

*На правах рукописи*



**Волков Александр Геннадьевич**

**МНОГОЗОННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОНВЕРТОРЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ  
СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель** — доктор технических наук профессор  
Зиновьев Геннадий Степанович

**Официальные оппоненты:** Дмитриков Владимир Федорович,  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
профессор кафедры теории электрических цепей  
и связи

Козляев Юрий Дмитриевич,  
кандидат технических наук, профессор  
Сибирский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики», г. Новосибирск,  
профессор кафедры радиотехнических устройств

**Ведущая организация** — Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»

Защита состоится «8» декабря 2016 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа по адресу: <https://storage.tusur.ru/files/44041/dissertation.pdf>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зыков Дмитрий Дмитриевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время известен ряд электротехнических систем, работающих в условиях переменной скорости вращения вала генератора. К таким системам относятся авиационные системы генерирования электрической энергии, транспортные системы, а также автономные системы генерирования возобновляемой энергии, к которым относятся ветроэнергетические установки. В последние годы во многих авиационных системах генерирования электрической энергии для стабилизации частоты бортового переменного напряжения широкое распространение получили турбомеханические дифференциальные реверсивные привода постоянной скорости (ППС), принцип действия которых основан на использовании сжатого воздуха компрессором. Такие привода преобразовывают механическую энергию, отбираемую от редуктора авиационного двигателя, в механическую энергию вращения ротора магистрального генератора с постоянной частотой. По сравнению с гидромеханическим приводом имеют более простую конструкцию, низкую стоимость, не требуют абсолютной герметичности, просты в установке и ремонте на авиационном двигателе, а также не нуждаются в охлаждении или обогреве. Но и имеют свои недостатки, такие как низкий КПД, большую относительную массу и малую жесткость механических характеристик. В целом на сегодняшний момент существующие ППС не удовлетворяют современным авиационным требованиям, что предполагает поиск новых принципов построения систем генерирования переменного тока постоянной частоты.

В отечественном самолетостроении (SSJ-100, Ту-204СМ, Ил-96-300, Ан-148) также придерживаются концепции построения централизованной системы генерирования с постоянной частотой переменного напряжения, где стабилизация осуществляется за счет интегрального привода-генератора, обладающего рядом существенных недостатков, прежде всего низкая надежность, высокая стоимость и необходимость обслуживания.

В современной литературе известны авиационные системы генерирования переменного тока на базе инверторов напряжения с промежуточным звеном постоянного тока. Такого рода системы получили название – системы генерирования электрической энергии переменного тока типа «переменная скорость – постоянная частота» (ПСПЧ). В системах данного рода, магистральный генератор размещен непосредственно на валу раздаточной коробки авиационного двигателя и имеет переменную угловую скорость вращения ротора. При этом постоянство частоты выходного напряжения достигается посредством полупроводникового преобразователя частоты, который установлен на выходе магистрального генератора.

Благодаря высокой управляемости силового преобразователя и отсутствию механического привода по постоянной частоте рассматриваемые системы генерирования переменного тока с ПСПЧ способны значительно улучшить качество генерируемой электроэнергии, повысить быстродействие и точность согласования всех параметров напряжения при включении на параллельную работу и в конечном результате улучшить энергетические и массогабаритные показатели всего авиационного электрооборудования в целом.

Эффективность систем генерирования с постоянной частотой вращения вала генератора подтверждена большим количеством исследований и реализованных

проектов в ветроэнергетике. Исключение механической системы, стабилизирующей частоту вращения вала генератора, в общем случае приводит к увеличению энергетической эффективности в среднем на 15÷20%. На борту летательного аппарата такое увеличение становится еще более актуальным, поскольку обеспечивает значимое снижение затрат на авиаперевозки.

По этой причине многие передовые фирмы, такие как *Shinko Denshi* (Япония), *General Electric* (США), *Westinghouse Electric* ведут интенсивные исследования по построению автономных систем генерирования типа «Переменная Скорость Постоянная Частота». Различные аспекты, затрагивающие данную тематику, нашли отражение в научных трудах таких видных ученых как Д.Э. Брускин, Ю.М. Быков, М. Виллиам, Ф.Ф. Галтеев, Л. Джуджи, В.Ф. Дмитриков, Ф.И. Ковалев, Г.С. Мыцык, М. Назер, Б. Пелли, М. Росвурм, В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Синдеев, Б.И. Фигаро, С.А. Харитонов, О.И. Хасаев, и др.

В качестве альтернативного варианта использования трехкаскадного генератора в системах генерирования электрической энергии (СГЭЭ) переменного тока постоянной частоты можно рассмотреть перспективный синхронный генератор (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов, который обеспечивает существенные преимущества в массе, габаритах и надежности, сочетающиеся с простотой конструкции. Удельная масса генератора с возбуждением от постоянных магнитов может достигать до колоссально низких значений. По данным из имеющихся источников, удельная масса магнитоэлектрического генератора (МЭГ) может составлять 0,3÷0,1 кг/кВт. Современные разработки в области проектирования конструкции ротора и способов крепления постоянных магнитов выразились в особенности параметров статорной цепи, а именно в увеличении собственного реактивного сопротивления обмотки в несколько раз, на фоне примерно неизменной индуктивности рассеяния. В итоге токи короткого замыкания снизились до трех-четырёхкратных значений, причем такие значения вполне допустимы для систем электроснабжения летательных аппаратов.

Вдобавок к применению в системах генерирования для летательных аппаратов, одной из перспективных областей использования ПСПЧ являются автономные ветроэнергетические и дизель-генераторные установки наземного назначения.

Ветроэнергетика является бурно развивающейся отраслью. К началу 2015 года общая установленная мощность всех ветрогенераторов составила 369 ГВт. В 2014 году количество электрической энергии, произведённой всеми ветрогенераторами мира, составило 706 тераватт-часов, что также составляет 3 % всей произведённой человечеством электрической энергии. Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику, в частности, на 2014 год в Дании с помощью ветрогенераторов производится 39 % всего электричества; в Португалии — 27 %; в Никарагуа — 21 %; в Испании — 20 %; Ирландии — 19 %; в Германии — 8 %; в ЕС — 7,5 %.

Силовые преобразователи частоты можно разделить на прямые топологии и топологии с промежуточным звеном постоянного тока. Кроме того, топологии с промежуточным звеном могут быть сгруппированы в две основные категории: выпрямитель, в роли первого звена преобразования и инверторы тока, инверторы напряжения в роли второго звена преобразования.

Для прямых преобразователей (АС-АС), наиболее распространенными топологиями являются циклоконвертеры. Циклоконвертеры используют массив силовых полупроводниковых вентилях для прямого подключения напряжения питания к генератору, преобразовывая трехфазное переменное напряжение с переменной амплитудой и частотой в трехфазное переменное напряжение с фиксированной частотой и амплитудой. Этот способ позволяет эффективно изменять направление потока мощности в обоих направлениях. Данный тип преобразователей также применяется в ветроэнергетических системах, где требуются низкие диапазоны скоростей и высокий крутящий момент.

В топологиях с промежуточным звеном преобразования энергии управляемый выпрямитель может быть выполнен в виде многозонного выпрямителя, входящего в состав нового семейства многозонных конверторов (зависимых инверторов, регуляторов переменного напряжения, компенсаторов реактивной мощности, инверторов тока, активных выпрямителей на базе инвертора тока), в которых обратные и прямые напряжения на тиристорах не превосходят амплитуды напряжения одной секции вторичной обмотки трансформатора или одной секции последовательной конденсаторной цепочки, используемой вместо трансформатора. Это позволяет строить схемы указанных преобразователей с высоковольтным выходом при использовании силовых ключей с  $n$ -раз меньшим рабочим напряжением при  $n$ -зонах регулирования величины выходного напряжения для питания последующих мощных инверторов тока. Вместе с тем, использование амплитудной модуляции для дискретного регулирования выпрямленного напряжения по зонам в сочетании с непрерывным фазовым (широтно-импульсным) регулированием внутри зон позволяет не только радикально улучшить качество выпрямленного напряжения, но и улучшить входной коэффициент мощности выпрямителя. Повышение качества выпрямленного напряжения приводит к уменьшению затрат на выходной фильтр выпрямителя. Повышение качества входного тока выпрямителя приводит к улучшению электромагнитной совместимости выпрямителя. Это приводит к уменьшению затрат на дополнительное оборудование (пассивные и активные фильтры, компенсаторы реактивной мощности), предназначенное для уменьшения обратного влияния выпрямителей на систему.

По сравнению с инверторами напряжения, инверторы тока обладают естественными преимуществами, такими как простота топологии, компактные размеры, высокий потенциал мощности, превосходную защиту от короткого замыкания, и гибкое управление потоками мощности. Основным преимуществом инверторов тока была и остается возможность увеличения выходного напряжения, относительно входного, в несколько раз, что не позволяют сделать ни инверторы напряжения, ни матричные преобразователи без дополнительного силового оборудования.

Независимо от объекта применения, будь то авиационные системы генерирования или ветроэнергетические установки, задачи силовых преобразователей частоты остаются неизменными. Ветроэнергетические системы генерирования электрической энергии имеют большой порядок мощностей и используемых напряжений, но используют тот же диапазон регулирования скоростей генератора, что переносит существующие проблемы построения систем генерирования электрической энергии летательных аппаратов в данную область и обуславливает применение нового семейства многозонных электронных конверторов.

**Целью работы** является разработка и исследование нового семейства схем трехфазных многозонных электронных конверторов для автономных систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ допустимых вариантов построения, выбор и разработка силовых схем трехфазных многозонных электронных конверторов для систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

2. Разработка математических моделей многозонных преобразователей, обеспечивающих общий анализ энергетических показателей и алгоритмов управления полупроводниковых преобразователей, входящих в состав автономных систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

3. Анализ электромагнитных процессов в многозонных преобразователях электрической энергии для систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

4. Синтез алгоритмов управления многозонными полупроводниковыми конверторами, обеспечивающих требуемое качество генерируемой электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

5. Разработка процедуры преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока, применительно к многозонному инвертору тока;

6. Разработка физического макета и проведение экспериментальных исследований многозонного электронного конвертора, работающего на автономную нагрузку.

**Методы исследования.** Основные результаты диссертационной работы получены с использованием методов анализа теории электрических цепей и систем автоматического регулирования. Используются методы алгебраизации дифференциальных уравнений, разработанные на кафедре Электроники и Электротехники профессором Зиновьевым Г. С., позволяющие определить показатели качества электромагнитных процессов напрямую через коэффициенты дифференциальных уравнений, без их решения. Также использованы методы аналитического и численного расчета линейных дифференциальных уравнений и имитационное моделирование в пакете прикладных программ для расчета процессов с учетом нелинейных характеристик полупроводникового преобразователя. В работе применяются спектральные методы анализа напряжений с помощью разложения известной формы сигнала на гармонические составляющие, используя преобразования Фурье, различные разделы линейной алгебры и математического анализа. Экспериментальные исследования проводятся путем имитационного моделирования и физического макетирования.

**Достоверность** полученных результатов подтверждаются корректной постановкой задач, адекватностью применения математического аппарата, а также результатами имитационного моделирования и натурального эксперимента.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. В разработке новых схем многозонных конверторов и результатах анализа их энергетических характеристик, которые имеют лучшие показатели качества выходного напряжения, входного тока, а также обладают меньшим количеством полупроводниковых элементов;

2. В результатах синтеза алгоритмов управления новыми многозонными электронными конверторами в составе систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

3. Предложен и исследован алгоритм замкнутой системы управления для активного выпрямителя на базе многозонного инвертора тока, который обеспечивает работу преобразователя в требуемых режимах. Полученные аналитические соотношения позволяют рассчитать параметры регуляторов через параметры схемы в каждом из контуров регулирования преобразователя;

4. Предложена и исследована процедура преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока.

#### **Практическая значимость работы:**

1. В результате аналитического расчета получены соотношения для проектирования трехфазных многозонных выпрямителей и инверторов тока;

2. Разработана инженерная методика расчета полного сопротивления нагрузки для многозонного инвертора тока в составе систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

3. Создан макетный образец силовой схемы многозонного инвертора тока для систем генерирования переменного тока постоянной частоты, на котором проведенные экспериментальные исследования подтвердили достоверность расчетно-теоретических положений и сравнительно высокую точность выведенных аналитических выражений;

4. Предложен алгоритм управления активным выпрямителем на базе многозонного инвертора тока, входящего в состав систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты, позволяющий улучшить качество выходного напряжения и входного тока, что ведет к улучшению электромагнитной совместимости устройств по входу и выходу.

#### **Основные результаты, выносимые на защиту:**

1. Предложенные схемы трехфазных многозонных электронных *AC-DC* и *DC-AC* конверторов, применительно к системам генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов;

2. Результаты анализа электромагнитных процессов в многозонных преобразователях электрической энергии для систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;

3. Результаты имитационного моделирования трехфазных многозонных электронных конверторов, которые имеют лучшие показатели качества выходного напряжения, входного тока, имеют возможность регулирования выходного напряжения в широком диапазоне, а также обладают сниженными обратными напряжениями на силовых ключах;

4. Способ построения замкнутой системы управления активным выпрямителем на базе многозонного инвертора тока с использованием широтно-импульсной модуляции, который позволяет получить лучшее качество выходного напряжения, что приводит к уменьшению массогабаритных показателей выходного фильтра;

5. Процедура преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока, применительно к многозонному инвертору тока.

**Апробация работы.** Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных семинарах и конференциях:

- Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2011, 2013 гг.;
- Международная конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП», Новосибирск, НГТУ, 2010, 2012, 2014 гг.;
- Международная конференция молодых специалистов по микро/нано-технологиям и электронным приборам «EDM», Новосибирск, НГТУ, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.;
- Международная научная конференция «Вычислительные технологии в электротехнике и электронике» *SIBIRCON-2010*;
- Международная промышленная выставка *EXPO RUSSIA-VIETNAM 2015*, г. Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам.

**Внедрение результатов исследований.** Разработанные имитационные модели многозонных электронных конверторов, а также алгоритмы управления многозонными полупроводниковыми конверторами на базе инвертора тока с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией, обеспечивающих требуемое качество генерируемой электрической энергии и улучшение энергетических показателей системы генерирования на базе синхронного генератора с постоянными магнитами при выборе вариантов построения систем генерирования в рамках договора № 64-13/177-78 от 27.08.2010 г. между ФГУП ПО «Север» и Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научные результаты диссертационной работы (разработанные новые схемы многозонных электронных конверторов и результаты анализа их энергетических характеристик, а также энергоэффективные алгоритмы управления полупроводниковыми многозонными конверторами на базе инвертора тока с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией в составе автономных систем генерирования электрической энергии) внедрены в НИР, ОКР и технологические работы по договору №64-13/177-78 от 27.08.2010 г. между Федеральным государственным унитарным предприятием ПО «СЕВЕР» и Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», в рамках договора №13.G36.31.0010 между ФГУП ПО «СЕВЕР» и Министерством образования и науки РФ на тему «Исследование, разработка и организация промышленного производства механотронных систем для энергосберегающих технологий двойного назначения» от 22 октября 2010г. и использованы при подготовке научных отчетов.

Результаты исследования использованы при проектировании высоковольтных интеллектуальных распределительных трансформаторов в проекте №8.1327.2014К «Силовые электронные трансформаторы» государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» в рамках проектной части государственного задания Министерства Образования и Науки РФ.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 28 печатных работ, в том числе 2 работы в журналах из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты

диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, а также 21 работа в журналах, цитируемых *SCOPUS*, 21 работа в журналах, цитируемых РИНЦ, и 9 работ в журналах, цитируемых «*Web of Science*». Предложенные структуры преобразователей защищены 3 патентами на изобретение.

**Личный вклад** автора в работы, опубликованные в соавторстве с научным руководителем, заключается в участии в постановке задач исследований, разработке структурных вариантов, математических и имитационных моделей многозонных преобразователей, аналитических и численных расчетов энергетических характеристик многозонных преобразователей, а также в синтезе алгоритмов и систем управления.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 2 приложений. Общий объем 192 страниц. Основная часть изложена на 189 страницах машинописного текста, иллюстрирована 141 рисунком, 10 таблицами. Список литературы содержит 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность избранной темы, характеризуется степень ее разработанности, определяются цели и задачи диссертационного исследования, осуществляется выбор предмета и объекта исследования, раскрывается научная новизна, определяются методологические основания исследования, теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов, формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации «**Аналитический обзор автономных систем генерирования электрической энергии**» произведен аналитический обзор современного состояния и перспективы развития систем генерирования электрической энергии для перспективных направлений, таких как автономные системы генерирования для летательных аппаратов и автономные ветроэнергетические установки наземного назначения. Рассматриваются основные методики построения многозонных выпрямителей, история развития и современное состояние многоуровневых инверторов напряжения и тока, многозонных инверторов тока, а также активного выпрямителя на базе инвертора тока, входящих в системы генерирования переменного тока постоянной частоты. Конверторы, используемые для целей стабилизации, регулирования, улучшения качества выходного напряжения и входного тока, требуют применения громоздких, дорогих реактивных элементов в виде электролитических конденсаторов, которые имеют ограничение на предельную допустимую отрицательную температуру, и использования большого количества управляемых и неуправляемых полупроводниковых элементов. Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости создания научно-технических решений для энергоэффективных автономных систем генерирования электрической энергии на базе многозонных электронных конверторов. Показана перспективность применения систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты на базе магнитоэлектрического генератора и многозонных электронных конверторов, таких как многозонные выпрямители напряжения, многозонные инверторы тока с высокочастотной широтно-импульсной модуляцией и активных выпрямителей на базе многозонного инвертора тока.

**Вторая глава** диссертации «Трехфазные многозонные конвертеры» посвящена разработке и исследованию схем и математических моделей трехфазных многозонных конвертеров сетевого напряжения. Проводится сравнительный анализ новых схем многозонных выпрямителей по количеству полупроводниковых элементов в схеме, качеству выходного напряжения, качеству входного тока преобразователя, а также по обратным напряжениям на силовых ключах. Приводятся результаты аналитического расчета энергетических показателей многозонного инвертора тока, таких как коэффициент гармоник выходного напряжения, внешняя и регулировочная характеристика. Приведена методика расчета полного сопротивления нагрузки. Также представлена процедура преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока.

Применение многозонных выпрямителей трехфазного напряжения рационально для высоковольтных нагрузок и нагрузок на средние значения напряжения при требовании регулирования напряжения в достаточно широком диапазоне. Многозонное регулирование выпрямленного напряжения позволяет улучшить качество выпрямленного напряжения, что уменьшает потери у потребителя. Уменьшение неактивных токов на входе и выходе преобразователя приводит к уменьшению энергопотребления, т. е. решается задача энергосбережения.

Предлагается и исследуется новое семейство многозонных конвертеров, таких как многозонные выпрямители трехфазного напряжения, многозонные инверторы тока и активные выпрямители на базе многозонных инверторов тока. На рисунке 1 (а, б) представлены трехзонная и двухзонная схема соответственно, а на рисунке 2 (а, б) представлены схемы трехзонной нулевой и двухзонной схемы выпрямления на однофазных мостах соответственно.

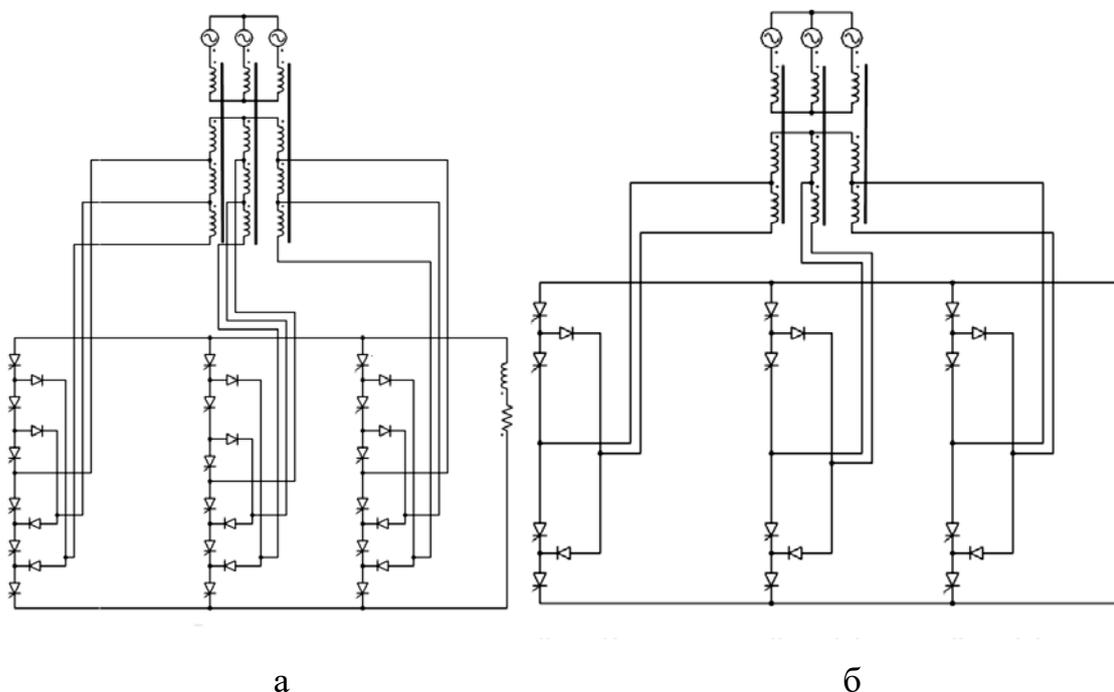


Рисунок 1 – Исследуемые схемы выпрямителей: а – мостовая трехзонная схема выпрямления, б – мостовая двухзонная схемы выпрямления

Все вышеуказанные схемы выпрямителей могут быть выполнены с использованием конденсаторного делителя в цепи переменного тока. Предлагаемые схемы многозонных выпрямителей имеют дополнительные фиксирующие диоды, обеспечивающие

получение меньших обратных и прямых напряжений на тиристорах, которые не превосходят амплитуды напряжения одной секции вторичной обмотки трансформатора или одной секции последовательной конденсаторной цепочки, используемой вместо трансформатора.

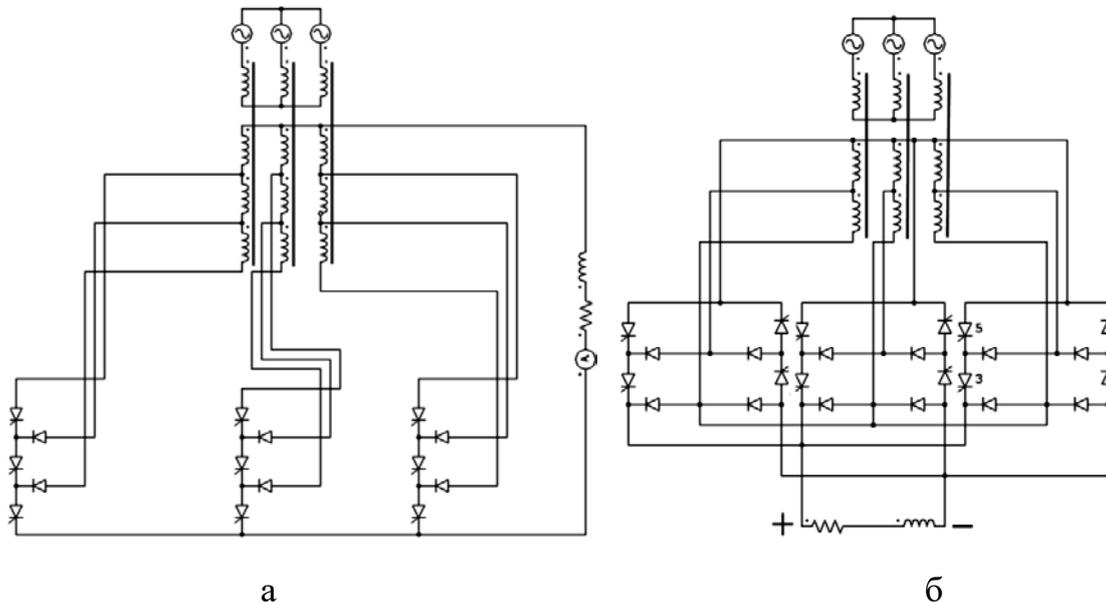


Рисунок 2 – Исследуемые схемы выпрямителей: а – трехзонная нулевая схема выпрямления, б – двухзонная схемы выпрямления на однофазных мостах

В данном случае обратные напряжения на тиристорах составляют 5,8%, от выпрямленного напряжения, а обратные напряжения на фиксирующих диодах соответствуют 5,8%, 11,6%, 17,4% от выпрямленного напряжения. В двухзонной схеме, которая также была проанализирована, напряжения на тиристорах составило 13,1% выпрямленного напряжения, а напряжения на фиксирующих диодах 13,1% и 26,2% от среднего значения выпрямленного напряжения. Значительное уменьшение обратных напряжений на силовых полупроводниковых устройствах позволяет использовать меньшее количество данных устройств, при применении ключей одного и того же класса.

Качество входной энергии оценено входным коэффициентом мощности в функции степени регулирования выпрямленного напряжения, как показано на рисунке 3. Как видно из рисунка лучший показатель коэффициента мощности достигается при использовании трехфазной трехзонной схемы выпрямления. Качество входного тока оценено его коэффициентом гармоник тока от степени регулирования и приведено на рисунке 4(а). Осциллограммы входного тока и напряжения в третьей зоне регулирования трехфазной трехзонной схемы приведены на рисунке 4(б). Качество выпрямленного напряжения оценено коэффициентом гармоник напряжения. График зависимости от степени регулирования, а также осциллограммы выходного тока и напряжения также в третьей зоне регулирования приведены на рисунке 5 (а, б) соответственно. Был исследован режим зависимого инвертирования для каждой из исследуемых схем преобразователей.

Многозонное регулирование выпрямленного напряжения позволяет улучшить качество выпрямленного напряжения, что уменьшает потери у потребителя и массогабаритные параметры выходных фильтров, что ведет к снижению веса всей автономной системы генерирования электрической энергии в целом.

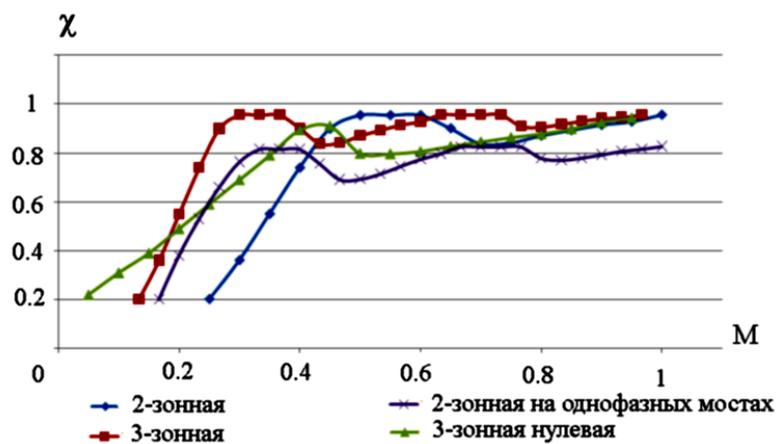


Рисунок 3 – Входной коэффициент мощности

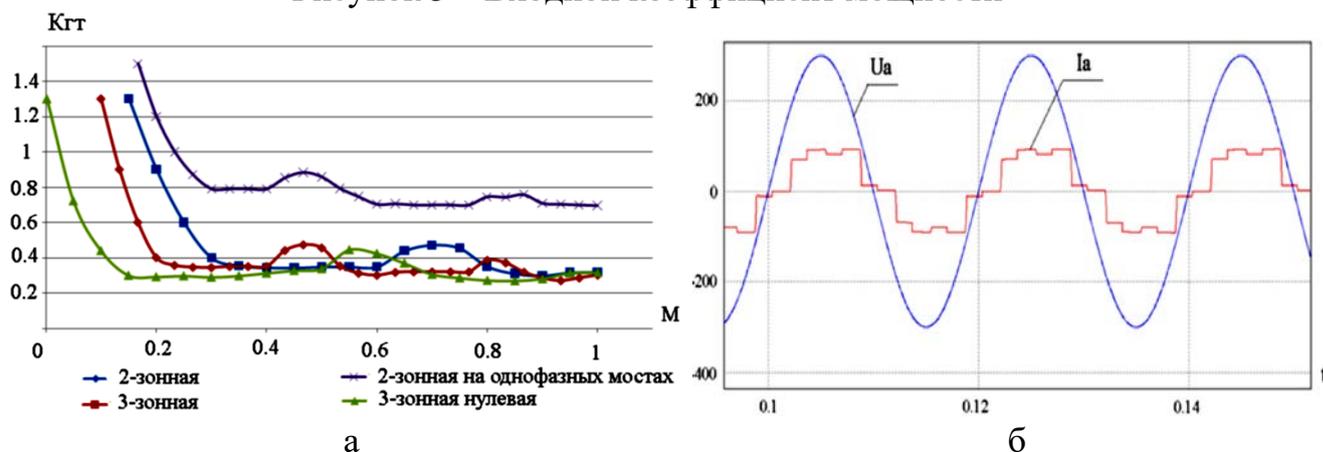


Рисунок 4 – Качество входного тока: а – коэффициент гармоник входного тока, б – осциллограммы входного тока и напряжения в третьей зоне регулирования в третьей зоне регулирования трехфазной трехзонной схемы

Уменьшение неактивных токов на входе и выходе преобразователя приводит к уменьшению энергопотребления, то есть решается задача энергосбережения, а отсутствие последовательного включения нескольких вентилях, из-за уменьшенных обратных напряжений на управляемых силовых вентилях, делают исследуемые схемы наилучшими для применения в данной области.

Наиболее распространенной на сегодняшний день топологией инвертора для систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты является трехфазный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Однако, в связи с характером топологии, недостатками данной системы являются ее сниженная надежность, тяжелые аварийные режимы в случае выхода транзисторов из строя, наличие электролитического конденсатора, имеющего ограничение по допустимой отрицательной температуре, высокие  $du/dt$ , а также высокий уровень электромагнитных помех.

Альтернативной топологией инвертору напряжения является многозонные инверторы тока, представленные на рисунке 6. Они имеют преимущества, а именно защиту от короткого замыкания, буферизация выхода от колебаний сетевого напряжения, значительное снижение высших гармоник тока в нагрузке, вследствие фильтрации напряжения, которое происходит на выходных конденсаторах преобразователя, высокий КПД, возможность регулирования частоты в широком диапазоне.

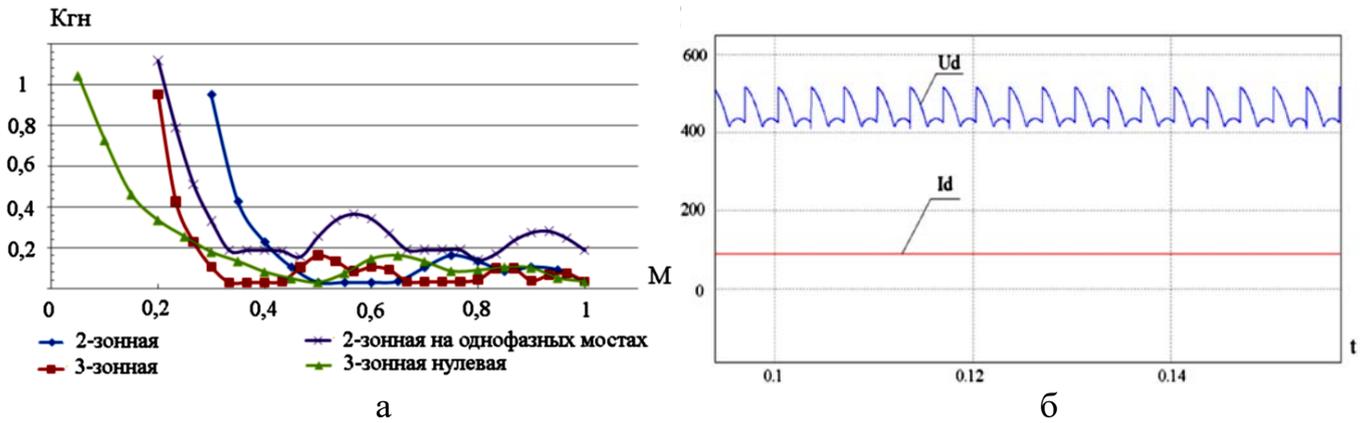


Рисунок 5 – Качество выходного напряжения: а – коэффициент гармоник выходного напряжения, б – осциллограммы выходного напряжения и тока

Отличие приведенных схем от других схем подобного рода заключается том, что многозонность инвертора заключается не в прямом получении нескольких уровней выходного тока, а в получении многозонного напряжения, величину которого мы можем изменять, подключая источник тока с помощью отводов к разным точкам нагрузки инвертора. Переключая отводы, мы изменяем полное входное сопротивление нагрузки инвертора, тем самым увеличивая или уменьшая напряжение на ней, а значит и на нагрузке потребителя. Изменяя отношение емкостей конденсаторов в фазе нагрузки, мы можем изменять величину напряжений в каждой из зон преобразователя.

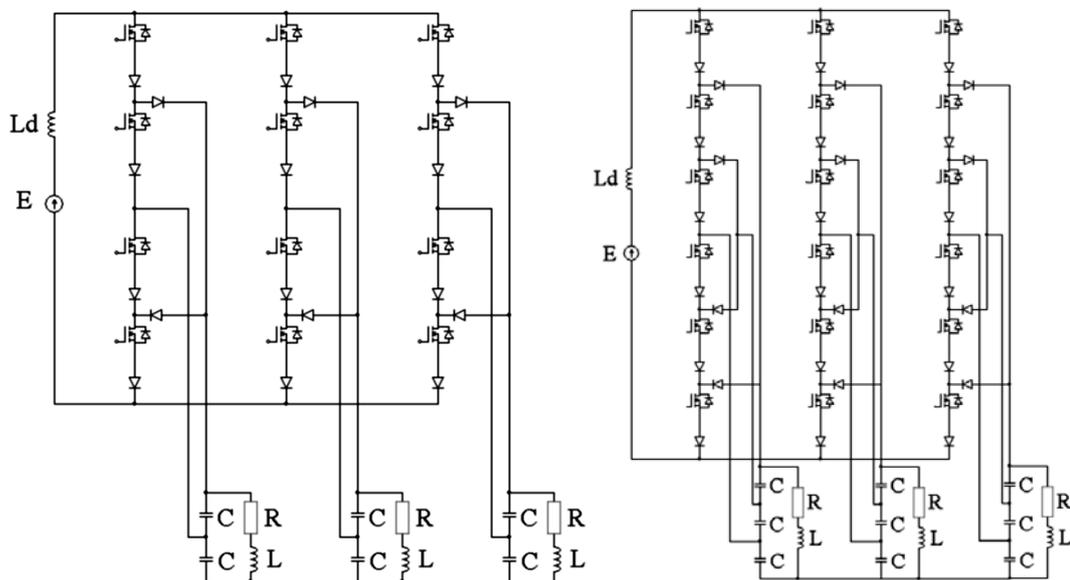


Рисунок 6 – Схемы исследуемых многозонных инверторов тока

Также существуют определенные ограничения при управлении многозонными инверторами тока. Исключено состояние преобразователя, когда одновременно проводят ток два транзистора в верхней части схемы преобразователя, так как произойдет короткое замыкание конденсаторов на выходе устройства. Также должно выполняться условие, когда, по меньшей мере, один ключ в верхней части преобразователя и один ключ в нижней части должны проводить ток, чтобы избежать размыкания цепи на входной стороне преобразователя.

Возможно использование многозонных инверторов тока в качестве второго звена преобразования энергии, в системе двойного преобразования энергии АС-АС, на входе которого установлен управляемый выпрямитель или активный выпрямитель в качестве преобразователя переменного напряжения в постоянное, и многозонный инвертор тока, в качестве преобразователя постоянного напряжения в переменное.

Для аналитического расчета внешней характеристики многозонных инверторов тока, методом алгебраизации дифференциальных уравнений схем замещения были получены аналитические соотношения для действующих значений тока нагрузки. Действующего значения первой гармоники тока нагрузки для первой зоны в соответствии с методом АДУ:

$$I_H = \frac{\pi \cdot E \cdot \sqrt{L^2 C^2 \omega^4 + R^2 C^2 \omega^2 + N^2 - 2NLC\omega^2}}{N \cdot R \cdot \sqrt{6}}$$

Действующего значения первой гармоники тока нагрузки для второй и следующих зон в соответствии с методом АДУ:

$$I_H = \frac{\pi \cdot E \cdot L \cdot C_1 \cdot \omega^2 \sqrt{1 + \frac{R^2}{L^2 \omega^2} + \frac{(1 + \frac{C_1}{C_2})^2}{L^2 C_1^2 \omega^4} - \frac{2}{LC_1 \omega^2} (1 + \frac{C_1}{C_2})}}{R \cdot \sqrt{6}}$$

Внешняя характеристика трехфазного многозонного инвертора тока:

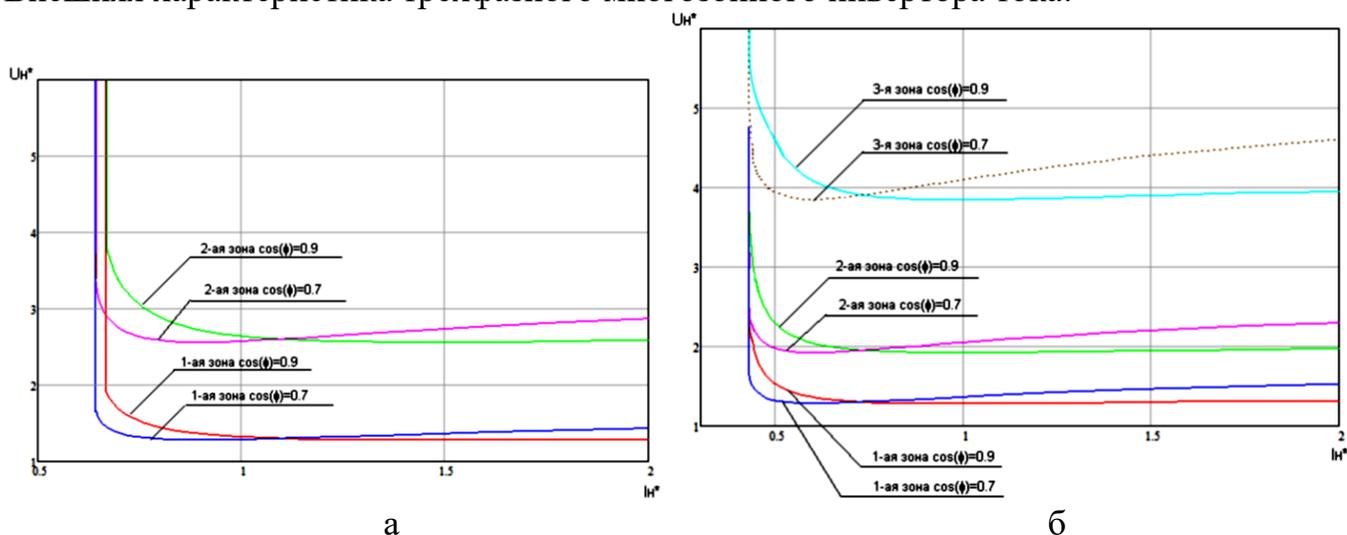


Рисунок 7 – Внешняя характеристика многозонного инвертора тока при различных  $\cos(\varphi)$  нагрузки: а – двухзонный, б – трехзонный

На рисунке 8 (а) представлена полученная регулировочная характеристика, для всех трех зон регулирования. Наряду с регулировочной характеристикой, были оценены качество входного тока преобразователя, а также его коэффициент гармоник выходного напряжения, показанный на рисунке 8 (б).

Далее в диссертации предложена процедура преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока, позволяющая использовать ранее сгенерированные сигналы управления инвертором напряжения для управления инвертором тока. Приведена практическая реализация логической схемы и результаты имитационного моделирования.

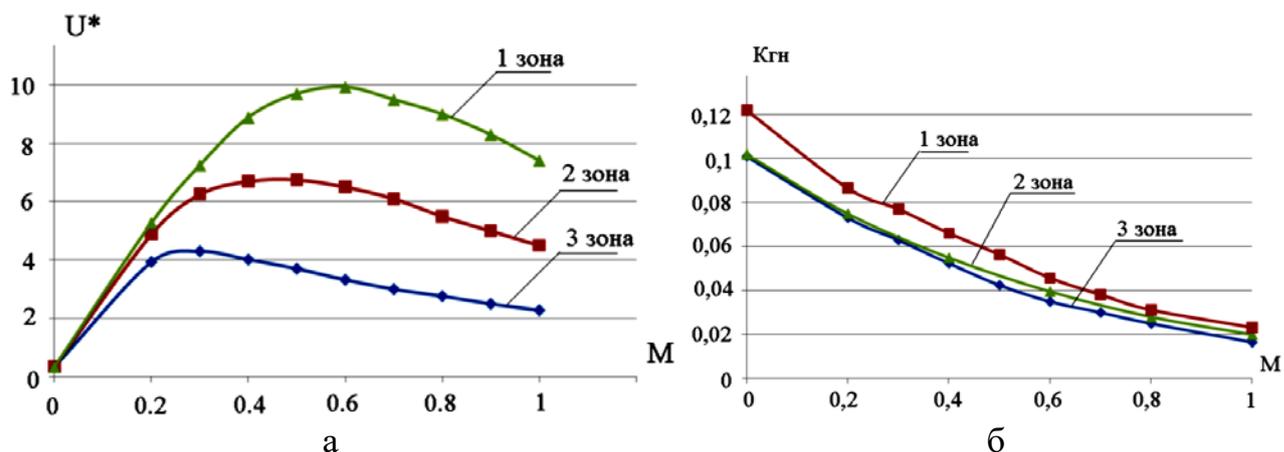


Рисунок 8 – Регулировочная характеристика (а) и коэффициент гармоник выходного напряжения (б) многозонного инвертора тока

В третьей главе диссертации «Активный выпрямитель на базе многозонного инвертора тока» рассматриваются режимы работы активного выпрямителя на базе многозонного инвертора тока, который представляет собой первое звено преобразования энергии АС-DC в системе генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты, а также представлен алгоритм управления преобразователем в DQ0-системе координат, который обеспечивает регулирование выходного напряжения с коррекцией входного коэффициента мощности. Фазовый сдвиг входных токов компенсируется за счет внутреннего токового контура, обеспечивающего устойчивое состояние преобразователя. Внешний контур регулирования по напряжению используется для поддержания необходимой величины выходного постоянного напряжения. Представлен метод разработки системы управления активным выпрямителем на базе многозонного инвертора тока для регулирования постоянного выходного напряжения с единичным коэффициентом мощности. Основными задачами в этом разделе являются:

- описание режимов работы трехфазного активного выпрямителя на базе многозонного инвертора тока;
- разработка математической модели преобразователя в ABC-системе координат;
- алгоритм управления преобразователем в DQ0-системе координат;
- синтез системы управления активным выпрямителем для регулирования выходного напряжения и поддержания единичного коэффициента мощности на входе преобразователя;
- Результаты моделирования замкнутой системы управления преобразователем.

Принципиальная схема трехфазного активного выпрямителя на базе многозонного инвертора тока показана на рисунке 9. Трехфазный выпрямитель состоит из мостовой схемы с двенадцатью однонаправленными силовыми ключами, образованных последовательным соединением IGBT транзистора и диода.

В ходе имитационного моделирования были представлены результаты анализа динамических свойств замкнутой системы управления активным выпрямителем на базе многозонного инвертора тока при изменении сигнала задания на выходное напряжение со 120В до 200В, показанные на рисунке 10(а), а также набросе нагрузки на 40%, приведенные на рисунке 10(б).

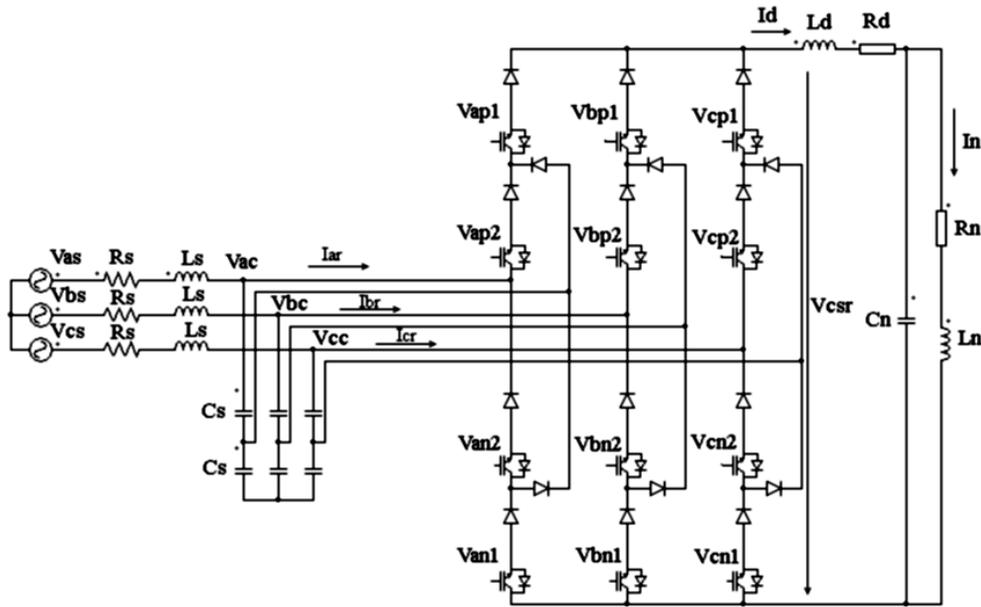


Рисунок 9 – Принципиальная схема трехфазного активного выпрямителя на базе многозонного инвертора тока

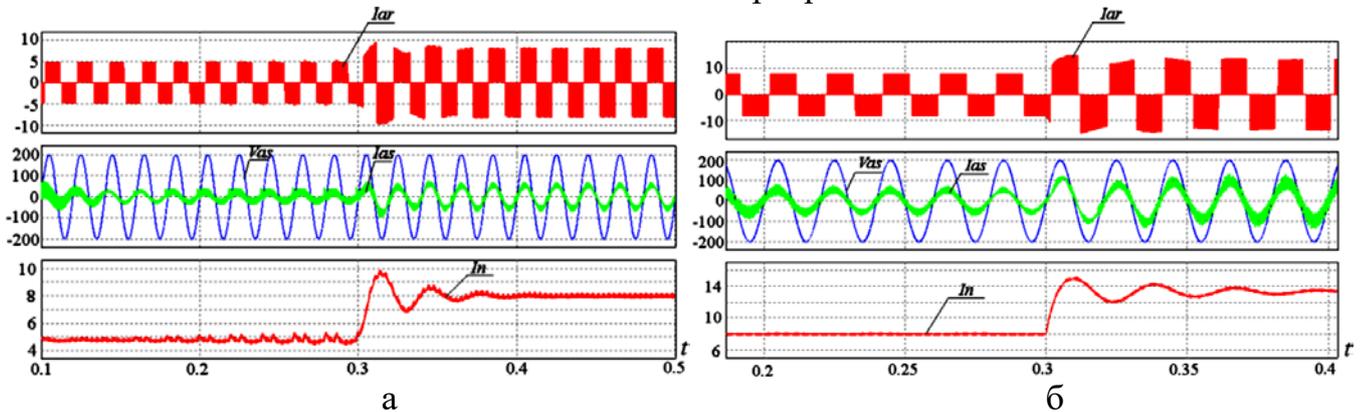


Рисунок 10 – Осциллограммы при изменении сигнала задания и при набросе нагрузки

Можно заметить, что сетевой ток и входное сетевое напряжение синфазны. Изменяя фазу вектора задающего тока входного конвертора возможно регулирование входного коэффициента мощности. Результаты имитационного моделирования показали, что алгоритм управления активным выпрямителем на базе многозонного инвертора тока, обеспечивает регулирование выходного напряжения с коррекцией входного коэффициента мощности, где фазовый сдвиг входных токов компенсируется за счет внутреннего токового контура, который обеспечивает устойчивое состояние преобразователя, генерируя желаемый ток. Внешний контур регулирования по напряжению используется для поддержания необходимой величины выходного постоянного напряжения. Одним из наиболее функциональных решений является использование активного выпрямителя на базе многозонного инвертора тока или многозонного выпрямителя, в качестве первого звена преобразования энергии в автономных системах генерирования электрической энергии, и многозонного инвертора тока, генерирующего необходимый уровень выходного напряжения. Среди всех AC-DC преобразователей, активный выпрямитель на базе инвертора тока с оптимальными методами управления позволяет получить малые искажения входных

токов, прекрасно сглаженный постоянный ток, а также регулирование напряжения в достаточно широком диапазоне.

Преимущества многозонных преобразователей, такие как уменьшенные обратные напряжения на вентилях, дискретное регулирование выпрямленного напряжения по зонам в сочетании с непрерывным широтно-импульсным регулированием внутри зон также характерны для этого решения.

**Четвертая глава** диссертации «**Результаты физического эксперимента**» посвящена описанию испытательного стенда многозонного инвертора тока, используемого для физического эксперимента, результатам испытаний, процессу синтеза двенадцати независимых сигналов от ПЛИС, а также требованиях к перекрытию импульсов управления в многозонном инверторе тока. Показан вариант реализации перекрытия импульсов управления на дискретных элементах, в случае отсутствия микропроцессора. Приведены параметры используемых в макете транзисторов и диодов. Представлены фотографии готового макетного образца, а также результаты физического эксперимента.

Для изготовления физического макета преобразователя в лаборатории были использованы MOSFET транзисторы IXFN110N60P3, фирмы IXYS с параметрами:  $V_{dss}=600\text{В}$ ,  $I_d=25\text{А}$ ,  $R_{ds(on)}=56\text{мОм}$ ,  $t_{\leq}250\text{нс}$ . Высокочастотные диоды MUR460, фирмы ON Semiconductor с параметрами:  $I_f=4\text{А}$ ,  $V_{rrm}=600\text{В}$ , соединены последовательно с каждым из транзисторов для обеспечения однонаправленного протекания тока через транзистор. При реализации системы управления для многозонного инвертора тока была использована ПЛИС фирмы Microsemi A3P250 с тактовой частотой 350 МГц.

На рисунке 11 приведена принципиальная электрическая схема, поясняющая силовую часть испытательного макета, а также представлен внешний вид макета трехфазного многозонного инвертора тока.

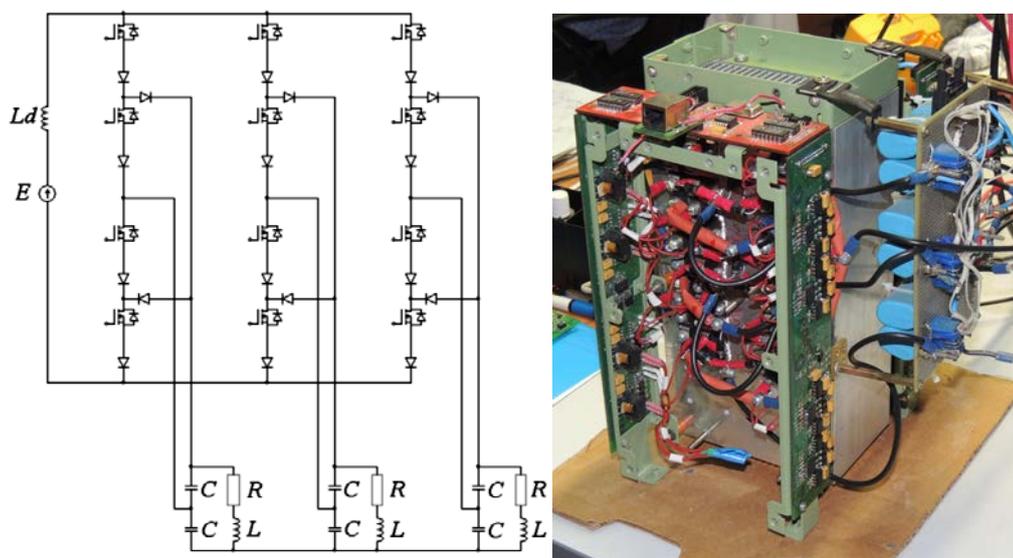


Рисунок 11 – Принципиальная электрическая схема и внешний вид испытательного макета трехфазного многозонного инвертора тока

Параметры эксперимента: входное напряжение  $E=100\text{В}$ , индуктивность в звене постоянного тока  $L_d=15\text{мГн}$ , выходные конденсаторы  $C_f=16\text{мкФ}$ , сопротивление

нагрузки  $R_n=30 \text{ Ом}$ , частоты коммутации  $f_k=5000 \text{ Гц}$ . Такой испытательный макет позволил провести физический эксперимент в реальных условиях.

В ходе экспериментов были получены результаты, подтверждающие возможность реализации процедуры преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока на базе микропроцессорной системы управления с использованием программируемой логической интегральной логики. Также были получены осциллограммы выходного напряжения и тока, выходного напряжения и входного тока для нескольких зон преобразователя, выходного напряжения и тока преобразователя до выходного фильтра. Данные осциллограммы, представленные на рисунке 12, не только отражают достоверность исходных допущений и выведенных соотношений, но и подтверждают принципиальную возможность построения трехфазного многозонного инвертора тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку и выполняющего роль регулируемого источника тока в цепи нагрузки.

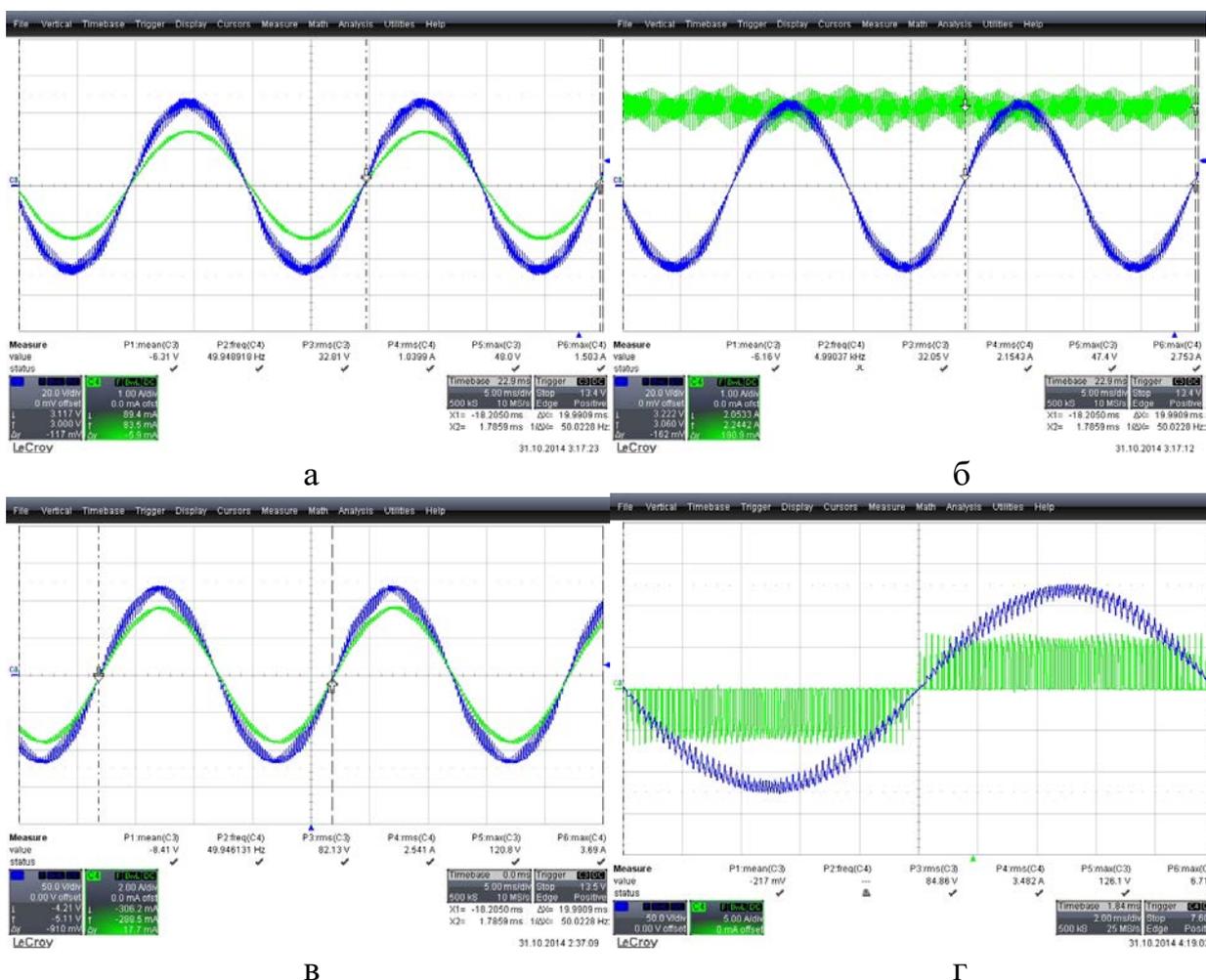


Рисунок 12 – Временные диаграммы многозонного инвертора тока – а) выходные фазные напряжение и ток для первой зоны, б) выходное фазное напряжение и входной ток преобразователя для первой зоны, в) выходные фазные напряжение и ток для второй зоны, г) выходное фазное напряжение на нагрузке и ток преобразователя до выходного фильтра

**В заключении** представлены основные результаты диссертационной работы и даны рекомендации по их применению.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты выполненной работы состоят в следующем:

1. Проведен анализ и физическое обоснование энергетической эффективности предложенных структурных вариантов систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и многозонных электронных конверторов;
2. Разработаны новые схемы многозонных конверторов, которые имеют лучшие показатели качества выходного напряжения, входного тока, а также обладают меньшим количеством управляемых полупроводниковых элементов по сравнению с типовыми решениями (количество тиристоров/транзисторов уменьшено до четырех раз, при добавлении диодов и использовании полупроводниковых элементов одного класса), вследствие уменьшенных обратных напряжений на полупроводниковых элементах до 30%;
3. Разработаны математические модели новых трехфазных многозонных электронных конверторов, обеспечивающие общий анализ энергетических показателей преобразователей, входящих в состав автономных систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;
4. С использованием имитационного моделирования в среде PSIM получены основные энергетические характеристики трехфазных многозонных выпрямителей и многозонных инверторов тока, входящих в систему генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты;
5. Разработана инженерная методика расчета полного сопротивления нагрузки для многозонного инвертора тока в составе системы генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты, позволяющая наиболее полно оценить величину полного сопротивления нагрузки многозонного конвертора;
6. Предложена и исследована процедура преобразования алгоритма управления инвертором напряжения в алгоритм управления инвертором тока, позволяющая использовать ранее сгенерированные сигналы управления инвертором напряжения для управления инвертором тока, а также многозонным инвертором тока;
7. Разработан и исследован алгоритм управления замкнутой системы управления активным выпрямителем на базе многозонного инвертора тока с использованием широтно-импульсной модуляции, входящего в состав автономных систем генерирования электрической энергии переменного тока постоянной частоты, позволяющий улучшить качество выходного напряжения и входного тока, что ведет к улучшению электромагнитной совместимости устройств по входу и выходу;
8. Разработан макет трехфазного многозонного инвертора тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку, выполняющего роль регулируемого источника тока в цепи нагрузки, и проведены физические эксперименты, подтверждающие достоверность исходных допущений и выведенных соотношений, а также принципиальную возможность построения данного типа преобразователей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук:**

1. Волков А. Г. Анализ электромагнитных процессов в трехфазном многозонном инверторе тока / А. Г. Волков, Г. С. Зиновьев // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2014. – № 1 (54). – С. 134-142.
2. Волков А. Г. Алгоритм преобразования сигналов управления инвертором напряжения в сигналы управления инвертором тока / А. Г. Волков, Г. С. Зиновьев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1 (30). – С. 21-33.

**Зарегистрированные результаты интеллектуальной деятельности:**

3. Пат. 2460202 Российская Федерация, МПК Н 02 М7/155, Преобразователь переменного напряжения в постоянное / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НГТУ»; заявл. 1.06.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. №24 – 4 с.
4. Пат. 2523001 Российская Федерация, МПК Н 02 М7/00, Н 02 М 7/217. Многозонный преобразователь постоянного тока в переменный / заявитель и патентообладатель ФГУП ПО «СЕВЕР»; заявл. 19.11.2012; опубл. 20.07.2014.
5. Заявка на патент на изобретение, Российская Федерация, МПК Н 02 М7/00. Многозонный трехфазный преобразователь постоянного тока в переменный / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «НГТУ». – № 2015119732/07; заявл. 25.05.2015.

**Наиболее значимые публикации в других научных изданиях:**

6. Волков А. Г. Разработка и исследование многозонных выпрямителей / Волков А.Г., Зиновьев Г. С. // Десятая международная конференция-семинар по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM 2009). – Сборник трудов. Новосибирский государственный университет. – 1-6 июля, 2009. – С. 372-378.
7. Volkov A. G. High-voltage Rectifiers for New Systems of Electrosupply of Railways / Volkov A. G., Zinoviev G. S., Kosarev A. P. // International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering Sibircon-2010. – Volume II. – Irkutsk Listvyanka, Russia, July 11-15, 2010. – P. 649-652.
8. Volkov A. G. Development and Research of Three-phase Multizone AC-DC Converters / Volkov A. G., Zinoviev G. S. // Twelfth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron device (EDM 2011). – Erlagol, Altai. – June 30 – July 4, 2011. – P. 377-380.
9. Волков А. Г. Исследование мехатронной системы для автономного генерирования напряжения переменной частоты постоянной амплитуды на базе магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя / Волков А. Г., Зиновьев Г. С., Харитонов С. А. // Технічна електродинаміка. – № 2. – Київ, 2012. – С. 63-64.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
Государственного Технического Университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,  
тел./факс: (383) 346-08-57  
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Объем 1.25 печ. л. Тираж 120 экз.  
Заказ 2448. Подписано в печать \_\_.\_\_.2016 г.