

На правах рукописи



Рощупкин Георгий Вячеславович

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО С ФУНКЦИЕЙ  
КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ДЛЯ ЛИТИЙ-  
ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ**

Специальность 05.09.03

«Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

**Научный руководитель:** **Шевцов Даниил Андреевич**, доктор технических наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Официальные оппоненты:** **Лукин Анатолий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «ММП-Ирбис»

**Коняхин Вячеслав Сергеевич**, кандидат технических наук, заместитель начальника отделения систем электроснабжения АО «Аэроэлектромаш»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАО)

Защита состоится « 24 » мая 2022 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. 57, ауд. 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, и на сайте:

[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=156469](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=156469).

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07,  
кандидат технических наук, доцент



**Д.С. Дежин**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Литий-ионные аккумуляторные батареи (АКБ) являются одним из самых распространенных видов накопителей электроэнергии, применяемых в системах автономного электропитания во всем мире. Преимуществами литий-ионных АКБ являются высокая энергоемкость, низкий уровень саморазряда, отсутствие «эффекта памяти», а также большое количество циклов заряд-разряд. Благодаря своим достоинствам литий-ионные АКБ имеют широкую область применения в клининговой, складской, военной и космической технике, а также в железнодорожном, водном и воздушном транспорте. Однако литий-ионные АКБ обладают рядом недостатков, которые заключаются в температурной зависимости основных параметров, зависимости срока службы от характеристик заряда и разряда, а также в высокой стоимости.

Одним из перспективных направлений обеспечения заявленного срока службы литий-ионной АКБ является применение зарядных устройств, обеспечивающих требуемую зарядную характеристику. Для формирования необходимой характеристики, а также уменьшения значения пульсаций выходного тока применяют индуктивные фильтры на выходе зарядного устройства. Однако, учитывая тенденцию развития силовой электроники и преобразовательной техники, а также требования к качеству потребляемой энергии, все более актуально становится применение высокоэффективных зарядных устройств с функцией коррекции коэффициента мощности без использования громоздких выходных индуктивных фильтров.

Основными элементами зарядного устройства являются корректор коэффициента мощности (ККМ), обеспечивающий синусоидальное потребление тока и преобразователь постоянного напряжения (ППН) с высокочастотным развязывающим трансформатором. Классическим решением при проектировании зарядного устройства является использование ККМ и резонансного ППН, обладающего хорошими энергетическими характеристиками, но при этом имеющего ряд общеизвестных недостатков при использовании в качестве зарядных устройств.

Поэтому разработка и исследование новых высокоэффективных зарядных устройств с функцией коррекции коэффициента мощности, обладающих высокими технико-экономическими характеристиками во всем диапазоне работы и низкими массогабаритными показателями, является актуальной научно-технической задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Отдельные вопросы проектирования высокоэффективных ЗУ, а также силовых каскадов, входящих в состав ЗУ рассмотрены в работах Рыкованова А.С., Шевцова Д. А., Машукова Е. В., Серегина Д. А. Оценочные методики расчета и проектирования частично изложены в работах Воронина П. А., Новикова М. А., Мелешина В.И.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются энергоэффективные однофазные зарядные устройства для литий - ионных АКБ, обладающие высоким качеством потребляемой энергии и малым значением пульсаций зарядного тока.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются топологии силовых каскадов однофазных зарядных устройств и их алгоритмы управления, направленные на повышение эффективности работы и увеличение качества потребления электроэнергии.

**Цели и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка алгоритма построения высокоэффективных однофазных зарядных устройств с функцией коррекции коэффициента мощности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. выполнены аналитическое описание и анализ достоинств и недостатков существующих силовых каскадов однофазных ККМ с однополярным и двухполярным выходным напряжением;
2. выполнен анализ алгоритмов управления различных топологий силовых каскадов однофазных ККМ по критериям: коэффициент мощности; коэффициент гармоник и др.;
3. разработаны имитационные компьютерные модели рассмотренных силовых каскадов однофазных ККМ с системами управления с целью верификации полученных результатов;
4. исследованы различные схемотехнические способы повышения энергоэффективности однофазных ККМ с однополярным и двухполярным выходным напряжением, верифицированные имитационным компьютерным моделированием;
5. выполнен анализ существующих силовых каскадов ППН с определением наиболее оптимального решения по критериям: коэффициент полезного действия и уровень пульсаций зарядного тока;
6. определены топология силовой схемы и алгоритм системы управления ППН с учетом выдвигаемых требований к однофазным ЗУ на основании аналитического описания процессов и характеристик;
7. разработана имитационно компьютерная модель силовой схемы ППН в комплексе с системой управления для исследования рабочих электрических процессов и проектирования устройства;
8. выполнен анализ совместной устойчивой работы силовых каскадов ККМ и ППН;
9. на основании полученных данных сформулирован алгоритм проектирования на примере однофазного зарядного устройства 24В 60А.
10. проведена верификация на макетном образце полученных теоретических данных и результатов имитационно компьютерного моделирования;

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использовались методы теории линейных и нелинейных электрических цепей, теоретические основы преобразования электрической энергии, методы имитационного моделирования в средах Mathcad и Orcad 9.2, теория автоматического регулирования и экспериментальные исследования на физических моделях различных ККМ и других преобразователей электроэнергии.

**Научная новизна.** При решении задач, поставленных в диссертационной работе, были получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена и исследована новая топология высокоэффективного формирователя низкоэнергетической траектории переключения силового транзисторного ключа (СТК) в однофазном ККМ, позволяющая повысить энергоэффективность ККМ.
2. Предложена методика расчета дроссель-трансформатора для двухтактных обратно прямоходовых силовых каскадов, включающая в себя электрический, энергетический и тепловой расчет.
3. Систематизированы основные критерии выбора значения емкости буферного конденсатора между силовыми каскадами ЗУ, а также получена графическая зависимость значения емкости от мощности ЗУ.
4. Разработан способ уменьшения динамической мощности потерь в мостовом двухтактном обратно прямоходовом ППН с управлением фазной ШИМ, работающего в режиме мягкой коммутации в широком диапазоне выходного тока.

#### **Практическая значимость работы.**

1. Результаты анализа алгоритмов управления различными топологиями силовых каскадов однофазных ККМ по критериям: коэффициент мощности, коэффициент гармоник, коэффициент искажения, коэффициент формы, коэффициент амплитуды могут использоваться для упрощения выбора топологии и алгоритма работы однофазного ККМ на ранних этапах разработки.
2. Применены методы симметрирования выходного напряжения «независимой стабилизации выходных каналов» и «ведущий – ведомый» в однофазных ККМ с двухполярным выходным напряжением при несимметричной нагрузке и показана их работоспособность.
3. Для управления мостовыми и полумостовыми каскадами двухтактных обратно прямоходовых ППН предложена аппаратная реализация системы управления фазной ШИМ с подчиненным регулированием по току, обеспечивающая симметричный режим работы силового каскада.
4. Использование перекрестных связей в предложенной аппаратной реализации системы управления фазной ШИМ позволяет исключить проблему логических гонок и состязаний, а также проблему сквозного тока.
5. Разработана схемотехническая реализация универсального синхронного сетевого выпрямителя, обладающая меньшим значением мощности потерь по сравнению с диодным сетевым выпрямителем, а также имеющая возможность быть реализованным на отечественной компонентной базе.
6. На основании требований государственного стандарта по качеству потребляемой энергии получены графические зависимости требуемого коэффициента мощности и коэффициента гармоник от потребляемой мощности.
7. Разработан макетный образец однофазного ЗУ на основе однофазного ККМ с однополярным выходным напряжением и дросселем постоянного тока и на основе ППН, построенного по мостовой двухтактной обратно прямоходовой структуре, с выходным напряжением от 24 В до 32 В.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Способ обеспечения мягкой коммутации силовых транзисторов в мостовом двухтактном обратно прямоходовом ППН с дроссель – трансформаторами, работающим в режиме фазной ШИМ, обеспечивающий переключение по низкоэнергетической траектории.
2. Структура формирователя траектории переключения СТК в однофазном ККМ с однополярным выходным напряжением, позволяющая существенно снизить динамическую составляющую мощности потерь.
3. Функциональные схемы алгоритмов управления однофазными ККМ с однополярным выходным напряжением, а также их имитационно компьютерные модели.
4. Структурная схема системы управления фазной ШИМ для управления двухтактным обратно прямоходовым ППН с дроссель-трансформаторами, обеспечивающая симметричный режим работы схемы за счет подчиненного регулирования по току, а также исключающая возможность протекания сквозных токов за счет использования перекрестных связей.
5. Алгоритм проектирования однофазных высокоэффективных зарядных устройств с функции корректора коэффициента мощности для литий-ионных АКБ, позволяющий упростить начальный этап проектирования.

**Степень достоверности результатов.** Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата, а также верификацией результатов полученных путем аналитических расчетов, математических, физических и имитационно компьютерных моделей, а также в ходе экспериментальных методов исследования.

Использовались следующие методы: методы теоретической электротехники, методы теории электрических линейных и нелинейных цепей, методы математического анализа, теории автоматического управления и основы электроники.

Имитационное компьютерное моделирование рассмотренных силовых каскадов однофазных корректоров коэффициента мощности и преобразователей постоянного напряжения в комплексе с системами управления было проведено в среде имитационного моделирования OrCad 9.2.

**Апробация работы.** Основные результаты обсуждались и докладывались и обсуждались на XXIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2017 г.), XXV Международной научно-технической конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2019 г.), на XXVI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2020 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 11 научных работ, среди них – 7 в изданиях, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией РФ и 1 – в изданиях, индексируемых в базах Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых источников и 5 приложений. Основная часть работы содержит 172 машинописных страницы, в том числе 124 рисунка и 10 таблиц. Список используемых источников включает 81 наименование. Общий объем работы - 177 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, представлена апробация и структура работы.

**В первой главе** проведен анализ основных требований, выдвигаемых к однофазным зарядным устройствам для литий-ионных АКБ. В результате анализа было установлено, что основными требованиями являются:

- обеспечение зарядной характеристики с низким значением пульсаций зарядного тока, которая представлена на Рисунке 1;
- высокое качество потребляемой энергии из сети, которое определяется высоким значением коэффициента мощности  $K_m$ , а также низким значением коэффициента гармоник  $K_g$ ;
- обеспечение потенциальной развязки;

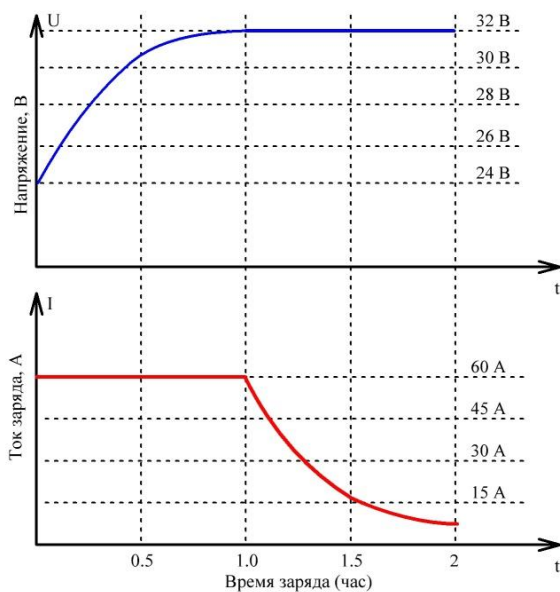


Рисунок 1. Зарядная характеристика литий-ионной АКБ.

На основании требований ГОСТ построены зависимости  $K_m$  и  $K_g$  от мощности нагрузки, позволяющие определить значение  $K_m$  и  $K_g$ , предъявляемые к однофазному ЗУ по качеству потребляемой энергии из сети, которые представлены на Рисунке 2.

Сформулирован критерий высокой эффективности однофазного зарядного устройства, показывающий недостатки классического схемотехнического решения в построении однофазных ЗУ с применением резонансных ППН, имеющих большое значение пульсаций выходного тока.

На основании сформулированного критерия, а также в результате анализа известных схемотехнических решений,

была составлена структурная схема однофазного высокоэффективного ЗУ, представленная на Рисунке 3, в основе которой используется два силовых каскада: однофазный ККМ и ППН.

В процессе анализа известных схемотехнических решений однофазных ЗУ для литий-ионных АКБ установлено, что для обеспечения высокой эффективности необходимо провести сравнение различных силовых каскадов

ККМ и ППН с целью определения наиболее подходящих для выдвигаемых требований.

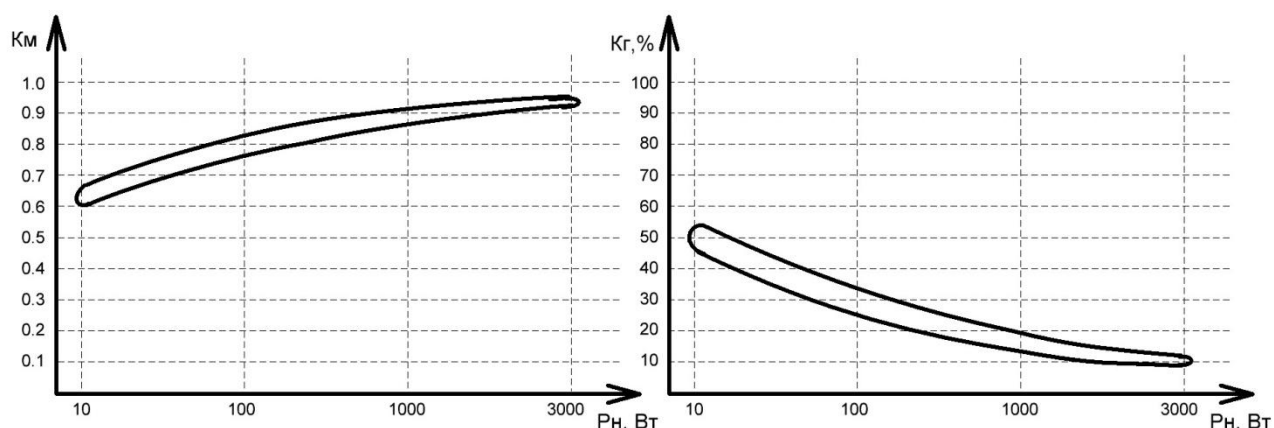


Рисунок 2. Зависимость  $K_m$  и  $K_g$  от номинальной мощности нагрузки для однофазной сети переменного тока.

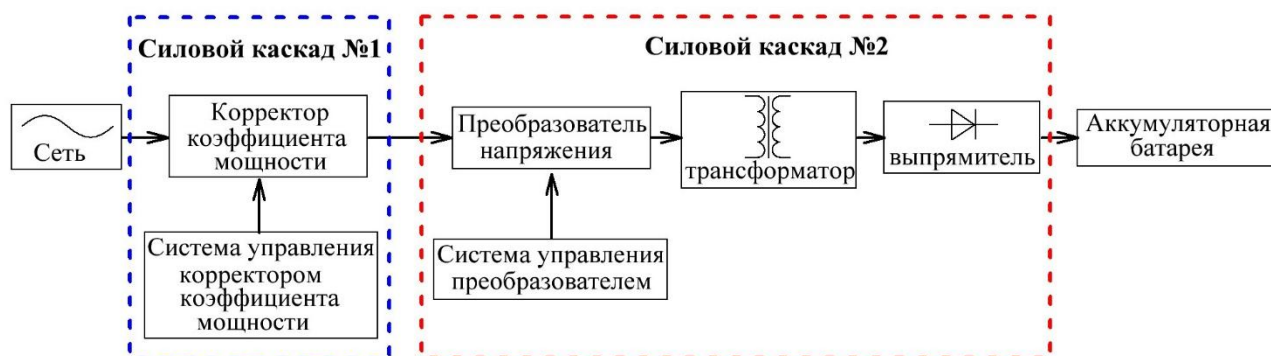


Рисунок 3. Структурная схема однофазного высокоэффективного ЗУ с функцией корректора коэффициента мощности для литий-ионных АКБ.

Во второй главе проведен сравнительный анализ различных силовых каскадов однофазных ККМ, базирующийся на предложенной классификации, представленной на Рисунке 4, а также аналитическом описании принципа их работы. Предложенная классификация основана на трех ключевых составляющих в построении однофазных ККМ:

- однополярное/двухполярное выходное напряжение;
- силовой транзисторный ключ (СТК) постоянного/переменного тока;
- дроссель постоянного/переменного тока;

В процессе сравнительного анализа силовых каскадов ККМ, целью которого было определение наиболее энергоэффективного, было выявлено и доказано, что применение однофазного ККМ с двухполярным выходным напряжением актуально лишь в сетях с широким диапазоном входного напряжения или сверхнизких сетях переменного тока.

В результате проведенного анализа получено, что наиболее энергоэффективным однофазным силовым каскадом ККМ является классический силовой каскад с однополярным выходным напряжением с



дросселем постоянного тока и СТК постоянного тока, который представлен на Рисунке 5.



Рисунок 4. Классификация силовых каскадов однофазных ККМ.

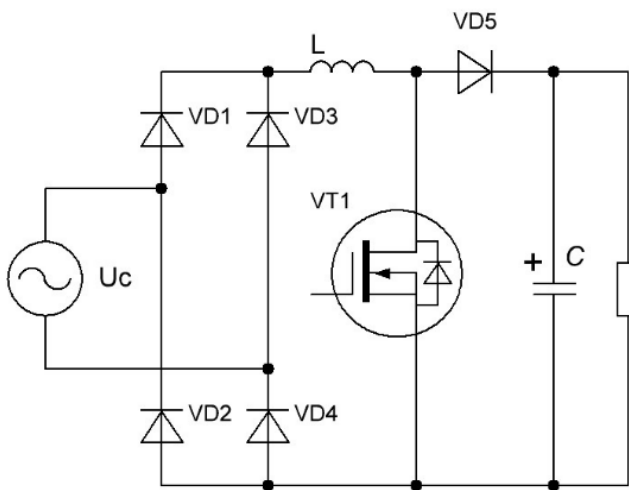


Рисунок 5. Однофазный ККМ с однополярным выходным напряжением, с дросселем постоянного тока и СТК постоянного тока.

транзисторов, работающих в режиме инверсной проводимости, что основывается на аналитических выражениях (1) и (2).

$$P_{\text{мост}}(U_{\text{сети}}) = (I_{\text{AVG}}(U_{\text{сети}}) \cdot V_D + I_{\text{RMS}}(U_{\text{сети}})^2 \cdot R_D) \cdot 4 \quad (1)$$

$$P_{\text{мост синх.}}(U_{\text{сети}}) = I_{\text{RMS}}^2(U_{\text{сети}}) \cdot R_{\text{DS(ON)}} \cdot 4 \quad (2)$$

Где  $P_{\text{мост}}(U_{\text{сети}})$  – значение мощности потерь в сетевом диодном выпрямителе, зависящее от уровня сетевого напряжения;  $I_{\text{AVG}}(U_{\text{сети}})$  – среднее значение тока, протекающего через диоды, зависящее от уровня сетевого напряжения;  $V_D$  – прямое падение напряжения на диоде;  $I_{\text{RMS}}(U_{\text{сети}})$  – действующее значение тока, протекающего через диоды, зависящее от уровня сетевого напряжения;  $R_D$  – сопротивление в проводящем состоянии;  $R_{\text{DS(ON)}}$  – внутренне сопротивление МДП транзистора в открытом проводящем состоянии.

Для выбранного силового каскада были рассмотрены и предложены способы повышения энергоэффективности, позволяющие существенно уменьшить значение энергетических потерь, не накладывая ограничения на алгоритм управления:

Первый способ повышения энергоэффективности заключается в применении сетевого синхронного выпрямителя, заменяющего входной диодный выпрямитель позволяет существенно снизить статическую составляющую мощности потерь за счет использования МДП

На основании выражений (1) и (2) был проведен аналитический расчет мощности потерь в одном полупроводниковом элементе при разном значении действующего тока, показывающий, что использование синхронного выпрямителя уменьшает значение мощности потерь в несколько раз.

ТАБЛИЦА 2.5 СРАВНЕНИЕ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В РАЗЛИЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Название	Значение мощности потерь при различном значении силового тока, Вт						
	10 А	11 А	12 А	13 А	14 А	15 А	16 А
GBJ2510-F	10.5	11.55	12.6	13.65	14.7	15.75	16.8
IPW65R019C7FKSA1	1.9	2.299	2.736	3.211	3.724	4.275	4.864

Где GBJ2510-F – диодный мост, в котором прямое падение напряжения на одном диоде составляет 1.05 В; IPW65R019C7FKSA1 – транзистор, сопротивление открытого канала которого составляет 19 мОм.

В процессе анализа существующих схемотехнических решений сетевых синхронных выпрямителей был выявлен ряд недостатков: необходимость использования вторичного источника напряжения для управления транзисторами; применение специализированных микросхем; использование оптронов; относительно узкий температурный диапазон работы.

Учитывая недостатки известных схемотехнических решений был разработан сетевой синхронный выпрямитель, не требующий подключения вторичных источников электропитания, оптронов и специализированных микросхем. Помимо этого предложенный синхронный выпрямитель может быть спроектирован на основе Отечественной компонентной базы. Модель сетевого синхронного выпрямителя представлена на Рисунке 6.

Вторым способом повышения энергоэффективности является применение формирователя траектории переключения (ФТП) СТК, который позволяет переключаться по низкоэнергетической траектории, уменьшая тем самым динамическую составляющую мощности потерь. Модель предложенного не диссипативного ФТП представлена на Рисунке 7, а результаты моделирования на Рисунках 8 и 9.

Также представлен аналитический расчет основных составляющих предложенного ФТП, позволяющий определить требуемые параметры реактивных компонентов для заданной мощности ККМ и частоты коммутации СТК. В результате проведенного имитационно компьютерного моделирования предложенного ФТП получено, что энергия на переключении уменьшилась от 421 мкДж до 74 мкДж, что эквивалентно уменьшению мощности потерь с 31.154 Вт до 5.476 Вт.

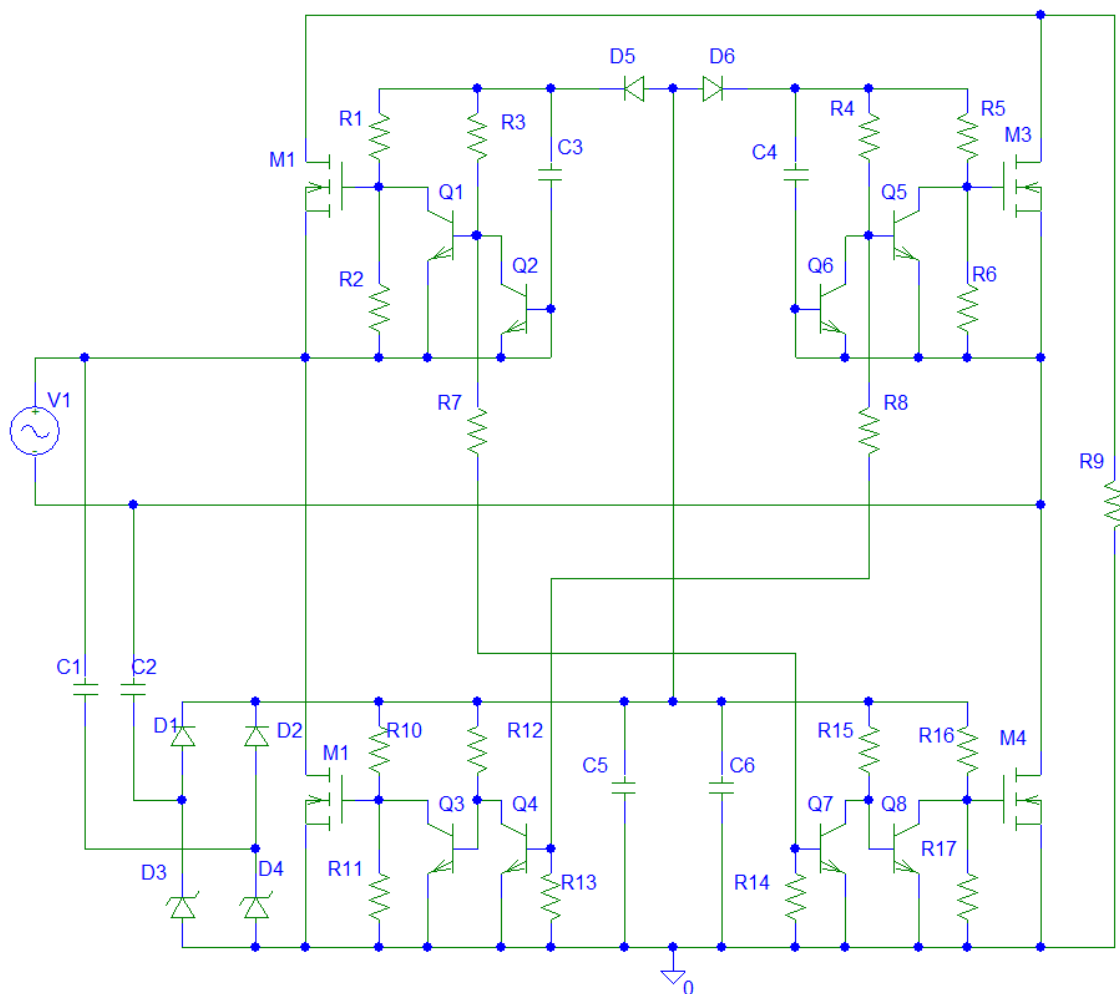


Рисунок 6. Модель сетевого синхронного выпрямителя.

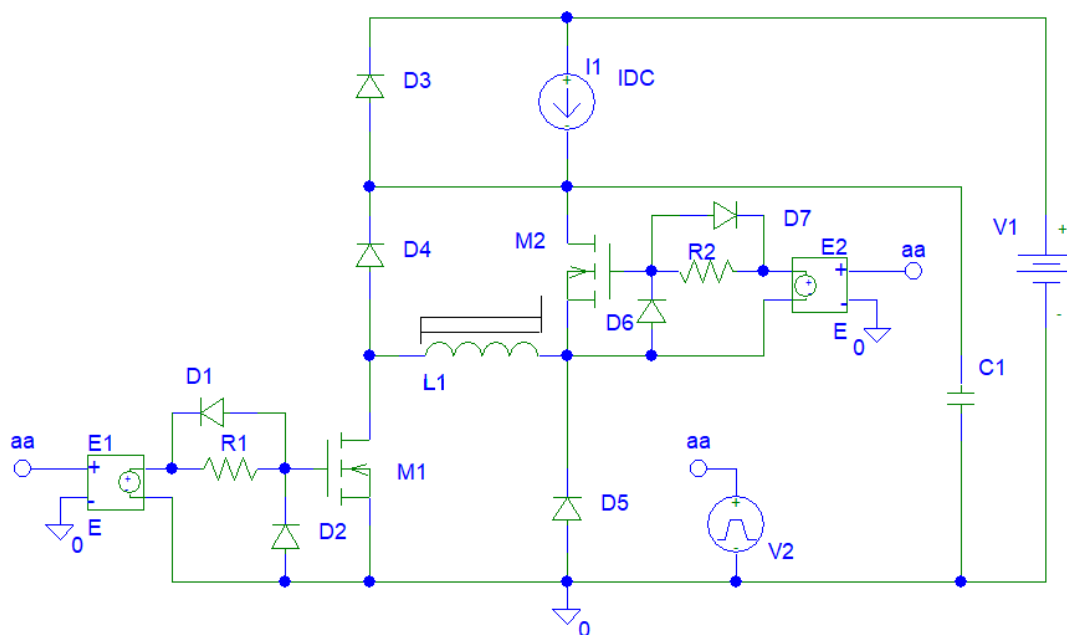


Рисунок 7. Модель не диссипативного формирователя траектории переключения.

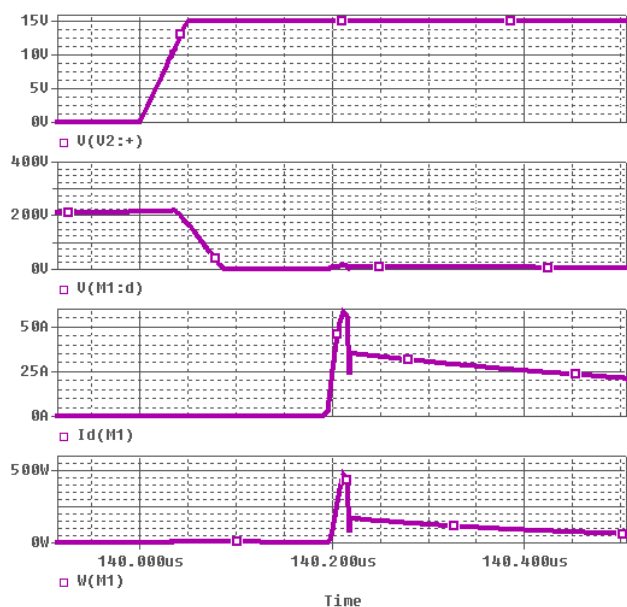


Рисунок 8. Включение СТК в модели ККМ с ФТП.

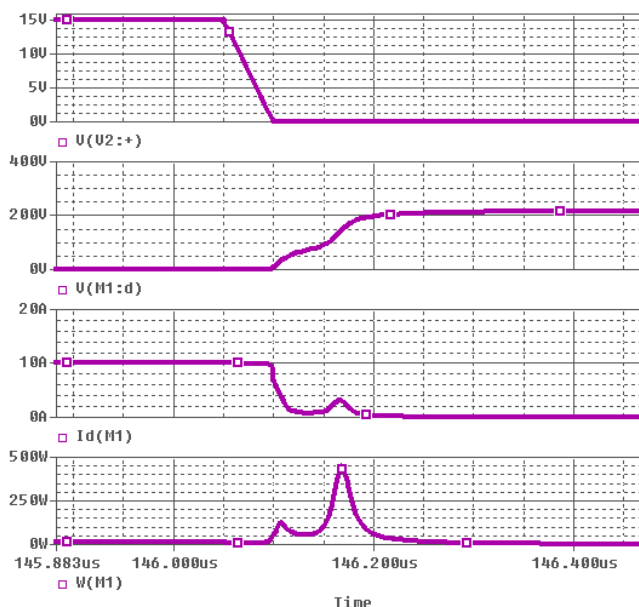


Рисунок 9. Выключение СТК в модели ККМ с ФТП

В третьей главе проведен анализ различных алгоритмов управления однофазным ККМ, в результате которого была составлена классификация алгоритмов систем управления. На основании предложенной классификации, а также базовых критериев оценивания качества потребляемой энергии ( $K_m$  и  $K_\Gamma$ ), определяющиеся по соотношениям (3) и (4) был проведен анализ достоинств и недостатков различных известных и предложенных автором структур управления однофазным ККМ.

$$K_m = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{\int_0^T u \cdot i \cdot dt}{\sqrt{\int_0^T u^2 \cdot dt \cdot \int_0^T i^2 \cdot dt}} \quad (3)$$

$$K_\Gamma = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \sqrt{\frac{I^2}{I_1^2} - 1} \quad (4)$$

где  $K_\Gamma$  – коэффициент гармоник;  $I_n$  – значение тока  $n$  – ой гармоники (при идеальной синусоиде  $K_\Gamma = 0\%$ );  $K_i$  – коэффициент искажения;  $I$  – действующее значение тока;  $I_1$  – значение тока первой гармоники (при идеальной синусоиде  $K_i = 1$ ).

В результате проведенного сравнения было получено, что наиболее высокими показателями качества потребляемой энергии обладает синхронная ШИМ, работающая на постоянной частоте в режиме непрерывного тока, а также предложенная структура ШИМ с времяимпульсным множителем. Структура синхронной ШИМ и предложенная структура ШИМ с времяимпульсным множителем представлены на Рисунке 10 и Рисунке 11 соответственно.

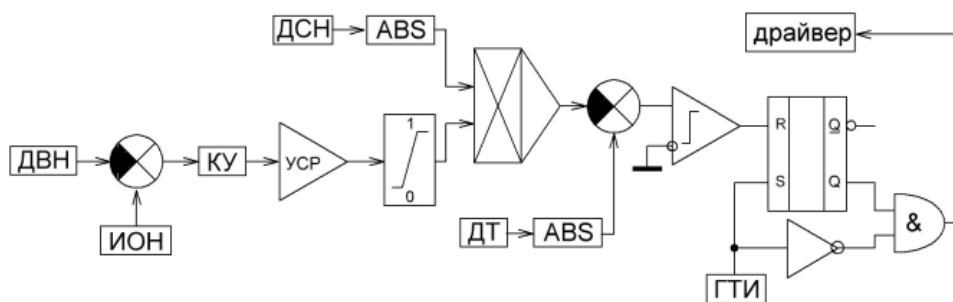


Рисунок 10. Функциональная схема синхронной ШИМ.

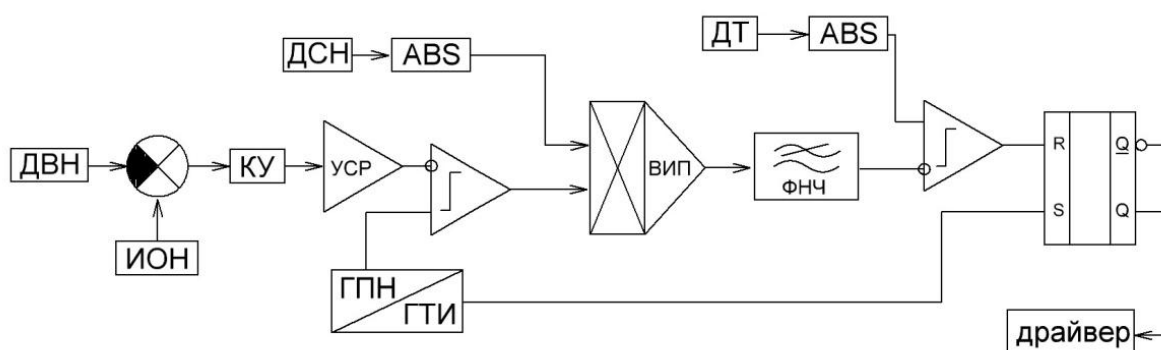


Рисунок 11. Функциональная схема ШИМ с времяимпульсным множителем.

Где ДСН – датчик сетевого напряжения; ДТ- датчик тока; ДВН – датчик выходного напряжения; ИОН – источник опорного напряжения; КУ – корректирующее устройство; УСР – усилитель сигнала рассогласования; ГПН – генератор пилообразного напряжения; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ВИП – времяимпульсный множитель.

Для верификации полученных данных было проведено имитационно компьютерное моделирование в среде Orcad 9.2 всех рассматриваемых алгоритмов управления. Результаты компьютерного моделирования подтвердили теоретические расчеты, ряд из которых представлен на Рисунках 12 и 13.

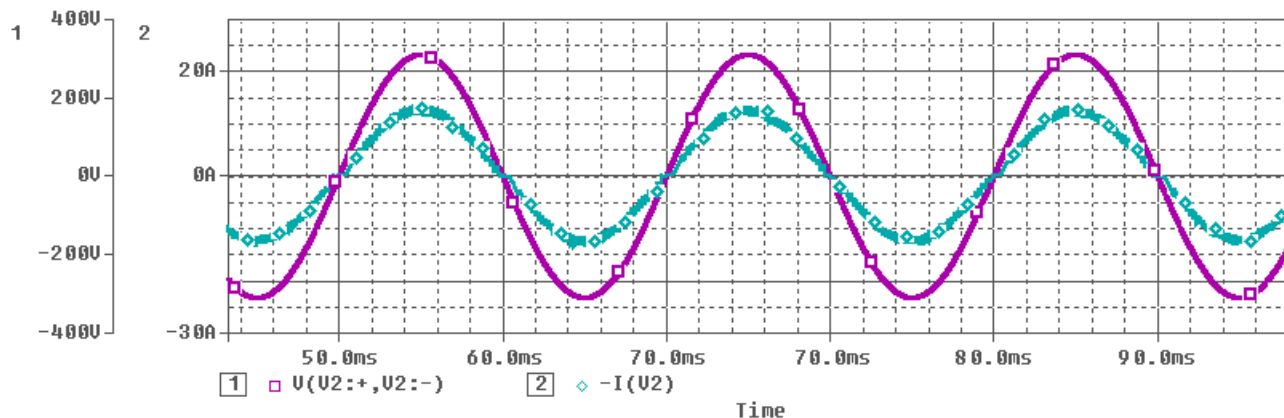


Рисунок 12. Результаты компьютерного моделирования алгоритма управления синхронной ШИМ.

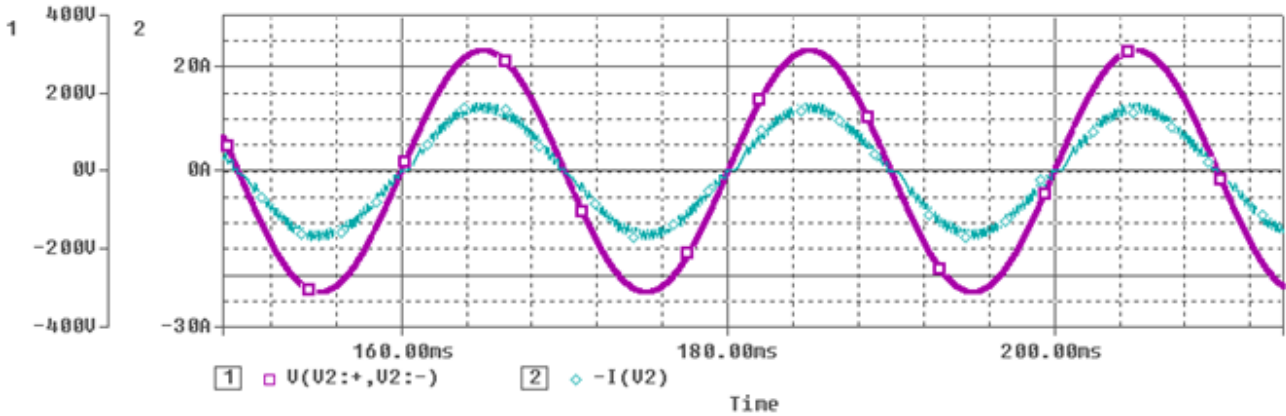


Рисунок 13. Результаты компьютерного моделирования алгоритма управления ШИМ с времяимпульсным перемножителем.

На представленных осциллограммах по оси ординат 1 показано питающее напряжение, а по оси ординат потребляемый ток. Количественная оценка алгоритмов работы производилась с помощью разложения в ряд Фурье по гармоническому составу потребляемого тока и расчету базовых критериев оценивания качества потребляемого тока, которые представлены в Таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 - СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ККМ.

Система управления	Км	Кг
Синхронная ШИМ	0.92-0.98	5-7
ШИМ с времяимпульсным перемножителем	0.92-0.96	6-8

Также, в данной главе рассмотрены способы симметрирования выходного напряжения для однофазных ККМ с двухполярным выходным напряжением, работающие по принципам независимой стабилизации и «ведущий-ведомый». Подобные способы позволяют симметрировать выходное напряжение ККМ при несимметричной нагрузке, что подтверждается результатами компьютерного моделирования предложенных структур, реализующих рассмотренные способы. Структурные схемы, реализующие рассмотренные способы представлены на Рисунках 14 и 15.

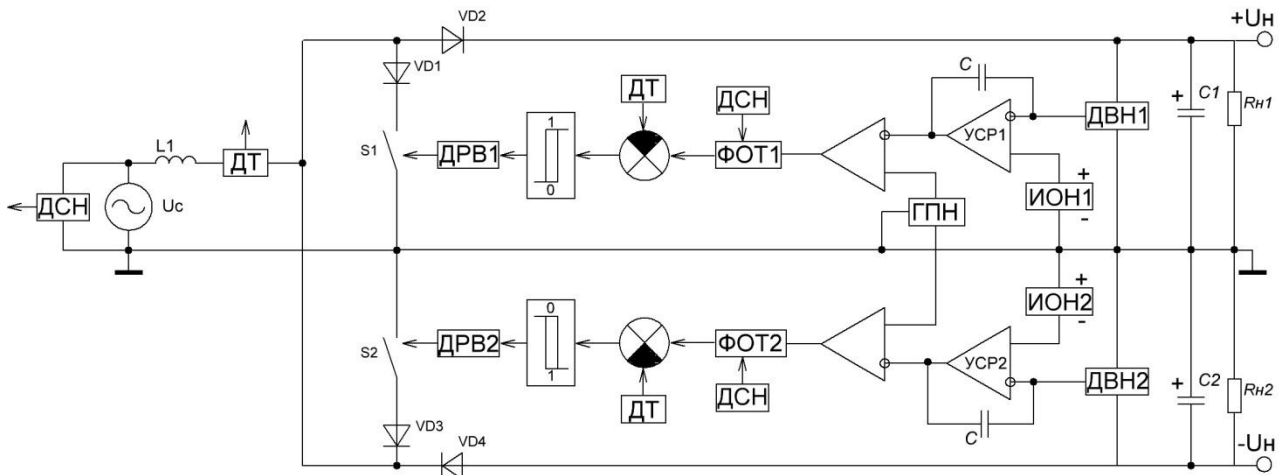


Рисунок 14. Структурная схема управления однофазным ККМ с двухполярным выходным напряжением с независимой стабилизацией выходного напряжения.

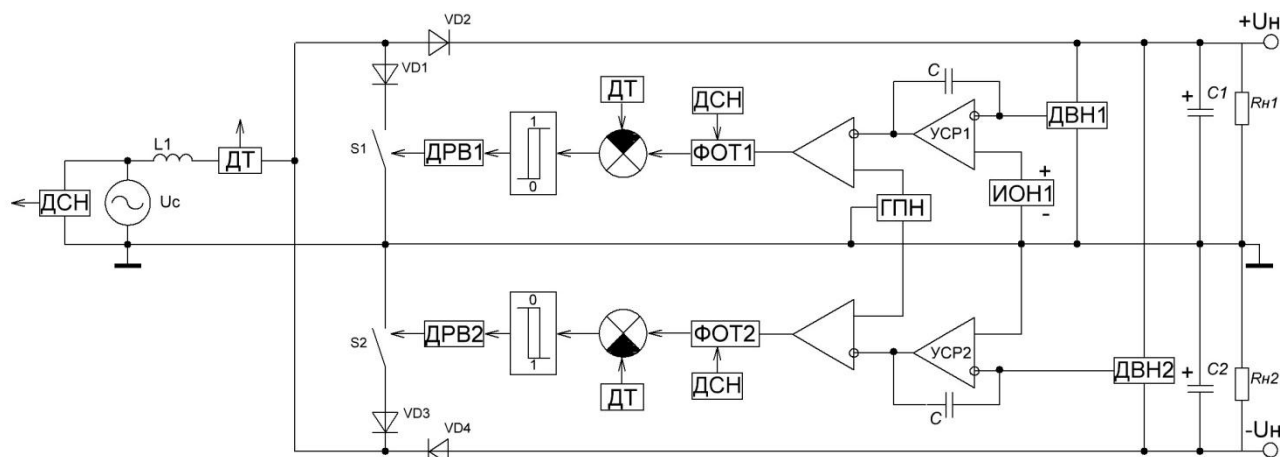


Рисунок 15. Структурная схема управления однофазным ККМ с двухполярным выходным напряжением по принципу «ведущий – ведомый».

Где ДТ - датчик тока, ДРВ – драйвер СТК, ДСН – датчик сетевого напряжения питания, ФОТ - формирователь огибающей тока, ГПН - генератор пилообразного напряжения, ИОН - источник опорного напряжения, УСР - усилитель сигнала рассогласования, ДВН - датчик выходного напряжения.

Применение предложенных методов симметрирования позволяет стабилизировать положительный и отрицательный каналы выходного напряжения двухполярного ККМ с несимметричной нагрузкой с точностью до 5%, в то время как без применения подобных методов разница напряжений на выходных каналах достигает 50%, что подтверждается результатами проведенного компьютерного моделирования.

В четвертой главе проведен анализ второго силового каскада однофазного зарядного устройства. В процессе анализа была составлена классификация различных ППН, на основании которой проводилось сравнение достоинств и недостатков различных классов преобразователей.

В результате проведенного анализа в качестве ППН в однофазном ЗУ предлагается двухтактный обратно прямоходовой ППН с двумя одинаковыми дросселями – трансформаторами, работающими в противофазе, показанный на

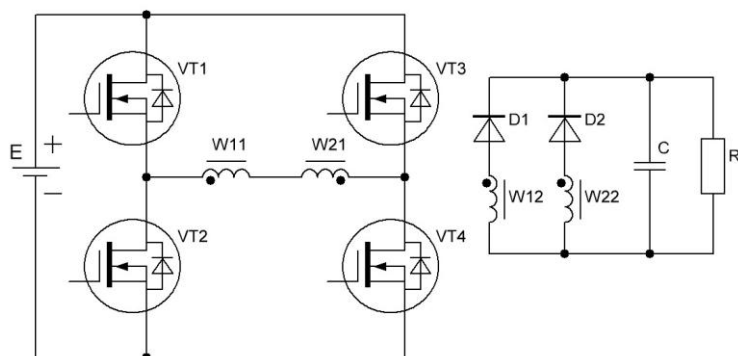


Рисунок 16. Силовой каскад мостового двухтактного обратно прямоходовой ППН с дросселем – трансформаторами.

Рисунке 16. Схема может быть выполнена на основе мостового или полумостового каскада, а также многоуровневого каскада со средней точкой. Особенностью схемы является отсутствие дросселя в выходном сглаживающем фильтре и относительно небольшие пульсации тока через выходной сглаживающий

конденсатор.

Также описан принцип работы предложенного силового каскада при алгоритме управления фазной ШИМ, изображенный на Рисунке 17:

В момент времени  $t_0-t_1$  открыты силовые транзисторы  $VT_1$  и  $VT_4$ , Диод  $D_1$  проводит силовой ток, а диод  $D_2$  заперт. На данном интервале дроссель – трансформатор  $T_1(W_{11}:W_{12})$ , работает как трансформатор и передает энергию. Дроссель – трансформатор  $T_2(W_{21}:W_{22})$ , работает как накопитель энергии, сдерживая нарастание тока в первичной цепи. Из-за того, что диод  $D_2$  заперт,

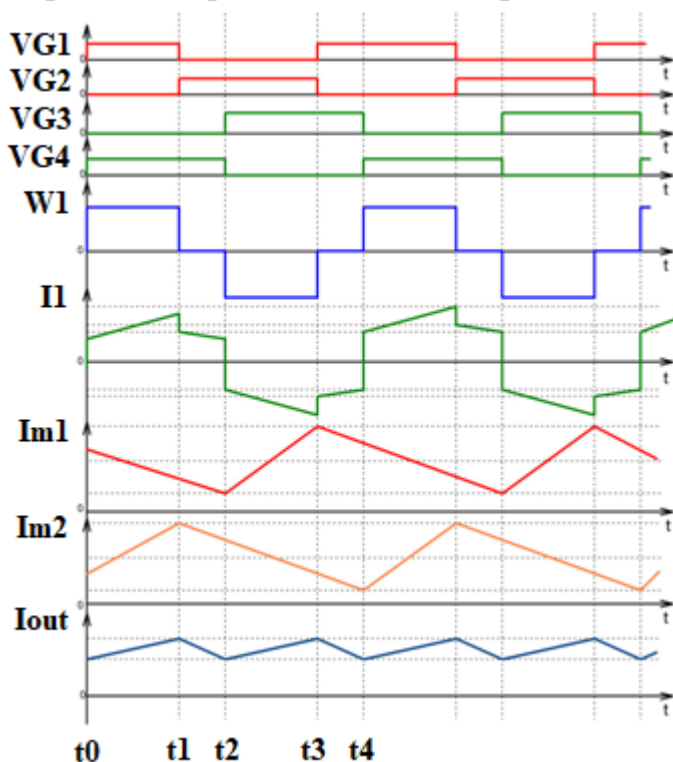


Рисунок 17. Осциллограммы работы мостового двухтактного обратно прямоходового ППН с дроссель – трансформаторами с алгоритмом управления фазной ШИМ.

проводящее состояние. Начинается процесс энергообмена между дроссель – трансформаторами  $T_1$  и  $T_2$ . При этом ток в индуктивности намагничивания  $Im_1$  дроссель – трансформатора  $T_1$  продолжает спадать, при этом начинает спадать и ток индуктивности намагничивания  $Im_2$  дроссель – трансформатора  $T_2$ , поскольку к первичной обмотке  $W_{21}$ , а, следовательно, и к индуктивности намагничивания, прикладывается пересчитанное напряжение с вторичной стороны, причем в полярности, противоположной изначальной. Из сказанного следует, что ток, протекающий по первичной стороне ППН, должен скачкообразно снизиться.

В момент времени  $t_2-t_3$ , происходят аналогичные процессы интервалу  $t_0-t_1$ , где дроссель – трансформатор  $T_1$  будет накапливать энергию, а дроссель – трансформатор  $T_2$  передавать энергию.

отсутствует ток вторичной обмотки дроссель – трансформатора  $W_{22}$ . При этом напряжение на первичной обмотке дроссель – трансформатора  $T_1$  не совпадает с направлением силового тока, протекающего в ней, поэтому ток индуктивности намагничивания  $Im_1$  будет спадать, а ток индуктивности намагничивания дроссель – трансформатора  $T_2$  будет возрастать.

В момент времени  $t_1-t_2$  по окончании этапа импульса закрывается СТК  $VT_1$ , наступает короткая пауза. Суммарное напряжение на первичных обмотках дроссель – трансформаторов равно нулю, по этой причине полярность напряжения на обмотке  $W_{21}$ , меняется на обратную. Вследствие этого диод  $D_2$  переходит в



Интервал времени  $t_3-t_4$  аналогичен интервалу  $t_1-t_2$ . После чего повторяется период работы.

Для реализации алгоритма управления была предложена и описана структурная схема, показанная на Рисунке 18, особенностями которой являются: исключение возможности возникновения сквозных токов, а также исключение проблемы логических гонок и состязаний, за счет введения перекрестных связей.

В составе главы также предложена методика расчета дроссель – трансформаторов, основанная на принципе работы схемы, законе сохранения энергии и законе электромагнитной индукции Фарадея, позволяющая спроектировать дроссель – трансформаторы, работающие в режиме непрерывного и прерывистого режима работы. Основными аналитическими соотношениями для проектированиямоточного элемента являются (5), (6) и (7).

$$V = \frac{\frac{P_n}{2} \cdot \frac{1}{\eta}}{\frac{1}{2} \cdot \frac{B_m^2 - B_r^2}{\mu \cdot \mu_0} \cdot f} = \frac{P_n \cdot \mu \cdot \mu_0}{\eta \cdot (B_m^2 - B_r^2) \cdot f} \quad (5)$$

$$\frac{E_{min}}{2} = S_{cm} \cdot W1 \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (6)$$

$$U_n = S_{cm} \cdot W2 \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (7)$$

Где  $P_n$  – мощность нагрузки;  $\eta$  – ориентировочный коэффициент полезного действия (КПД);  $B_m$  – максимальная рабочая индукция сердечника ( $B_m \approx 0.8 \div 0.9 B_s$ );  $B_s$  – индукция насыщения;  $B_r$  – остаточная индукция;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $V$  – требуемый объем сердечника;  $f$  – частота коммутации;  $W$  – число витков первичной/вторичной обмотки;  $\Delta B = (B_m - B_r)$ ;  $\Delta t = \frac{T}{2}$ ;

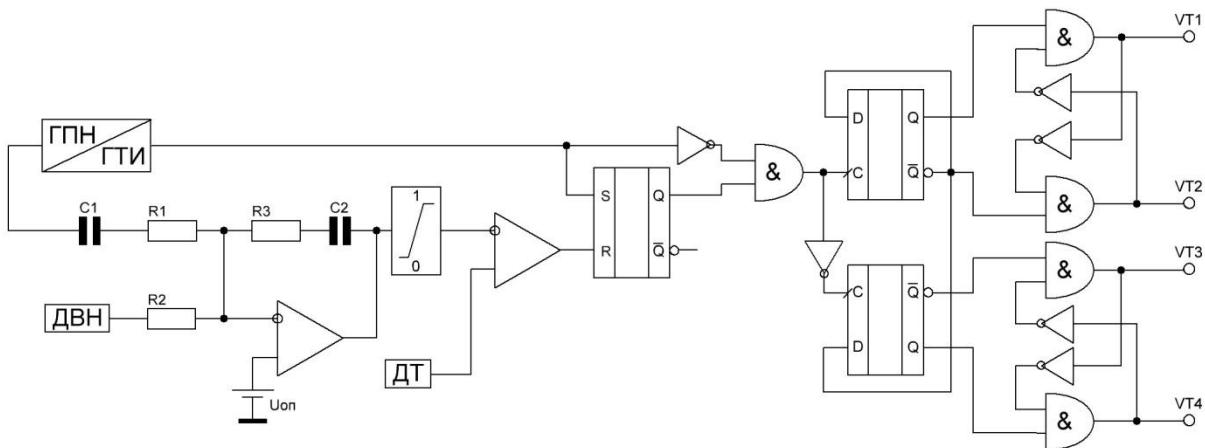


Рисунок 18. Структурная схема управления алгоритма фазной ШИМ.

В качестве дополнительных исследований, описанных в главе, был рассмотрен режим мягкой коммутации СТК при нуле тока, а также при нуле напряжения в двухтактном обратно прямоходовом ППН с дроссель –

трансформаторами. По результатам исследований установлено, что наиболее эффективно использовать мягкую коммутацию при нуле напряжения, используя дополнительные конденсаторы, устанавливающиеся параллельно СТК, а также индуктивность рассеивания дроссель – трансформаторов, как

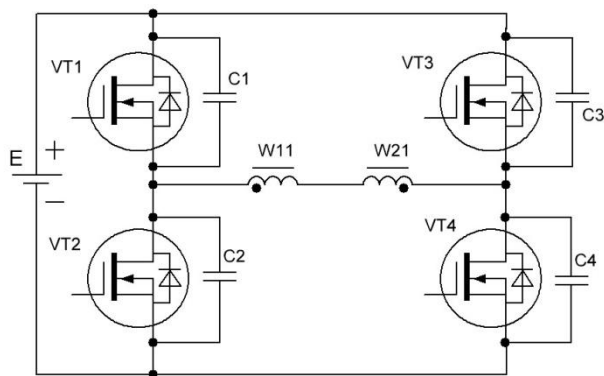


Рисунок 19. Схема двухтактного обратно прямоходового ПН с дроссель – трансформаторами в режиме мягкой коммутации СТК.

показано на Рисунке 19. Установлено, что режим мягкой коммутации СТК при нуле напряжения не оказывает влияния на алгоритм работы преобразователя, но вносит изменения в принцип работы на интервале паузы для перезаряда емкостей. В главе предложены и описаны аналитические соотношения, позволяющие обеспечить режим мягкой коммутации для конкретного силового транзистора при заданной индуктивности рассеивания дроссель – трансформаторов. Для верификации теоретических данных было

проведено имитационно компьютерное моделирование, результаты которого соответствуют ожиданиям. Также проведено дополнительное исследование совместной устойчивой работы двух силовых каскадов, входящих в состав однофазного ЗУ. В

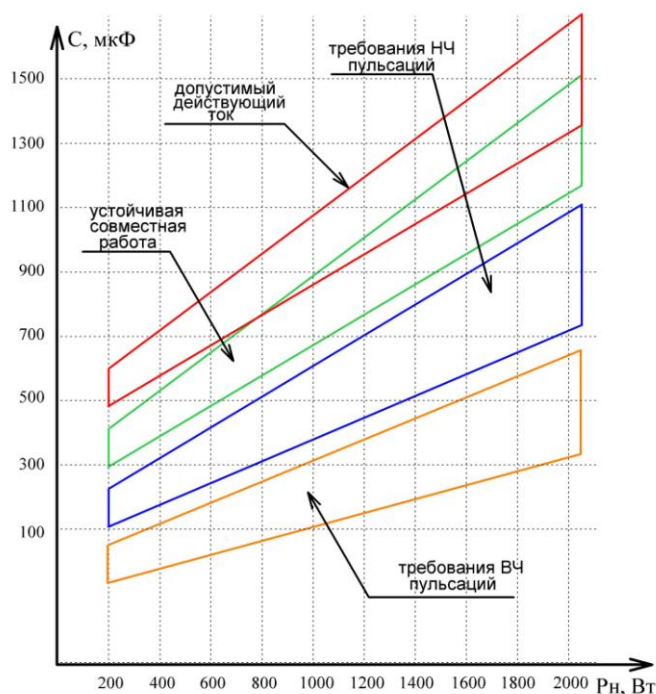


Рисунок 20. Зависимость значения выходной емкости ККМ от значения номинальной мощности устройства.

результате исследований было выявлено, что устойчивость совместной работы зависит от значения промежуточной буферной емкости между силовыми каскадами и от типа силового каскада ККМ. Одним из выводов проведенного исследования является необходимость выбора промежуточной буферной емкости на основании 4 критериев: требования к высокочастотным пульсациям выходного напряжения ККМ; требования к низкочастотным пульсациям выходного напряжения ККМ; условие совместной устойчивой работы; допустимое действующее значение тока конденсатора. Зависимость требуемой выходной емкости однофазного ККМ от значения номинальной мощности представлена на Рисунке 20.

В пятой главе на основании результатов проведенных исследований, составлен алгоритм проектирования однофазных высокоэффективных ЗУ. Предлагаемый алгоритм проектирования подразумевает использование двух силовых каскадов в составе высокоэффективного зарядного устройства для литий-ионных АКБ.

С целью проведения верификации теоретических положений, а также результатов компьютерного моделирования электрических процессов по предложенному алгоритму был изготовлен макетный образец однофазного высокоэффективного зарядного устройства для литий-ионных аккумуляторов мощностью 2 кВт с диапазоном регулирования выходного напряжения от 22 до 32 В, который представлен на Рисунке 21.

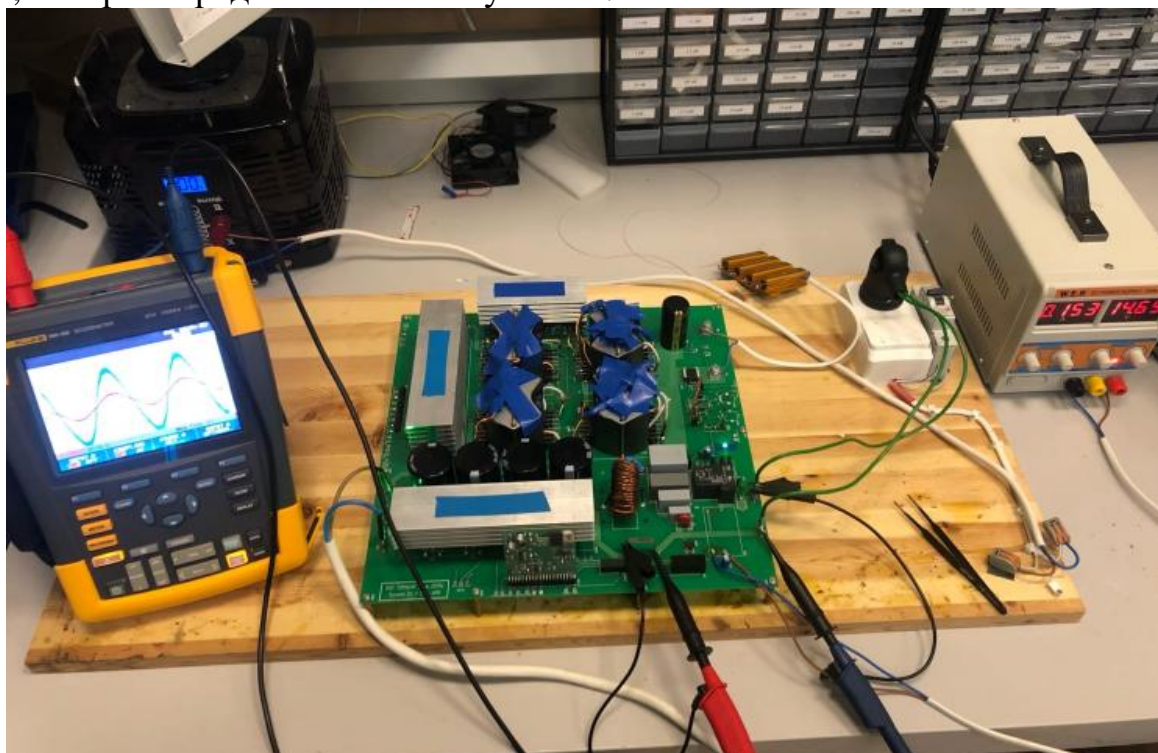


Рисунок 21. Макетный образец однофазного высокоэффективного ЗУ с функцией корректора коэффициента мощности для литий-ионного АКБ 24В 120А·ч.

В качестве примера на Рисунке 22 приведены осциллограммы входного напряжения (кривая В) и потребляемого тока (кривая А), также на Рисунке 23 показаны осциллограммы напряжения (кривая В) и тока (кривая А) на первичной стороне дроссель – трансформаторов. Также для проверки зарядной характеристики проводились экспериментальные исследования с зарядом литий-ионного АКБ 24В 120А·ч компании EnSol. В результате обработки экспериментальных исследований зарядной характеристики были получены осциллограммы, показанные на Рисунке 24.

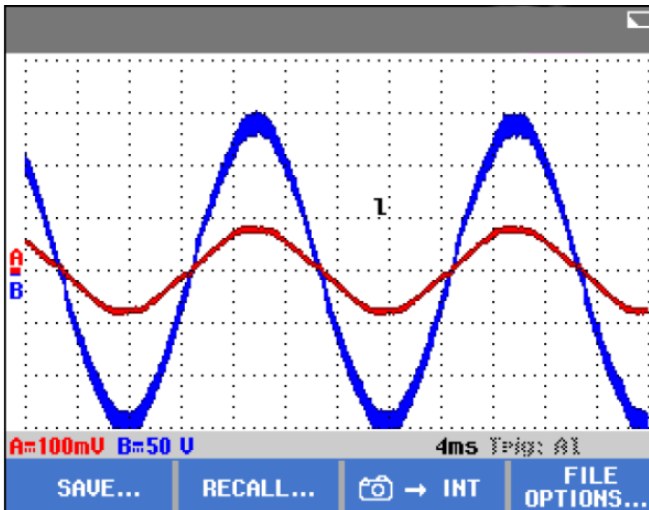


Рисунок 22. Осциллограммы потребляемого тока и питающего сетевого напряжения.

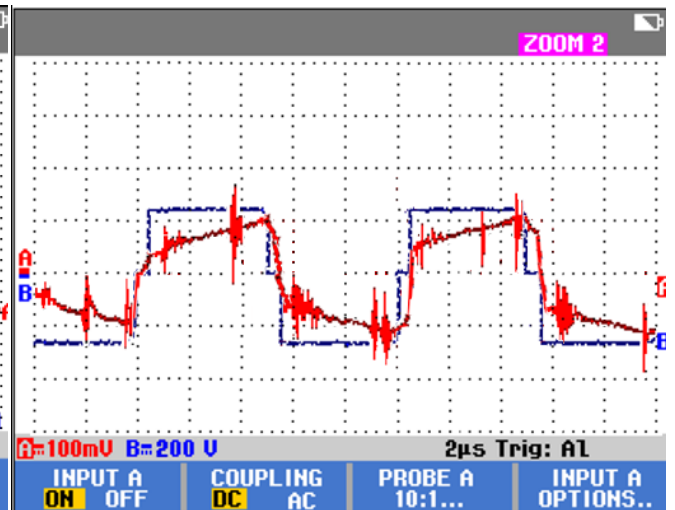


Рисунок 23. Осциллограммы напряжения и тока первичной стороны дроссель – трансформаторов.

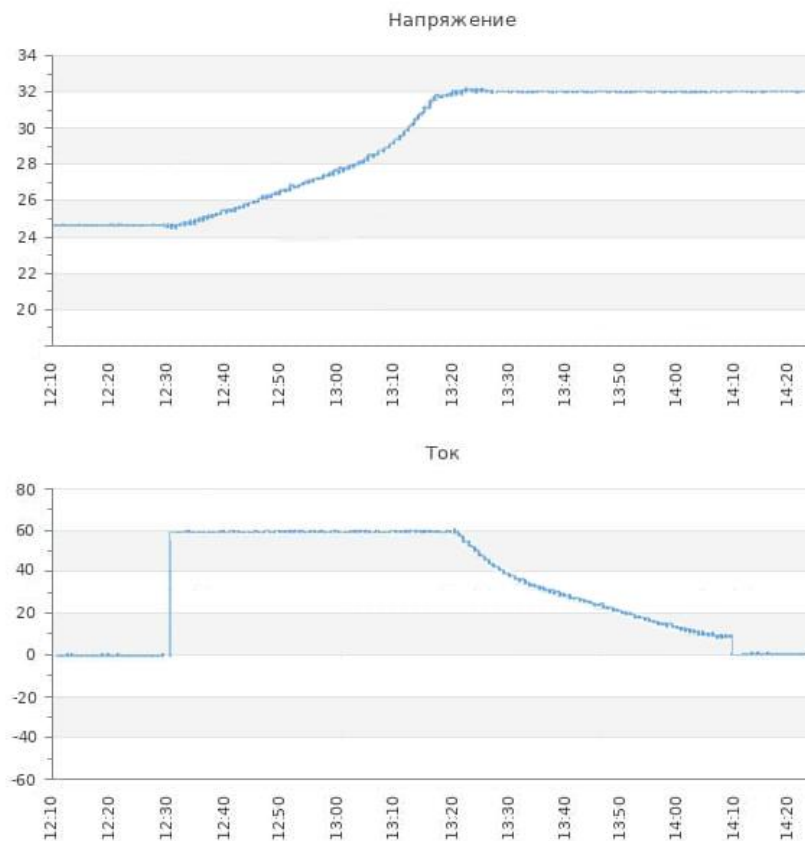


Рисунок 24. Зарядная характеристика литий-ионного АКБ.

В Таблице 2 приведены исходные значения требуемых параметров, а также результаты обработки экспериментальных исследований.

ТАБЛИЦА 2 ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ.

№	Наименование параметра	Исходное значение	Полученное значение
1	Номинальное значение выходной мощности, Вт	2000	2000
2	Номинальное значение входного напряжения, В	220	220
3	Минимальное значение входного напряжения, В	160	160
4	Максимальное значение входного напряжения, В	260	260
5	Диапазон регулирования выходного напряжения, В	22 – 32	22-32
6	Диапазон регулирования выходного тока, А	5-60	7-60
7	Коэффициента мощности, не менее	0.99	0.97
8	Коэффициент полезного действия устройства	0.94	0.90-0.92
9	Коэффициент гармонических составляющих входного тока с учетом 40-ой гармонической составляющей, %, не более	3	5
10	Диапазон изменения частоты входного напряжения, Гц	50-60	50-60

Экспериментальные исследования подтвердили основные теоретические положения диссертационной работы, а также результаты компьютерного моделирования и работоспособность однофазного зарядного устройства для литий-ионных АКБ с функцией корректора коэффициента мощности. При этом расхождение теоретически заявленных данных и результатов компьютерного моделирования расходятся с экспериментально полученными не более чем на 8%, что допустимо при инженерных расчетах таких сложных электрических устройств.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. Предложен алгоритм проектирования однофазных высокоэффективных зарядных устройств с функции корректора коэффициента мощности для литий-ионных АКБ, позволяющий упростить начальный этап проектирования.
2. На основании требований ГОСТ к качеству потребляемого тока выведены и представлены зависимости коэффициента мощности и коэффициента гармоник от величины преобразуемой мощности для однофазной сети переменного тока.
3. Разработанная имитационно компьютерная модель однофазного зарядного устройства с функцией коррекции коэффициента мощности позволяет корректно проводить исследование установившихся, переходных и аварийных режимов работы.
4. Проведенное сопоставительное сравнение по предложенным критериям силовых каскадов однофазных корректоров коэффициента мощности с однополярным и двухполярным выходным напряжением, в совокупности с представленными сравнительным анализом функциональных схем различных систем управления по основным коэффициентам качества

потребляемого тока, позволяет систематизировать и упростить процесс проектирования однофазного корректора коэффициента мощности для конкретного применения.

5. Разработанная имитационно-компьютерная модель мостового ППН с дроссель трансформаторами в комплексе с системой управления фазной ШИМ с подчиненным регулированием по току позволяет проводить исследование установившихся режимов, избегая проблем логических гонок и сквозных токов.

6. На основании анализа процессов в силовой схеме двухтактного обратно прямоходового ППН, разработана методика расчета дроссель-трансформатора, позволяющая провести расчет магнитопровода и параметров обмотки в полном диапазоне мощностей схемы.

7. Использование предложенного автономного синхронного выпрямителя в составе однофазных корректоров коэффициента мощности как альтернатива диодным выпрямителям позволяет существенно снизить значение статических потерь, особенно в высокомоощных системах с широким диапазоном питающего напряжения.

8. Предложен формирователь траектории переключения в однофазном корректоре коэффициента мощности, который позволяет минимизировать значение динамических потерь в силовом транзисторном ключе, осуществляя низкоэнергетическое переключение при любом алгоритме управления, не влияя на него.

9. Проведенные экспериментальные исследования электрических процессов на разработанном макетном образце подтвердили достоверность полученных теоретических положений диссертационной работы, а также точность имитационных компьютерных моделей. При этом расхождение теоретически заявленных данных и результатов компьютерного моделирования расходятся с экспериментально полученными не более чем на 8%, что допустимо при инженерных расчетах таких сложных электрических устройств.

В целом, разработанный алгоритм построения и проектирования однофазных высокоэффективных устройств, предложенные соответствующие ему теоретические положения и имитационно компьютерные модели, исследованные рабочие электрические процессы являются весьма актуальными и востребованными при проектировании источников питания для телекоммуникационных устройств, трехфазных зарядных устройств, а также электротехнических комплексов, содержащих ветро – энергетические установки, что определяют народно - хозяйственное значение диссертационной работы и повышения надежности при использовании заряда литий-ионных АКБ.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:**



1. **Рощупкин Г.В., Шевцов Д.А., Новиков М.А.** Анализ энергоэффективности корректоров коэффициента мощности в автономных системах питания с широким диапазоном входного напряжения. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2019, №2(74) - с. 26-33.
2. **Рощупкин Г.В., Шевцов Д.А., Новиков М.А.** Спецификация и классификация силовых каскадов однофазных корректоров коэффициента мощности. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2019, №3(75) - с. 8-19.
3. **Рощупкин Г.В., Шевцов Д.А., Калимуллин А.М.** Алгоритмы управления однофазными корректорами коэффициента мощности. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2019, №4(76) - с. 40-48.
4. **Рощупкин Г.В., Шевцов Д.А., Калимуллин А.М.** Методика расчета дроссель-трансформатора для статических преобразователей. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2020, №1(77) - с. 22-28.
5. **Рощупкин Г.В.** Формирователи траектории переключения для однофазного корректора коэффициента мощности. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2020, №4(80) - с. 20-28.
6. **Рощупкин Г.В.** Методы симметрирования выходного напряжения однофазных двухполупериодных корректоров коэффициента мощности при несимметричной нагрузке. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2020, №4(80) - с. 32-37.
7. **Рощупкин Г.В., Шевцов Д.А., Благинин Д.В.** Повышение энергоэффективности однофазного корректора коэффициента мощности. Статья. // Практическая силовая электроника. – М.: 2021, №2(82) с. 8-11.

#### **Работы в журналах, входящих в базы Scopus**

1. **Georgiy Roschupkin, Mikhail Novikov, Daniil Shevtsov.** Analysis of PFC converters efficiency in low voltage power systems. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019? Print on Demand(PoD) ISBN: 978-1-7281-1744-7.

#### **Доклады на конференциях**

1. **Рощупкин Г.В., Новиков М.А.** Однокаскадный ac-dc преобразователь с коррекцией коэффициента мощности // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XIX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 165.
2. **Рощупкин Г.В., Новиков М.А., Шевцов Д.А.** Аналитическое исследование границ применимости различных способов управления ключами в корректоре коэффициента мощности. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXV междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 127.
3. **Рощупкин Г.В., Новиков М.А., Шевцов Д.А.** Аналитическое исследование энергетических характеристик силовых каскадов dc-dc преобразователей при высоком входном напряжении // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXVI междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательский дом МЭИ, 2020. С.109.