизированная схема двухтрансформаторного мостового преобразователя с последовательно-параллельным включением N -трансформаторно-выпрямительных модулей (ТВМ, рис. 5), которые состоят из двухтрансформаторного преобразователя ($TV1$ и $TV2$) и синхронного выпрямителя ($VT1$ и $VT2$).

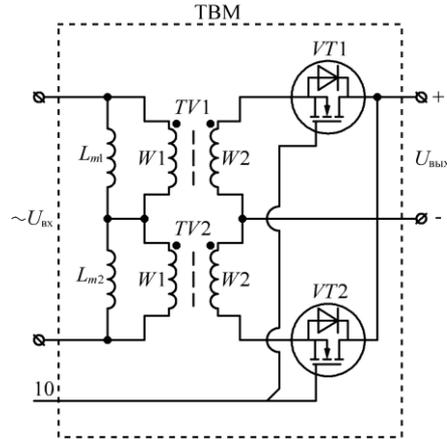


Рисунок 5 – Функциональная схема одного ТВМ ДТМП

При этом модуль стабилизатора тока ИПИК (СТ1- N , рис. 6), состоит из входного выпрямителя с фильтром (ВхФ), инвертора ($VT1-4$), нескольких ТВМ (от 2 до N), входы которых соединены последовательно и подключены к инвертору, а выходы соединены параллельно и подключены к выходному фильтру (C_ϕ) и микропроцессорной системе управления (МСУ), которая состоит из задатчика (б), вычитающего сумматора, корректирующего звена (КРЗ), формирователя сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), формирователя сигналов фазового управления инвертором (ФУ) и сигналов управления синхронным выпрямителем (СВ), одинаковых для всех ТВМ.

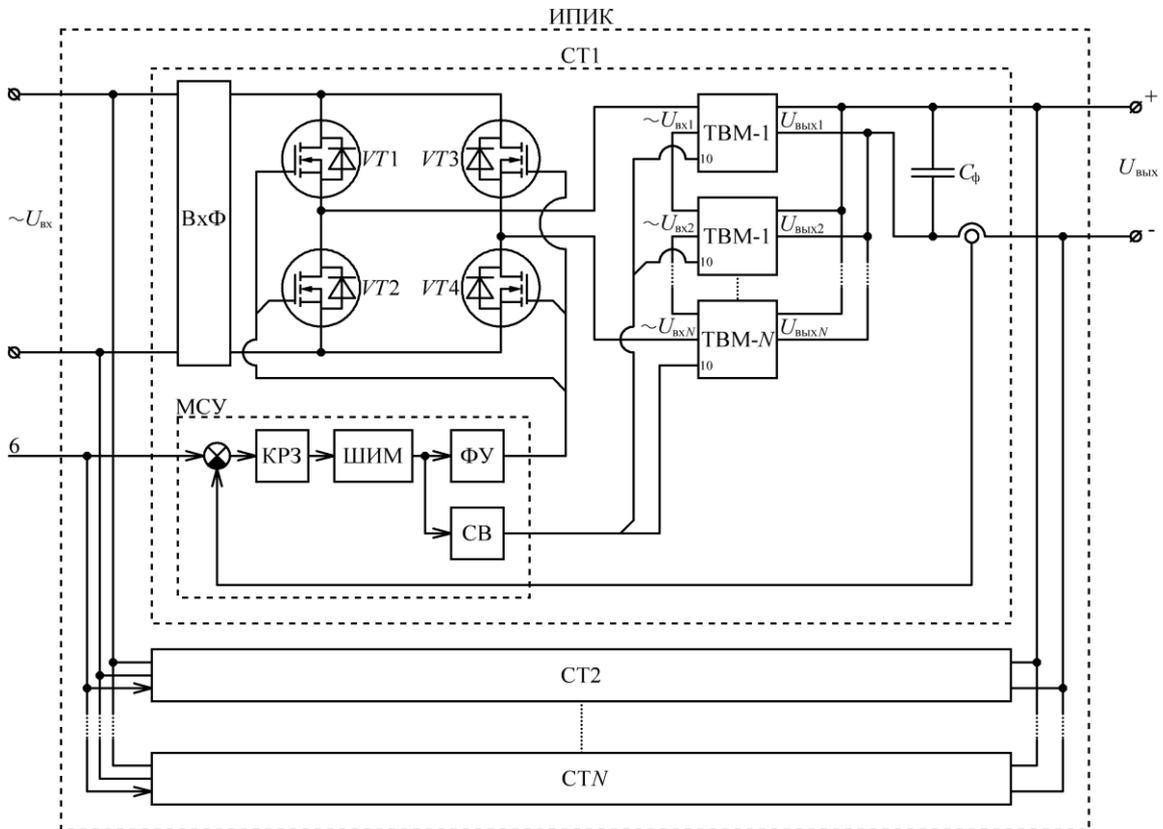


Рисунок 6 – Функциональная схема модульного ИПИК на базе ДТМП с N -ТВМ

Таблица 2 – Относительные закономерности изменения параметров трансформаторов ДТМП с N -ТВМ

Функция	Зависимость от количества ТВМ
Линейный размер (высота/длина/ширина) каждого трансформатора	$1/N_{\text{ТВМ}}^{0,25}$
Суммарный объем и масса всех трансформаторов	$N_{\text{ТВМ}}^{0,25}$
Потери трансформаторов на единицу мощности	$N_{\text{ТВМ}}^{0,25}$
Потери трансформаторов на единицу охлаждаемой поверхности	$1/N_{\text{ТВМ}}^{0,25}$
Суммарная индуктивность рассеивания всех трансформаторов, приведенная к первичной обмотке	$1/N_{\text{ТВМ}}^{0,25}$
Индуктивность намагничивания каждого трансформатора, приведенная к первичной обмотке	$1/N_{\text{ТВМ}}^{1,25}$

Для упрощения описания, и анализа работы части схем ДТМП с N -ТВМ рассматриваются на диодных выпрямителях, что не ограничивает возможности применения синхронных выпрямителей.

Предлагается «упрощенная» методика проектирования модульного ИПИК на базе ДТМП с N -ТВМ, позволяющая увеличивать его выходную мощность. При этом применение теории подобия к трансформаторам СТ ИПИК, построенном на базе ДТМП с N -ТВМ, позволило найти зависимости их параметров от количества ТВМ (табл. 2), а также получить эквивалентные схемы выходной цепи модернизированной схемы ДТМП с N -ТВМ.

В четвертой части второй главы приводятся результаты имитационного моделирования в среде MATLAB-Simulink, в ходе которого был построен виртуальный «стенд» позволяющий одновременно исследовать статические и динамические свойства трех независимых подсистем различного уровня сложности/детализации при воздействии на них одинаковых управляющих сигналов. По результатам моделирования оценена точность расчета коммутационных процессов, подтверждена адекватность полученных эквивалентных схем выходной цепи ДТМП и ДТМП с N -ТВМ, и сделан вывод о целесообразности их использования при исследовании режимов работы модульного ИПИК в процессе прогрузки АВ.

В третьей главе, «Защита модульной структуры источника питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока от перенапряжений», проведен анализ работы модульного ИПИК, с учетом паразитных индуктивностей токоведущих шин, и величины перенапряжений, возникающих на них при размыкании АВ. В первой части третьей главы рассмотрена работа ИПИК на «обрывающуюся» нагрузку и выявлено, что перенапряжения на полупроводниковых элементах выходной цепи СТ ИПИК не возникают при работе одного СТ ИПИК, а возникают только при параллельной работе нескольких СТ ИПИК.

Проведен анализ «кольцевой», «лестничной» и «линейной» схем параллельного подключения модулей СТ ИПИК, по результатам которого для дальнейшего анализа выбрана «линейная» схема подключения (рис. 7), как наиболее предпочтительная с точки зрения простоты конструктивного выполнения токоведущих шин, при которой СТ ИПИК (СТ1 - СТ n) соединяются друг с другом токоведущими шинами с паразитными индуктивностями ($L_{Ш1.1}, L_{Ш1.2} - L_{Шn-1.1}, L_{Шn-1.2}$) выход ИПИК подключается к «крайнему» СТ ИПИК (СТ n) токоведущими шинами с паразитными индуктивностями ($L_{Шn.1}, L_{Шn.2}$), а АВ подключается к выходу ИПИК токоведущими шинами с паразитными индуктивностями (L_{B1} и L_{B2}).

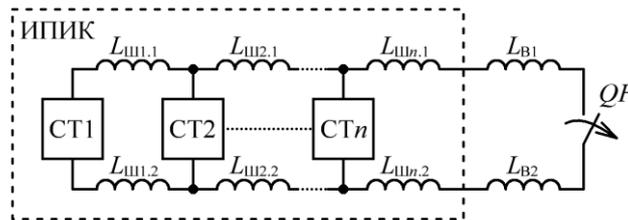


Рисунок 7 – «Линейная» схемы параллельного подключения СТ ИПИК

Во второй части третьей главы разработана трехмерная модель реальной конструкции токоведущих шин ИПИК в среде имитационного моделирования COMSOL Multiphysics (рис. 8, б). Предложен способ измерения паразитной индуктивности отдельных участков реальных конструкций токоведущих шин, путем создания в ней контуров измерения и их коммутации с помощью перемычек, основанный на измерении энергии магнитного поля как интеграла по объему от плотности магнитной энергии, с дальнейшим пересчетом ее в значение индуктивности.

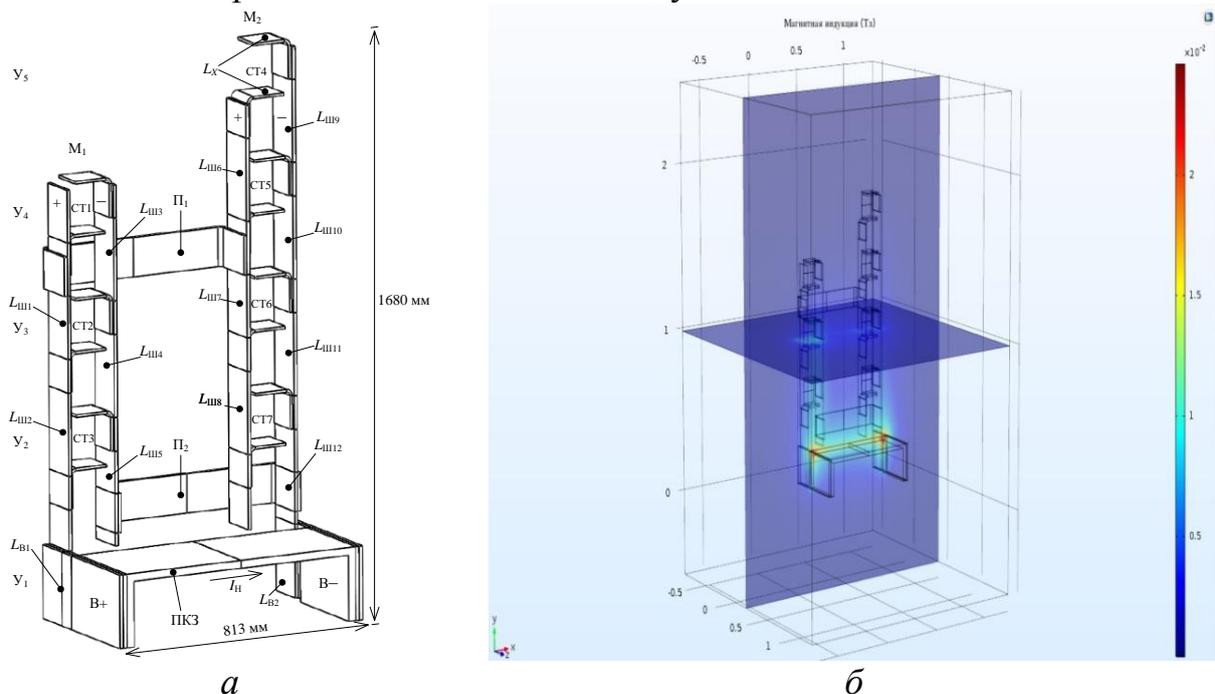


Рисунок 8 – Конструкция токоведущих шин ИПИК – а. Результаты моделирования в среде COMSOL Multiphysics – б

Конструктивное исполнение токоведущих шин (рис. 8, а) определяется расположением модулей СТ ИПИК (СТ1 – СТ7) и выходов ИПИК (В+ и В-), которые установлены на разных горизонтальных уровнях ($У_1 – У_5$) в двух стойках типа Rittal DK-TS 7820.730. Токоведущие шины ИПИК выполнены в виде двух «магистралей» (M_1 и M_2), соединённых между собой двумя перемычками (Π_1 и Π_2), с паразитными индуктивностями $L_{\Pi 1}$ и $L_{\Pi 2}$. Таким образом, в силу конструктивных ограничений, реализуется комбинация «линейной» и «кольцевой» схем подключения. Каждая «магистраль» состоит из двух монолитных медных шин, но для удобства рассмотрения паразитных индуктивностей они разделены на отдельные участки с паразитными индуктивностями $L_{Ш11} – L_{Ш12}$.

Средняя величина измеренной паразитной индуктивности отдельных участков токоведущих шин в разработанном ИПИК составляет $100 \div 160$ нГн.

В третьей части третьей главы приведены результаты оценки величины перенапряжений, возникающих в модульной структуре ИПИК. В результате анализа процесса эксплуатации АВ предложена эквивалентная схема размыкающегося АВ, в качестве которого выступает линейно возрастающее сопротивление, скорость изменения которого зависит от реальных параметров АВ и составляет $1,66 \div 200$ кОм/с.

Построена имитационная модель процесса прогрузки АВ в среде MATLAB-Simulink (рис. 9), при «линейной» схеме подключения четырех СТ ИПИК, построенных на базе эквивалентной схемы выходной цепи ДТМП с N -ТВМ по постоянному току (рис. 4, а). При этом емкость фильтра (C_{ϕ}) целенаправленно исключена из модели СТ ИПИК, для рассмотрения процесса прогрузки АВ при «наихудших» условиях с точки зрения величины перенапряжений.

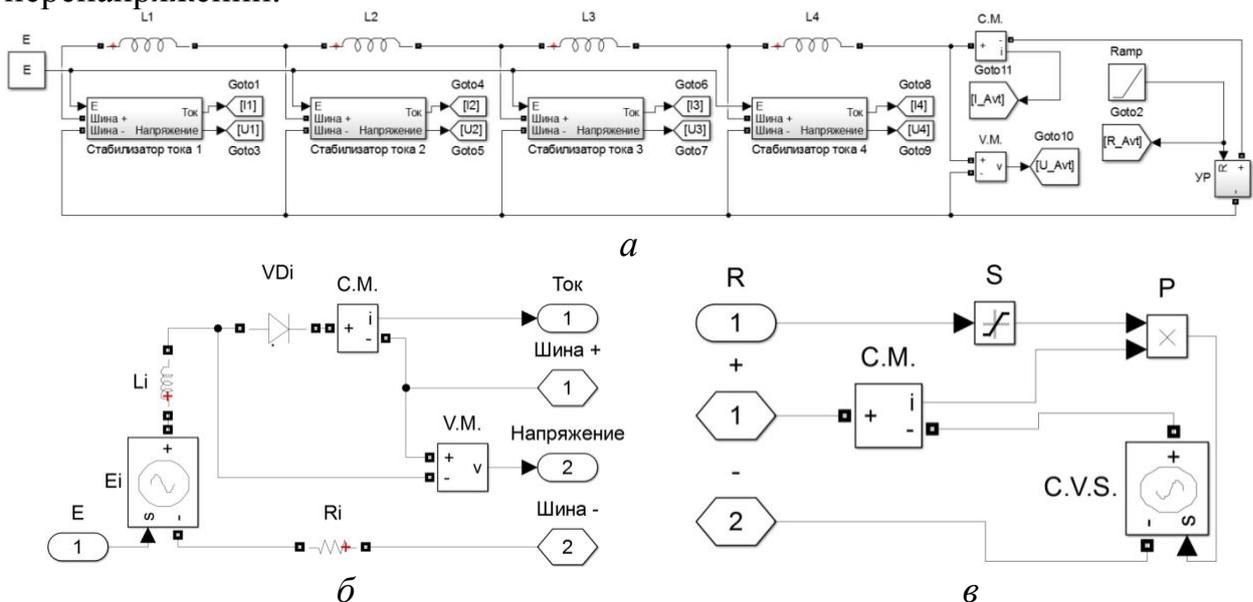


Рисунок 9 – Имитационная модель: прогрузки АВ несколькими СТ ИПИК – а; подсистемы СТ ИПИК – б; подсистемы управляемого резистора – в

Представлены результаты моделирования трех экспериментов (№1-3) по оценке перенапряжений (табл. 3). В первом эксперименте паразитные индуктивности имеют одинаковое значение и с ростом номера СТ ИПИК (n) растет величина максимального напряжения на запертом диоде ($U_{n_макс}$). Это обусловлено тем, что ЭДС самоиндукции паразитных индуктивностей соединяется последовательно и прикладывается к запертым внутренним диодам СТ ИПИК. Во втором и третьем эксперименте, для имитации дополнительной индуктивности выводов ИПИК, величина «последней» паразитной индуктивности ($n=4$) задана значительно больше остальных, при этом с её ростом наблюдается уменьшение величин $U_{n_макс}$.

Это обусловлено тем, что ЭДС самоиндукции «перераспределяется» между паразитными индуктивностями пропорционально их величине. Таким образом «последняя» паразитная индуктивность «забирает» большую часть ЭДС самоиндукции, которая прикладывается к размыкающимся контактам АВ.

Таблица 3 – Перенапряжения возникающие на полупроводниковых элементах выходной цепи СТ ИПИК при прогрузки АВ и «линейной» схеме подключения

№	1				2				3				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
$L_{ш\ n}$, мкГн	0,1				0,1				1	0,1			
$U_{n_макс}$, В	0	367,3	831,1	1326,8	0	290,1	573,2	807,3	0	120,4	218,5	308,3	

Четвертая часть третьей главы посвящена анализу способов защиты полупроводниковых элементов выходной цепи СТ ИПИК от перенапряжений, возникающих в модельной структуре ИПИК при размыкании АВ. Предложен защитный модуль ИПИК (ЗМ, рис. 10), построенный на базе нескольких последовательно соединённых силовых диодах ($VD1-VDn$) и вспомогательных RC -цепочках, позволяющий ограничить перенапряжения, возникающие в модульной структуре ИПИК с «линейной» схемой подключения СТ ИПИК при размыкании АВ.

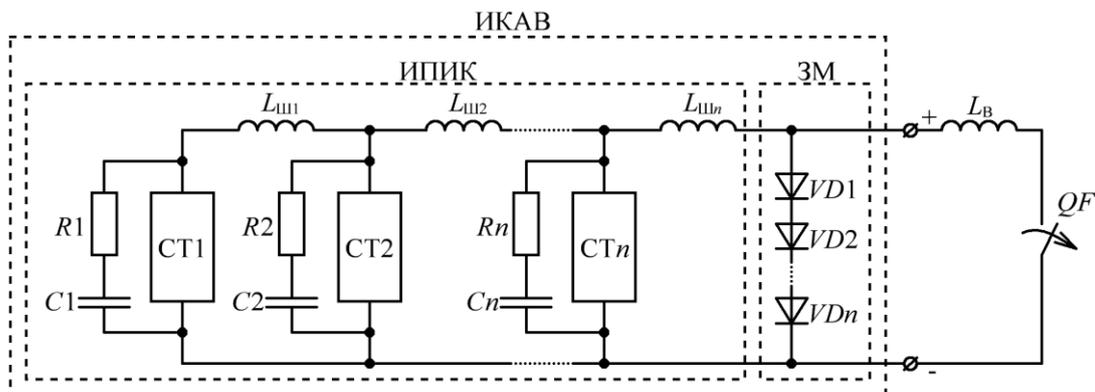


Рисунок 10 – Функциональная схема ИКАВ с ЗМ

В случае превышения напряжения на выходе ИПИК суммарного прямого падения напряжения на силовых диодах (максимальное напряжение ЗМ), они открываются и создают контур протекания тока «последней» паразитной индуктивности ($L_{\text{шн}}$) «перехватывая» ток прогрузки АВ и ограничивая величину перенапряжения.

Предложена методика расчета ЗМ ИПИК при «наихудших» условиях процесса прогрузки АВ, определяющая условие успешного «перехвата» тока прогрузки АВ, при выполнении которого ЗМ эффективно ограничивает перенапряжения:

$$I_{VD_ЗМ} > I_{\text{разм}} - I_{\text{СТ_ИПИК}}, \quad (4)$$

где $I_{VD_ЗМ} = I_{\text{разм}} \times L_{\text{шн}} / (L_{\text{шн}} + L_{VD})$ – ток «перехвата» ЗМ ИПИК, А; $I_{\text{разм}}$ – ток размыкаемый АВ, А; $I_{\text{СТ_ИПИК}}$ – ток одного СТ ИПИК, А; L_{VD} – общая индуктивность ЗМ, Гн; $L_{\text{шн}}$ – величина «последней» паразитной индуктивности, Гн.

Построена имитационная модель работы ЗМ ИПИК в среде MATLAB-Simulink. На базе построенной имитационной модели проведен анализ работы ЗМ в зависимости от величины его индуктивности, скорости изменения сопротивления АВ, величины внутренней индуктивности СТ ИПИК, величины выходной индуктивности ИПИК и емкости RC-цепочек, по результатам которого подтверждается эффективность работы ЗМ ИПИК, рассчитанного по предложенной методике для «наихудших» условий процесса прогрузки АВ. Представлены результаты имитационного моделирования и произведена оценка точности расчетов основных параметров ЗМ – расхождение результатов расчетов и результатов имитационного моделирования не превысили 13%, что подтверждает практическую ценность предложенной методики расчета ЗМ ИПИК.

Четвертая глава, «Практическая реализация испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока», посвящена задачи практической реализации и испытаниям экспериментального образца ИКАВ с модульным ИПИК, построенном на базе ДТМП с N-ТВМ. Приведены технические характеристики реализованного ИКАВ (табл. 4) и рассмотрены его функциональные схемы, с перечислением основных элементов используемой элементной базы.

Практически реализованы 7 модулей СТ ИПИК (рис. 11), построенных на базе ДТМП с N-ТВМ, и экспериментально подтверждена их работоспособность при формировании выходного тока 4 кА. Проведены испытания автоматического выключателя бытового назначения «ВА47-29», по результатам которых не наблюдалось перенапряжений на транзисторах ТВМ, что подтверждает сделанные ранее выводы – при прогрузке АВ одним

СТ ИПИК, энергия накопленная в паразитной индуктивности токоведущих шин «рассеивается» на размыкающихся контактах АВ и перенапряжений на транзисторах ТВМ не возникает.

Таблица 4 – Технические характеристики ИКАВ

Характеристики	Значение
Ток прогрузки АВ	45 ~ 26000 А
Напряжение прогрузки АВ	5 В
Количество модулей СТ ИПИК	7 шт.
Выходной ток одного модуля СТ ИПИК	4000 А
Коэффициент пульсаций тока прогрузки АВ	$\leq 5 \%$
Длительность формирования выходного тока, с	не ограничена
Напряжение питания	380В 50Гц
Коэффициент полезного действия	$\geq 85 \%$
Размеры	2200x1000x1200 мм
Объем	2,64 м ³
Масса	1900 кг

Практически реализован ИКАВ с модульным ИПИК (рис. 12), состоящем из 7-и модулей СТ ИПИК, построенных на базе ДТМП с N-ТВМ, и экспериментально подтверждена его работоспособность при формировании тока прогрузки АВ 26 кА.

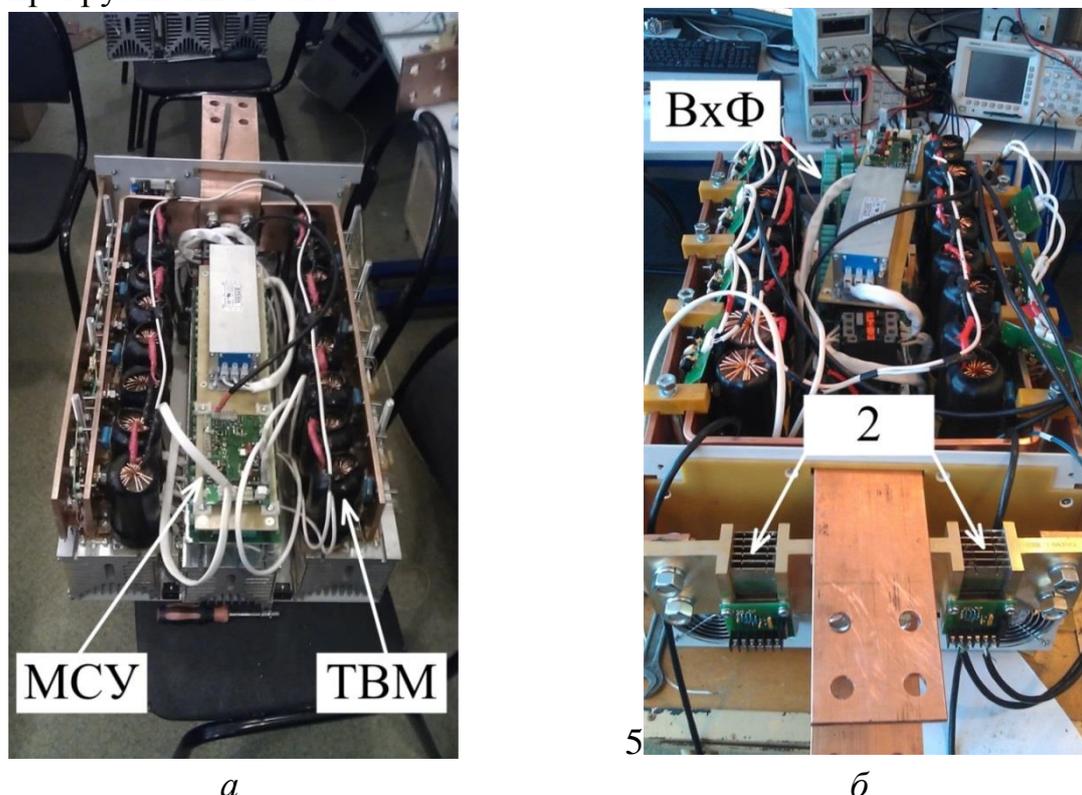


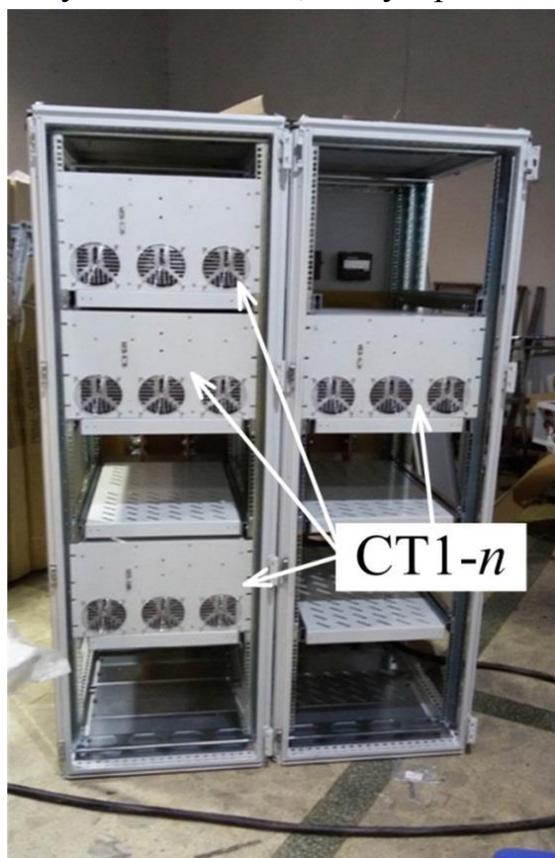
Рисунок 11 – Фотографии реализованного модуля СТ ИПИК: ракурс 1 – а; ракурс 2 – б

Экспериментально исследованы два принципа формирования тока прогрузки АВ:

- «ступенчатый», при котором каждый модуль СТ ИПИК формирует разный ток, например, при необходимости формирования 6 кА, задатчик первого СТ ИПИК устанавливается в значение 4 кА, задатчик второго СТ ИПИК устанавливается в значение 2 кА, а задатчики остальных СТ ИПИК устанавливаются в ноль;

- «общий/одинаковый», при котором каждый модуль СТ ИПИК формирует одинаковый ток, например, при необходимости формирования 7 кА, задатчик каждого СТ ИПИК устанавливается в значение 1 кА;

В результате анализа принципов формирования тока прогрузки АВ было выявлено, что при «ступенчатом» формировании возникают ситуации «перетекания» выходного тока одного СТ ИПИК (с наибольшим задатчиком), во вторичную цепь другого СТ ИПИК (с наименьшим задатчиком). «Перетекания» тока обусловлено тем, что открытый канал транзисторов синхронного выпрямителя ТВМ, в отличие от диодов, выступает в роле активного сопротивления, пропускающего ток в обоих направлениях. Следовательно, при малых выходных напряжениях одного из СТ ИПИК, в нем создаются условия для протекания обратного тока, который замыкается через вторичные обмотки ТВМ. Экспериментально подтверждена целесообразность установки общего/одинакового задатчика тока каждому модулю СТ ИПИК, для устранения «перетекания» тока между ними.



а



б

Рисунок 12 – Фотографии реализованного ИКАВ: ракурс 1 – а; ракурс 2 – б

Практически реализован ЗМ ИПИК и проведены экспериментальные исследования эффективности его работы при прогрузки реального АВ в диапазоне токов десятков кА.

В результате экспериментального исследования работы ЗМ ИПИК выявлено, что при его отсутствии, в момент размыкания АВ на транзисторах синхронного выпрямителя ТВМ возникают перенапряжения, превышающие по амплитуде их максимально допустимое напряжение (40 В). В процессе дальнейшего экспериментального исследования работы ЗМ ИПИК выявлено, что при его использовании совместно с вспомогательными *RC*-цепочками ($R \leq 10$ мОм, $C \approx 350$ мкФ), достигается возможность неоднократной прогрузки АВ в диапазоне токов десятков кА, с ограничением перенапряжений на уровне не более 40 В. При этом экспериментально доказана работоспособность ИКАВ при токе прогрузки АВ 26 кА, и количестве их повторений в течение одного часа до 30.

Экспериментально подтверждено быстроедействие модульного ИПИК, обеспечивающего требуемую скорость нарастания выходного тока при прогрузки «эталонного» АВ. При этом отсчет полного времени отключения «эталонного» АВ велся с момента включения модульного ИПИК, т.е. секундомер (С, рис. 1) и все модули СТ ИПИК (СТ1-7, рис. 1) включались одновременно, а измеренное время отключения «вошло» в диапазон разброса технологических параметров «эталонного» АВ.

В результате практической реализации ИКАВ построенного на базе модульного ИПИК, с применением микропроцессорной техники и прямого цифрового управления преобразователями электроэнергии, и проведенного анализа системных подходов проектирования программного обеспечения, предложена методика проектирования программного обеспечения (ПО) для быстродействующих систем управления, позволяющая реализовывать сложные алгоритмы управления высокочастотными силовыми преобразователями с максимальным быстродействием, за счет «обработки» возникающих событий непосредственно в прерываниях.

Предлагаемая методика проектирования ПО использует программно-аппаратные структурные схемы, которые разрабатываются с учетом принципиальной схемы объекта управления и состоят из узлов объекта управления, области ПО, блоков ПО, программно-аппаратных связей, внешних сообщений и запросов.

Каждый блок ПО содержит диаграмму состояний, которая описывает процесс изменения его внутреннего состояния, и хранит в себе информацию о предыстории выполнения алгоритма, что позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления. На диаграмме состояний блока ПО отображаются состояния, внешние сообщения и запросы (указанные на структурной схеме ПО), аппаратные сообщения (вызываемые аппаратными прерываниями), внутренние сообщения, и действия выполняемые при переходах, на которые указывает «молния» (зигзагообразная стрелка) выходящая из соответствующего перехода.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Доказана целесообразность применения ДТМП, с точки зрения габаритных размеров электромагнитных элементов, что позволяет уменьшить их на $4 \div 19\%$ по сравнению с рассмотренными аналогами.

2. Предложена модернизированная схема ДТМП с *N*-ТВМ позволяющая увеличивать выходную мощность преобразователя, за счет её распределения между ТВМ, без усложнения системы управления. Сформированы рекомендации по применению ДТМП с *N*-ТВМ, и найдены зависимости его параметров от количества ТВМ.

3. Получены эквивалентные схемы выходной цепи МПУТ, ДТМП, и ДТМП с *N*-ТВМ, позволяющие сформировать общие требования к их фильтрующим элементам, «наглядно» наблюдать протекающие в них процессы, а также оценивать их статические и динамические характеристики.

4. Благодаря предложенному способу измерена паразитная индуктивность отдельных участков реальной конструкции токоведущих шин практически реализованного ИПИК, средняя величина которой составила $100 \div 160$ нГн.

5. Выявлено, что перенапряжения, возникающие в модульной структуре ИПИК при «обрыве» тока нагрузки, зависят от величины паразитной индуктивности участков токоведущих шин, количества модулей СТ ИПИК и схемы их параллельного подключения. При этом в случае прогрузки АВ одним модулем СТ ИПИК перенапряжения на полупроводниковых ключах его выходной цепи не возникают.

6. Практически реализованы 7 модулей СТ ИПИК, построенных на базе модернизированной схемы ДТМП с *N*-ТВМ с выходным током 4 кА и напряжением 5 В, и экспериментально доказана их работоспособность.

7. Разработан ЗМ ИПИК, позволяющий использовать низковольтные полупроводниковые приборы, с более низким сопротивлением проводимости, в выходной цепи СТ ИПИК и сохранять работоспособность ИКАВ при многократной прогрузке АВ. Проанализированы условия работы и сформированы рекомендации по применению ЗМ ИПИК, позволяющие ограничить величину перенапряжений, возникающих при размыкании АВ на заданном уровне. Экспериментально доказана работоспособность ЗМ ИПИК, который ограничивает перенапряжения на уровне не более 40 В.

8. Практически реализован современный ИКАВ, отвечающий всем требованиям процесса прогрузки АВ, построенный на базе модульного ИПИК с выходным током 26 кА и напряжением 5 В. Экспериментально доказана работоспособность реализованного ИКАВ при многократной непрерывной прогрузке АВ – до 30 прогрузок (проверок) в течение одного часа.

9. Предложена новая методика проектирования программного обеспечения для быстродействующих систем управления.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из Перечня ВАК

1. Оценка величины паразитных индуктивностей токоведущих шин в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока / **Н.П. Винтоняк**, В.Д. Семенов, В.А. Кабиров, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов // Доклады ТУСУРа. – 2016. – № 4(19). – С. 129-132.
2. Оценка величины перенапряжения в источнике питания испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока при их размыкании / **Н.П. Винтоняк**, В.Д. Семенов, В.А. Кабиров, А.В. Кобзев, А.О. Сулайманов // Доклады ТУСУРа. – 2017. – № 3(20). – С. 198-207.
3. **Винтоняк Н.П.** Модульный источник постоянного тока 26 кА / Н.П. Винтоняк, В.Д. Семенов, В.А. Кабиров // Приборы и техника эксперимента. – 2018 г. – № 1. – С. 160-161.
4. **Винтоняк Н.П.** Методика проектирования программного обеспечения микроконтроллеров для быстродействующих систем управления / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Доклады ТУСУРа. – 2015. – № 2(36). – 175-179 с.

Другие научные публикации по теме диссертации

5. **Винтоняк Н.П.** Источник питания устройства тепловых экспресс-испытаний радиоэлементов с микропроцессорной системой управления / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Итоги НИР курсового проектирования студентов 1-6 курсов кафедры промышленной электроники: материалы ежегодной научно-практической конференции / под ред. к.т.н. В.Д. Семенова. Выпуск 6. – Томск: ТУСУР, 2012. – С. 6-22.
6. **Винтоняк Н.П.** Устройство для тепловых испытаний радиоэлементов на основе элементов Пельтье / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Научная сессия ТУСУР-2013. – 2013 г. – Т.2. – С. 180-182.
7. Разработка программного обеспечения моточного станка Roller DX7 / **Н.П. Винтоняк**, Р.Г. Калинин, В.А. Федотов, В.Д. Семенов // Научная сессия ТУСУР-2014. – 2014 г. – Т.2. – С. 195-199.
8. Сакавов Т.Р. Обзор источников постоянного тока для прогрузки автоматических выключателей / Т.Р. Сакавов, **Н.П. Винтоняк**, Р.Г. Калинин // Научная сессия ТУСУР-2015. – 2015 г. – Т.3. – С. 76-79.
9. **Винтоняк Н.П.** Программное обеспечение ячейки испытательного комплекса для прогрузки автоматических выключателей постоянным током / Н.П. Винтоняк, В.А. Федотов, В.Д. Семенов. // Электронные средства и системы управления – 2015. – Ч. 1. – С. 217–221.
10. **Винтоняк Н.П.** Испытательный комплекс для прогрузки автоматических выключателей постоянного тока // Научная сессия ТУСУР-2016. – 2016. – Т.2. – С. 237–239.