

На правах рукописи



Алексеев Алексей Олегович

**ТРЕХФАЗНЫЙ КОРРЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ
С ДВУПОЛЯРНЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ДЛЯ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 2.4.2.

«Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2025 г.

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»
- Рощупкин Георгий Вячеславович**, кандидат технических наук, руководитель направления ИБП ООО «Парус электро»
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Защита состоится «25» декабря 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.11, 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/?ELEMENT_ID=185601.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

И.О. Учёного секретаря
диссертационного совета 24.2.327.11,
д.т.н., с.н.с.



К.Л. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время существует тенденция значительного повышения электрической мощности, потребляемой на борту летательных аппаратов гражданского и военного назначения. Такая тенденция обосновывается увеличением мощности и количества бортового электрооборудования за счет постепенного перехода от традиционно используемых гидравлических и пневматических приводов, применяемых для механизации крыла, системы уборки-выпуска шасси, системы кондиционирования воздуха и других систем на электроприводы. Повышение мощности потребления ведет к увеличению массы распределительной сети и к увеличению мощности основных бортовых генераторов, для которых уже достигнутый уровень номинальной и удельной мощности является практически предельным.

Одним из целесообразных и перспективных направлений является построение авиационных систем электроснабжения (СЭС) постоянного повышенного двуполярного напряжения ± 270 В (540 В) на основе нерегулируемых синхронных генераторов и управляемых полупроводниковых преобразователей электроэнергии. Достоинством таких систем является высокая удельная мощность и эффективность за счет централизации систем преобразования электроэнергии в составе СЭС, а также использования повышенного напряжения.

К авиационным СЭС предъявляются высокие требования по качеству потребляемой электроэнергии, для удовлетворения которых должны использоваться трехфазные корректоры коэффициента мощности (ККМ), выполняющие следующие функции:

1. Преобразование трехфазного напряжения переменного тока переменной частоты и амплитуды в напряжение постоянного тока.
2. Обеспечение двуполярного выходного напряжения.
3. Повышение уровня выходного напряжения.
4. Стабилизация выходного напряжения.
5. Обеспечение коэффициента мощности, близкого к единице.
6. Обеспечение требуемого качества потребляемой электроэнергии.

Данной области электротехнических комплексов посвящен ряд научно-исследовательских работ отечественных авторов, таких как: Г.С. Зиновьев, В.И. Мелешин, Е.Е. Чаплыгин, П.А. Бачурин, И.А. Харченко, А.В. Левин, С.А. Харитонов, А.Г. Гарганеев и др., а также разработки и исследования известных зарубежных предприятий: ON Semiconductor Corporation, STMicroelectronics NV, Crane aerospace&electronics, Würth Elektronik и др.

В большинстве опубликованных исследований представлены структурные схемы силовых каскадов преобразователей электроэнергии и обеспечиваемые ими характеристики. Однако как правило в данных публикациях не приведены данные о алгоритмах и способах построения функциональных узлов, обеспечивающих работоспособность и эффективность трехфазных ККМ. В этой связи разработка и исследование трехфазных ККМ на уровне детальной проработки способов построения их функциональных узлов и принципиальных электрических схем является актуальной научно-технической задачей в рамках создания такого электротехнического комплекса, как перспективная авиационная СЭС.

Объектом исследования являются трехфазные ККМ для перспективных авиационных СЭС, обеспечивающие высокое качество потребляемой электроэнергии на борту.

Предметом исследования являются структуры силовых преобразовательных каскадов трехфазных ККМ, способы управления ими и принципы построения функциональных узлов, обеспечивающих работу трехфазных ККМ.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование трехфазного ККМ с двуполярным выходным стабилизированным напряжением, предназначенного для работы в составе перспективных авиационных СЭС, предъявляющих высокие требования к качеству потребляемой электроэнергии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**.

1. Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков существующих решений в области трехфазных ККМ.
2. Разработаны новые структурные и принципиальные схемы трехфазных ККМ с различными способами управления силовыми преобразовательными каскадами (СПК).
3. Проведены исследования характеристик и параметров различных структур СПК трехфазных ККМ.
4. Разработаны оригинальные способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения при работе на несимметричную нагрузку.
5. Разработаны принципы построения функциональных узлов, обеспечивающих работу трехфазных ККМ, а также их структурные и принципиальные схемы.
6. Синтезированы принципиальные электрические схемы и компьютерные модели трехфазных ККМ для проверки их работоспособности с помощью имитационного компьютерного моделирования (ИКМ).

7. Разработан и изготовлен экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением.

8. Проведены экспериментальные исследования параметров и характеристик трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением с целью верификации основных теоретических положений и результатов ИКМ.

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

1. Предложены и исследованы новые способы совместно-фазового и раздельно-фазового релейного управления трехфазными ККМ.

2. Исследовано влияние различных структур СПК трехфазных ККМ на показатели качества потребляемой электроэнергии.

3. Предложены и исследованы новые способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения при работе трехфазных ККМ на несимметричную нагрузку.

4. Предложены и исследованы новые схемы активных формирователей безопасной низкоэнергетической траектории переключения силовых транзисторных ключей (СТК).

5. Предложены и исследованы оригинальные способы формирования опорного трехфазного синусоидального напряжения для трехфазных ККМ с раздельно-фазовым управлением.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны принципиальные электрические схемы и имитационные компьютерные модели трехфазных ККМ с различными структурами СПК и способами управления.

2. Получены зависимости показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности для различных структур СПК с совместно-фазовым и раздельно-фазовым управлением.

3. Разработаны новые схемотехнические решения, позволяющие обеспечивать симметричное двуполярное выходное напряжение трехфазных ККМ при работе на несимметричную нагрузку.

4. Разработаны новые схемотехнические решения, позволяющие обеспечить безопасную низкоэнергетическую траекторию переключения СТК.

5. Разработаны оригинальные схемотехнические решения для синхронизации опорного трехфазного синусоидального напряжения с сетью, применимые для четырехпроводных и трехпроводных трехфазных сетей.

6. Разработан экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением ± 270 В и исследованы его параметры и

характеристики, подтвердившие корректность результатов, полученных при помощи ИКМ.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы математического анализа, методы теории автоматического управления, методы теоретической электротехники для линейных и нелинейных электрических цепей, методы имитационного компьютерного моделирования, методы экспериментального исследования макетного образца трехфазного ККМ. При проектировании экспериментального образца трехфазного ККМ были применены пакеты систем автоматизированного проектирования Altium Designer и SolidWorks. Для обработки и анализа полученных экспериментальных данных использовались пакеты прикладных программ Matlab и Mathcad. Моделирование трехфазного ККМ выполнялось в среде Orcad Pspice.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ структур СПК трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением.
2. Результаты исследований влияния структур СПК и способов управления ими на показатели качества потребляемой электроэнергии.
3. Авторские структурные схемы трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением с совместно-фазовым и раздельно-фазовым управлением.
4. Новые способы обеспечения симметричного выходного напряжения трехфазных ККМ при работе на несимметричную нагрузку.
5. Новые схемотехнические решения активных формирователей низкоэнергетической безопасной траектории переключения СТК.
6. Компьютерные модели трехфазных ККМ и результаты их имитационного компьютерного моделирования.
7. Результаты исследований параметров и характеристик экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением ± 270 В.

Достоверность и обоснованность научных результатов. Основные положения и научные результаты диссертационной работы подтверждаются и обосновываются путем верификации полученных аналитических результатов и исследований с помощью ИКМ с результатами экспериментальных исследований трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением.

Реализация результатов работы. Теоретические положения диссертационной работы были внедрены в учебный процесс в соответствии с учебно-методическими планами кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ, что подтверждено

Актом о внедрении в учебный процесс Московского авиационного института №310-18/26 от 02.06.2025 г.

Результаты диссертационной работы были внедрены в разработки ООО «РЭСТАР», что подтверждено Актом №09 от 17.06.2025 г. и в разработки ООО «Трансконвертер», что подтверждено Актом №2/07-2025 от 19.06.2025 г.

Апробация работы. Положения и результаты диссертационной работы докладывались на XLVIII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения 2022» (МАИ, г. Москва, 2022 г.), на XLIX Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения 2023» (МАИ, г. Москва, 2023 г.), на Международной конференции 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) (Республика Алтай, 2023 г.), на L Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения 2024» (МАИ, г. Москва, 2024 г.), на Международной конференции 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) (Республика Алтай, 2024 г.) и на LI Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения 2025» (МАИ, г. Москва, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 научных работ, включая 5 статей в журналах и изданиях, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией РФ и 4 – в изданиях, индексируемых в базах Scopus. В соавторстве получен 1 патент на изобретение и 2 положительных решения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Основная часть работы содержит 129 машинописных страницы, в том числе 65 рисунков и 6 таблиц. Список используемых источников включает 137 наименований. Общий объем работы – 132 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту, даны сведения о структуре работы и ее апробации.

В первой главе выполнен сопоставительный анализ различных структур СПК трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением с совместно-фазовым и раздельно-фазовым управлением. Разработанная структурная схема трехфазного ККМ, предназначенного для работы в составе канала генерирования электроэнергии перспективной авиационной СЭС показана на рисунке 1.

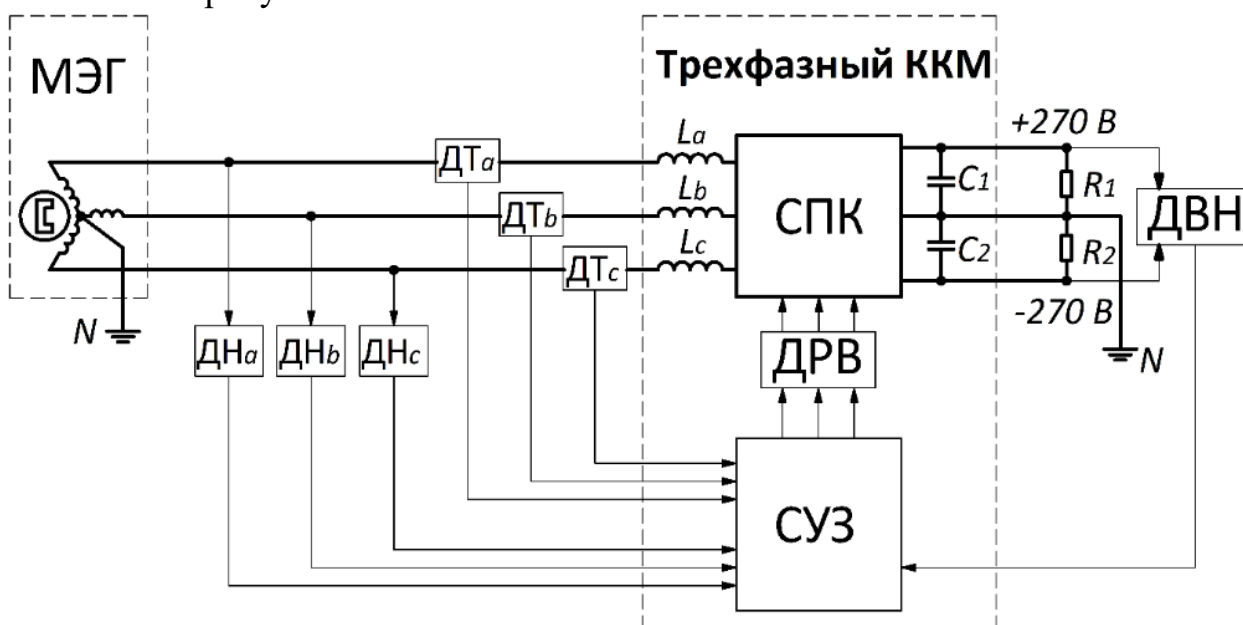


Рисунок 1 – Структурная схема трехфазного ККМ в составе канала генерирования электроэнергии перспективной авиационной СЭС

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: МЭГ – трехфазный магнитоэлектрический генератор; ККМ – трехфазный корректор коэффициента мощности; СПК – силовой преобразовательный каскад; ДРВ – драйвер; СУЗ – система управления и защиты; $ДТ_a$, $ДТ_b$, $ДТ_c$ – датчики фазных токов; $ДН_a$, $ДН_b$, $ДН_c$ – датчики фазных напряжений; ДВН – датчик выходного напряжения; L_a , L_b , L_c – входные дроссели; C_1 , C_2 – выходные конденсаторы; R_1 , R_2 – нагрузка; N – нейтраль.

Анализ параметров и характеристик проводился для четырехпроводных структур СПК с двуполярным выходным напряжением. Были рассмотрены различные структуры СПК с дросселями переменного и постоянного тока, с

СТК переменного и постоянного тока. Предложена классификация СПК трехфазных ККМ, приведенная на рисунке 2.

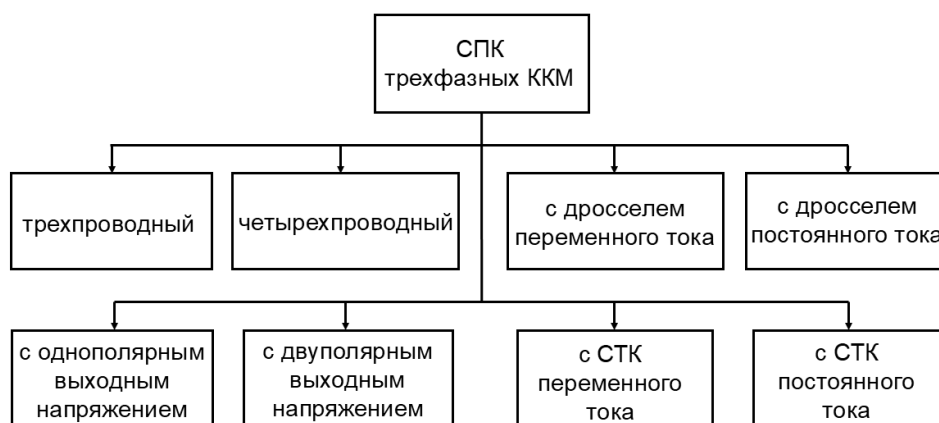


Рисунок 2 – Классификация силовых преобразовательных каскадов трехфазных ККМ

Для рассмотренных структур СПК были вычислены обеспечиваемый коэффициент мощности и коэффициент гармоник потребляемых фазных токов в соответствии с выражениями (1) и (2).

$$K_M = \frac{P_{\text{ср}}}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u_{\phi}(t) i_{\phi}(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_{\phi}^2(t) dt \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i_{\phi}^2(t) dt}}, \quad (1)$$

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где K_M – коэффициент мощности; $P_{\text{ср}}$ – средняя активная мощность, Вт; S – полная мощность, ВА; i_{ϕ} – мгновенное значение фазного тока, А; u_{ϕ} – мгновенное значение фазного напряжения, В; T – период, с; K_{Γ} – коэффициент гармоник, %; I_n – действующее значение тока n -ой гармоники, А.

Для всех структур СПК выполнена количественная оценка величины тока нейтрали, существенно влияющего на параметры электромагнитной совместимости бортового электрооборудования. Для этого введен коэффициент тока нейтрали, вычисляемый в соответствии с выражением (3).

$$K_N = \frac{I_N}{I_{\phi}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_N^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\phi}^2(t) dt}}, \quad (3)$$

где I_N – действующее значение тока нейтрали, А; I_{ϕ} – действующее значение фазного тока, А; i_N – мгновенное значение тока нейтрали, А; i_{ϕ} – мгновенное значение фазного тока, А.

С помощью ИКМ были получены зависимости показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности. Вычислены относительные потери в силовых диодах и СТК, входящих в состав СПК. Показано, что основным достоинством структур СПК с раздельно-фазовым управлением являются наилучшие показатели качества потребляемой электроэнергии, в частности, коэффициент мощности, равный 0,99 и коэффициент гармоник потребляемых токов менее 3%. При этом их недостатком является большое количество силовых полупроводниковых компонентов и относительно высокие суммарные потери в них. Кроме этого, большое количество компонентов усложняет разработку конструкции СПК трехфазных ККМ, а большое количество СТК и соответствующее количество драйверов в конечном счете приводят к высокой стоимости таких устройств. Структуры СПК с совместно-фазовым управлением, напротив, обеспечивают менее высокие показатели качества потребляемой электроэнергии, что следует отнести к их недостаткам. Однако, основным достоинством таких структур СПК являются простые топологии силовых схем, содержащие малое количество силовых полупроводниковых компонентов, обладающих относительно малыми суммарными потерями.

Во второй главе разработаны структурные и схемотехнические решения способов совместно-фазового и раздельно-фазового управления в соответствии с предложенной классификацией способов управления трехфазными ККМ, показанной на рисунке 3.

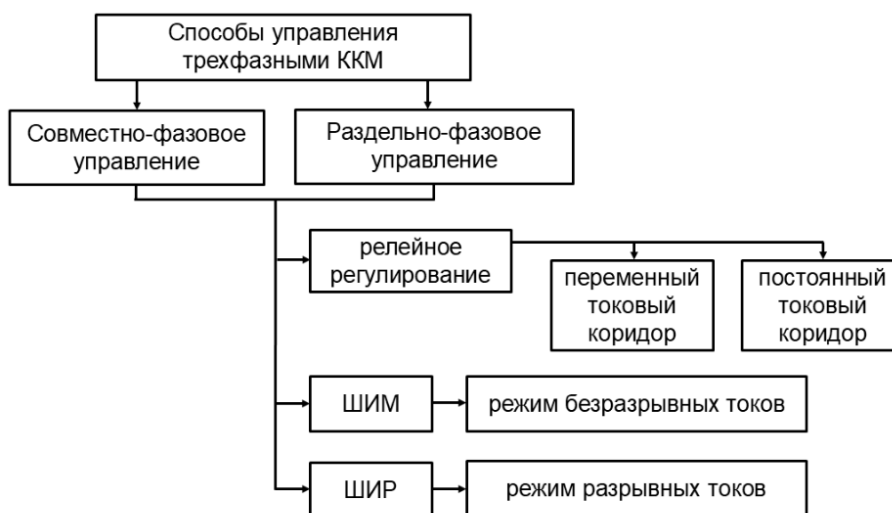


Рисунок 3 – Классификация способов управления трехфазными ККМ

Способ совместно-фазового управления трехфазными ККМ подразумевает совместное синхронное регулирование токов всех трех фаз и реализуется двухконтурной замкнутой системой автоматического управления с подчиненным регулированием по выпрямленным токам всех трех фаз

(внутренний контур регулирования) и по отклонению выходного постоянного напряжения от заданного значения (внешний контур регулирования). Разработанная имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с совместно-фазовым релейным управлением с постоянным гистерезисом показана на рисунке 4.

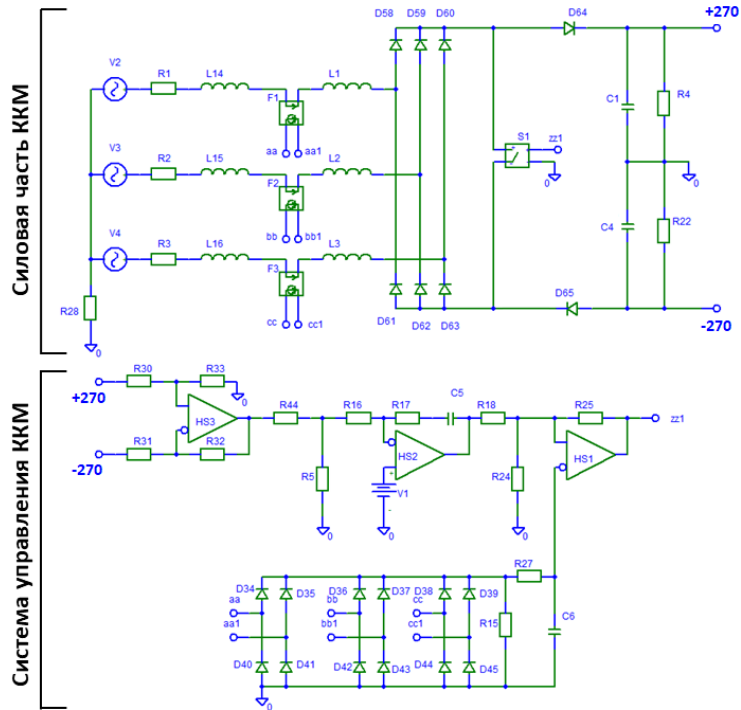


Рисунок 4 – Компьютерная модель трехфазного ККМ с совместно-фазовым управлением

Силовая часть трехфазного ККМ построена на основе структуры СПК с одиночным СТК на основе одного транзистора с дросселями переменного тока. На рисунке 5 показана форма потребляемого фазного тока по фазе А, полученная в результате проведенного ИКМ. При выходной мощности 25 кВт трехфазный ККМ с примененным СПК с совместно-фазовым управлением обеспечивает коэффициент мощности, равный 0,92 и коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, равный 6,7%.

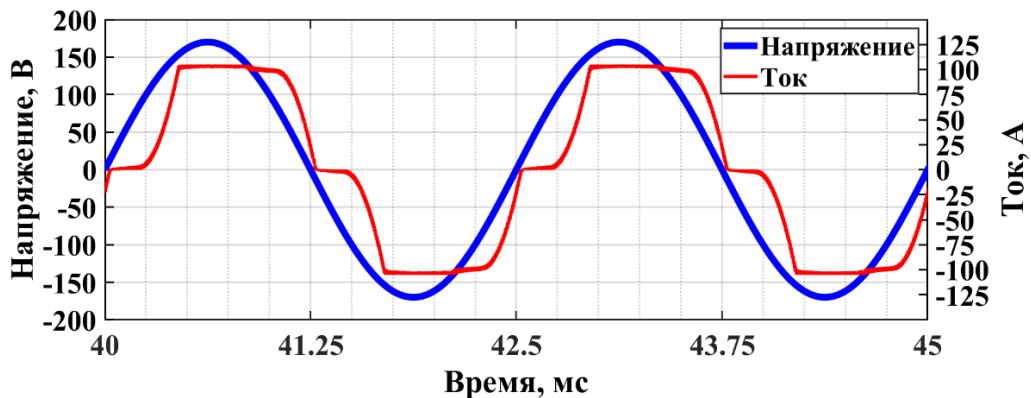


Рисунок 5 – Временная диаграмма потребляемого фазного тока в трехфазном ККМ с совместно-фазовым управлением

Способ раздельно-фазового управления трехфазными ККМ подразумевает раздельное независимое регулирование трех фазных токов. В этом случае обратная связь осуществляется по каждой фазе отдельно с помощью трех внутренних контуров регулирования по току и общего внешнего контура обратной связи по напряжению. Разработанная имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с раздельно-фазовым релейным регулированием с постоянным гистерезисом показана на рисунке 6.

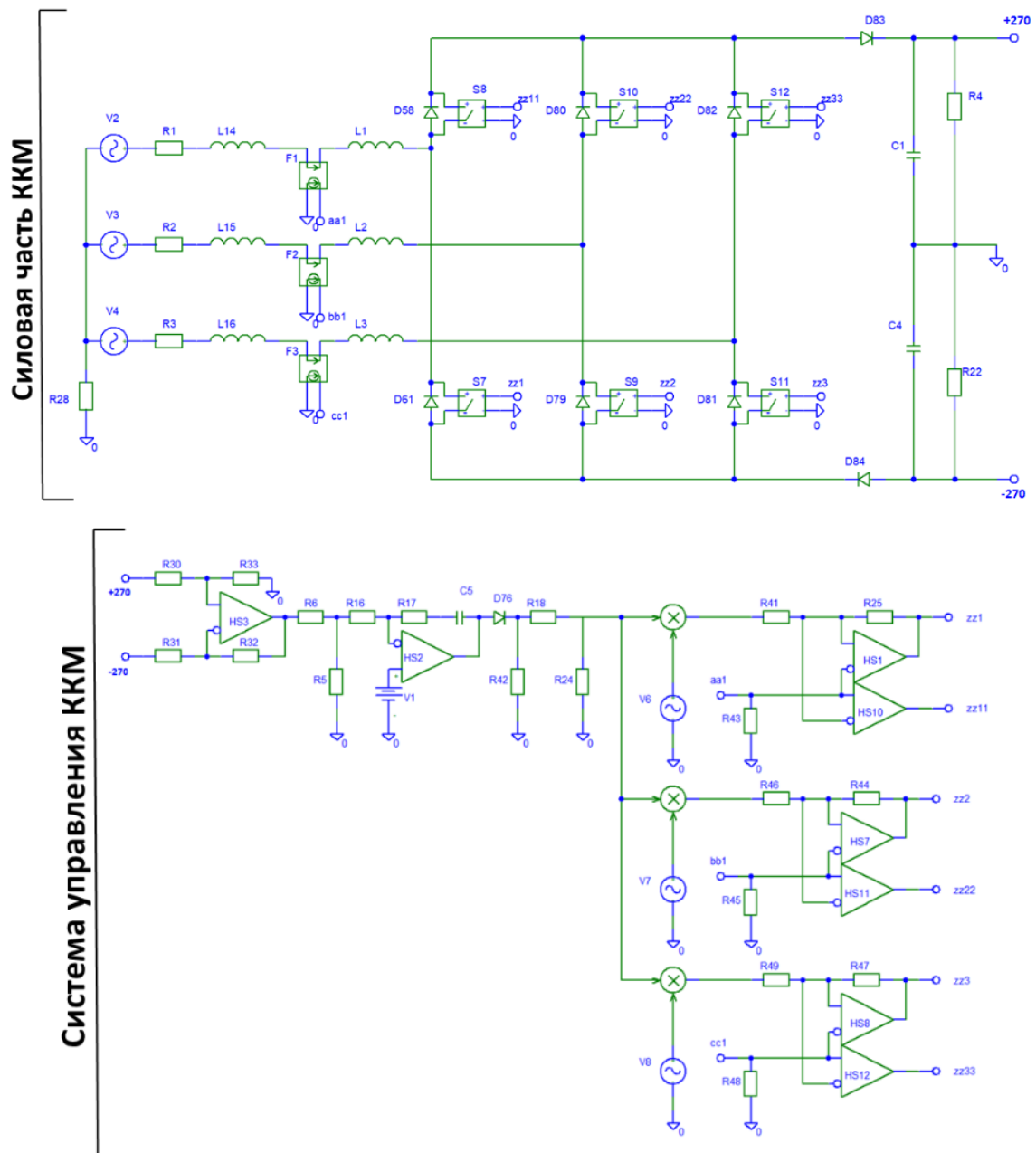


Рисунок 6 – Компьютерная модель трехфазного ККМ с раздельно-фазовым управлением

Силовая часть трехфазного ККМ, входящая в состав имитационной компьютерной модели, показанной на рисунке 6, построена на основе структуры СПК с трехфазным транзисторным мостом. На рисунке 7 показана

форма потребляемого фазного тока по фазе А, полученная в результате проведенного моделирования. При выходной мощности 25 кВт трехфазный ККМ с примененным СПК с раздельно-фазовым управлением обеспечивает коэффициент мощности по трем фазам, равный 0,99 и коэффициент гармоник потребляемых фазных токов менее 3 %.

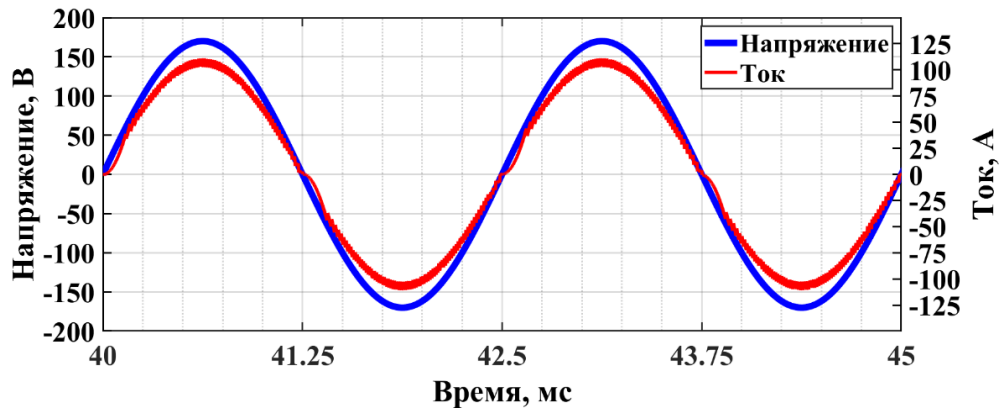


Рисунок 7 – Временная диаграмма потребляемого фазного тока в трехфазном ККМ с раздельно-фазовым управлением

В третьей главе предложены способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения ± 270 В в случае работы трехфазных ККМ на несимметричную нагрузку. Первый предложенный способ применим для трехфазных ККМ как с совместно-фазовым, так и с раздельно-фазовым управлением. Он заключается в использовании в структуре трехфазного ККМ устройства симметрирования (УС) на выходе СПК. УС включает симметрирующий силовой каскад (ССК), устройство управления симметрирующим силовым каскадом (УУ ССК), датчик несимметрии выходного напряжения (ДНВН), дроссель постоянного тока и датчик тока. Структурная схема трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения за счет использования устройства симметрирования показана на рисунке 8.

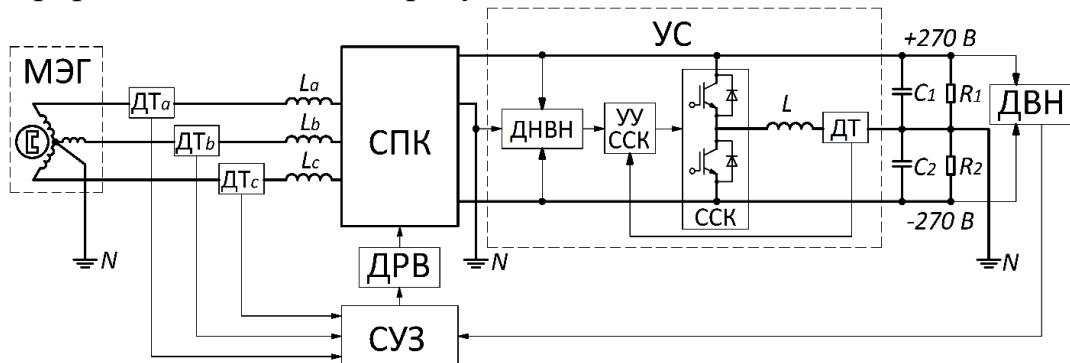


Рисунок 8 – Структурная схема трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения

При отклонении выходного напряжения от номинального уровня ± 270 В на выходе ДНВН появляется сигнал несимметрии, который обрабатывается

УУ ССК. УУ ССК выдает управляющий сигнал, поступающий на ССК. При коммутации транзисторов ССК происходит нарастание тока нагрузки по положительному или отрицательному каналу в зависимости от несимметрии напряжения, в результате чего напряжение на нагрузке принимает номинальное значение. Следует отметить, что контур регулирования УУ ССК работает автономно, не вмешиваясь в основной контур управления СПК трехфазного ККМ, не оказывая влияние на его функционирование. Это является достоинством предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения.

Неизбежным побочным явлением в процессе симметрирования двуполярного выходного напряжения является увеличение тока нейтрали, в том числе, возникновение постоянной составляющей в нем. Для количественной оценки этого увеличения в процессе симметрирования были исследованы зависимости коэффициента тока нейтрали и постоянной составляющей тока нейтрали. Вычисление постоянной составляющей тока нейтрали проводилось в соответствии с выражением (4).

$$K_{\text{пост.}N} = \frac{I_{\text{ср.}N}}{I_{\Phi}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_N(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Phi}^2(t) dt}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{пост.}N}$ – относительное значение постоянной составляющей тока нейтрали; $I_{\text{ср.}N}$ – среднее значение тока нейтрали (постоянная составляющая), А; I_{Φ} – действующее значение фазного тока, А; i_N – мгновенное значение тока нейтрали, А; i_{Φ} – мгновенное значение фазного тока, А.

Полученные зависимости действующего и среднего значений тока нейтрали от уровня несимметрии нагрузки показаны на рисунке 9.

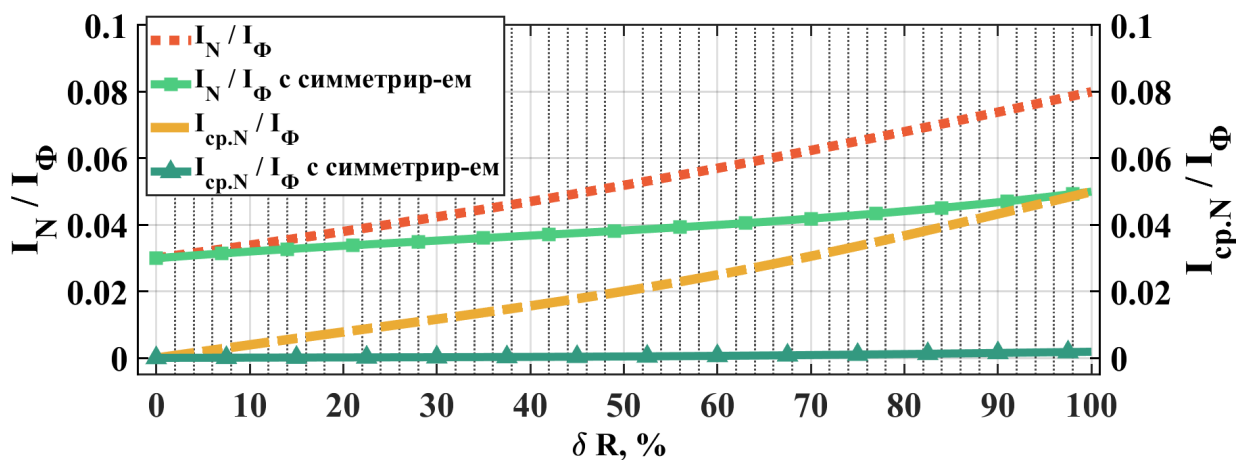


Рисунок 9 – Зависимости действующего и среднего значений тока нейтрали от несимметрии нагрузки

Из приведенных зависимостей видно, что предложенный способ симметрирования двуполярного выходного напряжения, во-первых, приводит

к снижению действующего значения тока нейтрали, во-вторых, минимизирует возникающую при несимметрии нагрузки постоянную составляющую тока нейтрали во всем рассмотренном диапазоне несимметрии нагрузки. Приведенные результаты исследований показывают, что применение симметрирования позволяет улучшить качество потребляемой электроэнергии.

Второй способ обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения применим только для трехфазных ККМ с отдельно-фазовым управлением. Один из предложенных вариантов реализации данного способа заключается во введении дополнительной обратной связи по несимметрии выходного напряжения и суммирования ее с сигналами датчиков фазных токов. Структурная реализация данного варианта показана на рисунке 10.

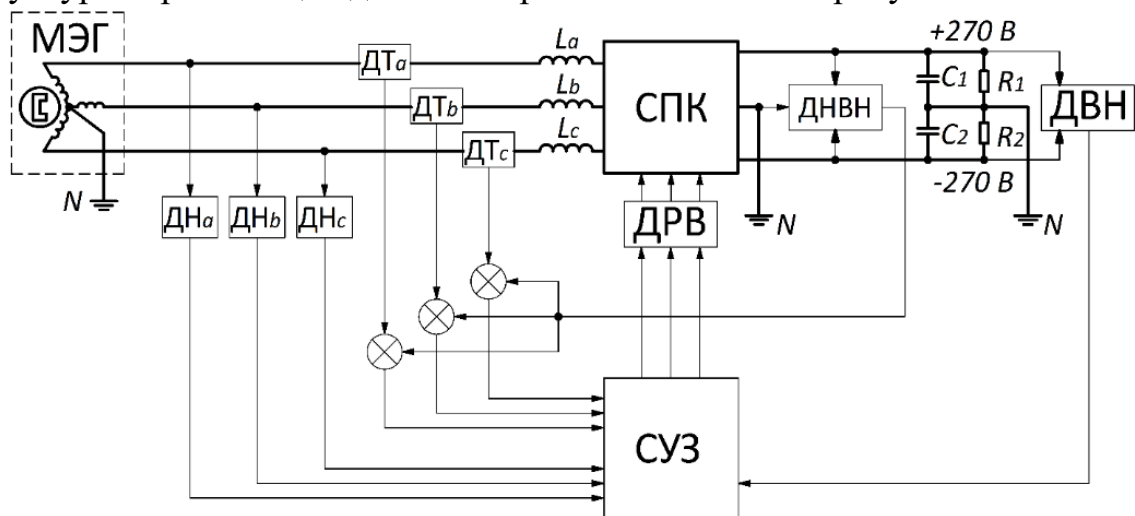


Рисунок 10 – Структурная схема трехфазного ККМ с отдельно-фазовым управлением с функцией симметрирования выходного напряжения

На рисунках 11-12 показаны временные диаграммы процессов при симметрировании двуполярного выходного напряжения вторым способом. Видна возникающая существенная постоянная составляющая тока нейтрали, что является его недостатком и накладывает ограничения на его применение.

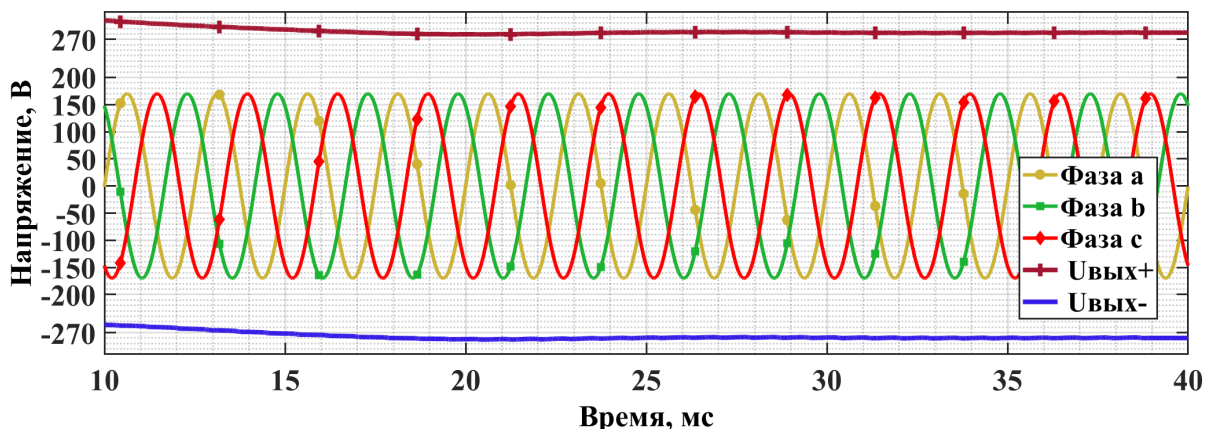


Рисунок 11 – Фазные напряжения и выходные постоянные напряжения при симметрировании

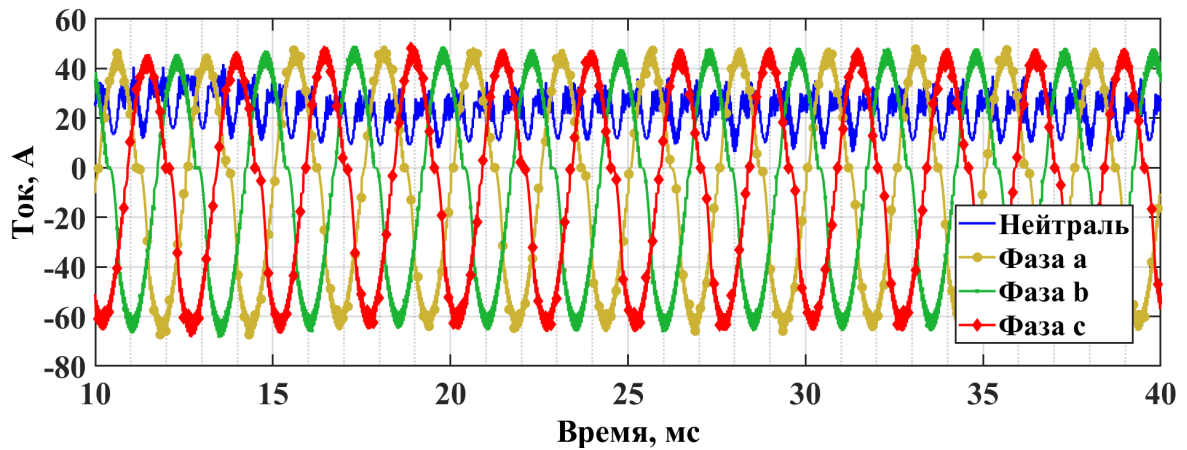


Рисунок 12 – Фазные токи и ток нейтрали при симметрировании

Проведено исследование зависимости уровня несимметрии выходного напряжения, вычисленного при помощи выражения (5), от уровня несимметрии нагрузки.

$$\delta U = \frac{U_{+270} - U_{-270}}{U_{+270} + U_{-270}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где δU – уровень несимметрии напряжений, %; U_{+270} – напряжение по положительному каналу; U_{-270} – напряжение по отрицательному каналу.

График зависимости уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения от уровня несимметрии нагрузки показан на рисунке 13.

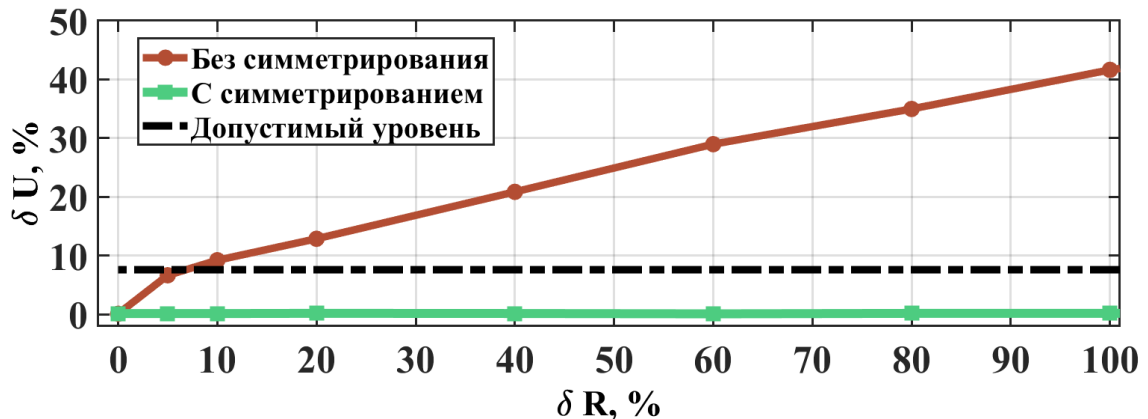


Рисунок 13 – Зависимость несимметрии выходного напряжения от несимметрии нагрузки

Полученная зависимость демонстрирует работоспособность предложенных способов симметрирования во всем рассмотренном диапазоне несимметрии нагрузки.

В четвертой главе рассмотрены предложенные способы построения функциональных узлов и схемотехнические решения, обеспечивающие работоспособность трехфазных ККМ в различных режимах. Одним из предложенных решений являются двухключевая и четырехключевая схемы активных формирователей безопасной низкоэнергетической траектории

переключения СТК, входящих в состав СПК трехфазных ККМ. Имитационные компьютерные модели данных схем приведены на рисунке 14.

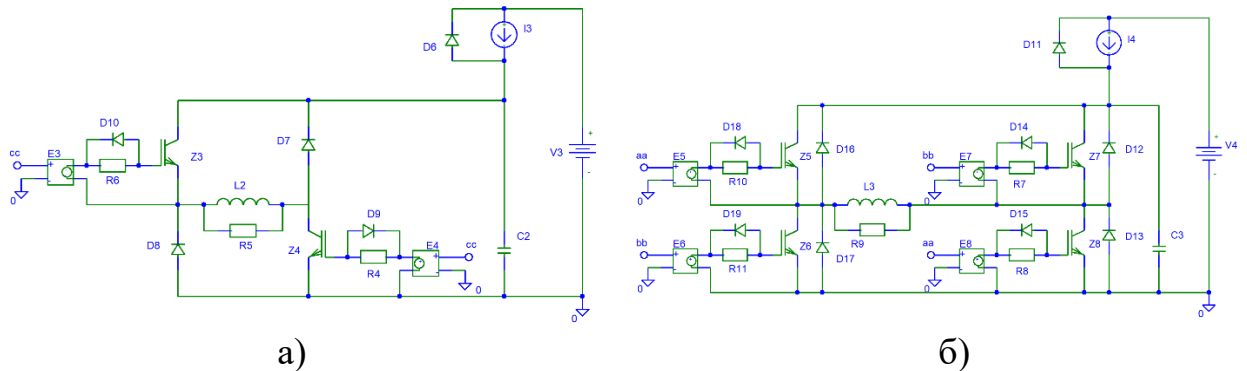


Рисунок 14 – Предложенные схемы активных ФТП (а – двухключевая схема; б – четырехключевая схема)

Показанная на рисунке 14 (а) схема подразумевает построение СТК на основе двух транзисторов. Переключение этих транзисторов производится синхронно и синфазно по общему сигналу управления. Непосредственно активный ФТП строится на основе индуктивности $L2$, которая обеспечивает формирование траектории при включении СТК и емкости $C2$, обеспечивающей формирование траектории при выключении СТК. Резистор $R5$ устанавливается для демпфирования возникающих паразитных высокочастотных колебаний тока, возникающих при выключении СТК, что позволяет улучшить электромагнитную совместимость СПК.

На рисунке 15 показана траектория переключения СТК в предложенной двухключевой схеме активного ФТП, полученная при помощи ИКМ.

По рисунку 15 видно, что процесс переключения СТК не сопровождается выходом в активную область. Такая траектория переключения является

допустимой для СТК и не выходит за пределы его области безопасной работы.

Результаты проведенных исследований показали, что применение предлагаемых схем ФТП позволяет снизить мгновенную мощность потерь в СТК при его включении в 100 раз, а при его выключении в 5 раз при прочих равных условиях.

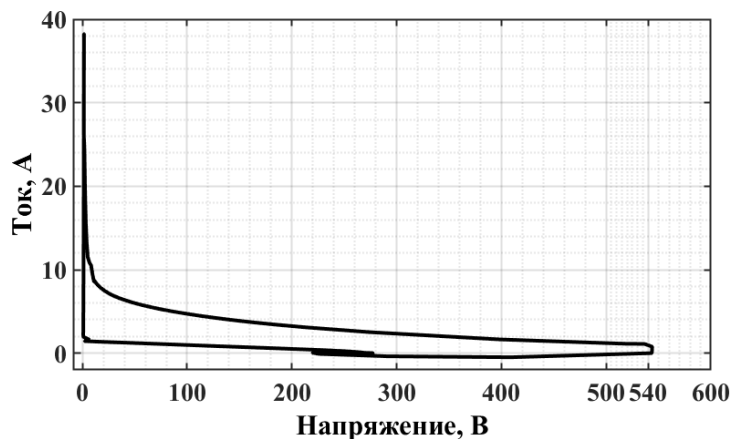


Рисунок 15 – Траектория переключения СТК в двухключевой схеме активного ФТП

В четвертой главе также предложены способы формирования опорного трехфазного напряжения для трехфазных ККМ с раздельно-фазовым управлением. Для корректной работы таких устройств управления опорное трехфазное напряжение должно удовлетворять следующим требованиям:

- 1) иметь синусоидальную форму;
- 2) быть отфильтрованным от помех;
- 3) быть синхронизированным с фазными напряжениями сети.

Схемотехническая реализация формирователя сигнала на основе апериодического звена второго порядка показана на рисунке 16. Передаточная функция такого звена имеет вид (6).

$$W(S) = -\frac{1}{(T_{\phi}S + 1)^2}, \quad (6)$$

где T_{ϕ} – постоянная времени фильтра, которая должна быть много больше периода сети.

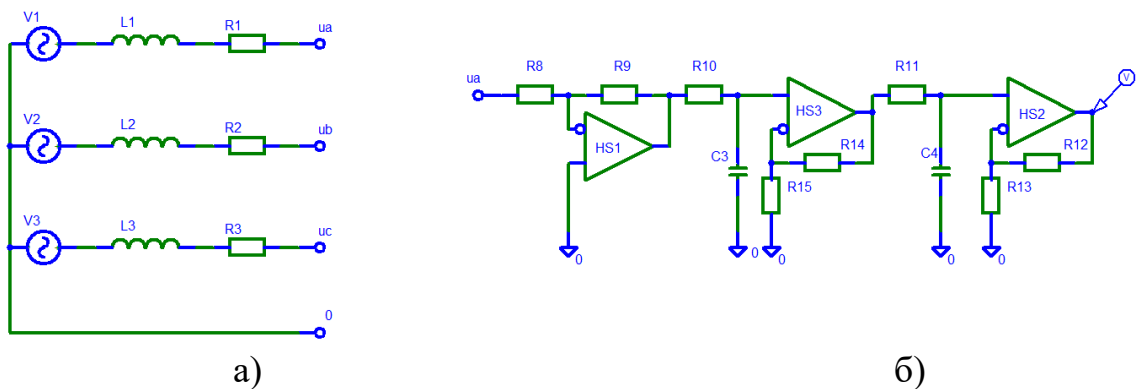


Рисунок 16 – Имитационная компьютерная модель формирователя опорного трехфазного напряжения (а – трехфазный МЭГ; б – формирователь сигнала для одной из трех фаз)

На рисунке 17 показана временная диаграмма напряжений, полученная при помощи ИКМ, демонстрирующая работоспособность предложенной схемы формирования опорных синусоидальных сигналов.

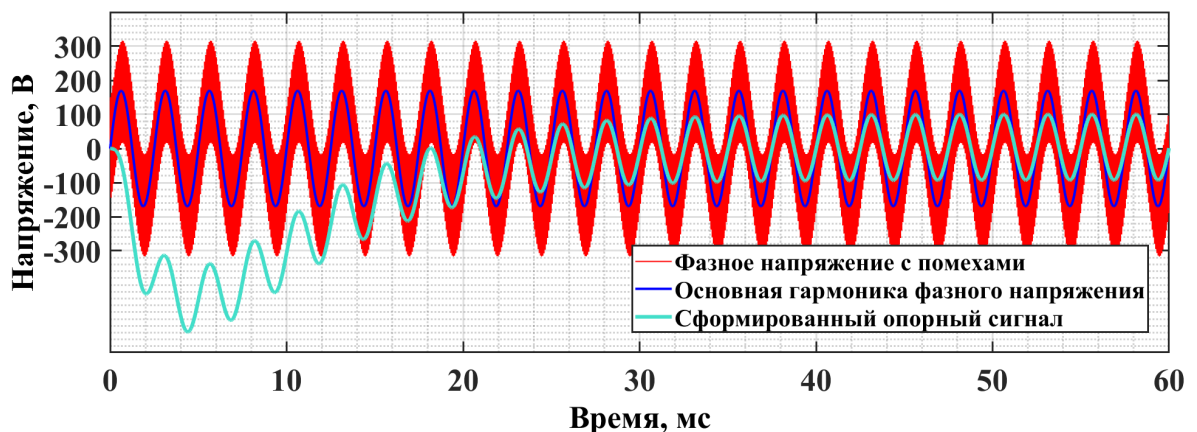


Рисунок 17 – Временная диаграмма напряжений при работе предложенной схемы формирователя опорного трехфазного напряжения

На временной диаграмме показано исходное фазное напряжение, искаженное высокочастотной гармоникой, основная гармоника этого напряжения частотой 400 Гц и полученный при помощи предложенной схемы сформированный сигнал. Видно, что после завершения переходного процесса сформированный синусоидальный сигнал становится синхронизированным и синфазным с исходным фазным напряжением.

В пятой главе приведены результаты исследований параметров и характеристик разработанного экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением ± 270 В. Имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ, в соответствии с которой осуществлялось изготовление экспериментального образца, показана на рисунке 18.

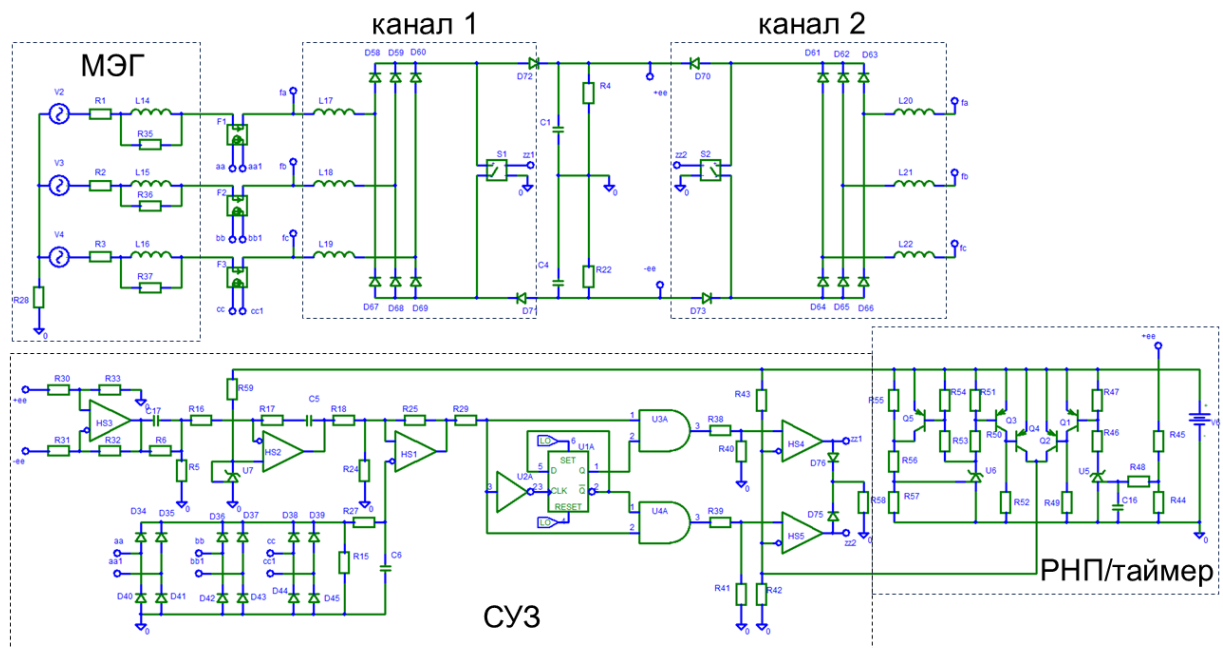


Рисунок 18 – Имитационная компьютерная модель экспериментального образца трехфазного ККМ

Было принято решение о построении трехфазного ККМ по двухпоточной схеме преобразования электроэнергии из двух идентичных силовых каналов с одинаковыми структурами СПК и дросселями переменного тока. В качестве таких структур использованы СПК на основе трехфазного выпрямительного моста с одним СТК и двумя развязывающими диодами. Выбран способ совместно-фазового релейного управления с подчиненным регулированием по току, что обусловлено простотой схемотехнической реализации устройства управления, при этом возможностью провести полноценные исследования параметров и характеристик трехфазного ККМ. Фотография изготовленного экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением ± 270 В показана на рисунке 19.

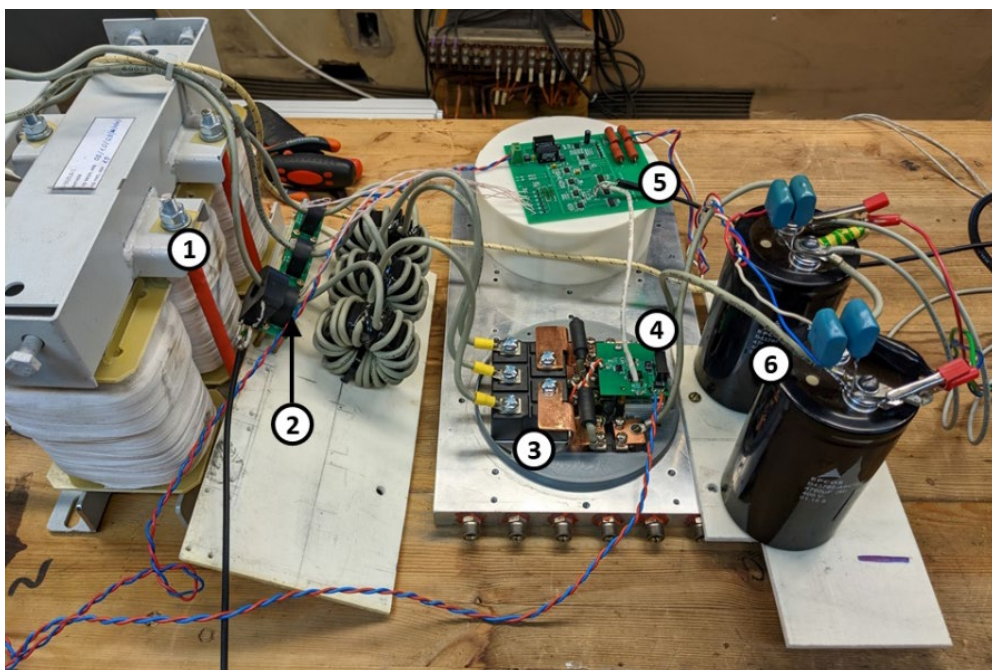


Рисунок 19 – Изготовленный экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением

На рисунке 19 приведены следующие обозначения: 1 – трехфазный дроссель переменного тока; 2 – датчики фазных токов и тока нейтрали; 3 – СПК; 4 – драйвер СТК; 5 – устройство управления; 6 – выходные конденсаторы звена постоянного тока.

При проведении экспериментальных исследований трехфазного ККМ было использовано следующее оборудование: трехфазный лабораторный источник ПНБА33-32/300/1200-ИР («НТЦ АКТОР»), осциллограф-самописец DL-850E (Yokogawa), датчики тока LF205-S и датчики напряжения CV3-1000 (LEM). В качестве нагрузки использовались последовательно-параллельные сборки на основе мощных проволочных тормозных резисторов.

На рисунке 20 представлена временная диаграмма фазного напряжения и фазного тока при работе экспериментального образца трехфазного ККМ на симметричную нагрузку суммарной мощностью 18 кВт.

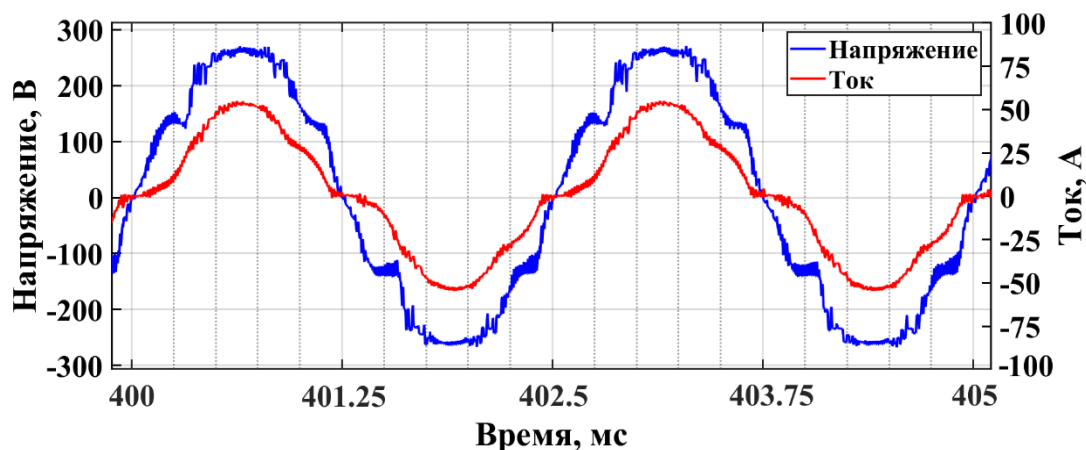


Рисунок 20 – Фазное напряжение и ток при выходной мощности 18 кВт

Был проведен сравнительный анализ показателей качества потребляемой электроэнергии при выходной мощности 18 кВт, полученных по результатам ИКМ и по результатам эксперимента. Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели качества потребляемой электроэнергии по результатам ИКМ и по результатам экспериментальных исследований

Параметр	ИКМ	Эксперимент
Коэффициент мощности	0,957	0,976
Коэффициент гармоник, %	7,26	7,32
Выходное напряжение, В	$\pm 270 \text{ В} \pm 1\%$	$\pm 270 \text{ В} \pm 1\%$
КПД, %	95	97,2
Размах пульсаций выходного напряжения, %	0,8	1
Несимметрия выходного напряжения, %	1	2

По результатам обработки полученных экспериментальных данных при работе трехфазного ККМ при выходной мощности от 3,5 до 18 кВт были получены зависимости коэффициента мощности и коэффициента гармоник потребляемых фазных токов от выходной мощности, представленные на рисунке 21.

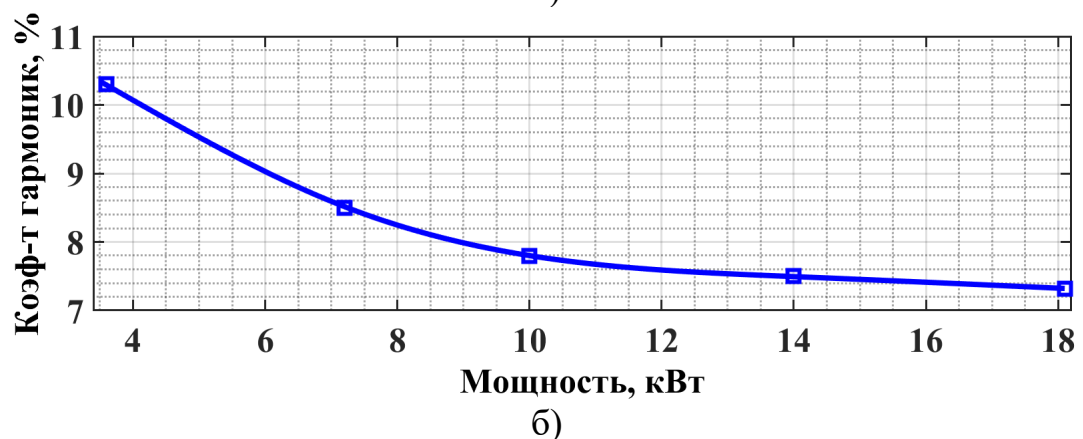
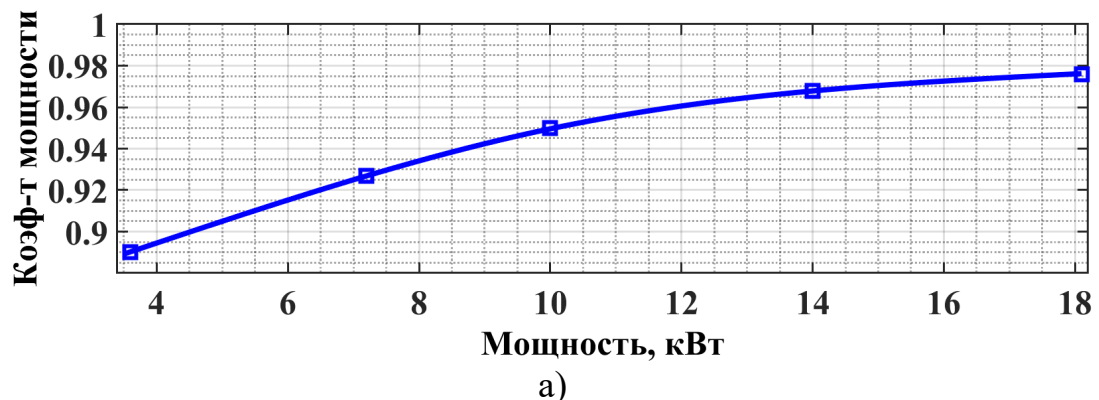


Рисунок 21 – Характеристики экспериментального образца трехфазного ККМ (а – коэффициент мощности; б – коэффициент гармоник)

Сопоставление параметров, полученных при помощи ИКМ и при проведении экспериментальных исследований макетного образца трехфазного ККМ, а также временные диаграммы электрических процессов, построенные из полученных экспериментальных данных, позволили сделать вывод о работоспособности и эффективности предложенных схемотехнических решений, а также о корректности соответствующих разработанных имитационных компьютерных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен обзор существующих решений в области трехфазных ККМ.
2. Проведен сопоставительный анализ достоинств и недостатков различных структур СПК трехфазных ККМ с совместно-фазовым и отдельно-фазовым управлением с подчиненным регулированием по току.
3. Предложены авторские способы управления трехфазными ККМ с совместно-фазовым и отдельно-фазовым управлением и релейным регулированием с постоянным гистерезисом.
4. Предложены новые способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения трехфазных ККМ при работе на несимметричную нагрузку.
5. Разработаны новые схемы активных формирователей траектории переключения для СТК, обеспечивающие их безопасную работу в составе трехфазных ККМ.
6. Предложены и исследованы способы синхронизации опорного трехфазного напряжения с сетью.
7. Разработаны структурные и схемотехнические решения трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением.
8. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением.
9. Выполнено исследование параметров и характеристик трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением при помощи ИКМ.
10. Разработан и изготовлен экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением.
11. Проведены экспериментальные исследования параметров и характеристик макетного образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением ± 270 В.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Алексеев А.О. Трехфазное выпрямительное устройство с функцией коррекции коэффициента мощности и стабилизацией выходного двуполярного напряжения // Практическая силовая электроника. – 2023. – №2 (90). – С. 7-12.
2. Алексеев А.О., Шишов Д.М., Трошин П.А., Шевцов Д.А. Трехфазный корректор коэффициента мощности с криогенным охлаждением для перспективных авиационных систем электроснабжения // Электричество. – 2024. – № 1. – С. 10–17.
3. Алексеев А.О., Шевцов Д.А. Активный формирователь низкоэнергетической траектории переключения высоковольтных силовых транзисторных ключей // Практическая силовая электроника. – 2024. – №1(93). – С. 12-16.
4. Алексеев А.О., Шевцов Д.А. Методы обеспечения равномерного токораспределения в силовых ячейках многопоточных преобразователей электроэнергии // Практическая силовая электроника. – 2025. – №1 (97). – С. 36-40.
5. Алексеев А.О. Сравнительный анализ силовых каскадов трехфазных корректоров коэффициента мощности с совместным управлением фазными токами // Практическая силовая электроника. – 2025. – №2 (98). – С. 10-15.

В журналах, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

1. Alekseev A. O., Shishov D. M., Shevtsov D. A., Ivanov N. S., Zanegin S. Y. Cryogenically-Cooled Stabilized Power Factor Correction Rectifier for Future Aircraft Electrical Systems // 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2023. – P. 770-773. – DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225074.
2. Alekseev A.O., Malyshev B.A., Shevtsov D.A., Lukoshin I.V. The Equal Current Distribution Ensuring Methods in Power Cells of Multi-Phase Power Converters // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2024. – P. 1100–1110. – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615120.
3. Shevtsov D.A., Shishov I.M., Lukoshin I.V., Alekseev A.O., Podguzova M.A. Eliminating the Negative Impact of the dU/dt Effect on Switching Processes in Drivers with Capacitive Galvanic Isolation // 2024 IEEE 25th

International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2024. – P. 1240–1243. – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615218.

4. Lukoshin I.V., Shishov I.M., Shevtsov D.A., **Alekseev A.O.** New Phase-Shift Controller Structure for Four-Transistor Half-Bridge Converter // 2024 IEEE 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2024.–P.1210–1213. – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615200.

В пунктах 1-5 перечня публикаций личный вклад автора заключается в разработке имитационных компьютерных моделей трехфазных ККМ и его функциональных узлов и выполнении исследований при помощи имитационного компьютерного моделирования. В пунктах 6-9 личный вклад автора заключается в разработке экспериментальных образцов и проведении теоретических и экспериментальных исследований.

Доклады и материалы научных конференций:

1. **Алексеев А.О.**, Остапчук М.А., Шишов И.М. Использование корректора коэффициента мощности в структуре перспективной системы электроснабжения летательных аппаратов // Гагаринские чтения – 2022: Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции. – Москва: Издательство «Перо», 2022. – С. 292.

2. **Алексеев А.О.** Стабилизированное выпрямительное устройство с криогенным охлаждением для перспективных авиационных систем электроснабжения // Гагаринские чтения – 2023: Сборник тезисов докладов XLIX Международной молодежной научной конференции. – Москва: Издательство «Перо», 2023. – С. 347.

3. **Алексеев А.О.** Использование принципа многопоточного преобразования электроэнергии в перспективных авиационных системах электроснабжения // Гагаринские чтения – 2024: Сборник тезисов докладов L Международной молодежной научной конференции. – Москва: Издательство «Перо», 2024. – С. 315.

Патенты:

1. Схема управления силовым ключом на основе БТИЗ или МДП-транзисторов // Шевцов Д.А., Шишов Д.М., Лукошин И.В., Кован Ю.И., Егошкина Л.А., Подгузова М.А., **Алексеев А.О.** RU 2825437 С1, 26.08.2024. Заявка № 2024107031 от 18.03.2024.

2. Преобразователь стабилизированного постоянного напряжения с двухполярным выходным напряжением // Шевцов Д.А., Волонин М.С., **Алексеев А.О.**, Кован Ю.И. Заявка № 2025109950 от 18.04.2025.

3. Силовой транзисторный ключ с активным формирователем траектории переключения // Шевцов Д.А., **Алексеев А.О.**, Трошин П.А., Кован Ю.И. Заявка № 2025119045 от 10.07.2025.