ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

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»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Шевцов Д.А.

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ 4

ВВЕДЕНИЕ 6

ГЛАВА 1 СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ 15

1.1 Силовые преобразовательные каскады трехфазных ККМ с совместным общим управлением 17

1.2 Силовые преобразовательные каскады трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением 32

1.3 Сравнительный анализ силовых преобразовательных каскадов трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением 37

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 39

ГЛАВА 2 СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ КАСКАДАМИ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ 40

2.1 Способ совместного общего управления СПК трехфазных ККМ 41

2.2 Способ раздельного пофазного управления СПК трехфазных ККМ 45

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 51

ГЛАВА 3 СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИММЕТРИЧНОГО ДВУПОЛЯРНОГО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ 52

3.1 Способ симметрирования двуполярного выходного напряжения трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением 53

3.2 Способ симметрирования двуполярного выходного напряжения трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением 61

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 69

ГЛАВА 4 СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ, ОБЕСПЕИВАЮЩИХ РАБОТУ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ 70

4.1 Активный формирователь низкоэнергетической траектории переключения СТК, входящих в состав СПК трехфазных ККМ 70

4.2 Способы формирования опорного трехфазного напряжения для трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением 80

4.2.1 Способ формирования опорного трехфазного напряжения за счет использования апериодического звена второго порядка 81

4.2.2 Способ формирования опорного трехфазного напряжения за счет использования генератора, управляемого напряжением и системы фазовой автоподстройки частоты 87

4.3 Схема разрешения работы при пуске трехфазного ККМ 89

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 93

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТРЕХФАЗНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК 94

5.1 Разработка и изготовление экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением 94

5.2 Испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением 100

5.3 Исследование параметров и характеристик экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением 101

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 109

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 110

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ 112

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 115

Приложение А Акт №310-18/26 о внедрении результатов диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича в учебный процесс кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

Приложение Б Акт №09 о внедрении результатов диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича в ООО «РЭСТАР».

Приложение В Акт №2/07-2025 о практическом использовании результатов диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича в ООО «Трансконвертер».

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

БВН – блок вспомогательных напряжений;

ВС – выпрямитель сигналов;

ГУН – генератор, управляемый напряжением;

ДН – датчик фазного напряжения;

ДНВН – датчик несимметрии выходного напряжения;

ДРВ – драйвер;

ДТ – датчик тока;

ДВН – датчик выходного напряжения;

ИКМ – имитационное компьютерное моделирование;

ИОН – источник опорного напряжения;

IGBT – биполярный транзистор с изолированным затвором;

ККМ – корректор коэффициента мощности;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЛА – летательный аппарат;

МЭГ – магнитоэлектрический генератор;

ОБР – область безопасной работы;

ОУН – ограничитель уровня напряжения;

ПН – перемножитель напряжений;

РНП – реле напряжения питания;

ССД – система сбора данных;

ССК – симметрирующий силовой каскад;

СТК – силовой транзисторный ключ;

СПК – силовой преобразовательный каскад;

СУЗ – система управления и защиты;

СЭС – система электроснабжения;

УС – устройство симметрирования;

УСО – усилитель сигнала ошибки;

УУ – устройство управления;

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты;

ФС – формирователь сигнала;

ФТП – формирователь траектории переключения;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ШИР – широтно-импульсное регулирование;

ЭР – электронное реле.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В настоящее время существует тенденция значительного повышения электрической мощности, потребляемой на борту атмосферных летательных аппаратов (ЛА) гражданского и военного назначения. Такая тенденция обосновывается, как правило, увеличением мощности и количества бортового электрооборудования за счет постепенной замены существующих неэлектрических систем их электрифицированными аналогами. Решение таких задач лежит, в том числе, в основе актуальной на сегодняшний день концепции более электрического самолета, где предполагается переход от традиционно используемых гидравлических и пневматических приводов, применяемых для работы механизации крыла, системы уборки-выпуска шасси, системы кондиционирования воздуха и других систем, на электроприводы [1-14]. Повышение мощности потребления ведет к необходимости повышения мощности основных бортовых генераторов, в качестве которых традиционно широко используются интегрированные с приводом постоянной частоты вращения трехкаскадные синхронные электрические машины. Однако, для последних уже достигнутый уровень номинальной и удельной мощности является практически предельным [15]. В этой связи целесообразным становится использование синхронных генераторов с постоянными магнитами (магнитоэлектрических генераторов (МЭГ)) совместно с управляемыми полупроводниковыми преобразователями электроэнергии и построение авиационной системы электроснабжения (СЭС) на основе общей шины постоянного тока. Наиболее значимым достоинством такой системы является высокая удельная мощность и эффективность как непосредственно за счет применения МЭГ, так и за счет централизации систем преобразования электроэнергии в составе СЭС. В настоящее время такие системы с уровнем напряжения 270 В уже эксплуатируются в ряде зарубежных ЛА [16-21]. Перспективными являются СЭС с повышенным двуполярным

напряжением ±270 В (540 В). Разработке и исследованию таких систем посвящено немало публикаций отечественных и зарубежных авторов [22-29].

К авиационным СЭС предъявляются высокие требования к качеству потребляемой электроэнергии. Так, согласно существующему стандарту [30] должен обеспечиваться высокий коэффициент мощности, наименьший коэффициент гармоник потребляемого тока, низкий уровень несимметрии напряжения и др. В этой связи в качестве управляемого полупроводникового преобразователя электроэнергии необходимо использование трехфазного корректора коэффициента мощности (ККМ) со стабилизированным двуполярным выходным напряжением, который выполняет 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 единице.
6. Обеспечение требуемого качества потребляемой электроэнергии.

В настоящее время существует ряд разработанных решений в области трехфазных ККМ, представленных такими разработчиками, как Onsemi (Onsemiconductor), STM (STMicroelectronics), Crane A&E (Crane aerospace&electronics), Würth Elektronik и другими [31-34]. Следует отметить, что на сегодняшний день имеется ограниченное число разработанных трехфазных ККМ, предназначенных для применения в составе бортовых сетей авиационных СЭС. В этой связи в приведенный далее перечень известных решений включены устройства, предназначенные для работы в общепромышленных сетях трехфазного переменного тока частотой 50 Гц. В таблице 1.1 представлены некоторые разработанные трехфазные ККМ и их характеристики.

Таблица 1.1 – Некоторые разработанные трехфазные ККМ и их характеристики

Разработчик	**STM**	**Onsemi**	**Würth Elektronik**	**Crane A&E**	**Power electronics system lab ETH Zürich**
Мощность, кВт	15	11	12	15..25	10
Входное трехфазное напряжение	230 В 50 Гц	230 В 50 Гц	230 В 50 Гц	115 В 400 Гц	115 В 400 Гц
Выходное постоянное напряжение, В	800	700	800	400..800	520
Коэффициент мощности	≥ 0,99	0,99	> 0,98	≥ 0,9	0,98
Коэффициент гармоник потребляемого тока, %	< 5	-	< 5	-	3,1
КПД, %	98	98,3	> 96	95..97	-

Разработкам в области трехфазных ККМ посвящен ряд научно-исследовательских работ отечественных и зарубежных авторов [35-56]. В большинстве опубликованных исследований представлены общие структурные схемы преобразователей электроэнергии и обеспечиваемые ими характеристики. Однако как правило в этих публикациях не раскрываются алгоритмы и способы построения устройств управления и функциональных узлов трехфазных ККМ, обеспечивающих их работоспособность и

эффективность. Готовые же решения часто реализуются с использованием микропроцессорных систем, программное обеспечение которых остается недоступным.

В этой связи разработка и исследование трехфазных ККМ на уровне детальной проработки способов построения функциональных узлов и принципиальных электрических схем является актуальной научно-технической задачей в рамках создания такого электротехнического комплекса, как перспективная авиационная СЭС. Полученные при этом результаты могут быть реализованы и при создании силовых полупроводниковых преобразователей электроэнергии для различных отраслей промышленности.

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, структурные схемы, принципиальные электрические схемы и способы реализации функциональных узлов, обеспечивающих работу трехфазных ККМ.

Цель и задачи исследований

Целью диссертационной работы является разработка трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением, функционирующего в составе перспективных авиационных СЭС, предъявляющих высокие требования к качеству потребляемой электроэнергии на борту.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Проведен анализ существующих решений в области трехфазных ККМ и их параметров.

2. Разработаны структурные и принципиальные схемы трехфазных ККМ с различными способами управления силовыми преобразовательными каскадами (СПК).

3. Проведены исследования параметров различных структур СПК трехфазных ККМ.

4. Разработаны способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения при работе на несимметричную нагрузку.

5. Разработаны способы построения функциональных узлов, обеспечивающих работу трехфазных ККМ, 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. Выполнена верификация основных теоретических положений и исследована работоспособность предложенных технических решений при помощи ИКМ.

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

9. Подготовлен испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований трехфазного ККМ.

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

<u>Научная новизна</u>

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

1. Предложены и исследованы авторские способы совместного общего и раздельного пофазного 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 недиссипативной траектории переключения силовых транзисторных ключей (СТК), входящих в состав СПК трехфазных ККМ.

5. Предложены и исследованы оригинальные способы формирования опорного трехфазного синусоидального напряжения для трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

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

2. Получены зависимости показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности для различных структур СПК с совместным общим и раздельным пофазным 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 работу СТК, входящих в состав СПК трехфазных ККМ.

5. Разработаны оригинальные схемотехнические решения для формирования опорного трехфазного синусоидального напряжения для

трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением, применимые для четырехпроводных и трехпроводных 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 в среде Orcad PSpice, методы экспериментального исследования на лабораторной модели 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сопоставительного анализа структур СПК трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением.

2. Результаты исследований влияния структур СПК и способов управления ими на показатели качества потребляемой электроэнергии.

3. Структурные схемы трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением с совместным общим и раздельным пофазным 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, входящих в состав СПК трехфазных ККМ.

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 анализа и верификации полученных аналитических заключений с результатами проведенного ИКМ и результатами экспериментальных исследований на разработанной лабораторной модели 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 «Энергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ, что подтверждено Актом о внедрении в учебный процесс Московского авиационного института №310-18/26 от 02.06.2025 г. (Приложение А).

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

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.

ГЛАВА 1 СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ КАСКАДЫ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Трехфазный ККМ является устройством импульсного преобразования электроэнергии, работающим в составе перспективной авиационной СЭС. В этой связи следует определить его СПК как основной функциональный узел, во многом определяющий массогабаритные, энергетические, динамические и регулировочные характеристики преобразователя электроэнергии в целом [57-59]. На рисунке 1.1 показана структурная схема трехфазного ККМ, включая его СПК, в составе канала генерирования электроэнергии перспективной авиационной СЭС.

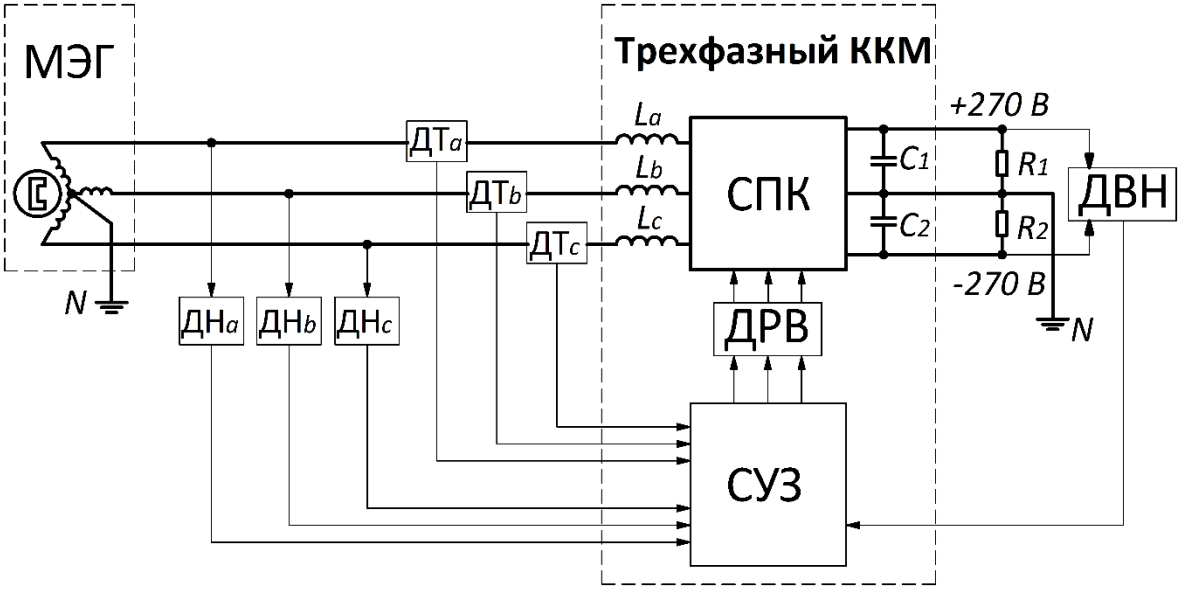


Рисунок 1.1 – Структурная схема трехфазного ККМ в составе канала генерирования электроэнергии перспективной авиационной СЭС

На структурной схеме на рисунке 1.1 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 по каналам +270 В и -270 В;

N – нейтраль.

Существуют различные варианты исполнения СПК трехфазных ККМ, различающихся по структуре и способу управления [39-41, 60]. Каждый из СПК имеет свою область рационального применения, определяемую их достоинствами и недостатками. Следует отметить, что параметры, обеспечиваемые каждым из СПК, зависят не только от их структуры, но и от выбранных способов управления ими. При этом одни и те же СПК, работающие при разных способах управления, могут обладать существенно разными характеристиками. Структуры СПК трехфазных ККМ могут быть классифицированы в зависимости от предназначения для трехпроводных или четырехпроводных сетей, а также в зависимости от выходного напряжения – однополярного или двуполярного. Структуры СПК также различаются применяемыми типами дросселей – переменного или постоянного тока и применяемыми типами СТК – переменного или постоянного тока. На рисунке 1.2 представлена предложенная обобщенная классификация СПК трехфазных ККМ.

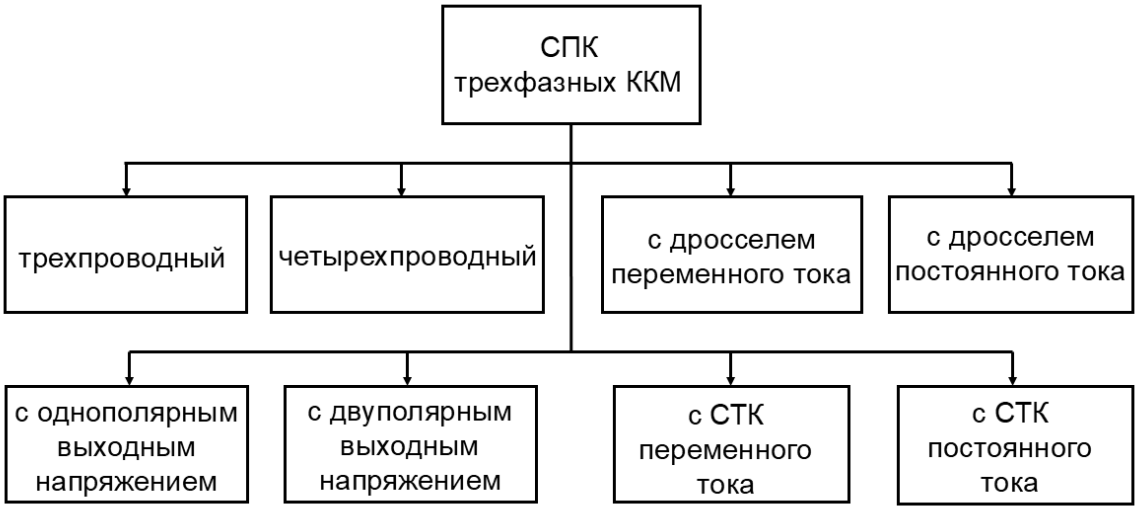


Рисунок 1.2 – Классификация СПК трехфазных ККМ

Разрабатываемый трехфазный ККМ предназначен для работы в составе перспективных авиационных СЭС. В этой связи он выполняется с четырехпроводным СПК, имеющим двуполярное выходное напряжение. В данной главе проводится сопоставительный анализ различных СПК трехфазных ККМ с целью поиска и выбора наиболее рациональных структур. Перед проведением такого анализа необходимо выделить два рассматриваемых в дальнейшем способа управления СПК трехфазных ККМ – совместное общее управление (синхронное управление токами всех трех фаз) и раздельное пофазное управление (управление током каждой фазы по отдельности). Оба способа управления будут подробно рассмотрены в Главе 2.

1.1 Силовые преобразовательные каскады трехфазных ККМ с совместным общим управлением

На рисунке 1.3 представлены некоторые из возможных структур СПК трехфазных четырехпроводных ККМ с двуполярным выходным напряжением ±270 В, работающие при совместном общем управлении [39].

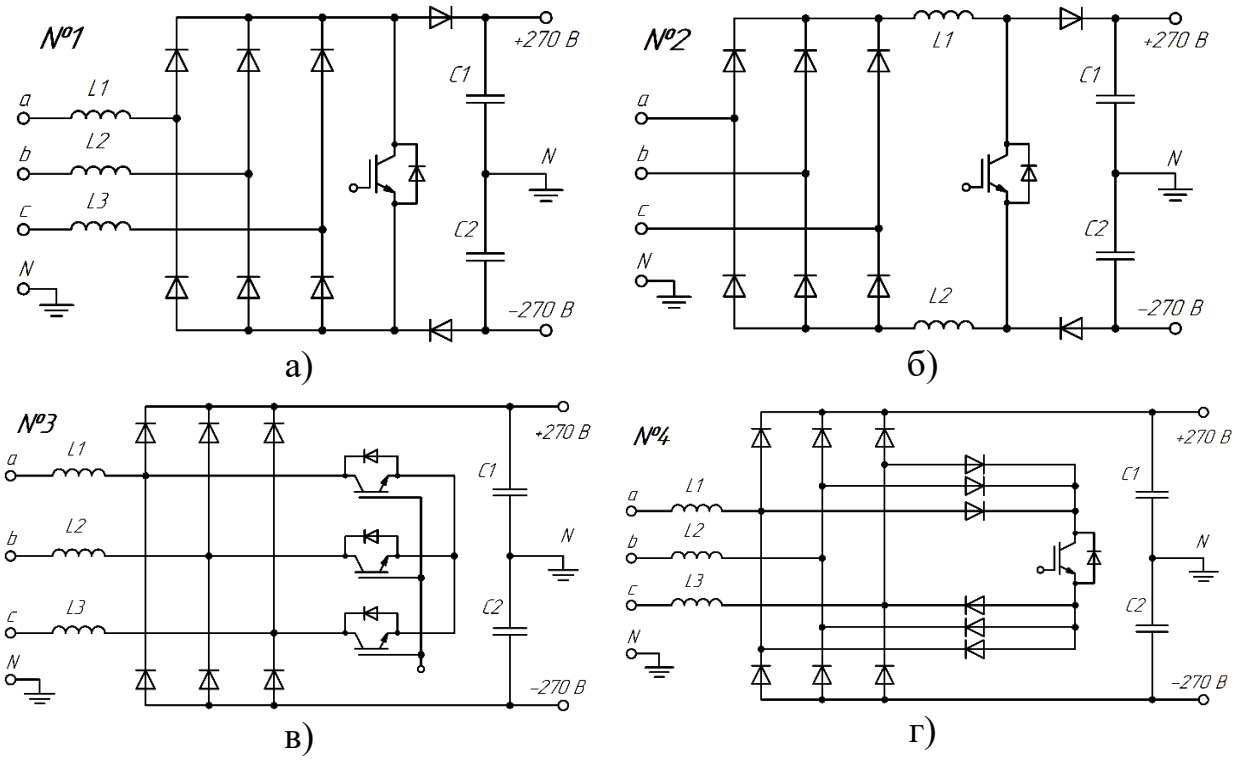


Рисунок 1.3 – Структуры СПК трехфазных четырехпроводных ККМ с двуполярным выходным напряжением с совместным управлением

Приведенные на рисунке 1.3 структуры СПК строятся на основе входного трехфазного двухполупериодного выпрямительного диодного моста, СТК и блокирующих диодов. Подключение управляющих цепей к затворам СТК на схемах условно не показано. СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) и СПК №2 (рисунок 1.3 (б)) содержат в своей структуре только один СТК и два блокирующих диода, отличаются типом используемых дросселей – трехфазного переменного тока и постоянного тока соответственно. СПК №3 (рисунок 1.3 (в)) предполагает использование трехфазного СТК переменного тока, выполненного на основе трех синхронно управляемых транзисторов с общей средней точкой. СПК №4 (рисунок 1.3 (г)) предполагает использование шести блокирующих диодов, соединяемых по три с коллектором и по три с эмиттером СТК. Необходимо отметить, что рассматриваемые структуры СПК предназначены для работы на симметричную нагрузку, подключаемую между нейтралью и выходами ±270 В соответственно. При работе на несимметричную нагрузку необходимо применение дополнительных специальных схем симметрирования выходного напряжения, включенных в состав трехфазного ККМ.

Для исследования характеристик и проведения сравнительного анализа показателей качества электроэнергии, обеспечиваемых трехфазными ККМ с приведенными структурами СПК, в системе Orcad PSpice были созданы имитационные компьютерные модели трехфазных ККМ с использованием каждой из них. По результатам ИКМ вычислялись показатели качества потребляемой электроэнергии – коэффициент мощности, определяемый как отношение средней активной мощности к полной мощности в соответствии с выражением (1.1) и коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, определяемый как отношение среднеквадратичной суммы токов высших гармоник, кроме первой, к току первой гармоники, в соответствии с выражением (1.2) [61].

$$K_M = \frac{P_{\text{ср}}}{S} = \frac{P_{\text{ср}}}{U_{\text{ф}} I_{\text{ф}}} = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{ф}}(t) i_{\text{ф}}(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{ф}}^2(t) dt \cdot \frac{1}{T}\int_0^T {i_{\text{ф}}}^2(t) dt}}, \quad (1.1)$$

где $K_{\text{м}}$ – коэффициент мощности; $P_{\text{ср}}$ – средняя активная мощность, Вт; S – полная мощность, ВА; $U_{\text{ф}}$ – действующее значение фазного напряжения, В; $I_{\text{ф}}$ – действующее значение тока фазы, А; $i_{\text{ф}}$ – мгновенное значение тока фазы, А; $u_{\text{ф}}$ – мгновенное значение напряжения фазы, В; T – период, с.

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_n^2}}{I_1} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где $K_{\text{г}}$ – коэффициент гармоник, %; I_{n} – действующее значение тока n-ой гармоники, А.

Вычисление коэффициента гармоник проводилось по первым сорока гармоникам тока [62].

Для четырехпроводных сетей авиационных СЭС немаловажным параметром является величина тока, протекающего по нейтральному проводу, так как от нее зависит возможность обеспечения требуемых параметров электромагнитной совместимости различных бортовых приборов и устройств [62-63]. Для количественной оценки этого показателя был введен коэффициент тока нейтрали, представляющий собой отношение действующих значений тока нейтрали и тока фазы, вычисляемый в соответствии с выражением (1.3). Количественная оценка тока нейтрали наряду с другими оцениваемыми показателями качества потребляемой электроэнергии позволяет сделать вывод о возможности и рациональности использования той или иной структуры СПК при проектировании трехфазных ККМ.

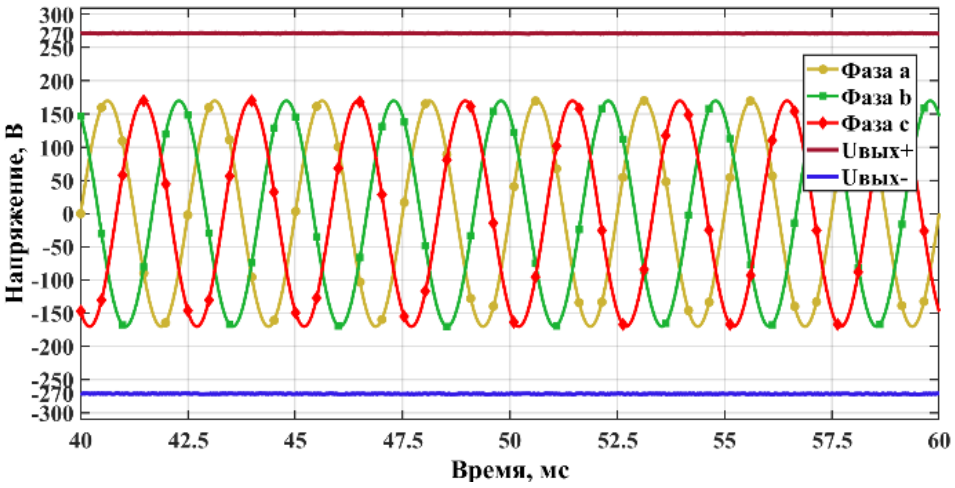
$$K_N = \frac{I_N}{I_{\text{ф}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T {i_N}^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T {i_{\text{ф}}}^2(t) dt}}, \quad (1.3)$$

где I_N – действующее значение тока нейтрали, А; $I_ф$ – действующее значение тока фазы, А; i_N – мгновенное значение тока нейтрали, А; $i_ф$ – мгновенное значение тока фазы, А.

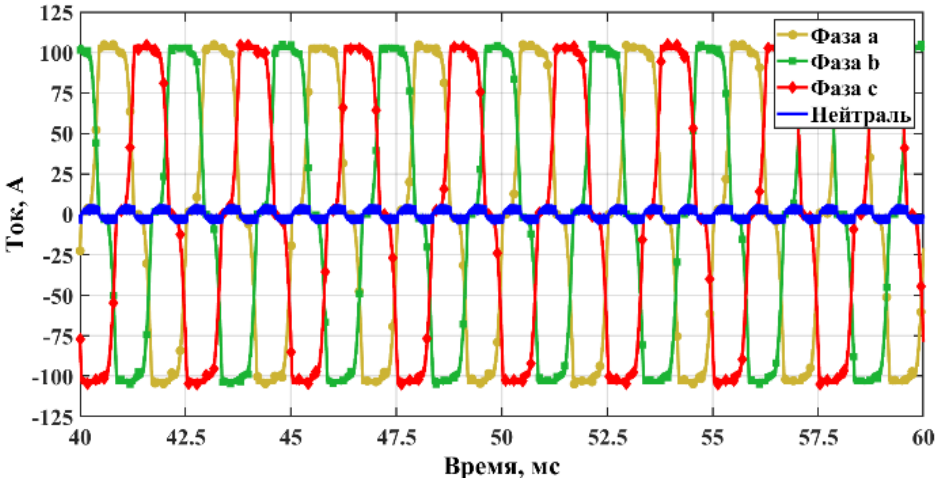
По результатам проведенного ИКМ были получены временные диаграммы электрических процессов и вычислены показатели качества потребляемой электроэнергии, обеспечиваемые трехфазными ККМ с каждой из приведенных структур СПК. Следует отметить, что при вычислениях показателей качества потребляемой электроэнергии бралось одно усредненное по трем фазам значение коэффициента мощности, коэффициента гармоник фазных токов и коэффициента тока нейтрали в силу симметричности фазных напряжений и токов, и, как следствие, незначительных различий этих коэффициентов по трем фазам. Для выполнения моделирования было задано действующее значение входных фазных напряжений 120 В частотой 400 Гц. Моделирование и последующий расчет параметров производились при симметричной активной нагрузке суммарной мощностью 25 кВт (12,5 кВт на каждый канал) при выходном напряжении ±270 В. Выбор такого значения обусловлен вероятной целесообразностью применения принципа многопоточного преобразования электроэнергии для достижения требуемого уровня мощности [64-73]. Так, например, для построения канала генерирования электроэнергии с выходной мощностью 100 кВт могут быть включены четыре канала по 25 кВт. Принцип многопоточного преобразования электроэнергии имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с мощными однопоточными преобразователями [74-78]. В первую очередь, исключается параллельная одновременная коммутация силовых полупроводниковых компонентов, что позволяет избежать неравномерных тепловых нагрузок на элементы конструкции и обеспечить лучшие условия охлаждения всего устройства. Отсутствие параллельно включенных элементов также исключает необходимость одновременной коммутации чрезмерно больших токов, что, в конечном счете, улучшает возможность обеспечения

требуемой электромагнитной совместимости. Еще одним достоинством принципа является повышение эквивалентной частоты преобразования в число раз, равное количеству однотипных силовых преобразовательных каналов, что позволяет улучшить массо-габаритные показатели реактивных элементов входного и выходного фильтров, а также улучшить динамику регулирования преобразователя электроэнергии [79-80].

На рисунке 1.4 представлены временные диаграммы фазных напряжений и выходных постоянных напряжений по каналам ±270 В, фазных токов и тока нейтрали для модели трехфазного ККМ с СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с дросселями переменного тока и одиночным СТК постоянного тока, полученные по результатам проведенного ИКМ.



а)



б)

Рисунок 1.4 – Временные диаграммы электрических процессов в трехфазном ККМ с СПК №1 (а – фазные напряжения и выходные постоянные напряжения, б – фазные токи и ток нейтрали)

Трехфазный ККМ со структурой СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с дросселями переменного тока и одиночным СТК постоянного тока обеспечивает коэффициент мощности, равный 0,915, коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, равный 6,65%, коэффициент тока нейтрали, равный 0,03 при выходной мощности 25 кВт. Форма фазного тока, потребляемого трехфазным ККМ с рассмотренной структурой СПК, полученная по результатам ИКМ, показана на рисунке 1.5.

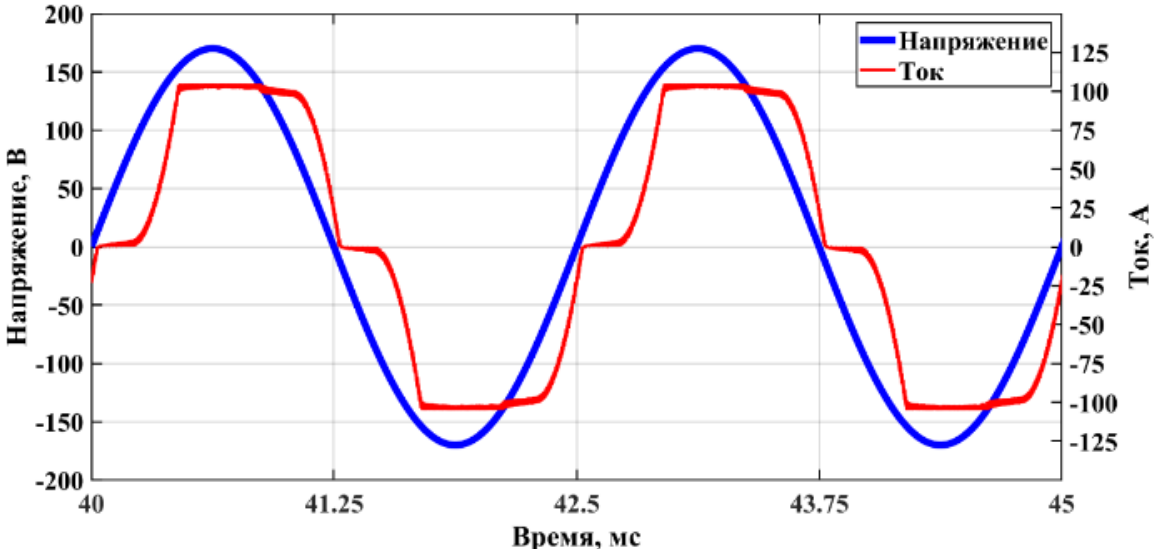
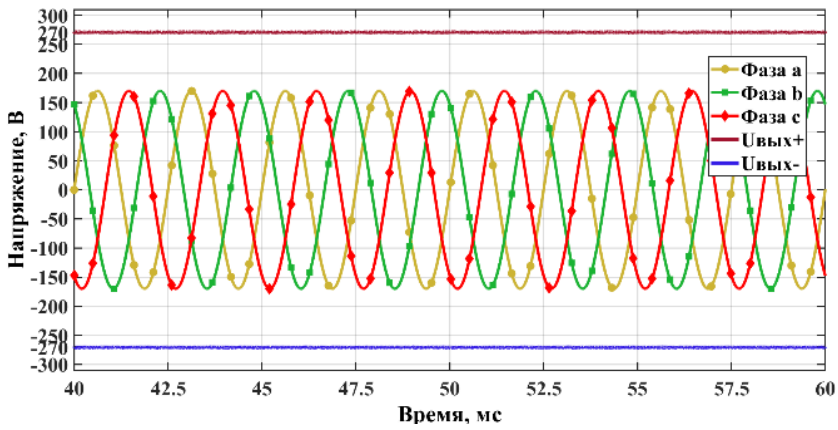
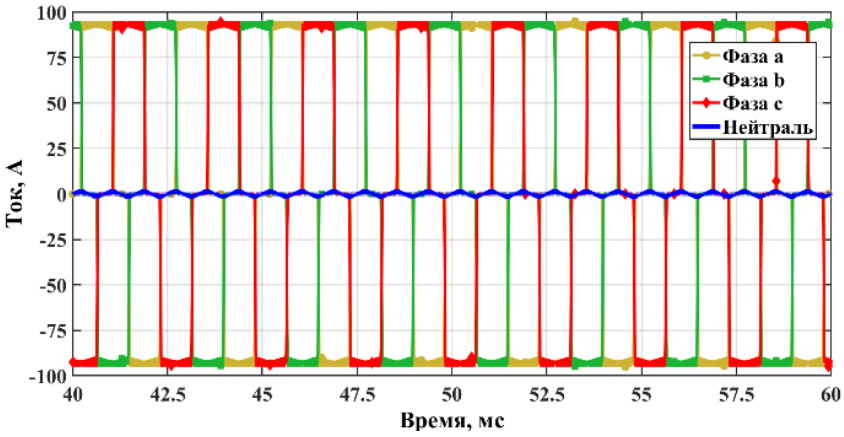


Рисунок 1.5 – Форма фазного тока, потребляемого трехфазным ККМ с СПК №1 с дросселями переменного тока и одиночным СТК постоянного тока с совместным общим управлением

На рисунке 1.6 представлены полученные по результатам ИКМ временные диаграммы фазных напряжений и выходных постоянных напряжений по каналам ±270 В, фазных токов и тока нейтрали для модели трехфазного ККМ с СПК №2 (рисунок 1.3 (б)) с дросселями постоянного тока и одиночным СТК постоянного тока. Трехфазный ККМ со структурой СПК №2 с дросселями постоянного тока и одиночным СТК постоянного тока обеспечивает коэффициент мощности, равный 0,948, коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, равный 8,6%, коэффициент тока нейтрали, равный 0,082 при выходной мощности 25 кВт.



а)



б)

Рисунок 1.6 – Временные диаграммы электрических процессов в трехфазном ККМ с СПК №2 (а – фазные напряжения и выходные постоянные напряжения, б – фазные токи и ток нейтрали)

Форма тока, потребляемого трехфазным ККМ с данной структурой СПК №2, полученная по результатам ИКМ, показана на рисунке 1.7.

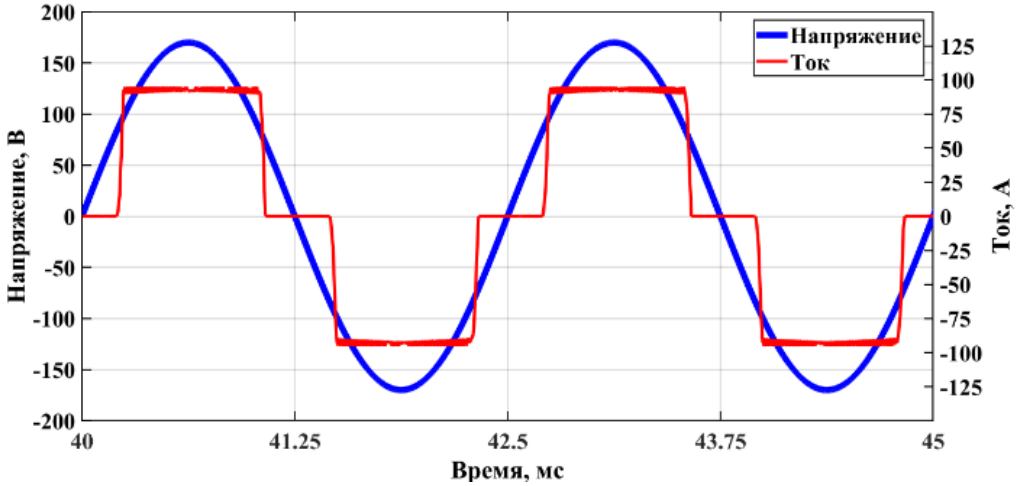


Рисунок 1.7 – Форма фазного тока, потребляемого трехфазным ККМ с СПК №2 с дросселями постоянного тока и одиночным СТК постоянного тока с совместным общим управлением

При сравнении временных диаграмм, приведенных на рисунках 1.5 и 1.7, видно, что для структуры СПК №2 (рисунок 1.3 (б)) с дросселями постоянного тока характерна более прямоугольная форма потребляемого тока по сравнению со структурой СПК №1 (рисунок 1.3 (а) с дросселями переменного тока. При такой форме потребляемого тока обеспечивается немного больший коэффициент мощности, однако, возрастает коэффициент гармоник.

По результатам ИКМ трехфазный ККМ со структурой СПК №3 (рисунок 1.3 (в)) с дросселями переменного тока и трехфазным СТК переменного тока обеспечивает коэффициент мощности, равный 0,917, коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, равный 7,4%, коэффициент тока нейтрали, равный 0,03 при выходной мощности 25 кВт. Трехфазный ККМ со структурой СПК №4 (рисунок 1.3 (г)) с дросселями переменного тока и одним СТК постоянного тока обеспечивает коэффициент мощности, равный 0,92, коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, равный 7,0%, коэффициент тока нейтрали, равный 0,029 при выходной мощности 25 кВт. Полученные временные диаграммы электрических процессов, в том числе формы потребляемых фазных токов, при моделировании работы трехфазных ККМ с этими структурами СПК идентичны временным диаграммам, показанным на рисунках 1.4-1.5, полученным для модели трехфазного ККМ со структурой СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с дросселями переменного тока и одиночным СТК постоянного тока.

Для каждой структуры СПК была проведена оценка уровня потерь в силовых полупроводниковых компонентах. Для проведения аналитических расчетов необходимо знать значения параметров конкретных электронных компонентов, предоставляемых их производителями [81-82]. Для этого были использованы параметры силовых диодов и транзисторов, применяемых при проектировании экспериментального образца трехфазного ККМ. Для расчета потерь в диодах трехфазного выпрямительного моста использованы параметры модуля VUO160-12NO7 [83]. Для расчета потерь в СТК и

блокирующих диодах использованы параметры IGBT ключа VS-GT180DA120U и диодов VS-HFA140FA120 соответственно [84-85]. Статические потери в СТК, включающие потери в открытом и в закрытом состоянии, были рассчитаны при помощи выражений (1.4) – (1.5).

$$P_{\text{стат.Откр.т}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{Откр.т}}(t) i_{\text{Откр.т}}(t) dt = U_{\text{Откр.т}} I_{\text{Откр.т}} k_{\text{з}}\,, \qquad (1.4)$$

где $P_{\text{стат.Откр.т}}$ – статические потери в открытом состоянии транзистора, Вт; $i_{\text{Откр.т}}$ – мгновенное значение тока, протекающего через силовой транзистор в открытом состоянии, А; $u_{\text{Откр.т}}$ – мгновенное значение падения напряжения на открытом транзисторе, В; T – период, с; $U_{\text{Откр.т}}$ – среднее установившееся напряжение на открытом транзисторе, В; $I_{\text{Откр.т}}$ – средний установившийся ток через транзистор в открытом состоянии, А; $k_{\text{з}}$ – коэффициент заполнения управляющего сигнала.

$$P_{\text{стат.Закр.т}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{Закр.т}}(t) i_{\text{Закр.т}}(t) dt = U_{\text{Закр.т}} I_{\text{ост}} (1 - k_{\text{з}})\,, \qquad (1.5)$$

где $P_{\text{стат.Закр.т}}$ – статические потери в закрытом состоянии транзистора, Вт; $i_{\text{Закр.т}}$ – мгновенное значение тока, протекающего через силовой транзистор в закрытом состоянии, А; $u_{\text{Закр.т}}$ – мгновенное значение напряжения, прикладываемого к закрытому силовому транзистору, В; T – период, с; $U_{\text{Закр.т}}$ – среднее напряжение прикладываемое к закрытому силовому транзистору, В; $I_{\text{ост}}$ – средний установившийся ток через транзистор в закрытом состоянии, А; $k_{\text{з}}$ – коэффициент заполнения управляющего сигнала.

Динамические потери в СТК, в которые входят потери при включении и потери при выключении, были рассчитаны при помощи выражений (1.6) – (1.7).

$$P_{\text{дин}ON.\text{т}} = W_{ON} \frac{U_{ON} I_{ON}}{U_{ONvt} I_{ONvt}} f_{\text{ком}}, \quad (1.6)$$

где $P_{\text{дин}ON.\text{т}}$ – динамические потери при включении транзистора, Вт; W_{ON} – выделяемая энергия потерь в результате перехода транзистора с закрытого в открытое состояние, Дж; U_{ON} – коммутируемое напряжение коллектор-эмиттер при включении транзистора, В; I_{ON} – ток коллектора при включении транзистора, А; U_{ONvt} – паспортное значение коммутируемого напряжения коллектор-эмиттер при включении транзистора, В; I_{ONvt} – паспортное значение коммутируемого тока коллектора транзистора, А; $f_{\text{ком}}$ – частота коммутации транзистора, Гц.

$$P_{\text{дин}OFF.\text{т}} = W_{OFF} \frac{U_{OFF} I_{OFF}}{U_{OFFvt} I_{OFFvt}} f_{\text{ком}}, \quad (1.7)$$

где $P_{\text{дин}OFF.\text{т}}$ – динамические потери при выключении транзистора, Вт; W_{OFF} – выделяемая энергия потерь в результате перехода транзистора с открытого в закрытое состояние, Дж; U_{OFF} – коммутируемое напряжение коллектор-эмиттер при выключении транзистора, В; I_{OFF} – ток коллектора при выключении транзистора, А; U_{OFFvt} – паспортное значение коммутируемого напряжения коллектор-эмиттер при выключении транзистора, В; I_{OFFvt} – паспортное значение коммутируемого тока коллектора транзистора, А.

Суммарные потери в силовых транзисторах были вычислены при помощи выражения (1.8).

$$P_{\Sigma\text{т}} = P_{\text{стат.Откр.т}} + P_{\text{стат.Закр.т}} + P_{\text{дин}ON.\text{т}} + P_{\text{дин}OFF.\text{т}}, \quad (1.8)$$

где $P_{\Sigma\text{т}}$ – суммарные потери в силовых транзисторах, Вт.

Следует отметить, что при вычислении суммарных потерь в СТК потери на управление не учитывались в силу их относительно малых значений по сравнению со статическими и динамическими потерями в СТК.

Статические потери в силовых диодах, включающие потери в открытом и в закрытом состоянии, были рассчитаны при помощи выражений (1.9) - (1.10).

$$P_{\text{стат.Откр.д}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{Откр.д}}(t) i_{\text{Откр.д}}(t) dt\,, \tag{1.9}$$

где $P_{\text{стат.Откр.д}}$ – статические потери в открытом состоянии диода, Вт; $i_{\text{Откр.д}}$ – мгновенное значение тока, протекающего через диод в открытом состоянии, А; $u_{\text{Откр.д}}$ – мгновенное значение падения напряжения на открытом диоде, В; T – период, с.

$$P_{\text{стат.Закр.д}} = \frac{1}{T}\int_0^T u_{\text{Закр.д}}(t) i_{\text{Закр.д}}(t) dt\,, \tag{1.10}$$

где $P_{\text{стат.Закр.д}}$ – статические потери в закрытом состоянии диода, Вт; $i_{\text{Закр.д}}$ – мгновенное значение тока, протекающего через диод в закрытом состоянии, А; $u_{\text{Закр.д}}$ – мгновенное значение напряжения, прикладываемого к закрытому диоду, В; T – период, с.

Динамические потери в диодах, включающие потери при закрытии, были рассчитаны при помощи выражения (1.11).

$$P_{\text{дин}OFF.\text{д}} = \frac{U_{\text{Закр.д}} \cdot I_{\text{д}} \cdot t_{rr}}{2 \cdot T \cdot ln(1 + \frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{обр.м.д}}})}, \tag{1.11}$$

где $P_{\text{дин}OFF.\text{д}}$ – динамические потери при закрытии диода, Вт; $U_{\text{Закр.д}}$ – среднее значение напряжения, прикладываемого к закрытому диоду, В; $I_{\text{д}}$ – среднее значение тока, протекающего через диод в открытом состоянии, А; t_{rr} – интервал времени от момента, когда ток диода проходит через нулевое значение, изменяя направление с прямого на обратное, и до момента времени,

когда ток достигнет установившегося обратного значения при заданных значениях прямого тока и скорости спада тока, с; T – период, с; $I_{\text{обр.м.д}}$ – амплитуда обратного тока при заданных значениях прямого тока и скорости спада тока, А.

Суммарные потери в силовых диодах были вычислены при помощи выражения (1.12).

$$P_{\Sigma\text{д}} = P_{\text{стат.Откр.д}} + P_{\text{стат.Закр.д}} + P_{\text{дин}OFF.\text{д}}, \quad (1.12)$$

где $P_{\Sigma\text{д}}$ – суммарные потери в силовых диодах, Вт.

Следует отметить, что современные силовые диоды имеют относительно малые значения динамических потерь на открытие, вследствие этого при вычислении суммарных потерь в диодах они не были учтены.

Суммарные относительные потери в силовых полупроводниковых компонентах СПК представляют собой отношение суммарной мощности потерь в силовых диодах и силовых транзисторах к выходной мощности. Их значения были вычислены при помощи выражения 1.13.

$$P_{\text{отн}} = \frac{P_{\Sigma\text{т}} + P_{\Sigma\text{д}}}{P_{\text{вых}}} 100\%, \quad (1.13)$$

где $P_{\text{отн}}$ – суммарные относительные потери в силовых полупроводниковых компонентах СПК; $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность, Вт.

Вычисленный уровень суммарных относительных потерь в силовых полупроводниковых компонентах СПК позволяет приближенно оценить эффективность той или иной структуры СПК трехфазного ККМ в зависимости от требуемого уровня выходной мощности, не проводя дополнительных расчетов потерь в силовых диодах и СТК.

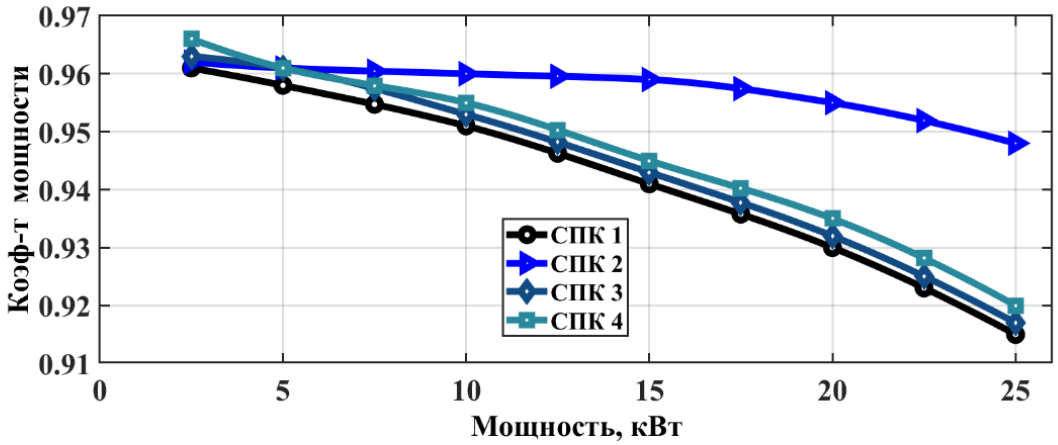
В таблицу 1.2 были сведены результаты вычислений и ИКМ для трехфазных ККМ с рассмотренными структурами СПК №1-№4 с совместным общим управлением: коэффициент мощности, коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, коэффициент тока нейтрали. Указанные коэффициенты приведены при выходной мощности 25 кВт. Кроме этого, в таблице 1.2 приведены суммарные относительные потери в силовых полупроводниковых компонентах СПК, количество силовых полупроводниковых компонентов (в частности, количество транзисторов) и количество дросселей для каждой из рассмотренных структур СПК.

Таблица 1.2 – Параметры рассмотренных структур СПК трехфазных ККМ с совместным общим управлением

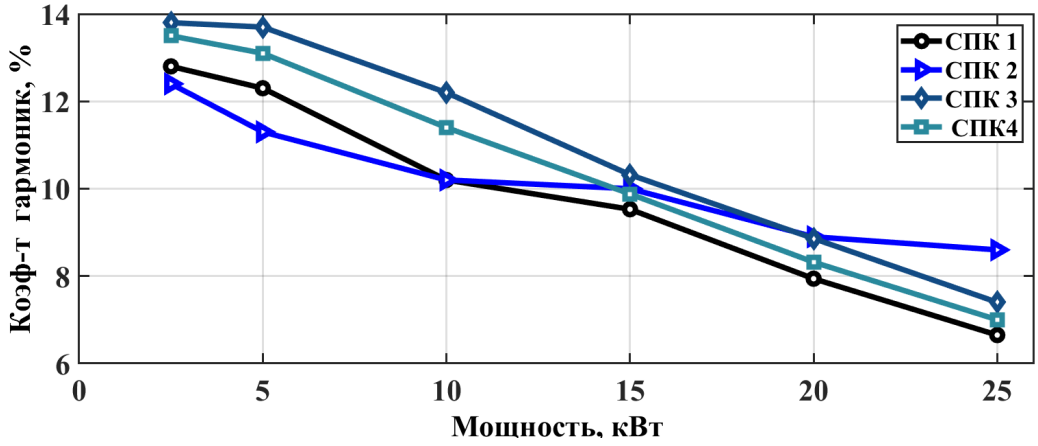
	СПК №1	СПК №2	СПК №3	СПК №4
Коэффициент мощности	0,915	0,948	0,917	0,92
Коэффициент гармоник, %	6,65	8,62	7,41	7,0
Коэффициент тока нейтрали	0,03	0,082	0,03	0,029
Суммарные относительные потери в силовых полупроводниковых компонентах, %	2,26	2,38	2,65	3,27
Количество силовых полупроводниковых компонентов	9	9	9	13
Количество силовых транзисторов	1	1	3	1
Количество дросселей	3	2	3	3

Проводя сравнительный анализ показателей, приведенных в таблице 1.2, можно отметить, что наилучший коэффициент мощности при выходной мощности 25 кВт характерен для структуры СПК №2 с дросселями постоянного тока с одиночным СТК постоянного тока, однако, она же обладает наибольшим коэффициентом гармоник и наибольшим коэффициентом тока нейтрали. Достоинством такого СПК является наличие только двух дросселей по сравнению со структурами СПК №1, №3, №4. Однако, в определенных условиях роль входных дросселей переменного тока в структурах СПК №1, №3, №4 могут выполнять фазные обмотки МЭГ при достаточно большой величине их индуктивности. Также следует принимать во внимание особенность СПК №2 с дросселями постоянного тока с точки зрения его конструктивной реализации ввиду необходимости встраивания дросселей между силовыми полупроводниковыми компонентами силового каскада. СПК №1, №3, №4 обладают приблизительно равными показателями коэффициента мощности 0,915-0,92, коэффициента гармоник 6,65-7,41% и коэффициента тока нейтрали 0,029-0,03. Все рассмотренные СПК обладают относительно малыми суммарными потерями в силовых полупроводниковых компонентах от 2,26 до 3,37% от выходной мощности. С точки зрения наименьшего требуемого количества элементов наиболее рациональным было бы использование СПК №1 с дросселями переменного тока и одиночным СТК постоянного тока, так как он содержит наименьшее количество силовых полупроводниковых компонентов и только один силовой транзистор. При этом СПК №3 позволяет применить три менее мощных ключа, так как тепловая нагрузка распределяется равномерно между тремя транзисторами трехфазного СТК переменного тока.

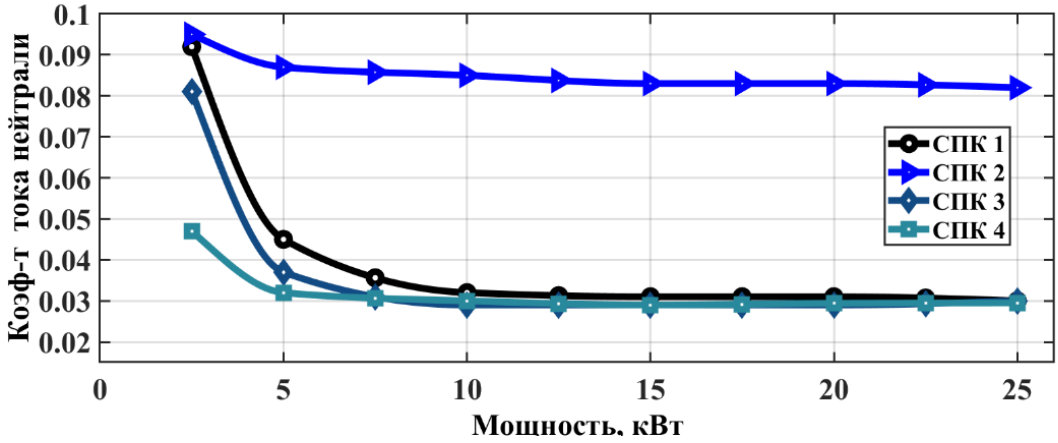
При помощи ИКМ были исследованы характеристики всех рассмотренных структур СПК в диапазоне выходной мощности от 2,5 до 25 кВт. Построены графики зависимостей коэффициента мощности, коэффициента гармоник и коэффициента тока нейтрали от выходной мощности, приведенные на рисунке 1.8.



а)



б)



в)

Рисунок 1.8 – Графики зависимостей показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности для структур СПК с совместным управлением (а – коэффициент мощности; б – коэффициент гармоник; в – коэффициент тока нейтрали)

На приведенных графиках видно, что СПК №1, СПК №3 и СПК №4 с дросселями переменного тока обеспечивают приблизительно равные показатели качества потребляемой электроэнергии во всем диапазоне

выходной мощности. Для СПК №2 (рисунок 1.3 (б)) с дросселями постоянного тока характерен более высокий коэффициент мощности практически во всем диапазоне выходной мощности, однако в то же время более высокие коэффициент гармоник и коэффициент тока нейтрали. Кроме этого, необходимо отметить некоторое уменьшение коэффициента мощности с увеличением мощности нагрузки независимо от структуры СПК, что следует отнести к недостаткам способа совместного общего релейного управления.

1.2 Силовые преобразовательные каскады трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением

На рисунке 1.9 представлены некоторые из возможных структур СПК трехфазных четырехпроводных ККМ с двуполярным выходным напряжением ±270 В, работающие при раздельном пофазном управлении [39-40].

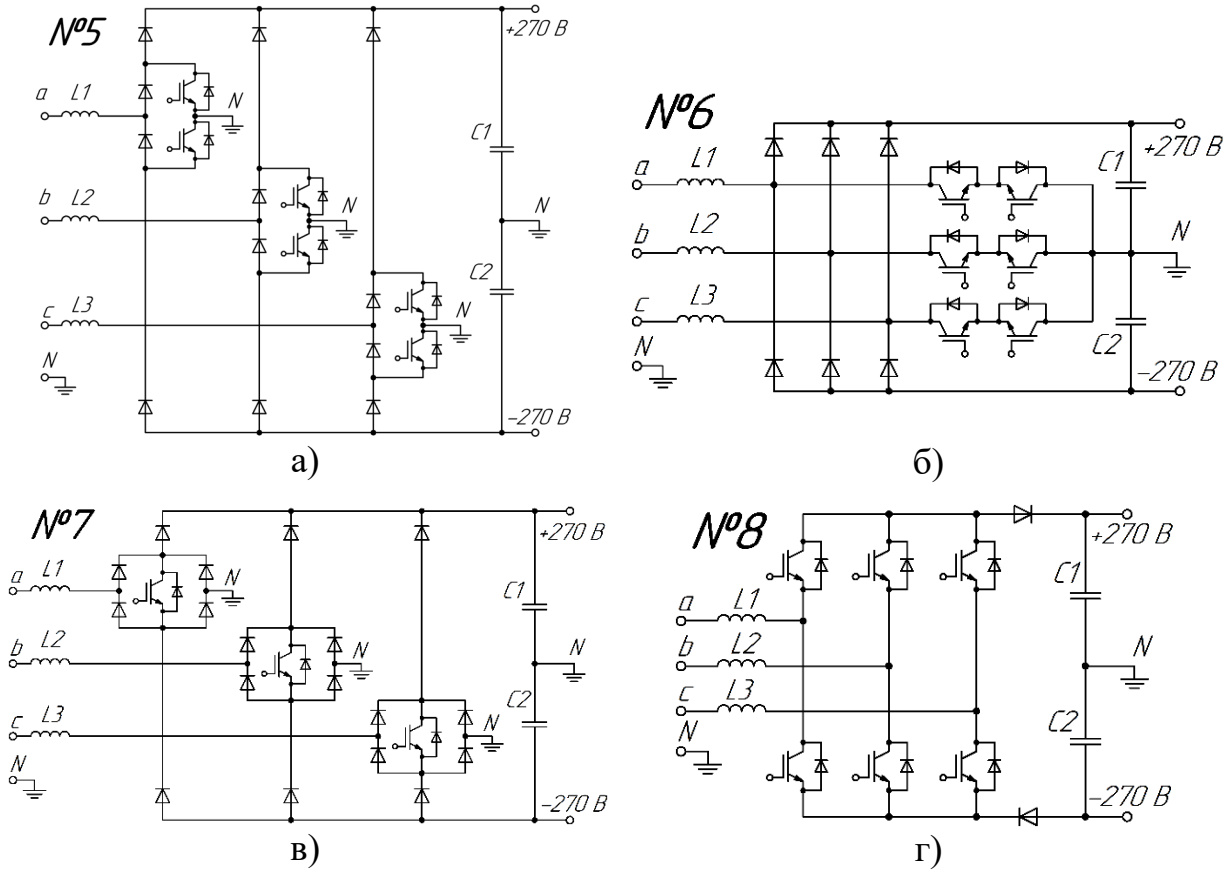
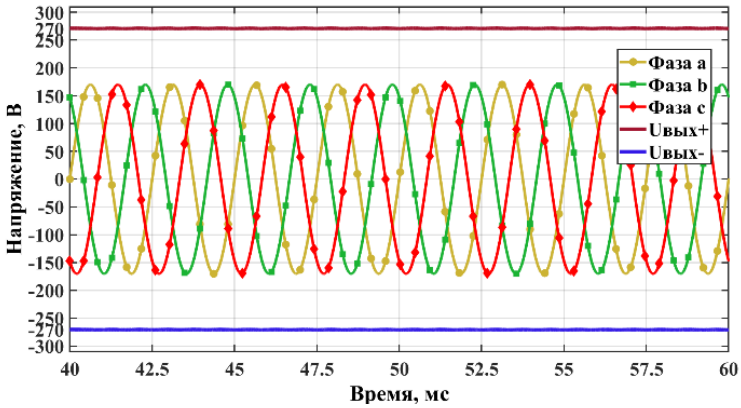


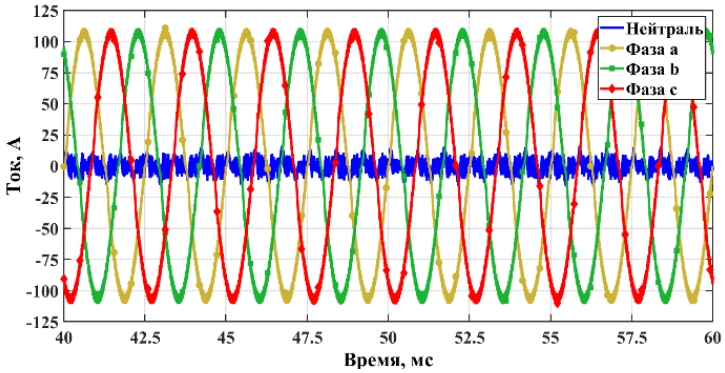
Рисунок 1.9 – Структуры СПК трехфазных четырехпроводных ККМ с двуполярным выходным напряжением с раздельным управлением

Приведенные на рисунках 1.9 (а) и 1.9 (в) структуры СПК №5 и СПК №7 строятся на основе входного трехфазного двухполупериодного выпрямительного моста и интегрированных в него СТК, выполненных на основе комбинаций силовых транзисторов и диодов. Структура СПК №6 (рисунок 1.9 (б)) включает три СТК переменного тока на основе шести силовых транзисторов. Средние точки всех СТК в структурах СПК №5, СПК №6, СПК №7 (рисунки 1.9 (а) -1.9 (в)) соединены с нейтралью. Структура СПК №8 (рисунок 1.9 (г)) строится на основе трехфазного транзисторного моста.

На рисунке 1.10 представлены временные диаграммы фазных напряжений и выходных постоянных напряжений по каналам ±270 В, фазных токов и тока нейтрали для модели трехфазного ККМ с СПК №5 (рисунок 1.9 (а)) с дросселями переменного тока, построенного на основе трехфазного диодного моста и интегрированных СТК, полученные по результатам проведенного ИКМ.



а)



б)

Рисунок 1.10 – Временные диаграммы электрических процессов в трехфазном ККМ с СПК с раздельным управлением (а – фазные напряжения и выходные постоянные напряжения, б – фазные токи и ток нейтрали)

Трехфазный ККМ со структурой СПК №5 (рисунок 1.9 (а)) с раздельным пофазным управлением обеспечивает коэффициент мощности, равный 0,99, коэффициент гармоник потребляемых фазных токов, равный 2,775%, коэффициент тока нейтрали, равный 0,074 при выходной мощности 25 кВт. Форма фазного тока, потребляемого трехфазным ККМ с рассмотренной структурой СПК, полученная по результатам ИКМ, показана на рисунке 1.11.

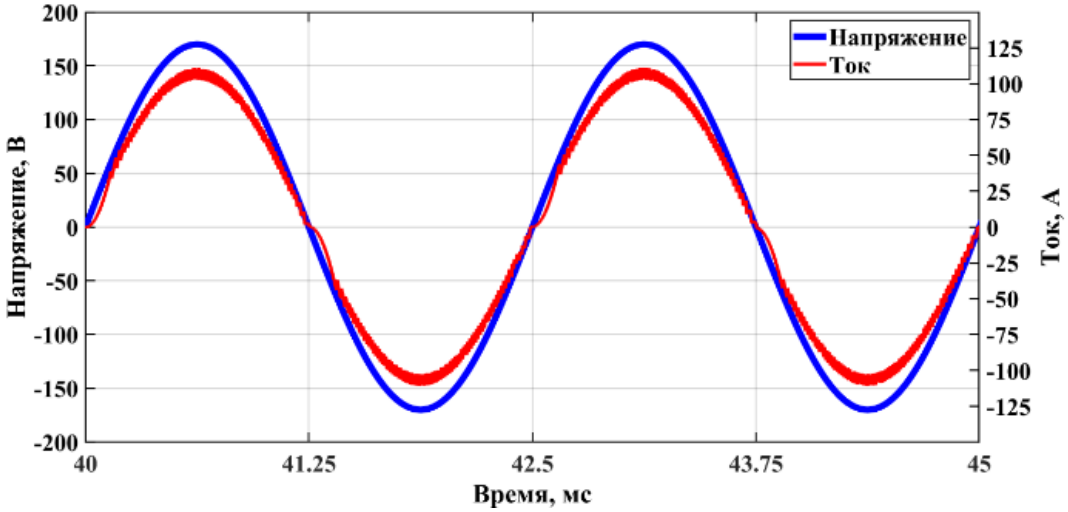


Рисунок 1.11 – Форма фазного тока, потребляемого трехфазным ККМ с СПК с раздельным пофазным управлением

Результаты проведенного ИКМ показали, что трехфазные ККМ с остальными структурами СПК №6-№8 (рисунки 1.9 (б)-1.9 (г)) с раздельным пофазным управлением дают временные диаграммы, идентичные полученным для модели трехфазного ККМ со структурой СПК №5 (рисунок 1.9 (а)). Аналогично рассмотренным структурам СПК с совместным общим управлением (рисунок 1.3) для приведенных структур СПК с раздельным пофазным управлением (рисунок 1.9) при помощи выражений (1.1) - (1.3) были вычислены обеспечиваемые показатели качества потребляемой электроэнергии при работе трехфазных ККМ при выходной мощности 25 кВт, а также при помощи выражений (1.4) - (1.13) вычислены суммарные относительные потери в силовых полупроводниковых компонентах СПК. Полученные результаты были сведены в таблицу 1.3. Кроме вычисленных параметров в таблице 1.3 приведено количество силовых полупроводниковых

компонентов, в том числе количество силовых транзисторов, входящих в рассмотренные структуры СПК с раздельным пофазным управлением.

Таблица 1.3 – Параметры рассмотренных структур СПК трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением

	СПК №5	СПК №6	СПК №7	СПК №8
Коэффициент мощности	0,99	0,99	0,99	0,99
Коэффициент гармоник, %	2,77	2,58	2,87	1,91
Коэффициент тока нейтрали	0,074	0,062	0,071	0,049
Относительные потери в силовых полупроводниковых компонентах, %	4,21	3,4	4,01	3,06
Количество силовых полупроводниковых компонентов	18	12	21	8
Количество силовых транзисторов	6	6	3	6

При выходной мощности 25 кВт трехфазные ККМ со всеми рассмотренными структурами СПК с раздельным пофазным управлением обеспечивают коэффициент мощности, равный 0,99. Трехфазные ККМ со структурами СПК №5, №6, №7 (рисунки 1.9 (а) - 1.9 (в)) обеспечивают приблизительно равные коэффициенты гармоник потребляемых фазных токов, лежащие в диапазоне 2,58-2,87% и коэффициенты тока нейтрали 0,062-0,074. При этом наилучшие показатели коэффициента гармоник менее 2% и коэффициента тока нейтрали менее 0,05 обеспечивает трехфазный ККМ с СПК №8 (рисунок 1.9 (г)), к тому же эта структура СПК содержит наименьшее количество силовых полупроводниковых компонентов, что следует отнести к ее преимуществам по сравнению с другими рассмотренными структурами СПК. Уровень суммарных относительных потерь в силовых

полупроводниковых компонентах лежит в диапазоне 3,06-4,21% от выходной мощности.

При помощи ИКМ были проведены исследования зависимостей показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности в диапазоне 2,5 - 25 кВт для трехфазных ККМ с рассмотренными структурами СПК с раздельным пофазным управлением. На рисунке 1.12 приведены построенные графики соответствующих зависимостей.

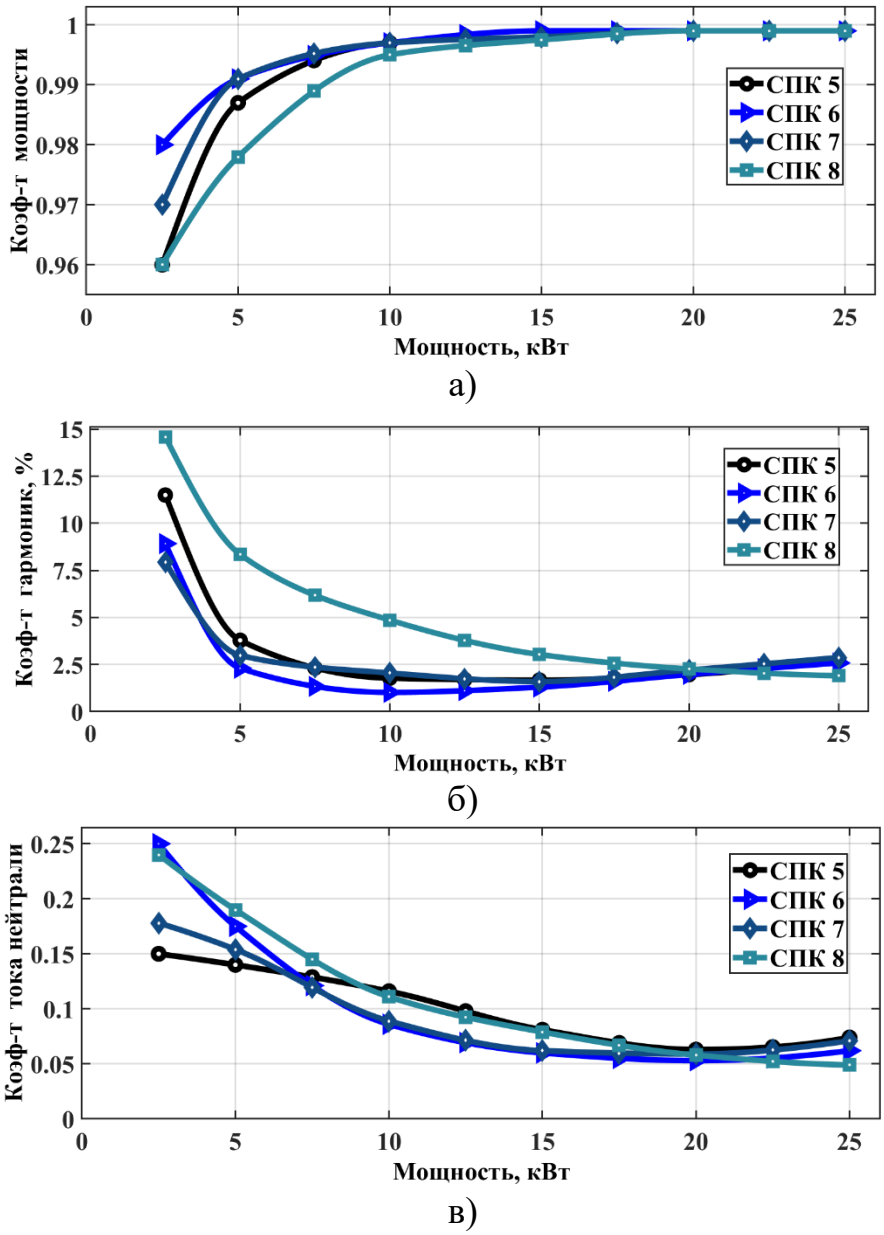


Рисунок 1.12 – Графики зависимостей показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности для структур СПК с раздельным пофазным управлением (а – коэффициент мощности; б – коэффициент гармоник; в – коэффициент тока нейтрали)

Трехфазные ККМ со всеми рассмотренными структурами СПК с раздельным пофазным управлением обеспечивают коэффициент мощности не менее 0,99 в диапазоне выходной мощности от 8 до 25 кВт. При уменьшении мощности коэффициент мощности снижается. Трехфазные ККМ с СПК №5, №6, №7 (рисунки 1.9 (а) - 1.9 (в)) обеспечивают приблизительно равные коэффициенты гармоник потребляемых токов в зависимости от выходной мощности во всем рассмотренном диапазоне. Следует отметить, что наименьшие значения коэффициента гармоник при таких структурах СПК обеспечиваются в диапазоне выходной мощности от 7 до 15 кВт. При этом для структуры СПК №4 (рисунок 1.9 (г)) с наименьшим коэффициентом гармоник при мощности 25 кВт характерно более крутое нарастание этого параметра при уменьшении выходной мощности. Для всех рассмотренных структур СПК с раздельным пофазным управлением характерны незначительные различия коэффициента тока нейтрали в зависимости от выходной мощности.

1.3 Сравнительный анализ силовых преобразовательных каскадов трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением

Проводя обобщенный сопоставительный анализ структур СПК №1-№4 с совместным общим управлением (рисунок 1.3) и структур СПК №5-№8 с раздельным пофазным управлением (рисунок 1.9), можно отметить, что основным достоинством структур СПК с раздельным пофазным 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, входящих в СПК, и относительно высокие суммарные потери в них. Большое суммарное количество компонентов усложняет разработку конструкции СПК трехфазных ККМ, а большое количество СТК и, соответственно, требуемое количество драйверов в конечном счете приводят к высокой стоимости таких устройств.

Структуры СПК с совместным общим управлением, напротив, обеспечивают менее высокие показатели качества потребляемой электроэнергии, что следует отнести к их недостаткам. Основным достоинством таких структур СПК является малое количество силовых полупроводниковых компонентов, входящих в СПК и, соответственно, относительно малые суммарные потери в них. Малое суммарное количество компонентов, в частности всего один СТК, позволяет значительно упростить разработку конструкции СПК трехфазных ККМ и снизить их стоимость по сравнению со структурами СПК с раздельным пофазным управлением.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Предложена классификация СПК трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением.

2. Приведены структуры СПК трехфазных ККМ, предназначенные для работы с совместным общим и раздельным пофазным управлением.

3. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем трехфазных ККМ с рассмотренными структурами СПК.

4. Приведены временные диаграммы электрических процессов при работе трехфазных ККМ с рассмотренными структурами СПК, полученные при помощи ИКМ.

5. Исследованы зависимости показателей качества потребляемой электроэнергии (коэффициент мощности, коэффициент гармоник, коэффициент тока нейтрали) от выходной мощности, обеспечиваемых трехфазными ККМ со структурами СПК с совместным общим и раздельным пофазным управлением.

6. Проведена оценка суммарных относительных потерь в силовых полупроводниковых компонентах рассмотренных структур СПК трехфазных ККМ.

7. Проведен сопоставительный анализ рассмотренных структур СПК трехфазных ККМ, определены достоинства и недостатки структур СПК с совместным общим управлением и структур СПК с раздельным пофазным управлением.

ГЛАВА 2 СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ КАСКАДАМИ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

При разработке трехфазных ККМ не менее важное значение по сравнению с выбранной структурой СПК имеет способ управления ей. Выбор рационального способа управления во многом определяет показатели качества потребляемой электроэнергии и эффективности, обеспечиваемые трехфазными ККМ с той или иной структурой СПК. На рисунке 2.1 представлена предложенная обобщенная классификация способов управления СПК трехфазных ККМ.

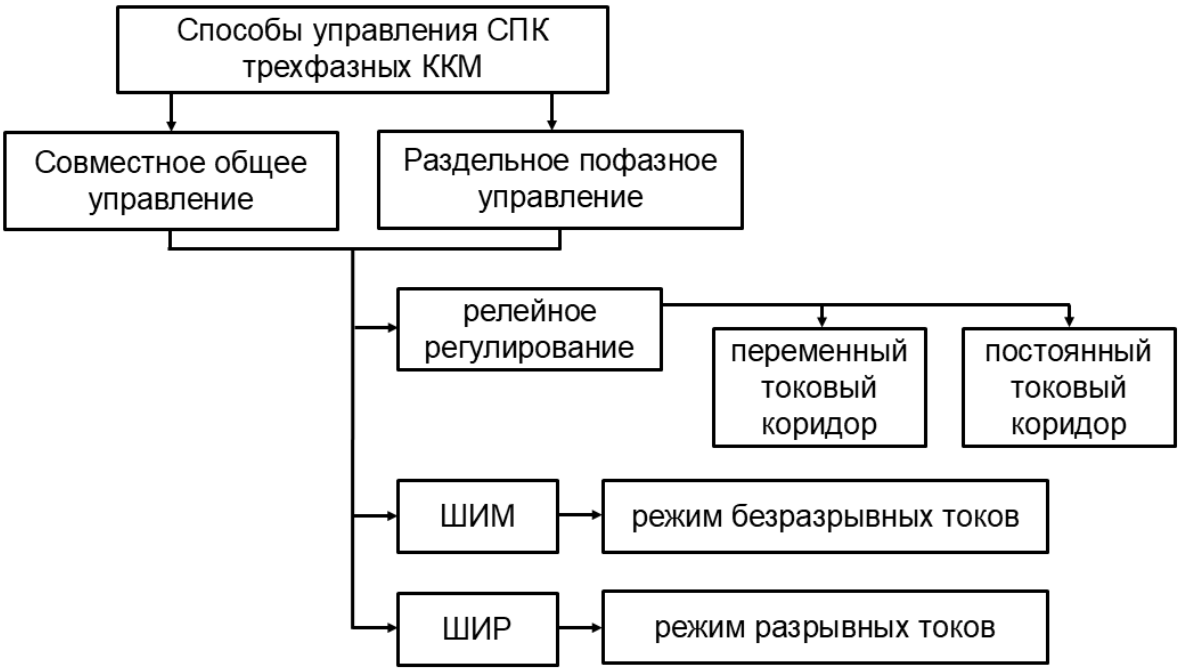


Рисунок 2.1 – Классификация способов управления СПК трехфазных ККМ

В первую очередь следует выделить два основных способа управления СПК трехфазных ККМ – совместное общее управление, подразумевающее одноканальное управление токами сразу всех трех фаз, и раздельное пофазное управление, подразумевающее независимое управление током каждой фазы по отдельности. Возможны различные варианты реализации обоих способов, такие как релейное регулирование с постоянной или переменной величиной токового коридора, регулирование посредством широтно-импульсной

модуляции (ШИМ) с постоянной частотой коммутации, реализующее режим безразрывных токов и широтно-импульсное регулирование (ШИР) с переменной частотой коммутации, реализующее режим разрывных токов.

Далее рассмотрены предложенные структурные и схемотехнические реализации способов совместного общего и раздельного пофазного управления СПК трехфазных ККМ, реализованные посредством релейного регулирования с постоянной величиной токового коридора. В соответствии с такими способами были проведены исследования различных структур СПК трехфазных ККМ, рассмотренных в Главе 1. Следует отметить, что такая реализация способов совместного общего и раздельного пофазного управления требует разработки относительно простых схем управления трехфазными ККМ по сравнению с ШИМ и ШИР [86-91].

2.1 Способ совместного общего управления СПК трехфазных ККМ

На рисунке 2.2 представлена разработанная структурная схема трехфазного ККМ с совместным общим релейным управлением с подчиненным регулированием по пиковому значению фазных токов.

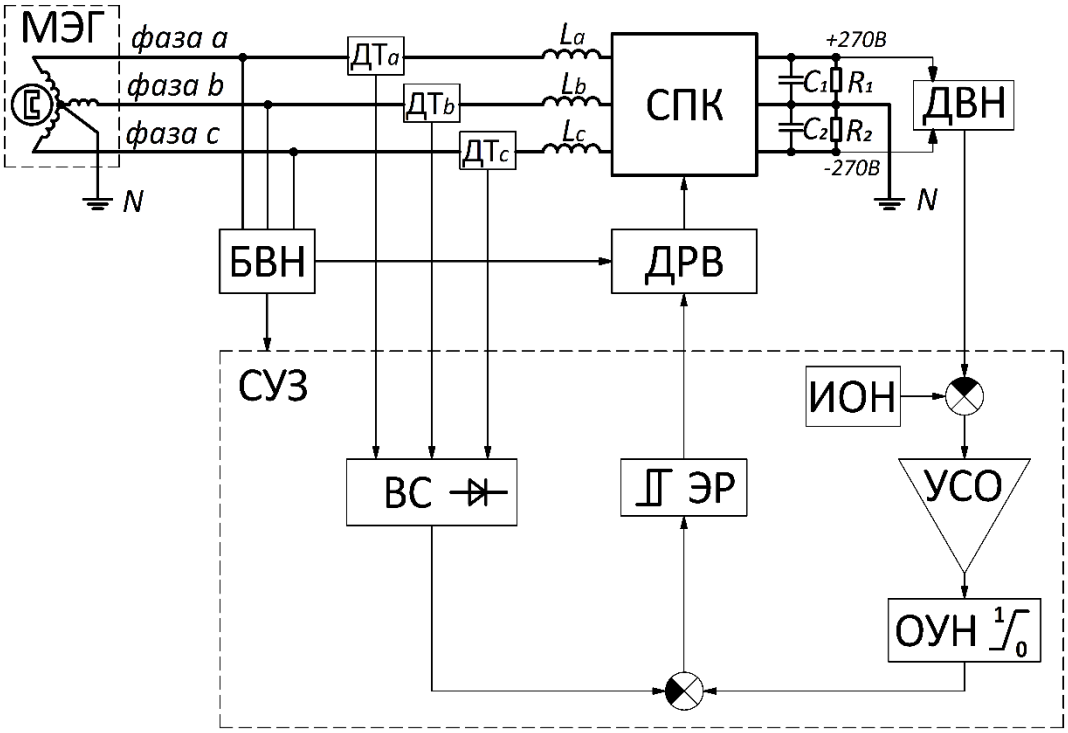


Рисунок 2.2 – Структурная схема трехфазного ККМ с совместным общим управлением

На структурной схеме, показанной на рисунке 2.2, приняты следующие обозначения:

БВН – блок вспомогательных напряжений;

СУЗ – система управления и защиты;

ВС – выпрямитель сигналов, поступающих с датчиков фазных токов;

ЭР – электронное реле;

ИОН – источник опорного напряжения;

УСО – усилитель сигнала ошибки;

ОУН – ограничитель уровня напряжения.

Остальные обозначения на рисунке 2.2 аналогичны приведенным на структурной схеме на рисунке 1.1.

Рассматриваемый способ совместного общего управления СПК трехфазного ККМ реализуется двухконтурной замкнутой системой автоматического управления с подчиненным регулированием по фазным токам (внутренний контур регулирования) и по отклонению выходного постоянного напряжения от заданного значения (внешний контур регулирования). Обратная связь внутреннего контура регулирования осуществляется при помощи датчиков фазных токов (ДТ$_a$, ДТ$_b$, ДТ$_c$) и выпрямителя сигналов, поступающих с этих датчиков (ВС). Обратная связь внешнего контура регулирования осуществляется при помощи датчика выходного напряжения (ДВН), выходной сигнал которого сравнивается с заданным эталонным напряжением источника опорного напряжения (ИОН). Полученный сигнал рассогласования подается на усилитель сигнала ошибки (УСО) со звеном коррекции. Усиленный и скорректированный сигнал рассогласования поступает на ограничитель уровня напряжения (ОУН), который необходим для защиты системы от аварийных перегрузок по току. Регулирование фазных токов осуществляется при помощи электронного реле (ЭР) по принципу токового коридора. Необходимо отметить, что для обеспечения устойчивой работы трехфазного

ККМ внутренний контур регулирования по току должен быть существенно более быстрым, чем внешний контур регулирования по напряжению [92-95].

В соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 2.2, в системе Orcad Pspice была разработана имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с совместным общим управлением. Разработанная компьютерная модель приведена на рисунке 2.3.

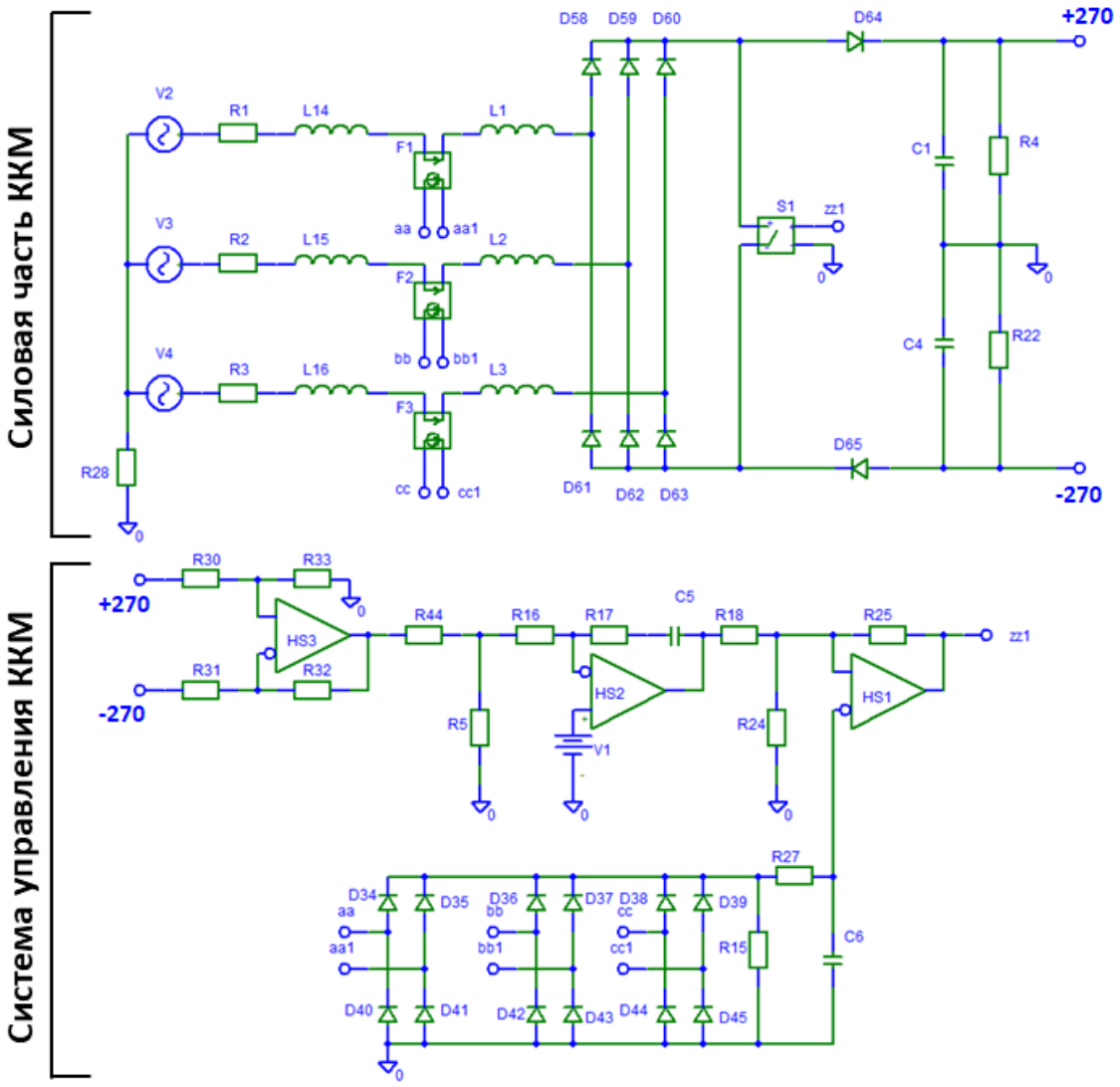


Рисунок 2.3 – Имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с совместным общим управлением

Силовая часть трехфазного ККМ, входящая в состав имитационной компьютерной модели, показанной на рисунке 2.3, построена на основе структуры СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с одиночным СТК (S1) и дросселями

переменного тока (L1-L3), характеристики которой были исследованы в разделе 1.1 Главы 1. Источники V2-V4 совместно с резисторами R1-R3 и индуктивностями L14-L16 имитируют работу трехфазного МЭГ. Элементы C1, C4 выполняют роль выходных сглаживающих конденсаторов звена постоянного тока. Резисторы R4 и R22 выполняют роль внешней активной нагрузки.

В системе управления трехфазного ККМ роль ДВН выполняет дифференциальный усилитель HS3, измеряющий суммарное выходное постоянное напряжение по каналам +270 В и –270 В. Операционный усилитель HS2 выполняет роль УСО. В качестве ИОН выступает источник V1. Резистор R13 и конденсатор C3, а также резистор R27 и конденсатор C6 выполняют роль цепей коррекции, обеспечивающих устойчивую работу внешнего и внутреннего контуров регулирования системы управления трехфазным ККМ. Электронное реле с постоянным гистерезисом выполнено на операционном усилителе HS1. Элементы F1-F3 выполняют роль датчиков фазных токов. Диоды D34-D45 используются в качестве мостовых двухполупериодных выпрямителей, нагруженных на резистор R15.

На рисунке 2.4 показана форма потребляемого фазного тока по фазе А, полученная в результате проведенного ИКМ разработанной модели трехфазного ККМ с совместным общим управлением.

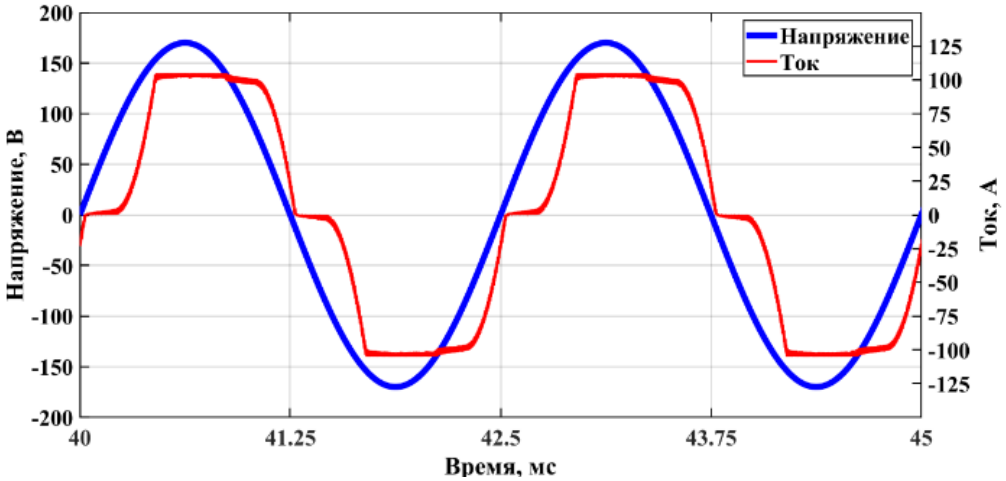


Рисунок 2.4 – Временная диаграмма потребляемого фазного тока в трехфазном ККМ с совместным общим управлением

Временная диаграмма, показанная на рисунке 2.4 получена при моделировании работы трехфазного ККМ при выходной мощности 25 кВт. Перед проведением ИКМ заданы входные действующие значения фазных напряжений 120 В частотой 400 Гц. Полученные формы потребляемых фазных токов по фазам B и C идентичны форме тока, приведенной на временной диаграмме на рисунке 2.4. Трехфазный ККМ с совместным общим управлением обеспечивает не самые высокие показатели качества потребляемой электроэнергии. При указанной выходной мощности усредненный коэффициент мощности по трем фазам равен 0,915, а усредненный коэффициент гармоник потребляемых фазных токов по трем фазам равен 6,65%. Указанные коэффициенты вычислены при помощи ранее приводимых в разделе 1.1 Главы 1 выражений (1.1) – (1.2). Коэффициенты гармоник потребляемых фазных токов вычислены по первым сорока гармоникам фазных токов. Также из временной диаграммы на рисунке 2.4 видно, что форма потребляемых фазных токов отлична от чисто синусоидальной. Не самые высокие обеспечиваемые показатели качества потребляемой электроэнергии являются главным недостатком способа совместного общего управления СПК трехфазных ККМ. Основным достоинством такого способа управления СПК трехфазных ККМ является простота схемотехнической реализации системы управления по сравнению со способом раздельного пофазного управления. Малое количество электронных компонентов в схеме системы управления СПК трехфазного ККМ, приведенной на рисунке 2.3, позволяет упростить разработку и реализовать устройство с низкой стоимостью.

2.2 Способ раздельного пофазного управления СПК трехфазных ККМ

На рисунке 2.5 представлена разработанная структурная схема трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением (с раздельным независимым управлением фазными токами).

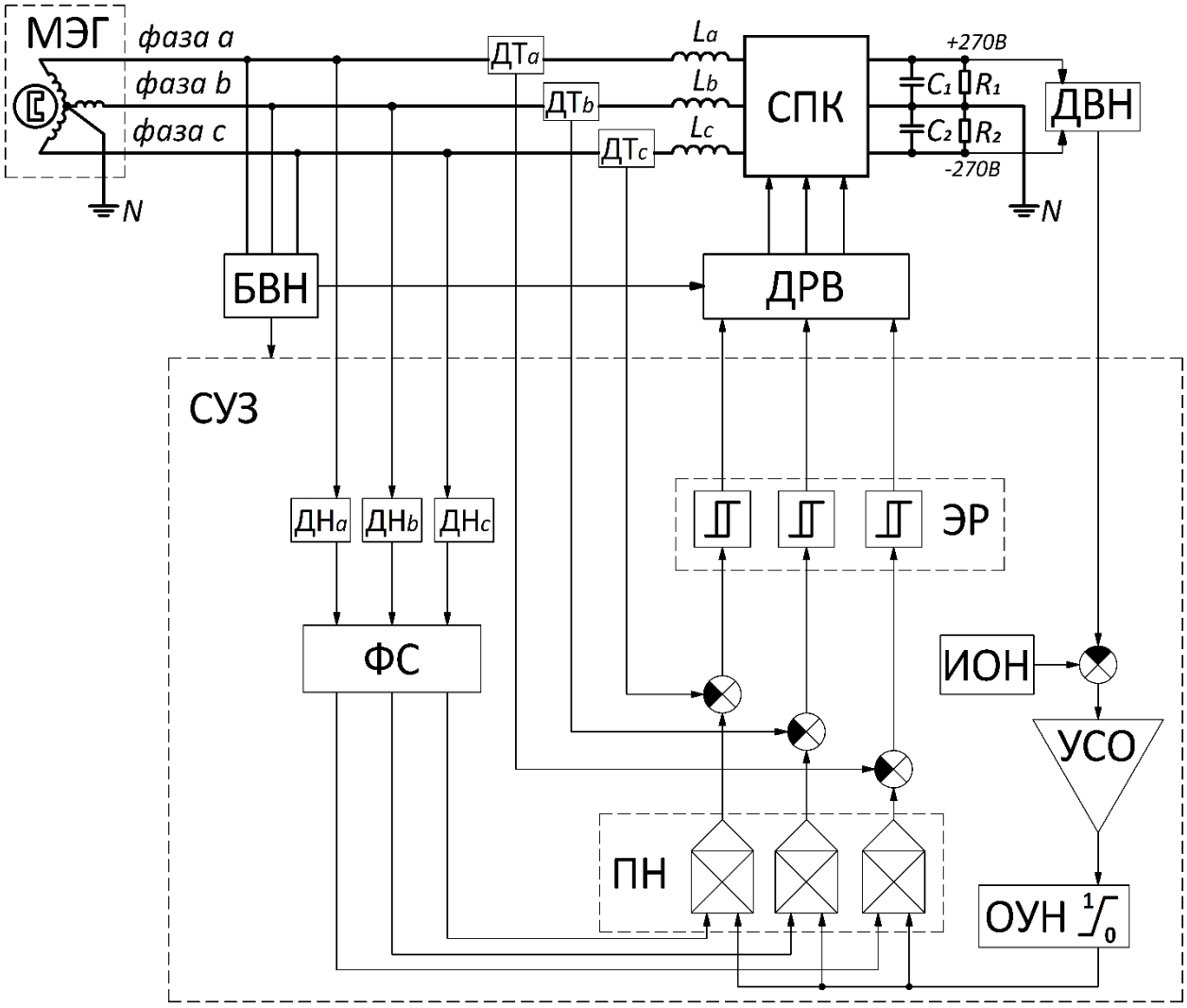


Рисунок 2.5 – Структурная схема трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением

На структурной схеме, показанной на рисунке 2.5, приняты следующие обозначения:

ДН$_a$, ДН$_b$, ДН$_c$ – датчики фазного напряжения;

ФС – формирователь сигнала;

ПН – перемножитель напряжений.

Остальные обозначения на рисунке 2.5 аналогичны приведенным на структурных схемах на рисунках 1.1 и 2.1.

Рассматриваемый способ раздельного пофазного управления СПК трехфазного ККМ реализуется двухконтурной замкнутой системой автоматического управления с подчиненным регулированием по фазным токам

(внутренний контур регулирования) и по отклонению выходного постоянного напряжения от заданного значения (внешний контур регулирования), как и способ совместного общего управления. Различие способов заключается в том, что обратная связь внутреннего контура осуществляется при помощи датчиков фазных токов (ДТ$_a$, ДТ$_b$, ДТ$_c$), а опорным напряжением для внутреннего контура являются сигналы, поступающие с датчиков фазных напряжений (ДН$_a$, ДН$_b$, ДН$_c$). Однако, напрямую эти сигналы непригодны для использования в качестве опорных из-за их искаженности высокочастотными гармоническими составляющими вследствие коммутации СТК, происходящих в процессе работы СПК трехфазного ККМ. Для формирования надлежащих сигналов требуется использование специальных схем формирователей сигналов (ФС) синусоидальной формы. Принцип работы предложенных схем ФС будет подробно рассмотрен в разделе 4.2 Главы 4, посвященной схемотехнической реализации функциональных узлов, обеспечивающих работу трехфазных ККМ. Выходные сигналы ФС при помощи перемножителей напряжений (ПН) перемножаются с выходным сигналом ограничителя уровня напряжения (ОУН) и поступают на сумматоры. С сумматоров сигналы поступают на электронное реле (ЭР), осуществляющее коммутацию СТК СПК и регулирование фазных токов по принципу токового коридора с постоянным гистерезисом. Также, как и для способа совместного общего управления СПК трехфазного ККМ необходимо, чтобы внутренний контур регулирования по току был существенно более быстрым, чем внешний контур регулирования по напряжению для обеспечения устойчивой работы трехфазного ККМ [92-95].

В соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 2.5, в системе Orcad Pspice была разработана имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением. Разработанная компьютерная модель приведена на рисунке 2.6.

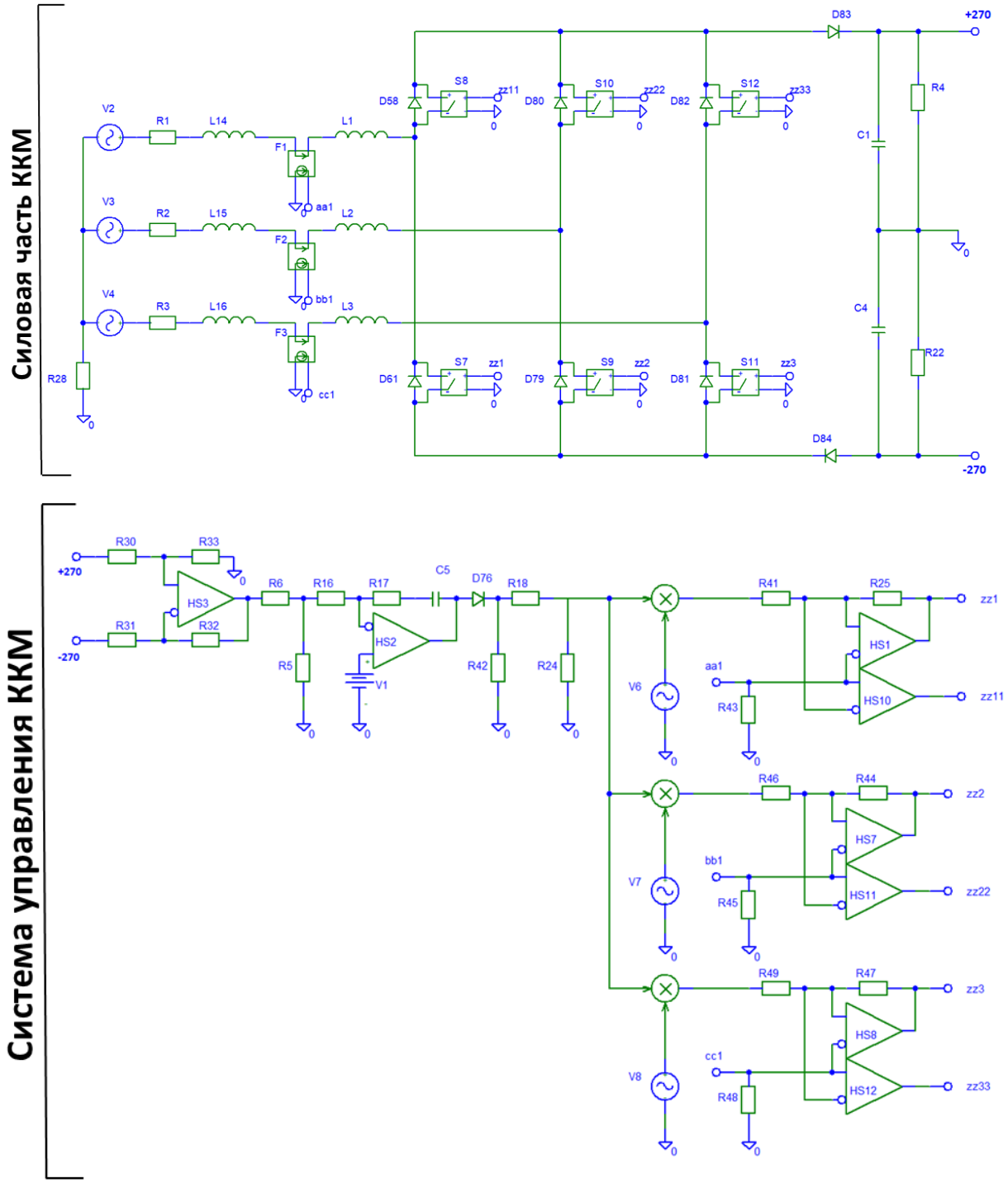


Рисунок 2.6 – Имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением

Силовая часть трехфазного ККМ, входящая в состав имитационной компьютерной модели, показанной на рисунке 2.6, построена на основе структуры СПК №8 (рисунок 1.9 (г)) с трехфазным транзисторным мостом (ключи Z7-Z12), характеристики которой были исследованы в разделе 1.2

Главы 1. Остальные элементы силовой части трехфазного ККМ выполняют функции, аналогичные описанным для модели, приведенной на рисунке 2.3.

Следует отметить, что источники опорного напряжения V6, V7, V8, входящие в состав компьютерной модели системы управления трехфазного ККМ, имитируют выходные фазные напряжения МЭГ, которые в реальности должны быть получены при помощи датчиков фазных напряжений и специальных схем, входящих в состав ФС.

На рисунке 2.7 показана форма потребляемого фазного тока по фазе а, полученная в результате проведенного ИКМ разработанной модели трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением.

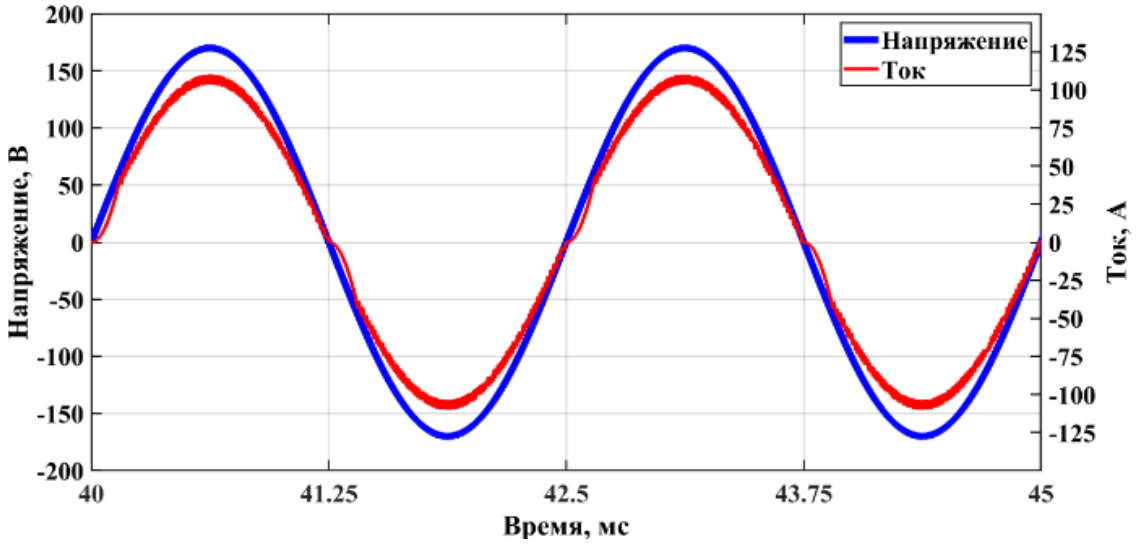


Рисунок 2.7 – Временная диаграмма потребляемого фазного тока в трехфазном ККМ с раздельным пофазным управлением

Временная диаграмма, показанная на рисунке 2.7, получена при проведении ИКМ с теми же параметрами, как и для модели трехфазного ККМ с совместным общим управлением. Для фазы b и фазы c были получены формы потребляемых фазных токов, идентичные форме тока, приведенной на временной диаграмме на рисунке 2.7.

Трехфазный ККМ с раздельным пофазным управлением обеспечивает наиболее высокие показатели качества потребляемой электроэнергии. При

выходной мощности 25 кВт вычисленный коэффициент мощности составляет 0,99. Коэффициент гармоник потребляемых фазных токов не превышает 3%. Также временная диаграмма на рисунке 2.6 демонстрирует, что форма потребляемых фазных токов близка к чисто синусоидальной. Наиболее высокие обеспечиваемые показатели качества потребляемой электроэнергии являются главным достоинством способа раздельного пофазного управления СПК трехфазных ККМ. Однако, сложность схемотехнической реализации системы управления СПК трехфазных ККМ является основным его недостатком по сравнению со способом совместного общего управления. Важной принципиальной особенностью рассмотренного способа управления является использование перемножителей напряжений, вносящих дополнительную нелинейность в систему управления, что следует принимать во внимание при разработке устройств управления СПК трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением [95].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Предложена классификация способов управления СПК трехфазных ККМ.
2. Предложена структурная схема трехфазного ККМ с совместным общим релейным управлением фазными токами и подчиненным регулированием.
3. Разработана схемотехническая реализация устройства управления трехфазного ККМ с совместным общим управлением.
4. Предложена структурная схема трехфазного ККМ с раздельным пофазным релейным управлением фазными токами и подчиненным регулированием.
5. Разработана схемотехническая реализация устройства управления трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением.
6. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением.
7. Приведены временные диаграммы электрических процессов и вычислены показатели качества потребляемой электроэнергии при работе трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением, полученные с помощью ИКМ.
8. Приведены достоинства и недостатки предложенных способов совместного общего и раздельного пофазного управления СПК трехфазных ККМ.

ГЛАВА 3 СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИММЕТРИЧНОГО ДВУПОЛЯРНОГО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Одним из преимуществ построения перспективной авиационной СЭС на основе общей шины постоянного тока с выходным двуполярным напряжением ±270 В относительно нейтрали является возможность гибкого подключения нагрузки. Трехпроводная шина с выходным напряжением ±270 В позволяет использовать как половину напряжения за счет включения нагрузки между нейтралью и одним из каналов ±270 В, так и полное напряжение 540 В. Это позволяет добиться наиболее рационального распределения мощности в СЭС ЛА и, в конечном счете, улучшить удельные показатели первичных трехфазных МЭГ [28-29]. В зависимости от этапа полета ЛА и в процессе каждого этапа полета величины нагрузок и, соответственно, выходная мощность по каналам ±270 В могут изменяться [96-98]. Это приводит к отклонению выходного двуполярного напряжения от номинального значения ±270 В. Исходя из существующих требований, предъявляемых к СЭС постоянного тока номинальным напряжением 270 В, утвержденных ГОСТ Р 54073-2017, допустимо предельное отклонение выходного напряжения на величину ±10 В [30]. Однако, возникающая несимметрия нагрузок может приводить к превышению этого значения, и в таком случае возникает необходимость симметрирования выходного двуполярного напряжения. В данной главе представлены разработанные способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения трехфазных четырехпроводных корректоров коэффициента мощности при работе на несимметричную нагрузку. Следует провести разделение предложенных способов симметрирования в зависимости от их применимости к трехфазным ККМ в зависимости от способов управления СПК, рассмотренных в Главе 2. Первый способ предназначен для использования в трехфазных ККМ как с совместным общим, так и с раздельным пофазным управлением. Второй

способ применим для использования в трехфазных ККМ только с раздельным пофазным управлением.

3.1 Способ симметрирования двуполярного выходного напряжения трехфазных ККМ с совместным общим и раздельным пофазным управлением

Первый предложенный способ обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения ±270 В при несимметричной нагрузке заключается в использовании в структуре трехфазного ККМ устройства симметрирования (УС) на выходе основного 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 3.1.

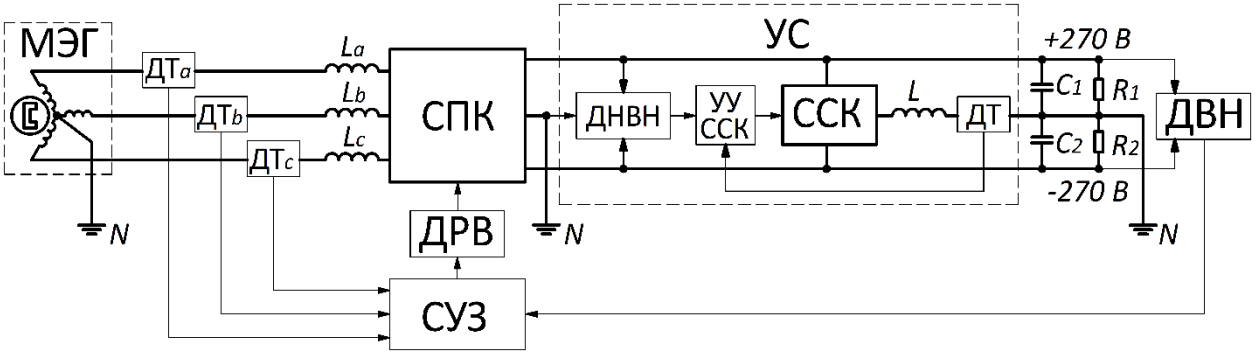


Рисунок 3.1 – Структурная схема трехфазного ККМ с устройством симметрирования двуполярного выходного напряжения

На структурной схеме, показанной на рисунке 3.1, приняты следующие обозначения:

УС – устройство симметрирования;

ДНВН – датчик несимметрии выходного напряжения;

УУ ССК – устройство управления симметрирующим силовым каскадом;

ССК – симметрирующий силовой каскад;

ДТ – датчик тока.

Остальные обозначения на рисунке 3.1 аналогичны приведенным на структурной схеме на рисунке 1.1.

Принцип действия УС заключается в следующем. 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 каналам +270 В или -270 В в зависимости от несимметрии напряжения, в результате чего напряжение на нагрузке принимает номинальное значение. ДТ выдает сигнал по току симметрирования, который поступает на УУ ССК для осуществления ограничения максимального допустимого тока при симметрировании. 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 рассматриваемого способа симметрирования двуполярного выходного напряжения.

Для подтверждения работоспособности и проведения исследований предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения в рассмотренную ранее имитационную компьютерную модель трехфазного ККМ (рисунок 2.3) со структурой СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с одиночным СТК, с дросселями переменного тока, работающей при совместном общем управлении, была встроена разработанная имитационная компьютерная модель УС. На рисунке 3.2 показана созданная результирующая имитационная компьютерная модель в системе Orcad Pspice трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения, которая реализована предложенным способом.

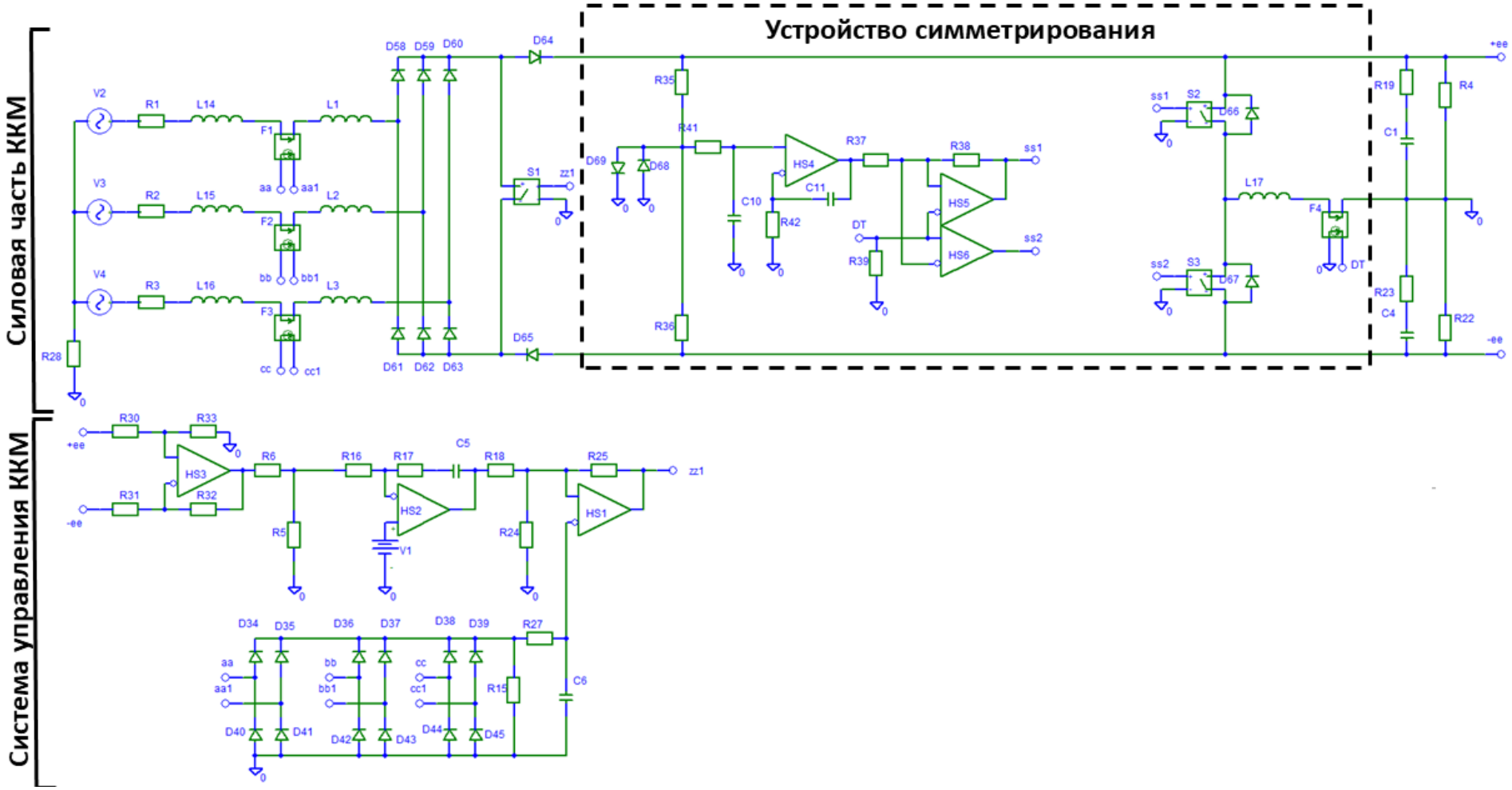
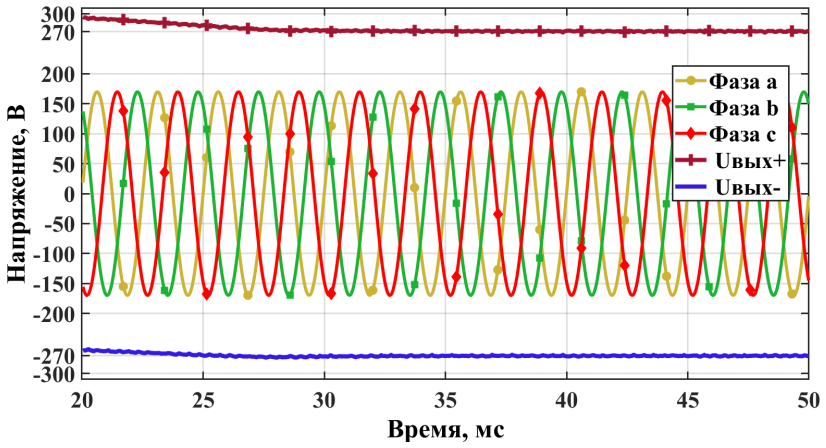
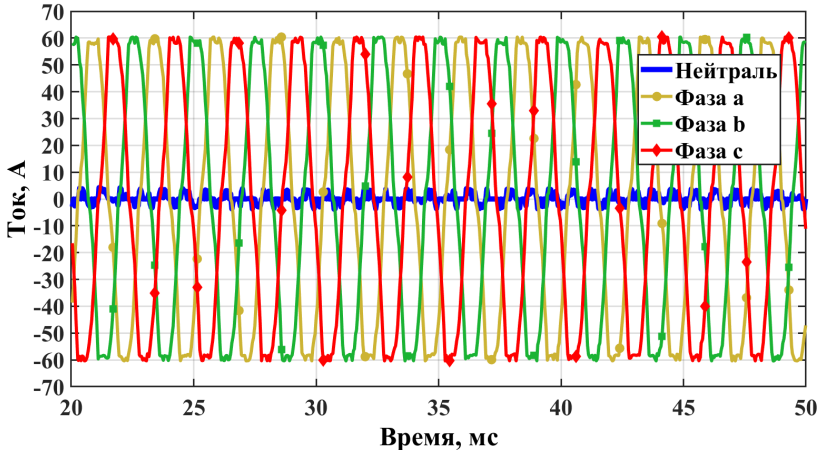


Рисунок 3.2 – Имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с устройством симметрирования двуполярного выходного напряжения

В соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 3.1, в состав УС на имитационной компьютерной модели на рисунке 3.2 входят: ДНВН, выполненный на резисторах одинакового номинала R35, R36; УУ ССК, выполненное на основе операционных усилителей HS4, HS5, HS6; ССК, выполненный на основе СТК S2, S3; дроссель L17 и датчик тока F7. Для функционирования ССК принципиально необходимо наличие встроенных обратных диодов у силовых транзисторов S2, S3, либо использование отдельных диодов, включаемых встречно к ним. При выполнении ИКМ на выходе трехфазного ККМ была включена несимметричная нагрузка путем задания в модели сопротивлений нагрузочных резисторов по каналам +270 В и -270 В, отличающихся в полтора раза. Результаты проведенного ИКМ продемонстрированы на рисунке 3.3.



а)



б)

Рисунок 3.3 – Временные диаграммы процессов при работе устройства симметрирования выходного напряжения (а – фазные напряжения и выходные постоянные напряжения, б – фазные токи и ток нейтрали)

На временных диаграммах на рисунке 3.3 показаны фазные напряжения, выходные постоянные напряжения относительно нейтрали, фазные токи и ток нейтрали. На временной диаграмме напряжений видно, что в начальный момент времени выходные напряжения отклоняются от уровня ±270 В, после чего происходит процесс симметрирования, приводящий их к номинальному уровню.

Неизбежным побочным явлением в процессе симметрирования двуполярного выходного напряжения является изменение тока нейтрали, в том числе – возникновение постоянной составляющей в нем. Для проведения количественной оценки этих изменений в процессе симметрирования были исследованы зависимости коэффициента тока нейтрали, вычисляемого при помощи выражения (1.3) – действующего значения тока нейтрали относительно тока фазы, и постоянной составляющей тока нейтрали относительно тока фазы от уровня несимметрии нагрузки. Исследование было проведено в диапазоне несимметрии нагрузки, который варьировался от 0 до 100%, для этого в модели задавалась соответствующая разница между сопротивлениями нагрузочных резисторов по каналам +270 В и -270 В. Уровень несимметрии нагрузки был вычислен при помощи выражения (3.1).

$$\delta R = \frac{R_{\text{н}1} - R_{\text{н}2}}{R_{\text{н}2}} \cdot 100\%\,, \tag{3.1}$$

где δR – уровень несимметрии нагрузки, %; $R_{\text{н}1}$ – сопротивление нагрузки по каналу +270 В, Ом; $R_{\text{н}2}$ – сопротивление нагрузки по каналу -270 В, Ом.

Для оценки постоянной составляющей тока нейтрали относительно тока фазы вычислялось среднее значение тока нейтрали в соответствии с выражением (3.2).

$$K_{\text{пост}.N} = \frac{I_{\text{ср}.N}}{I_{\text{ф}}} = \frac{\frac{1}{T}\int_0^T i_N(t)dt}{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T {i_{\text{ф}}}^2(t)dt}}\,, \tag{3.2}$$

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

Результаты проведенного исследования зависимостей относительных значений действующего и среднего тока нейтрали от уровня несимметрии нагрузки, полученные при помощи ИКМ, приведены на рисунке 3.4.

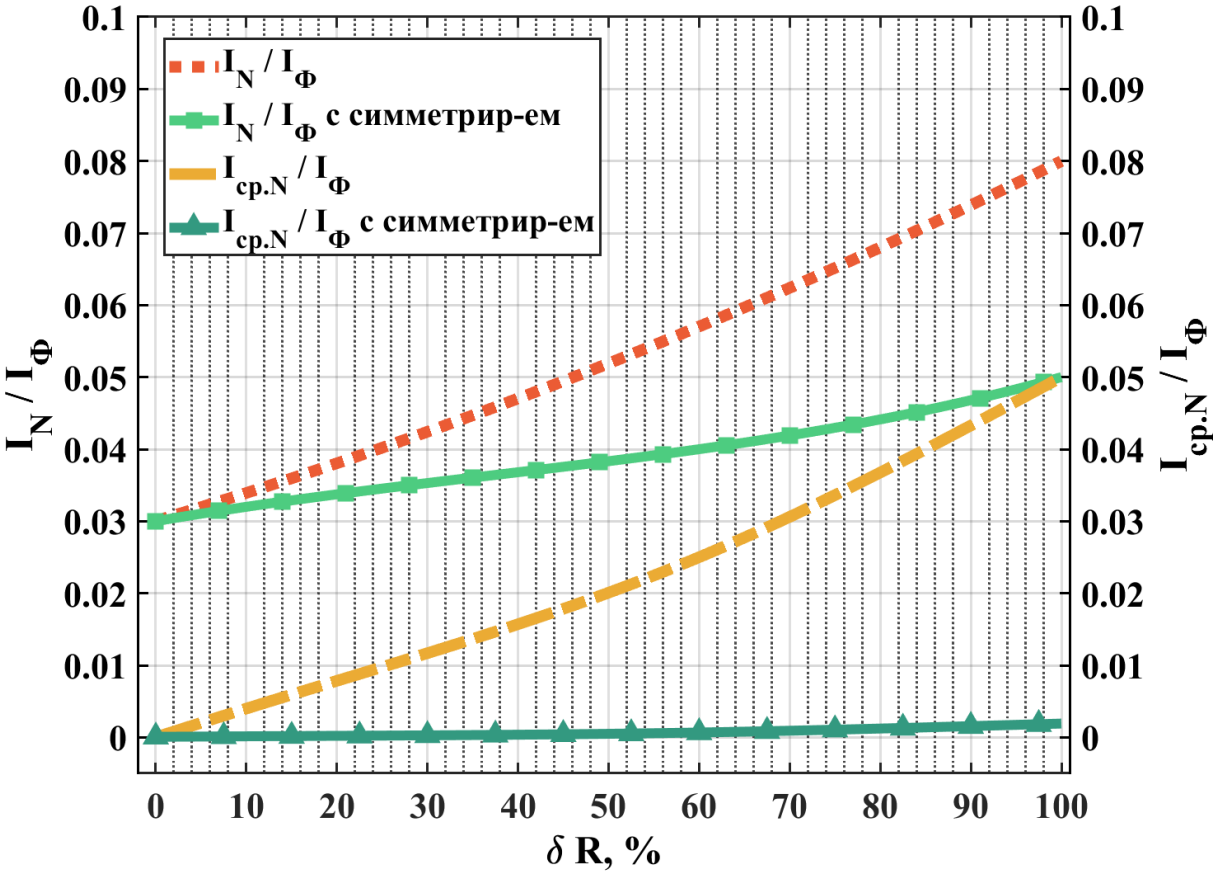


Рисунок 3.4 – График зависимости относительных значений действующего и среднего тока нейтрали от уровня несимметрии нагрузки при работе устройства симметрирования

На графике на рисунке 3.4 показаны зависимости относительных значений действующего тока нейтрали и его постоянной составляющей от уровня несимметрии нагрузки. Зависимости, обозначенные пунктирными линиями, были построены в режиме отсутствия симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке. Зависимости, обозначенные сплошными

линиями с маркерами, построены в режиме симметрирования двуполярного напряжением предложенным способом за счет использования УС. Сравнивая соответствующие зависимости, 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. Данные результаты положительно влияют на параметры тока в нейтральном проводе, что в конечном счете позволяет облегчить обеспечение требуемых параметров электромагнитной совместимости бортового оборудования ЛА.

Было проведено исследование работоспособности предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения в диапазоне несимметрии нагрузки от 0 до 100%. Для этого при помощи ИКМ были исследованы значения выходного напряжения по каналам +270 В и -270 В и при помощи выражения (3.3) был вычислен уровень несимметрии напряжений.

$$\delta U = \frac{\left|U_{+270} - |U_{-270}|\right|}{|U_{-270}|} \cdot 100\%\,, \tag{3.3}$$

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

Для демонстрации уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения и работоспособности предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения в указанном диапазоне несимметрии нагрузки было выполнено ИКМ в режиме отсутствия симметрирования при несимметричной нагрузке и в режиме симметрирования выходного напряжения. По результатам проведенных исследований построен график зависимости уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения от уровня несимметрии нагрузки, показанный на рисунке 3.5.

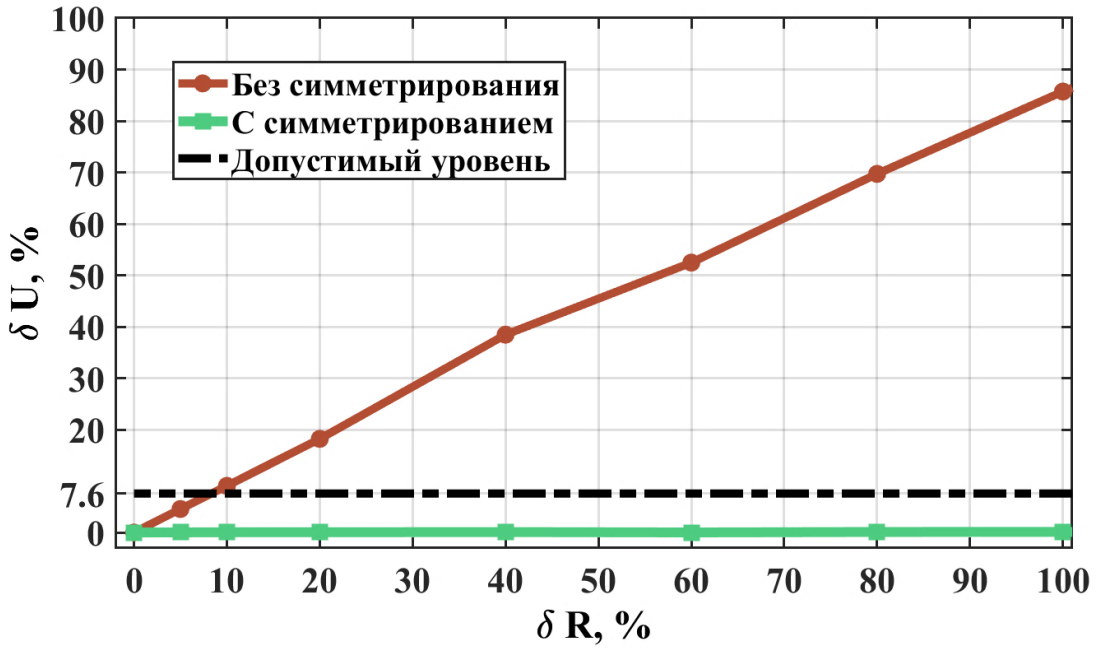


Рисунок 3.5 – График зависимости уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения от уровня несимметрии нагрузки при работе устройства симметрирования

Из рисунка 3.5 видно, что при уровне несимметрии нагрузки менее 10% уровень несимметрии выходного напряжения уже превышает допустимое значение 7,6%, соответствующее отклонению ±10 В по требованиям ГОСТ Р 54073-2017 [30]. Дальнейшее увеличение несимметрии нагрузки приводит к еще большему (недопустимому) уровню несимметрии двуполярного выходного напряжения. При этом предложенный способ симметрирования обеспечивает уровень несимметрии двуполярного выходного напряжения близкий к нулю во всем рассмотренном диапазоне несимметрии нагрузки от 0 до 100%. Таким образом, функционирование трехфазных ККМ без применения способов симметрирования двуполярного выходного напряжения возможно только в диапазоне несимметрии нагрузки менее 10%. Временная диаграмма выходных напряжений в данном предельном случае показана на рисунке 3.6. В этом случае напряжение по положительному каналу устанавливается на уровне +280 В, а по отрицательному каналу на уровне -260 В.

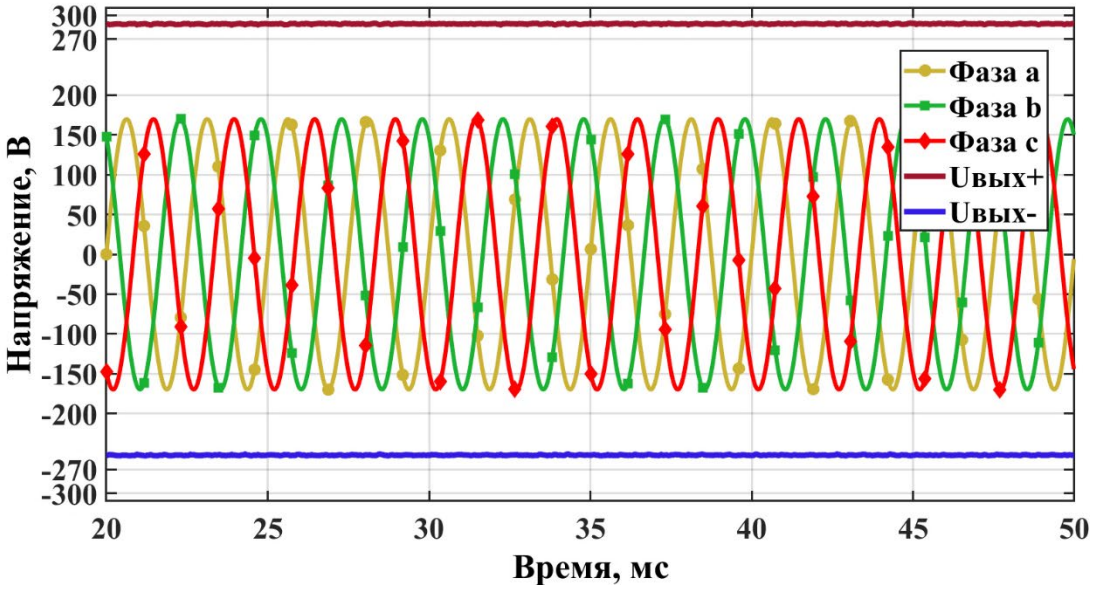


Рисунок 3.6 – Временная диаграмма двуполярного выходного напряжения при предельно допустимой несимметрии

Важно отметить, что предложенный способ симметрирования двуполярного выходного напряжения за счет использования независимого УС является универсальным. Он пригоден для использования в трехфазных ККМ как с совместным общим, так и с раздельным пофазным управлением СПК. Это обстоятельство следует отнести к достоинствам рассмотренного способа. Работоспособность такого способа была подтверждена на всех структурах СПК, исследованных в Главе 1. При помощи ИКМ были получены результаты, аналогичные показанным на рисунках 3.3-3.6. Недостатком данного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения является необходимость встраивания отдельного дополнительного устройства (УС) в структуру трехфазного ККМ, что усложняет его конструкцию и ухудшает удельные массо-габаритные показатели.

3.2 Способ симметрирования двуполярного выходного напряжения трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением

Второй предложенный способ обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения ±270 В при несимметричной нагрузке заключается во введении дополнительной обратной связи по несимметрии

выходного напряжения. Возможны два варианта реализации данного способа. Первый вариант предполагает суммирование сигнала несимметрии выходного напряжения с сигналами датчиков фазных токов. Реализация данного варианта показана на структурной схеме на рисунке 3.7.

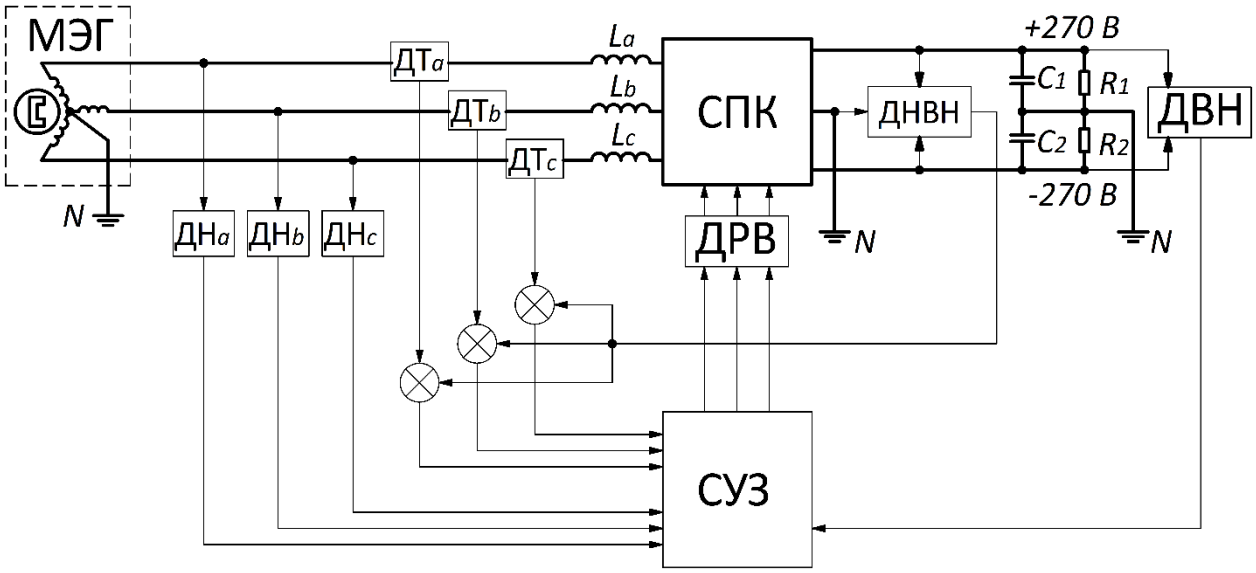


Рисунок 3.7 – Структурная схема трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения за счет суммирования сигнала несимметрии с сигналами датчиков фазных токов

Обозначения на рисунке 3.7 аналогичны приведенным на структурных схемах на рисунках 1.1 и 3.1.

Принцип работы данного предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения заключается в следующем. В случае, если по каналу +270 В выходное напряжение превышает номинальное значение, на выходе ДНВН появляется сигнал несимметрии, который суммируется с сигналом каждого датчика фазного тока ДТ$_a$, ДТ$_b$, ДТ$_c$. Суммированные сигналы поступают на СУЗ, которая выдает сигнал на запирание транзисторов СПК, что приводит к снижению тока нагрузки. Вследствие этого выходное напряжение по каналу +270 В снижается до установления номинального значения. Аналогичный процесс происходит при отклонении выходного напряжения от номинального значения по каналу -270 В. На рисунке 3.8 показана имитационная компьютерная модель трехфазного

ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения, которая реализована данным способом (первый вариант).

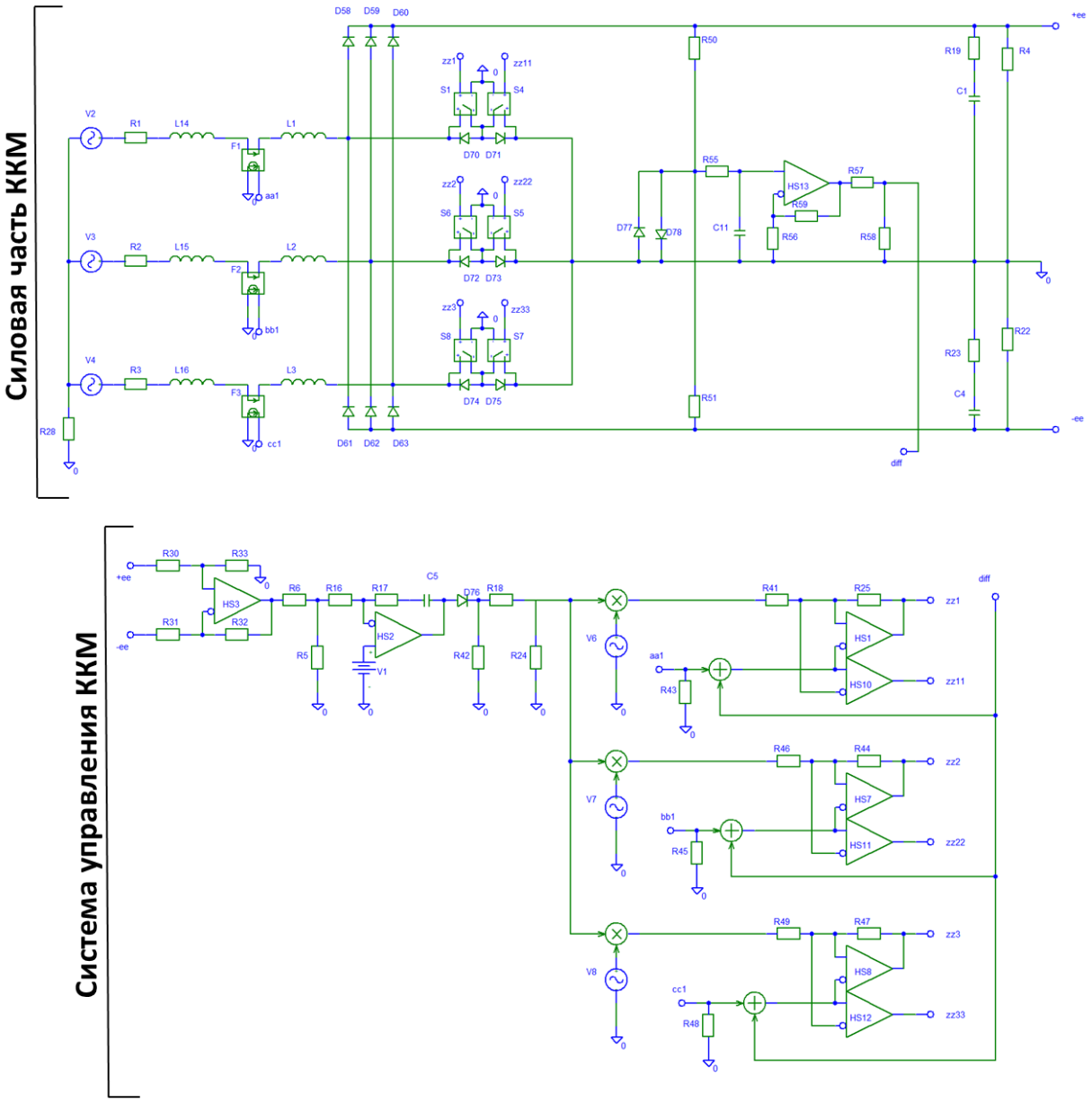
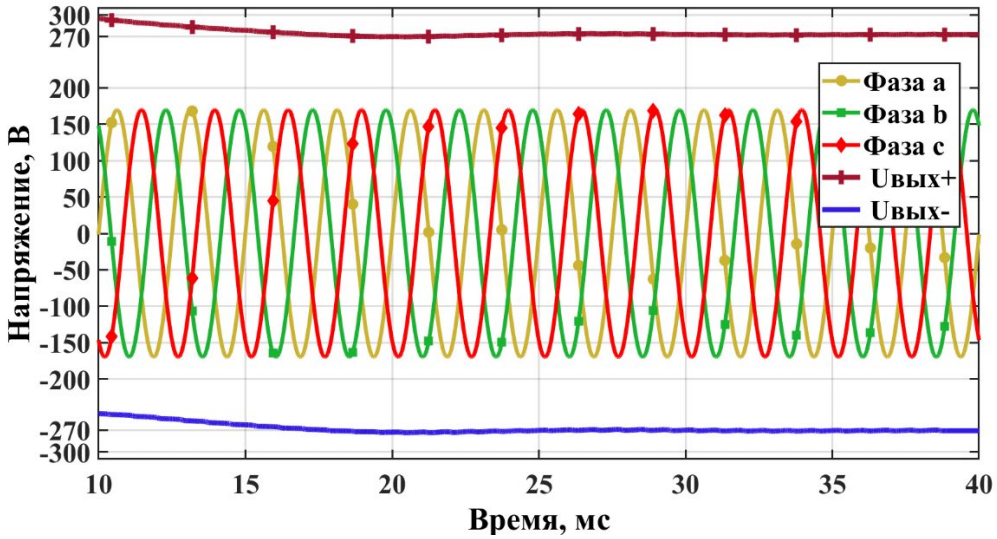


Рисунок 3.8 – Имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения за счет суммирования сигнала несимметрии с сигналами датчиков фазных токов

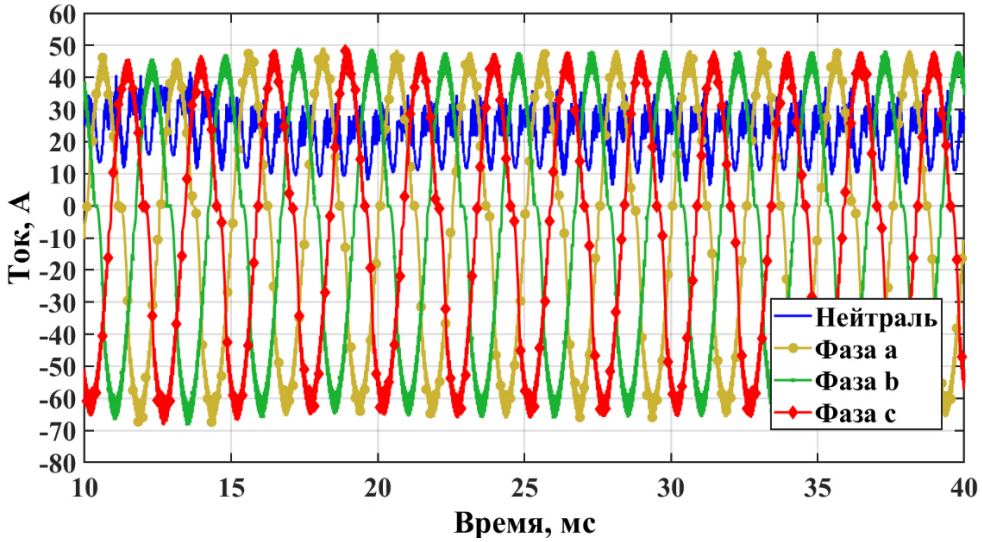
Показанная на рисунке 3.8 имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ построена на основе исследованной в разделе 1.2 Главы 1 структуры СПК №6 (рисунок 1.9 (б)) с тремя СТК переменного тока, с дросселями переменного тока, работающей при раздельном пофазном

управлении, и встроенного в нее ДНВН, реализованного так же, как и на имитационной компьютерной модели на рисунке 3.2.

Подтверждение работоспособности данного предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения проводилось аналогично, как и при рассмотрении первого способа симметрирования (раздел 3.1). Результаты проведенного ИКМ при отличающихся в полтора раза заданных сопротивлениях нагрузочных резисторов по каналам +270 В и -270 В показаны на временных диаграммах на рисунке 3.9.



а)



б)

Рисунок 3.9 – Временные диаграммы процессов при симметрировании двуполярного выходного напряжения за счет суммирования сигнала несимметрии с сигналами датчиков фазных токов (а – фазные напряжения и выходные постоянные напряжения, б – фазные токи и ток нейтрали)

Из временной диаграммы напряжений на рисунке 3.9 (а), видно изначальное отклонение выходных напряжений от номинальных значений, после чего происходит процесс симметрирования, приводящий их к номинальному уровню ±270 В. На временной диаграмме токов на рисунке 3.9 (б) видно, что в процессе симметрирования данным способом возникает значительная постоянная составляющая тока нейтрали.

Для оценки изменений тока нейтрали в процессе симметрирования данным способом были проведены исследования зависимости действующего значения тока нейтрали относительно тока фазы и постоянной составляющей тока нейтрали относительно тока фазы от уровня несимметрии нагрузки – аналогично, как и при рассмотрении первого предложенного способа (раздел 3.1). Результаты проведенного исследования, полученные при помощи ИКМ, приведены на рисунке 3.10.

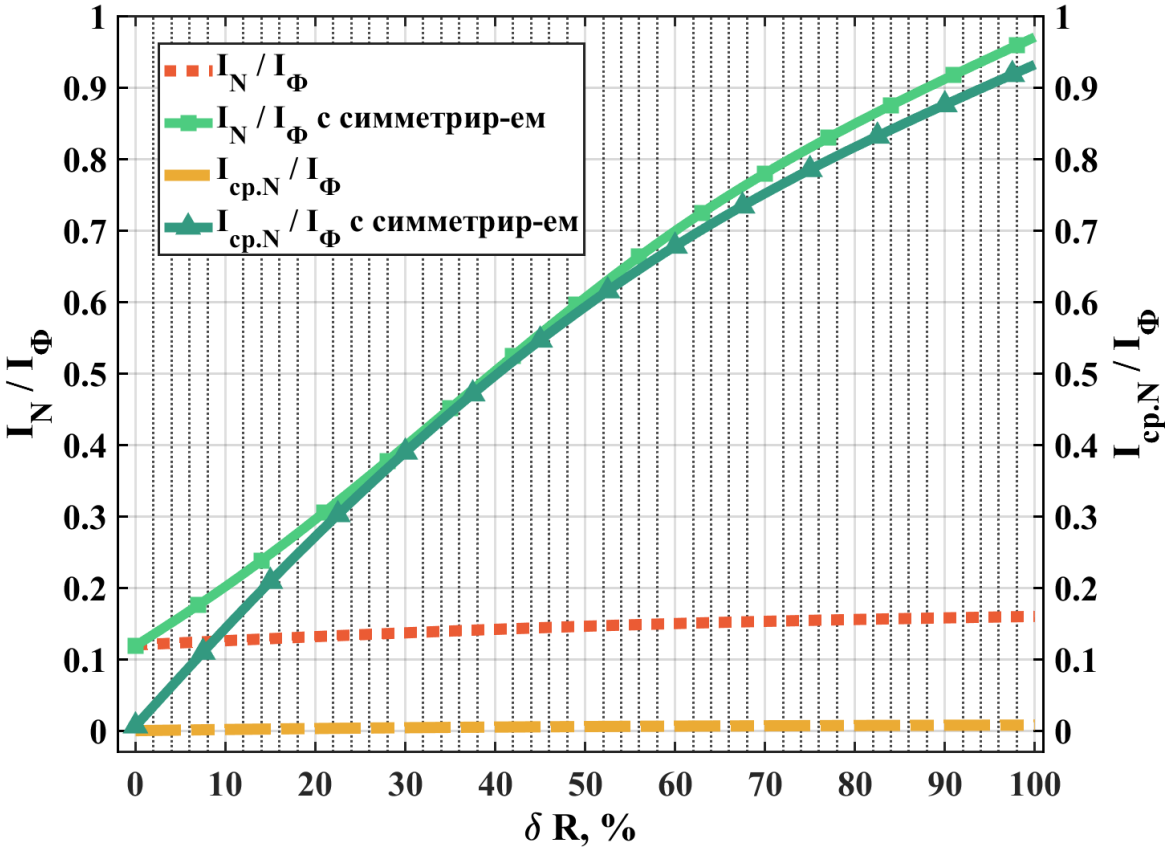


Рисунок 3.10 – График зависимости относительных значений действующего и среднего тока нейтрали от уровня несимметрии нагрузки при симметрировании за счет суммирования сигнала несимметрии с сигналами датчиков фазных токов

По рисунку 3.10 видно, что симметрирование двуполярного выходного напряжения данным способом приводит как к увеличению действующего значения тока нейтрали, так и к появлению существенной постоянной составляющей в нем. Столь значительное влияние данной схемы симметрирования на ток нейтрали является недостатком рассмотренного способа. В этой связи предложенный способ симметрирования двуполярного выходного напряжения может быть применен только для относительно маломощных преобразователей электроэнергии, в случае, когда увеличение тока нейтрали является допустимым.

Работоспособность предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения была исследована в диапазоне несимметрии нагрузки от 0 до 100% аналогично проведенному исследованию первого предложенного способа. На рисунке 3.11 показан график зависимости уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения от уровня несимметрии нагрузки, построенный в результате проведенных исследований при помощи ИКМ.

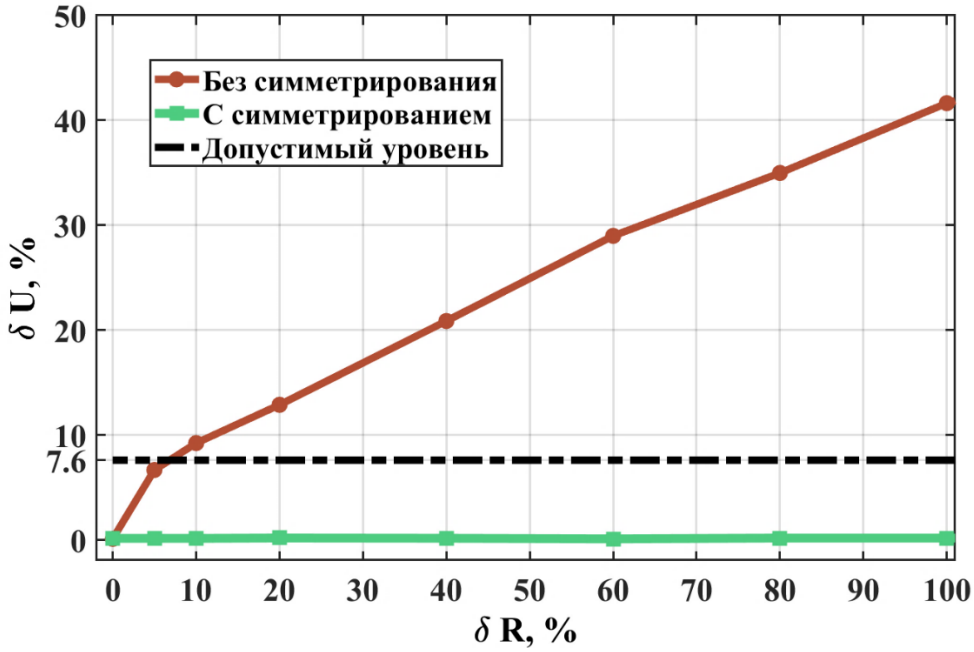


Рисунок 3.11 – График зависимости уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения от уровня несимметрии нагрузки при симметрировании за счет суммирования сигнала несимметрии с сигналами датчиков фазных токов

По рисунку 3.11 видно, что уровень несимметрии выходного напряжения в трехфазном ККМ с раздельным управлением примерно в два раза ниже по сравнению с ранее полученными результатами для трехфазного ККМ с совместным управлением, показанными на рисунке 3.5. Тем не менее, при несимметрии нагрузки еще менее 10% уровень несимметрии выходного напряжения уже превышает допустимое значение 7,6%. При этом предложенный способ симметрирования двуполярного выходного напряжения обеспечивает уровень его несимметрии близкий к нулю во всем рассмотренном диапазоне несимметрии нагрузки от 0 до 100%.

Второй вариант реализации предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения предполагает вычитание сигнала несимметрии выходного напряжения из опорных синусоидальных сигналов по фазному напряжению, получаемых при помощи датчиков напряжения ДН$_a$, ДН$_b$, ДН$_c$. Реализация данного варианта предложенного способа симметрирования показана на структурной схеме на рисунке 3.12.

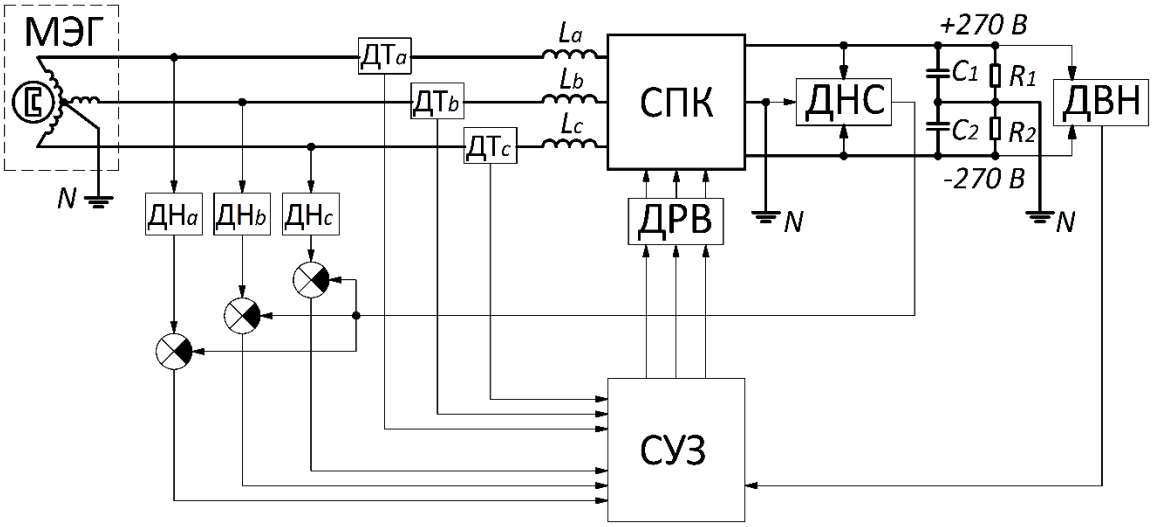


Рисунок 3.12 – Структурная схема трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения за счет вычитания сигнала несимметрии из опорных синусоидальных сигналов

На рисунке 3.13 показана имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения, которая реализована данным способом (второй вариант).

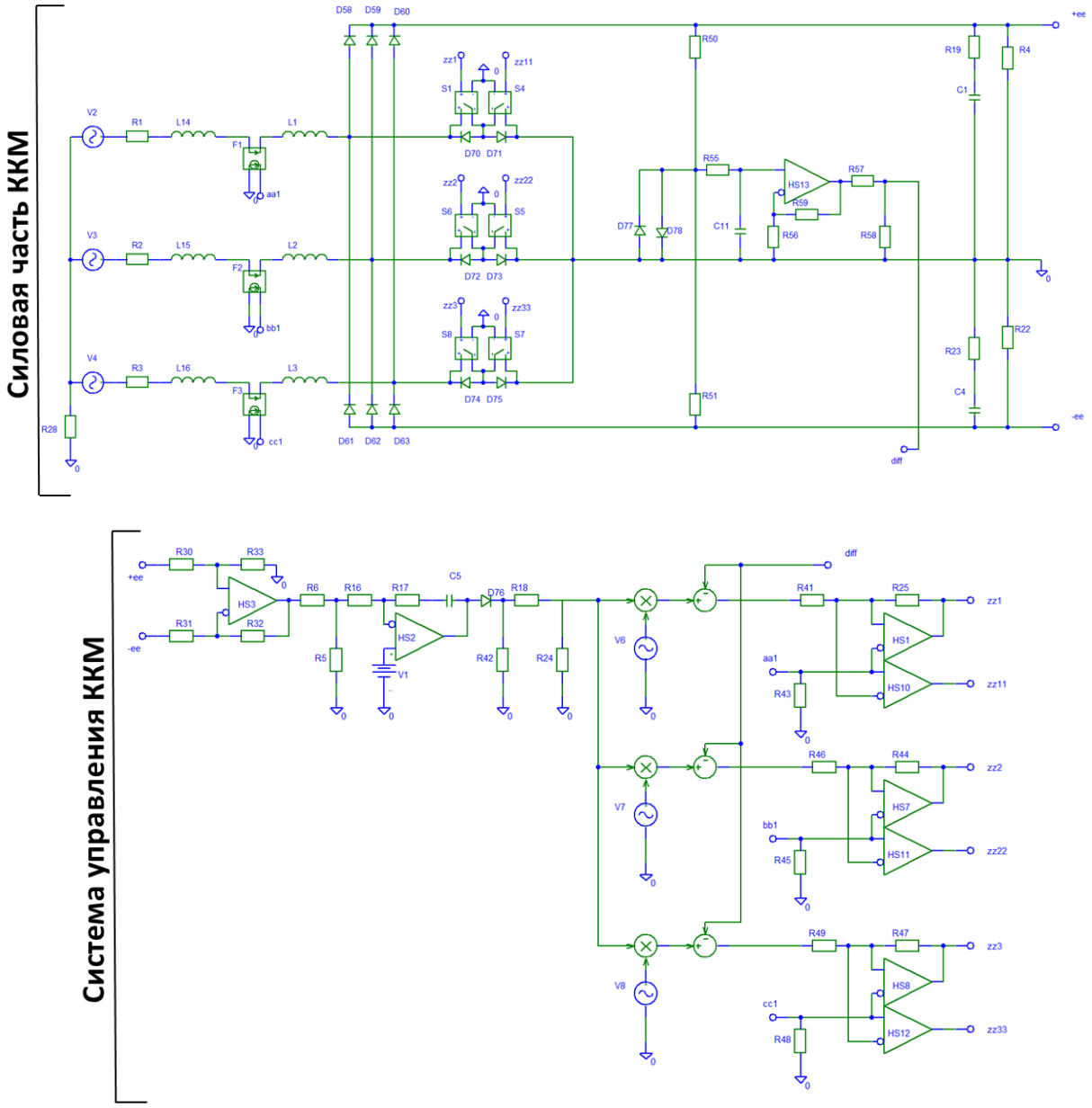


Рисунок 3.13 – Имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения за счет вычитания сигнала несимметрии из опорных синусоидальных сигналов

Проведенное ИКМ подтвердило работоспособность предложенного способа симметрирования двуполярного выходного напряжения, за счет вычитания сигнала несимметрии из опорных синусоидальных сигналов по фазным напряжениям. При помощи ИКМ были получены результаты, аналогичные продемонстрированным на временных диаграммах, приведенных на рисунке 3.9 и на графиках, показанных на рисунках 3.10-3.11.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

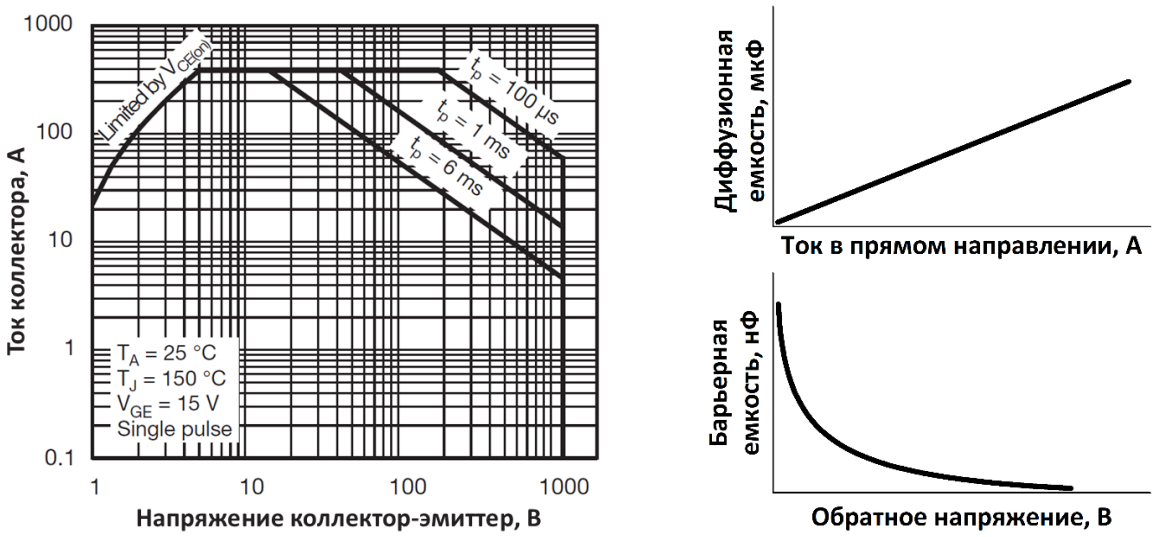
1. Предложены способы обеспечения симметричного двуполярного выходного напряжения при несимметричной нагрузке и приведены их достоинства и недостатки.
2. Разработаны структурные схемы трехфазных ККМ с совместным и раздельным управлением с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения.
3. Разработаны схемотехнические решения предложенных способов симметрирования двуполярного выходного напряжения.
4. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем трехфазных ККМ с функцией симметрирования двуполярного выходного напряжения.
5. Приведены временные диаграммы процессов, демонстрирующие работоспособность предложенных способов симметрирования двуполярного выходного напряжения, полученные с помощью ИКМ.
6. Исследованы зависимости уровня несимметрии двуполярного выходного напряжения в широком диапазоне несимметрии нагрузки.
7. Исследовано влияние предложенных схемотехнических решений на изменения параметров тока в нейтральном проводе.

ГЛАВА 4 СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ, ОБЕСПЕИВАЮЩИХ РАБОТУ ТРЕХФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

В данной главе рассмотрены предложенные способы построения функциональных узлов и схемотехнические решения, обеспечивающие работоспособность трехфазных ККМ в различных режимах. Глава включает три раздела: активный формирователь низкоэнергетической траектории переключения СТК, входящих в состав СПК трехфазных ККМ; способы формирования опорного трехфазного напряжения для трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением; устройство разрешения работы при пуске трехфазного ККМ.

4.1 Активный формирователь низкоэнергетической траектории переключения СТК, входящих в состав СПК трехфазных ККМ

Обеспечение безопасной и надежной работы СТК, входящих в состав СПК, является актуальной проблемой при проектировании мощных высоковольтных полупроводниковых преобразователей электроэнергии, к которым, в том числе, относятся трехфазные ККМ с двуполярным выходным напряжением [57-59]. Надежная работа СТК нормируется приводимой в технической документации областью безопасной работы (ОБР). ОБР для IGBT ключей VS-GT180DA120U [84] показана на рисунке 4.1 (а) [99]. Одной из причин выхода параметров СТК за пределы ОБР являются недопустимо большие броски тока при переключениях СТК, возникающие по причине рассасывания накопленных неосновных носителей заряда в блокирующих диодах, входящих в состав СПК трехфазных ККМ. Такое явление обуславливается диффузионной емкостью блокирующих диодов, прямо пропорциональной их прямому току. Зависимости диффузионной и барьерной емкости диодов показаны на рисунке 4.1 (б) [100-101].



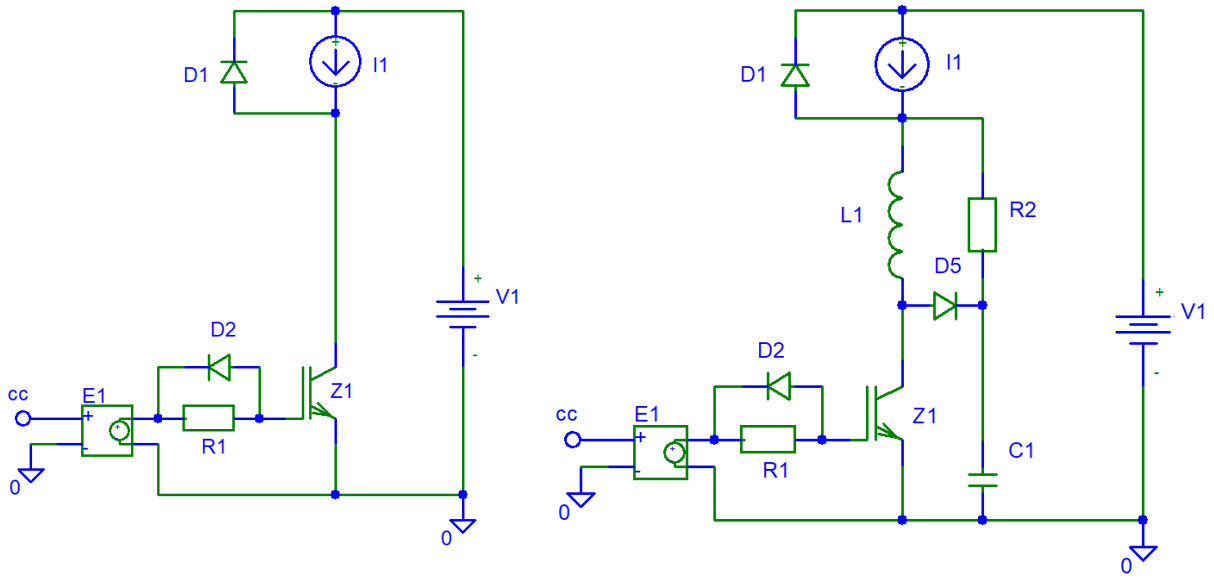
а) б)

Рисунок 4.1 – Зависимости параметров для силовых транзисторов и диодов (а – область безопасной работы; б – диффузионная и барьерная емкость)

В результате это приводит к многократному увеличению динамических потерь в СТК с последующим выходом их из строя. Такая проблема актуальна для любых импульсных схем, при этом наибольшее ее проявление наблюдается в мощных высоковольтных преобразователях электроэнергии, работающих в режиме безразрывных токов [102-104]. Следует отметить, что на сегодняшний день существуют серийно выпускаемые сверхбыстрые карбид-кремниевые диоды Шоттки, накапливающие значительно меньший заряд и обладающие наименьшим временем обратного восстановления по сравнению с обычными силовыми диодами. Тем не менее их использование является лишь частичным решением вышеописанной проблемы, и, в то же время, значительно усложняет обеспечение хорошей электромагнитной совместимости устройства в силу очень крутых фронтов переключения, присущих таким диодам [105-108].

Одним из существующих способов снижения динамических потерь в СТК как на включение, так и на выключение, является применение схем пассивных и активных формирователей траектории переключения (ФТП) СТК [109-127]. Для демонстрации процессов при переключениях СТК была создана упрощенная имитационная компьютерная модель СПК трехфазного ККМ на

основе силового транзистора Z1, работающего совместно с блокирующим диодом D1. Имитационная компьютерная модель, показанная на рисунке 4.2, создана в системе Orcad Pspice на основе структуры СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с одиночным СТК, параметры и характеристики которой были исследованы в разделе 1.1 Главы 1.



а) б)

Рисунок 4.2 – Упрощенная имитационная компьютерная модель СПК трехфазного ККМ с силовым транзистором и блокирующим диодом (а – без ФТП; б – с пассивным ФТП)

На рисунке 4.2 (а) показана упрощенная имитационная компьютерная модель СПК без дополнительных цепей ФТП, а на рисунке 4.2 (б) – аналогичная модель с пассивным ФТП на основе дросселя L1, конденсатора C1, резистора R2 и диода D5. На показанных моделях источник тока I1 имитирует протекание постоянного тока 15 А, источник напряжения V1 имитирует выходное постоянное напряжение 540 В.

На рисунках 4.3-4.4 показаны временные диаграммы процессов при переключениях СТК, полученные при помощи выполненного ИКМ для схемы на рисунке 4.2 (а) без дополнительных цепей ФТП.

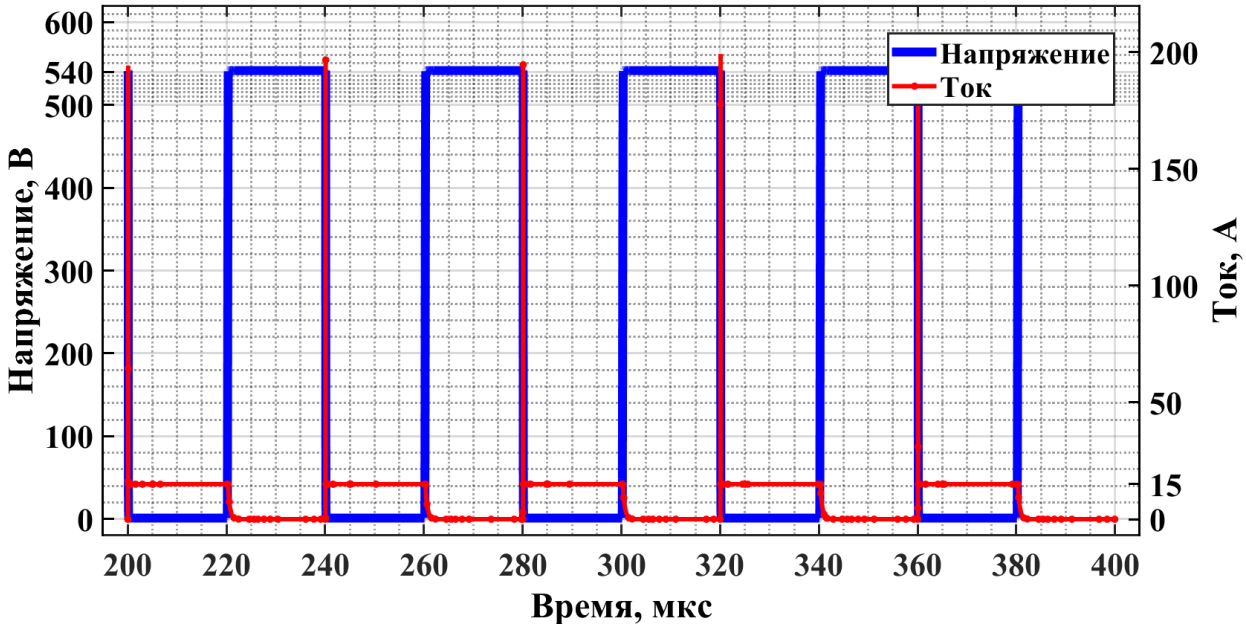
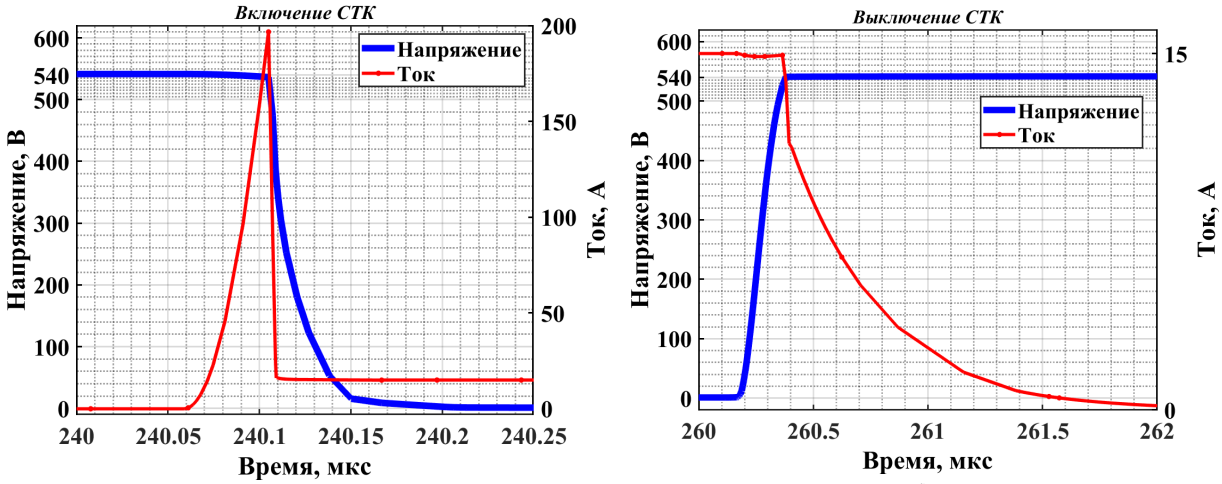


Рисунок 4.3 – Временные диаграммы процессов переключения СТК без ФТП



а) б)

Рисунок 4.4 – Временные диаграммы процессов переключения СТК без ФТП (а – включение СТК; б – выключение СТК)

Из рисунка 4.4 видно, что в момент включения СТК Z1 происходит бросок тока коллектора до 200 А вследствие разряда диффузионной емкости блокирующего диода D1. В момент выключения СТК Z1 наблюдается плавный спад тока коллектора, длительность которого в данных условиях составляет приблизительно 1,6 мкс. Такие процессы приводят к выделению на ключе мгновенной мощности потерь до 100 кВт на включение и до 10 кВт на выключение, что отражено на временной диаграмме, показанной на рисунке 4.5, полученной при помощи ИКМ.

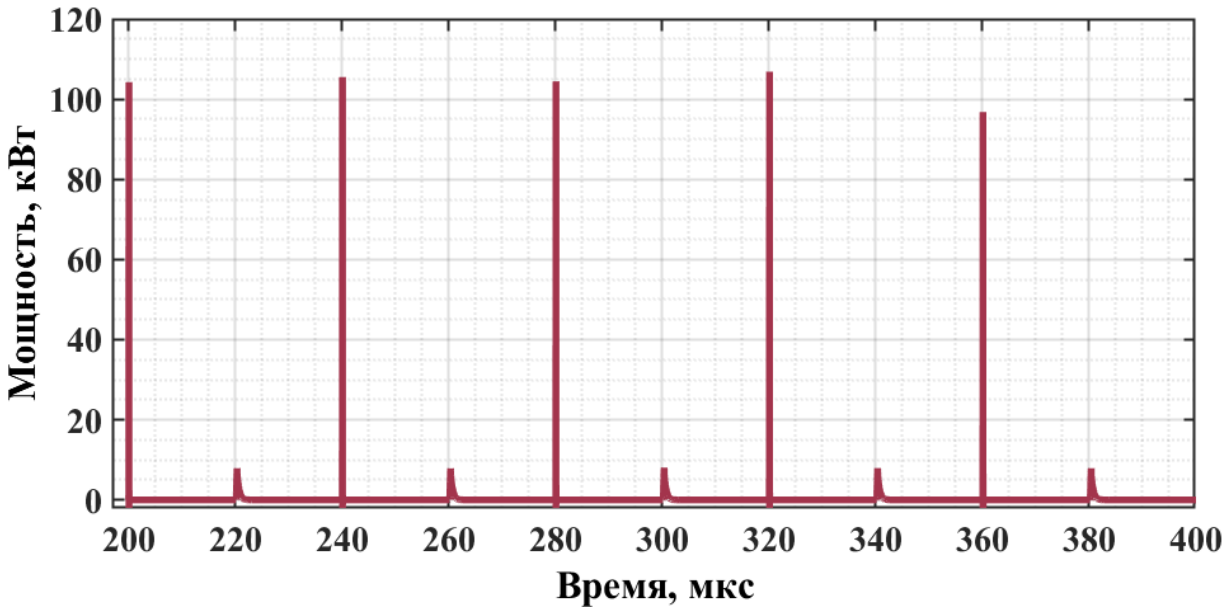


Рисунок 4.5 – Временная диаграмма мгновенной мощности, выделяемой при переключениях СТК без ФТП

Такая мощность потерь, выделяемая даже за короткие интервалы времени, приводят к интенсивному тепловыделению с последующим выходом из строя СТК. На рисунке 4.6 показана траектория переключения СТК без ФТП, полученная при помощи ИКМ.

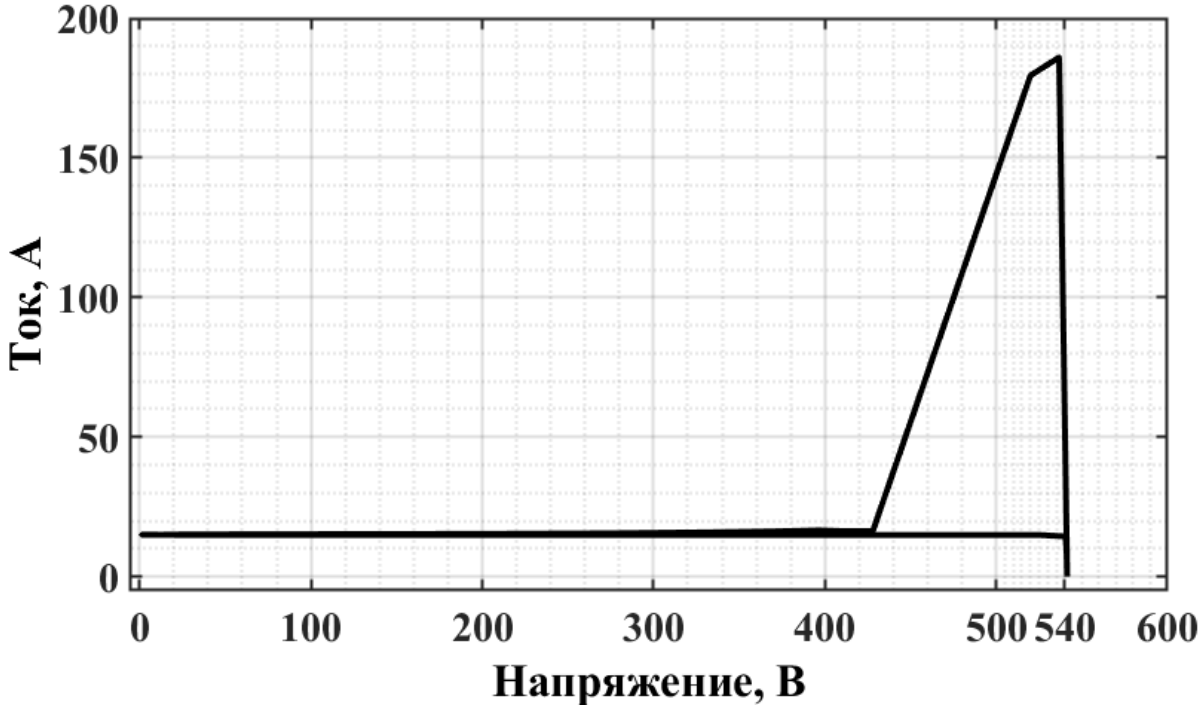


Рисунок 4.6 – Траектория переключения СТК без ФТП

По рисунку 4.6 видно, что процесс переключения сопровождается длительным выходом в активную область (ток 180 А при напряжении 540 В). Такая траектория переключения выходит за допустимые пределы ОБР, приведенной на рисунке 4.1 (а) и является недопустимой для СТК.

Схема пассивного ФТП, приведенная в рамках упрощенной компьютерной модели СПК на рисунке 4.2 (б), предполагает перенос части выделяемых тепловых потерь с СТК Z1 на резистор R2. Схема пассивного ФТП имеет следующий основной и наиболее значимый недостаток. Интенсивное тепловыделение на резисторе R2 приводит к необходимости использования крупных резисторов, рассчитанных на большую мощность и/или обеспечения их дополнительного охлаждения. Такое решение вносит существенный вклад в суммарный уровень тепловых потерь преобразователя электроэнергии, снижая его коэффициент полезного действия (КПД), а также ухудшает его удельные массо-габаритные показатели. При проектировании общепромышленных устройств относительно малой, либо средней мощности, указанный недостаток не является критичным и применение схем пассивных ФТП имеет место. Однако, для преобразователей электроэнергии большой мощности, к которым, в том числе, относятся трехфазные ККМ для перспективных авиационных СЭС, существенное снижение эффективности и ухудшение массо-габаритных показателей является неприемлемым.

В качестве предлагаемого схемотехнического решения продемонстрированной проблемы, позволяющего привести к значительному снижению потерь при переключениях СТК, была разработана новая схема активного ФТП, подразумевающая построение СТК на основе двух транзисторов – двухключевая схема активного ФТП. На рисунке 4.7 показана созданная имитационная компьютерная модель СПК трехфазного ККМ, построенного с применением предложенной схемы.

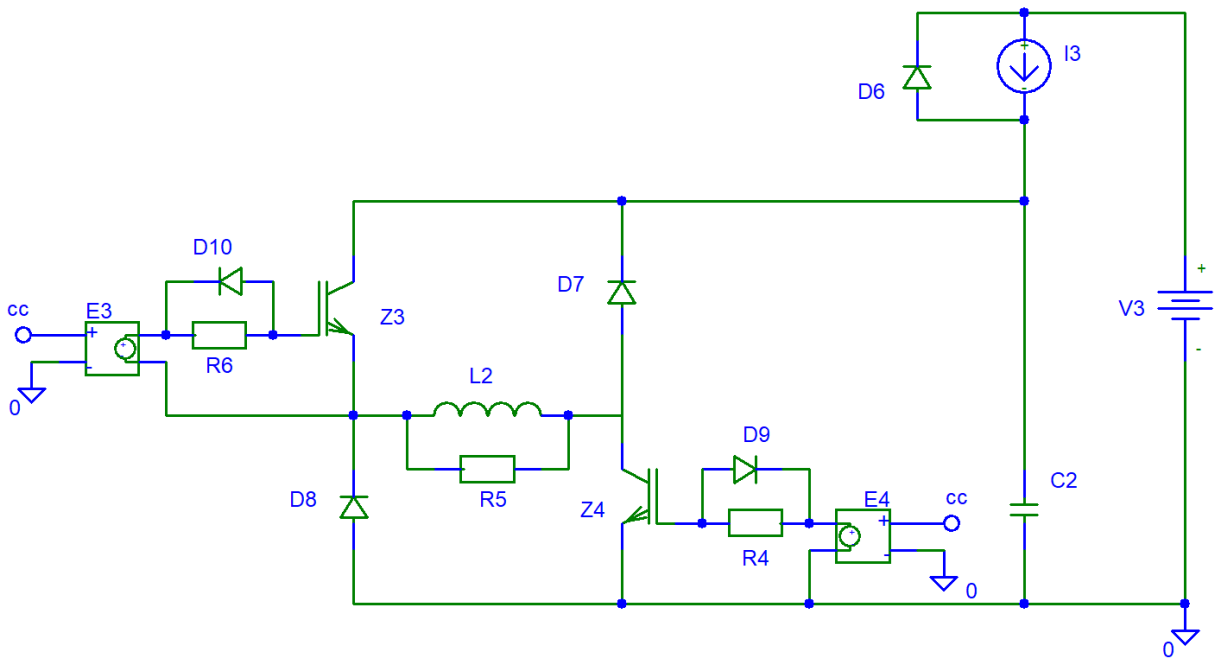


Рисунок 4.7 – Упрощенная имитационная компьютерная модель СПК трехфазного ККМ с новой двухключевой схемой активного ФТП

Показанная на рисунке 4.7 схема подразумевает построение СТК на основе двух транзисторов Z3, Z4. Переключение транзисторов Z3, Z4 производится синхронно и синфазно по общему сигналу управления. Непосредственно активный ФТП строится на основе индуктивности L2, которая обеспечивает формирование траектории переключения СТК при включении и емкости C2, обеспечивающей формирование траектории переключения СТК при выключении. Резистор R5 устанавливается для демпфирования возникающих паразитных высокочастотных колебаний тока, возникающих при выключении СТК. Такое решение позволяет улучшить электромагнитную совместимость СПК. Диоды D7, D8 устанавливаются для формирования направления протекания индукционного тока дросселя L2 при запирании СТК. Следует отметить, что в качестве диодов D7 и D8 могут быть применены обычные, а не сверхбыстрые диоды.

На рисунке 4.8 приведена временная диаграмма процессов переключения СТК в предложенной двухключевой схеме активного ФТП, полученная при помощи ИКМ.

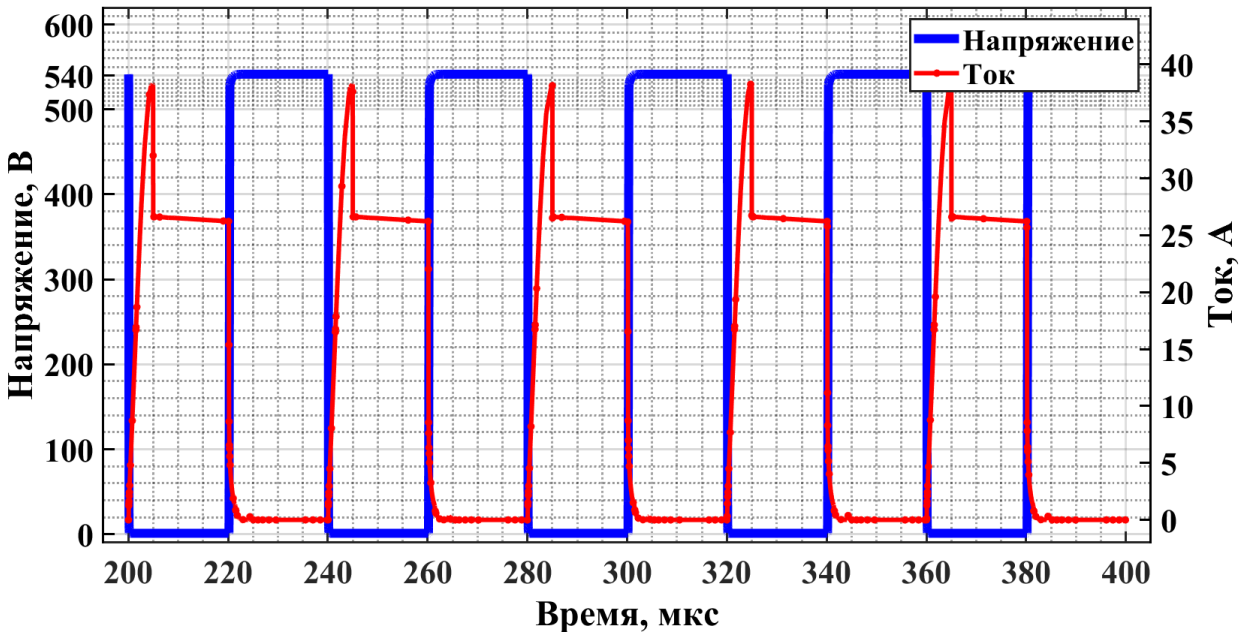


Рисунок 4.8 – Временная диаграмма процессов переключения СТК в предложенной двухключевой схеме активного ФТП

При сравнении результатов, приведенных на рисунках 4.3 и 4.8, видно, что активный ФТП позволяет обеспечивать мягкую коммутацию СТК, избегая недопустимо больших бросков тока при включении. По рисунку 4.8 видно, что устанавливается верхний уровень импульса тока коллектора СТК приблизительно 27 А при заданном токе нагрузки 15 А, что приводит к некоторому увеличению статических потерь на СТК. Однако, по сравнению с уровнем снижения динамических потерь благодаря работе активного ФТП, такое увеличение является незначительным. При помощи выражений (1.6) – (1.7), приведенных в разделе 1.1 Главы 1 были вычислены динамические потери при переключениях СТК. Мгновенная мощность потерь на включение СТК составила около 700 Вт, на выключение – менее 100 Вт. Таким образом, мощность потерь на СТК при работе в предложенной двухключевой схеме активного ФТП приблизительно на два порядка меньше по сравнению со схемой, показанной на рисунке 4.2 (а). Полученные результаты были подтверждены при помощи выполненного ИКМ, что отражено на временной диаграмме мгновенной мощности на рисунке 4.9.

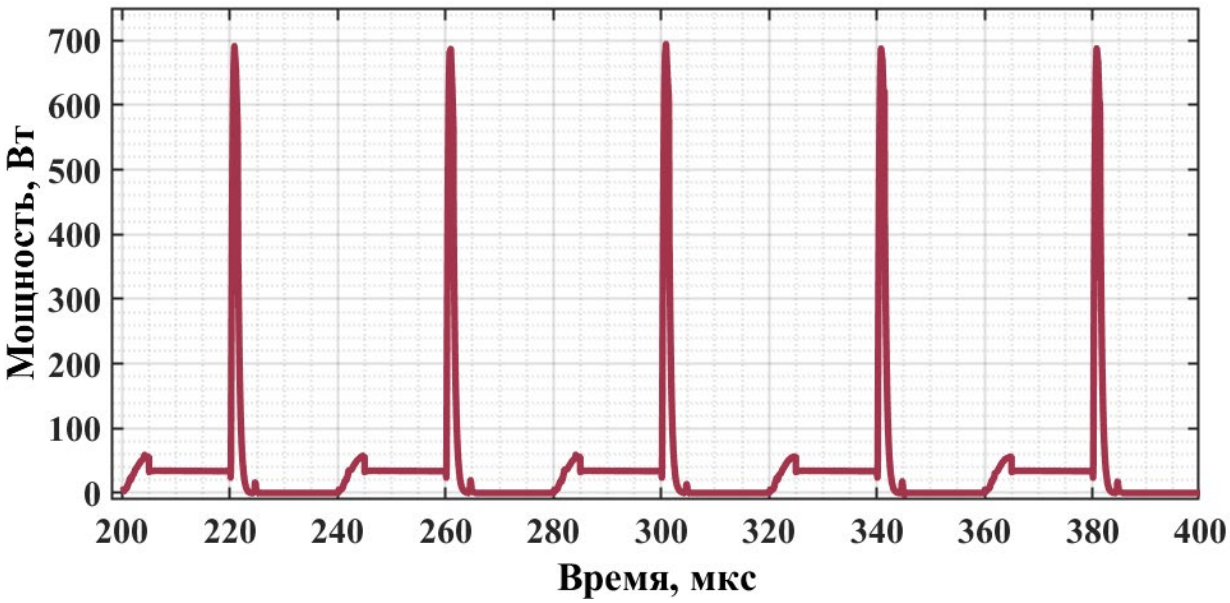


Рисунок 4.9 – Временная диаграмма мгновенной мощности, выделяемой при переключениях СТК в предложенной двухключевой схеме активного ФТП

На рисунке 4.10 показана траектория переключения СТК в предложенной двухключевой схеме активного ФТП, полученная при помощи ИКМ.

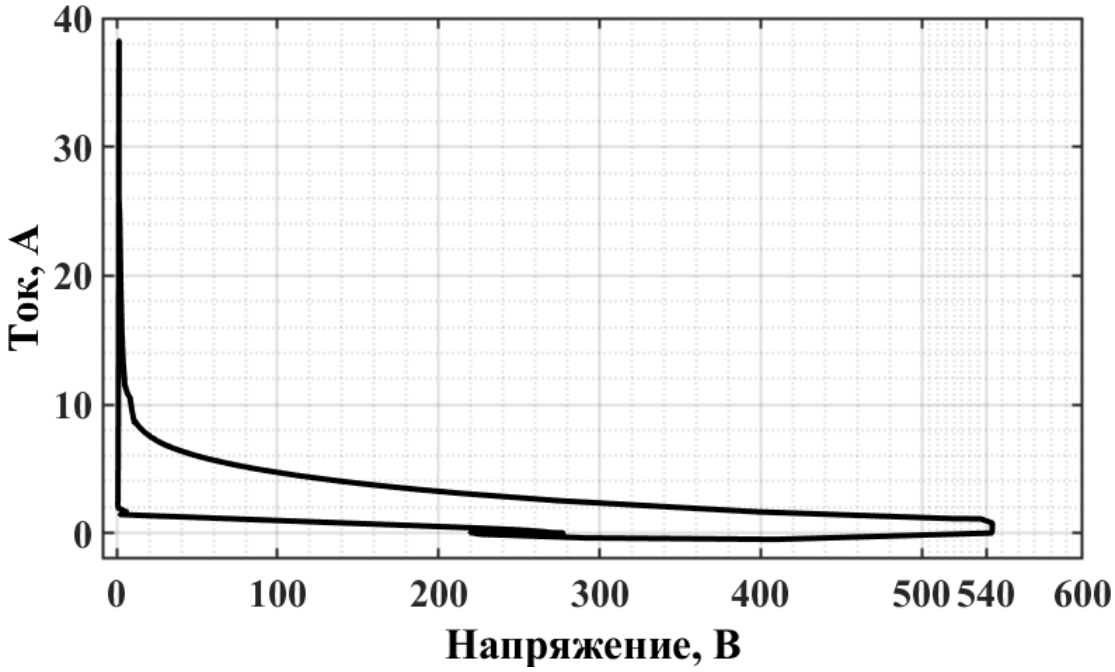


Рисунок 4.10 – Траектория переключения СТК в предложенной двухключевой схеме активного ФТП

По рисунку 4.10 видно, что процесс переключения СТК не сопровождается выходом в активную область. Такая траектория

переключения является допустимой для СТК и не выходит за пределы ОБР, приведенной на рисунке 4.1 (а).

Вторым предложенным схемотехническим решением, позволяющим существенно снизить потери при переключениях СТК, является новая схема активного ФТП, подразумевающая построение СТК на основе четырёх транзисторов – четырехключевая схема активного ФТП. Созданная упрощенная имитационная компьютерная модель СПК трехфазного ККМ с применением такой схемы показана на рисунке 4.11.

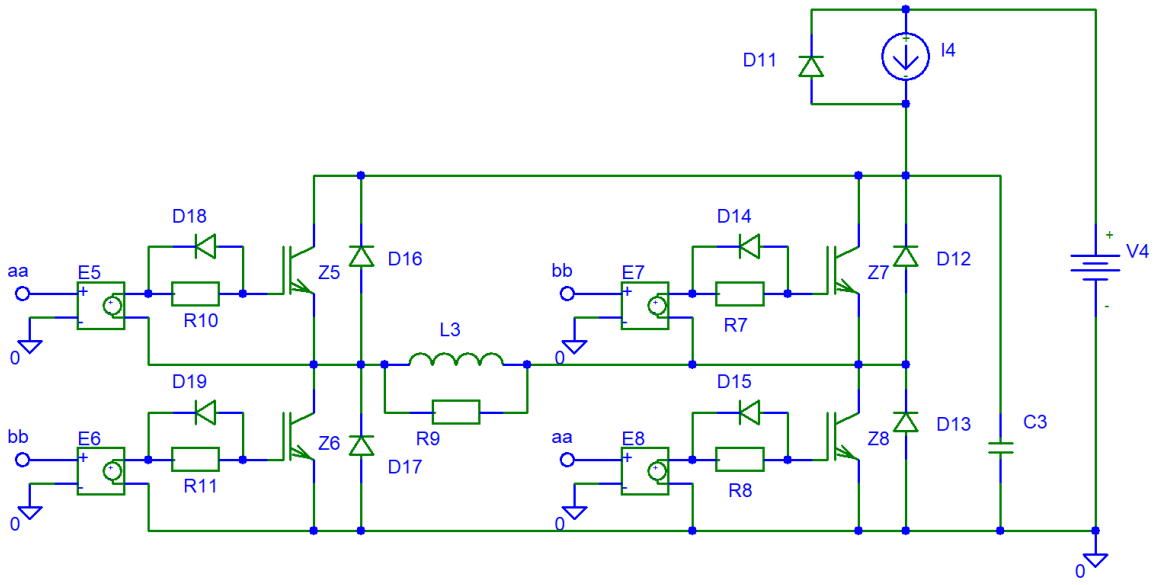


Рисунок 4.11 – Упрощенная имитационная компьютерная модель СПК трехфазного ККМ с новой четырехключевой схемой активного ФТП

В схеме, показанной на рисунке 4.11, подразумевается перекрестная коммутация транзисторов, входящих в состав каждой стойки (Z5, Z8 и Z6, Z7 соответственно) в противофазе. Такое решение позволяет при заданной частоте коммутации вдвое уменьшить частоту переключения СТК, и, как следствие, еще больше разгрузить транзисторы, снизив динамические потери в них. Либо, наоборот, при заданной частоте коммутации СТК вдвое повысить эквивалентную частоту коммутации и, тем самым, уменьшить массу и объем реактивных элементов сглаживающих фильтров, что в итоге приведет к улучшению удельных массо-габаритных показателей трехфазного ККМ в целом [79-80].

Следует отметить, что при проектировании СПК трехфазных ККМ и других преобразователей электроэнергии необходимо учитывать, что применение любых ФТП, в том числе предложенных двухключевой и четырехключевой схем приводит к ограничению диапазона изменения коэффициента заполнения управляющих импульсов ($K_з$), что обусловлено следующими причинами. При $K_з$, стремящемся к нулю, теряется эффективность ФТП на выключение из-за нехватки времени импульса на разряд емкости формирователя. При $K_з$, стремящемся к единице, напротив, теряется эффективность ФТП на включение из-за нехватки времени паузы на разряд индуктивности формирователя. Другой особенностью применения ФТП является то, что из-за наличия дополнительных реактивных элементов (индуктивности и емкости) напряжение на закрытом СТК и ток через открытый СТК будут несколько большими, чем без применения схем ФТП при прочих равных условиях [128].

4.2 Способы формирования опорного трехфазного напряжения для трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением

В разделе 2.2 Главы 2 была рассмотрена структура трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением. В такой структуре опорными сигналами для внутреннего контура регулирования являются сигналы, поступающие с датчиков фазных напряжений. При этом, из-за совокупности импульсного режима работы СПК трехфазного ККМ и наличия неизбежных индуктивностей трехфазного МЭГ и распределительной сети, фазные напряжения имеют форму, искаженную высокочастотными гармоническими составляющими. Непосредственно такие сигналы непригодны в качестве опорных для осуществления релейного регулирования. Опорные сигналы по фазным напряжениям должны соответствовать следующим требованиям:

1) иметь чисто синусоидальную форму;

2) быть синхронизированными и синфазными с исходными фазными напряжениями.

Для получения таких сигналов необходимо применение специальных схем формирователей сигналов (ФС). В данном разделе рассмотрены предложенные способы их схемотехнической реализации. ФС в составе структуры трехфазного ККМ с раздельным пофазным управлением показан на рисунке 2.4. Предлагаются следующие два способа реализации ФС:

1) использование апериодического звена второго порядка;

2) использование генератора, управляемого напряжением и системы фазовой автоподстройки частоты.

4.2.1 Способ формирования опорного трехфазного напряжения за счет использования апериодического звена второго порядка

Первый способ реализации ФС основывается на использовании апериодического звена второго порядка, выполняющего функцию сетевого фильтра. Передаточная функция такого звена описывается выражением (4.1).

$$W(S) = -\frac{1}{\left(T_{\text{ф}}S + 1\right)^2}, \tag{4.1}$$

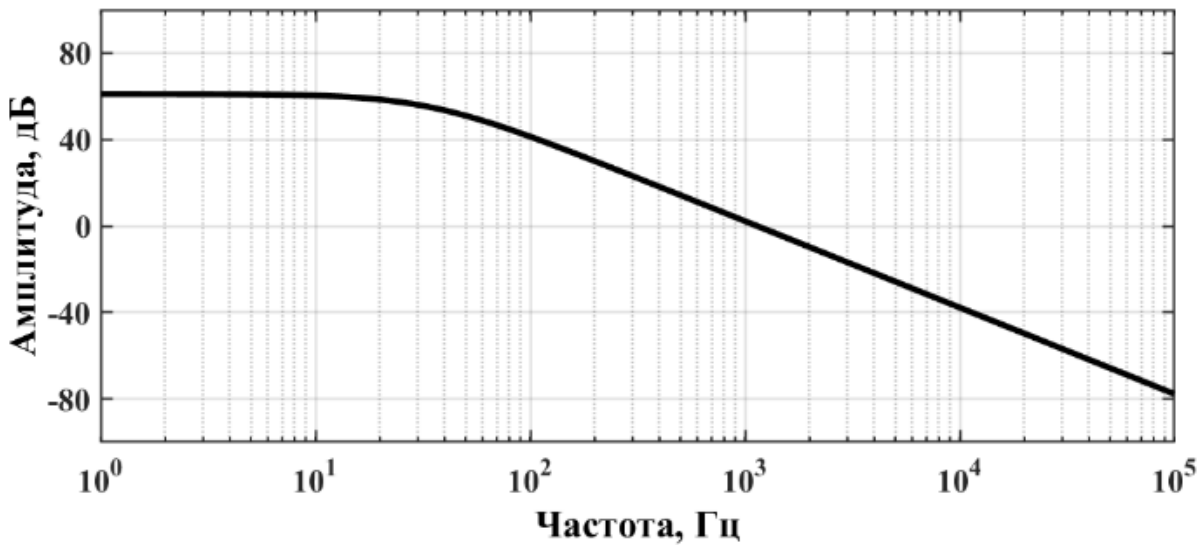
где $T_{\text{ф}}$ – период фильтра.

На вход звена поступает исходный искаженный сигнал фазного напряжения, на выходе происходит формирование опорного синусоидального сигнала. Инверсия в выражении (4.1) необходима для осуществления сдвига на 180° получаемого сигнала. Результирующий сигнал становится синхронизированным и синфазным с исходным фазным напряжением. Следует отметить, что из-за высокочастотных гармонических составляющих, искажающих первичный сигнал, для корректной работы фильтра необходимо выполнение условия (4.2).

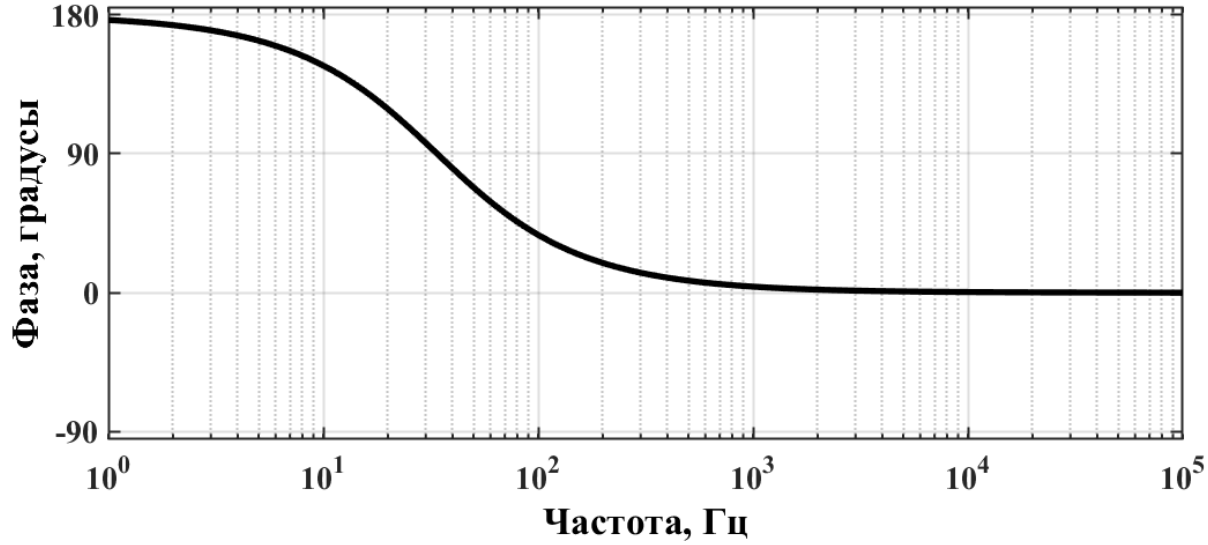
$$T_{\text{ф}} \geq 10T_{\text{сети}}, \tag{4.2}$$

где $T_{\text{сети}}$ – период сети.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) рассмотренного звена показаны на рисунке 4.12.



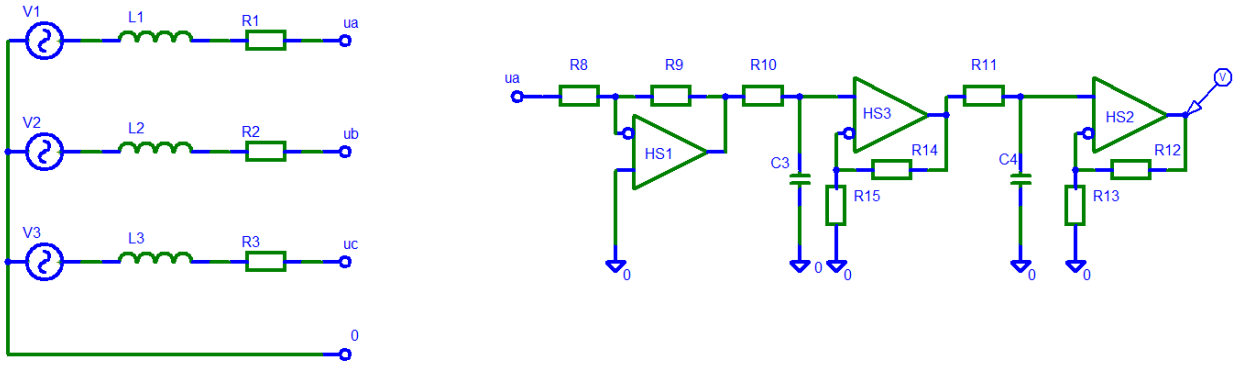
а)



б)

Рисунок 4.12 – Характеристики апериодического звена второго порядка с инверсией (а – АЧХ; б – ФЧХ)

Предложены схемотехнические реализации ФС для четырехпроводных сетей с выведенной нейтралью, а также для трехпроводных сетей, в случае если доступа к нейтрали нет. В случае трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением для перспективных авиационных СЭС используется четырехпроводная сеть. В этом случае схемотехническая реализация ФС за счет использования апериодического звена второго порядка показана на рисунке 4.13 на имитационной компьютерной модели, созданной в системе Orcad Pspice.



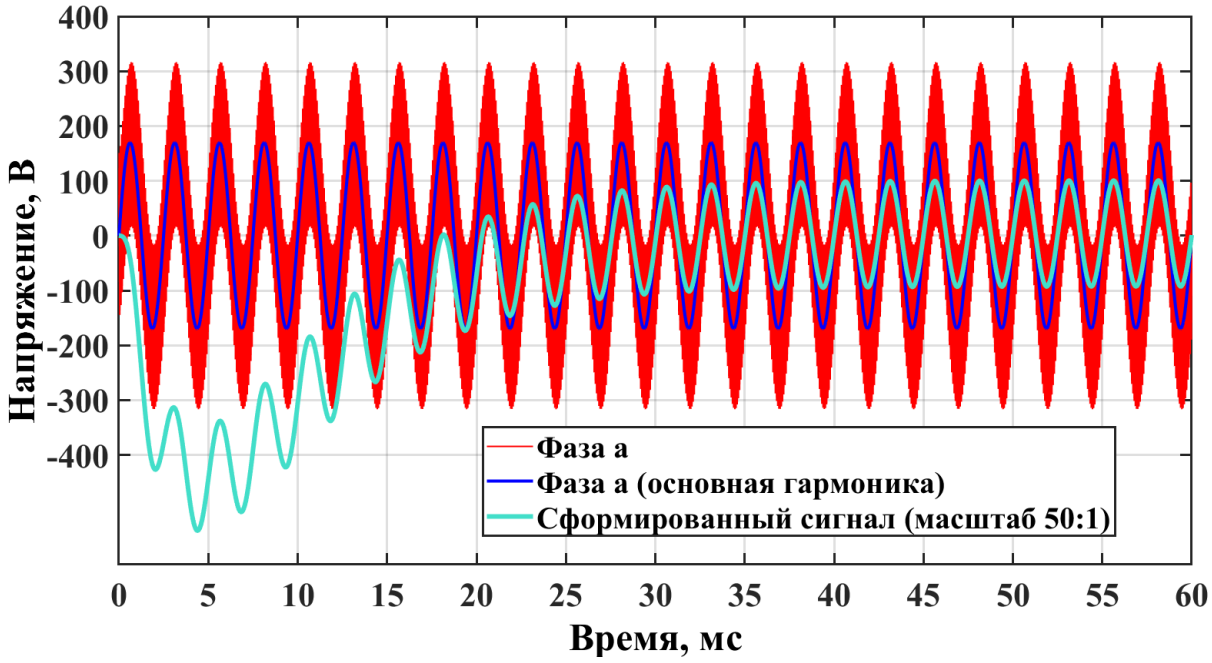
а) б)

Рисунок 4.13 – Имитационная компьютерная модель формирователя опорного трехфазного напряжения для четырехпроводных сетей (а – трехфазный МЭГ; б – ФС по фазе а)

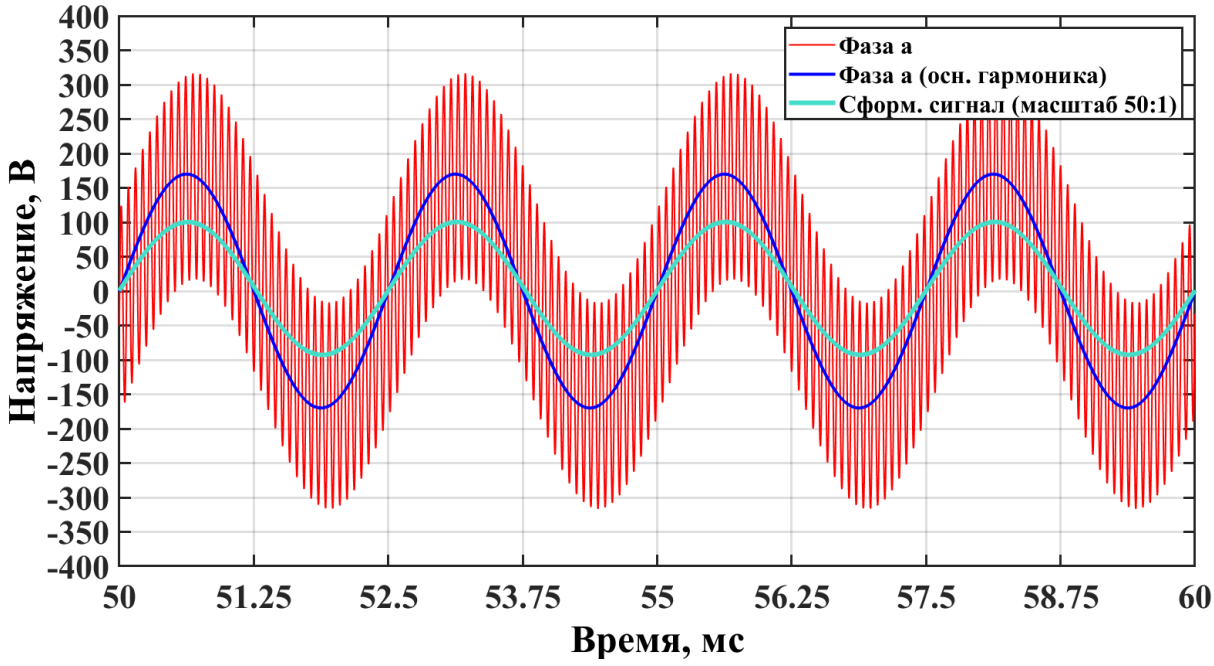
На рисунке 4.13 (а) источниками V1-V3, индуктивностями L1-L3 и сопротивлениями R1-R3 моделируется работа трехфазного МЭГ. В точках u_a, u_b, u_c имитируются исходные фазные напряжения с частотой основной гармоники 400 Гц, искаженные высшей гармоникой с частотой 15 кГц, соответствующей частоте коммутации СПК трехфазного ККМ. На рисунке 4.13 (б) динамическое звено в случае четырехпроводных сетей реализуется на основе операционных усилителей HS1-HS3. На рисунке 4.13 (б) показана схемотехническая реализация ФС только для фазы a. Для фазы b и фазы c предполагается использование идентичных схем ФС. Следует подчеркнуть, что для достижения достаточной точности сформированных опорных сигналов, необходимо использование прецизионных операционных усилителей.

На рисунке 4.14 показана временная диаграмма напряжений, полученная при помощи ИКМ, демонстрирующая работоспособность предложенной схемы ФС. На временной диаграмме показаны исходное фазное напряжение МЭГ, искаженное высокочастотной гармоникой, основная гармоника этого напряжения частотой 400 Гц и полученный при помощи предложенной схемы ФС для четырехпроводной сети сформированный опорный синусоидальный сигнал. Полученный сигнал является низковольтным, поэтому для наглядности на временной диаграмме он представлен в масштабе 50:1. По

временной диаграмме видно, что после завершения переходного процесса сформированный синусоидальный сигнал становится синхронизированным и синфазным с исходным фазным напряжением.



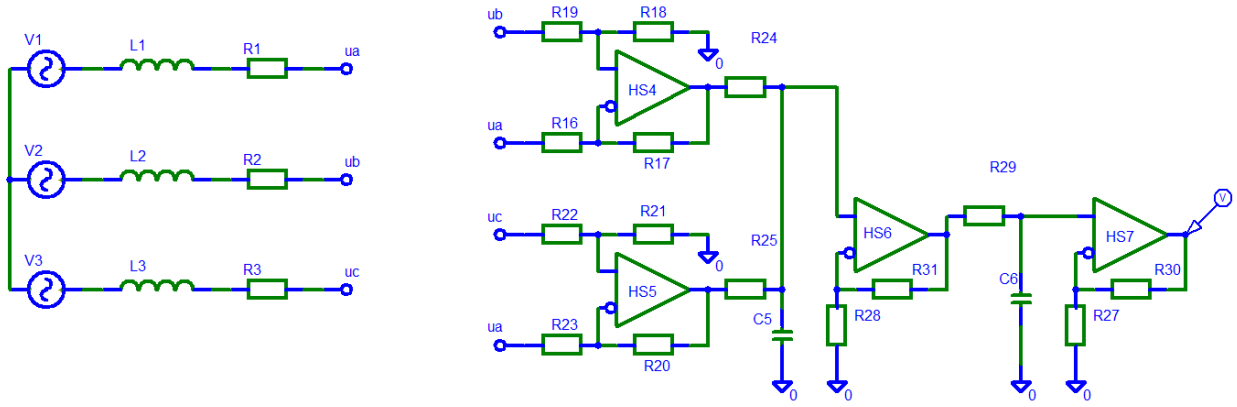
а)



б)

Рисунок 4.14 – Временная диаграмма напряжений при работе ФС на основе апериодического звена для четырехпроводных сетей (а – временная развертка 60 мс; б – временная развертка 10 мс)

Схемотехническая реализация ФС для трехпроводных сетей за счет использования апериодического звена второго показана на рисунке 4.15 на созданной имитационной компьютерной модели.



а) б)

Рисунок 4.15 – Имитационная компьютерная модель формирователя опорного трехфазного напряжения для трехпроводных сетей (а – трехфазный МЭГ; б – ФС по фазе а)

Динамическое звено в случае ФС для трехпроводных сетей реализуется на основе операционных усилителей HS4-HS7. На рисунке 4.15 (б) показана схемотехническая реализация ФС только для фазы а. Для фазы b и фазы с также предполагается использование идентичных схем. В этом случае отсутствие выведенной нейтрали не позволяет напрямую измерить исходные фазные напряжения и сформировать соответствующие опорные сигналы. Однако, возможно измерить линейные напряжения, а фазные напряжения могут быть вычислены из них с помощью выражений (4.3) – (4.5).

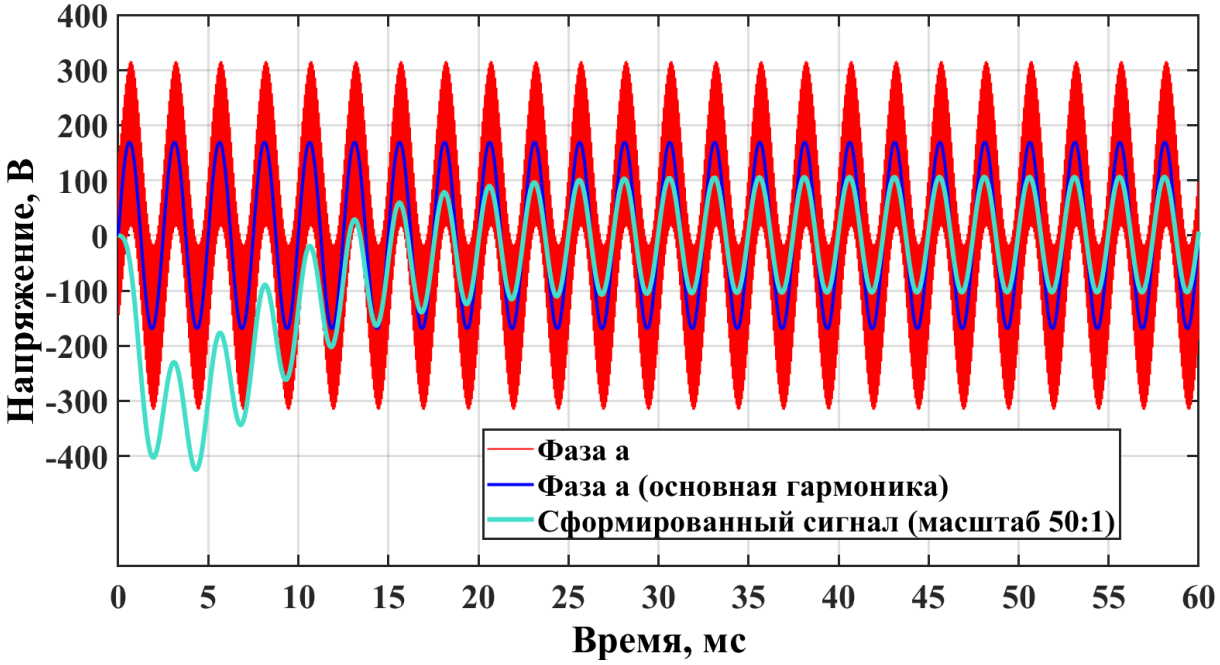
$$u_a = \frac{2u_{ab} + u_{bc}}{3}; \tag{4.3}$$

$$u_b = \frac{2u_{bc} + u_{ca}}{3}; \tag{4.4}$$

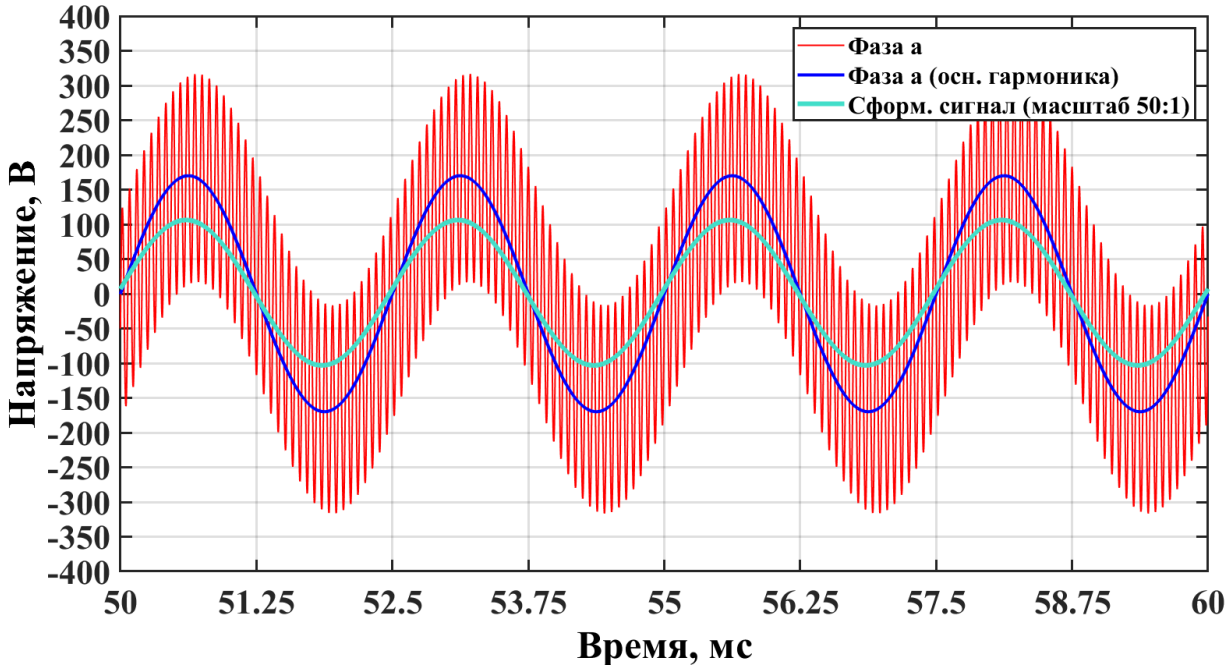
$$u_c = \frac{2u_{ca} + u_{ab}}{3}; \tag{4.5}$$

где u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} – линейные напряжения, В; u_a, u_b, u_c – фазные напряжения, В.

На рисунке 4.16 показана временная диаграмма напряжений, полученная при помощи проведенного ИКМ.



а)



б)

Рисунок 4.16 – Временная диаграмма напряжений при работе ФС на основе апериодического звена для трехпроводных сетей (а – временная развертка 60 мс; б – временная развертка 10 мс)

По рисунку 4.16 видно, что предложенная схема ФС для трехпроводных сетей дает аналогичные результаты, как и для четырехпроводных, что подтверждает ее работоспособность.

Следует отметить, что предложенный способ формирования опорного трехфазного напряжения как для четырехпроводных, так и для трехпроводных сетей имеет следующие недостатки:

1) достаточно длительная задержка на формирование опорного синусоидального сигнала ввиду большой инерционности системы;

2) в случае, если фазы трехфазного МЭГ нагружены несимметрично, то при измерении несимметричных фазных напряжений будут сформированы и несимметричные опорные напряжения. Впоследствии это приведет к формированию несимметричных фазных токов и чрезмерно большому току нейтрали;

3) приведенные выражения для вывода фазных напряжений из линейных напряжений справедливы только для симметрично работающих систем. В случае несимметрии они дают относительно большую погрешность.

В связи с указанными недостатками предложен второй способ формирования опорного трехфазного напряжения для трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением.

4.2.2 Способ формирования опорного трехфазного напряжения за счет использования генератора, управляемого напряжением и системы фазовой автоподстройки частоты

Второй способ реализации ФС основывается на использовании генератора, управляемого напряжением (ГУН) и системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Схемотехническая реализация ФС, построенного таким способом представлена на созданной имитационной компьютерной модели на рисунке 4.17. В состав имитационной компьютерной модели ФС входят компаратор входного сигнала HS15, компаратор сигнала обратной связи HS13, фазовый детектор, построенный на основе микросхем U71-U73, корректирующее устройство и ГУН. Для избавления исходного искаженного сигнала фазного напряжения от высокочастотных составляющих используется помехоподавляющий RC-фильтр, выполненный на основе

резистора R57 и конденсатора C7. Для того, чтобы скомпенсировать получаемый при этом фазовый сдвиг используется фазосдвигающий RC-фильтр, выполненный на основе резистора R58 и конденсатора C8, имеющих такие же номиналы, как резистор R57 и конденсатор C7 соответственно.

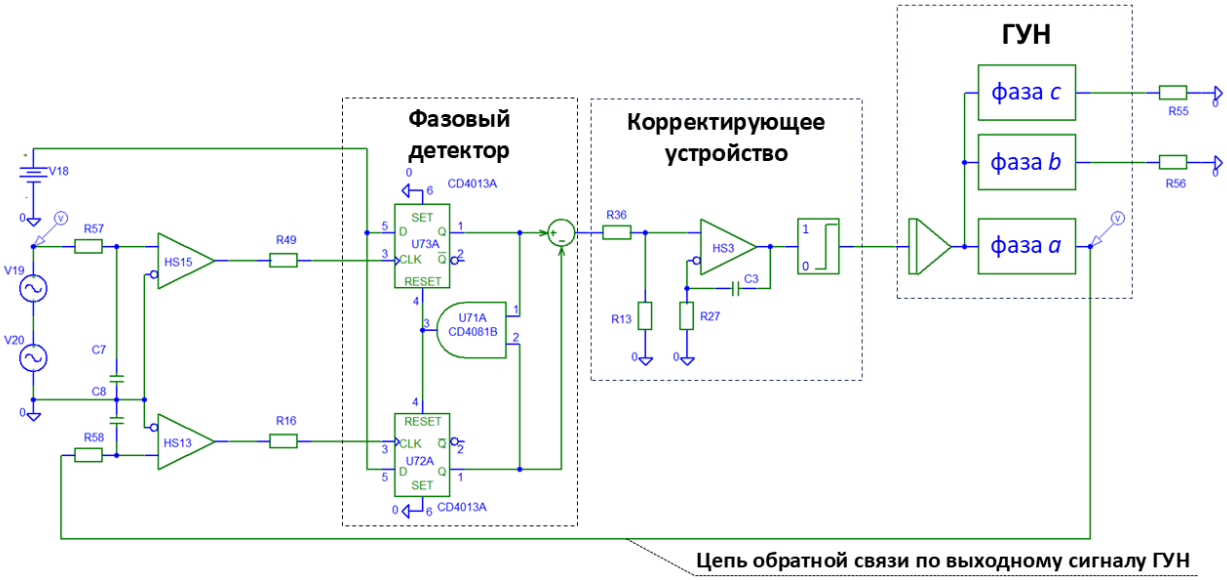


Рисунок 4.17 – Имитационная компьютерная модель формирователя опорного трехфазного напряжения за счет ГУН и ФАПЧ

На рисунке 4.18 показана временная диаграмма напряжений, полученная при помощи проведенного ИКМ, демонстрирующая работоспособность предложенной схемы.

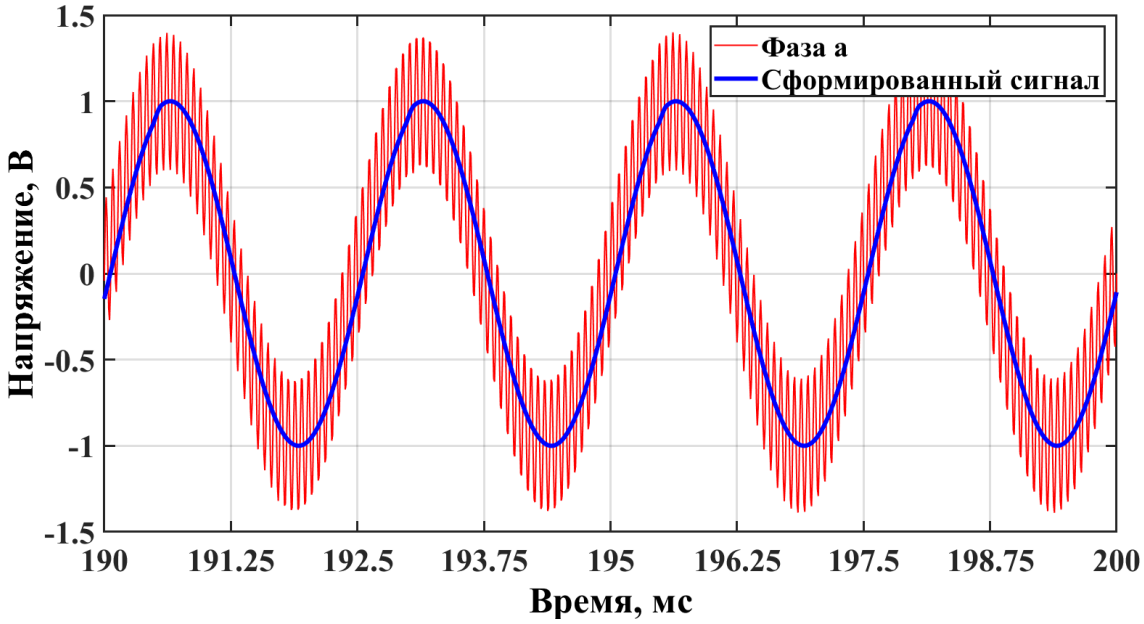


Рисунок 4.18 – Временная диаграммы напряжений при работе ФС на основе ГУН и ФАПЧ

Следует отметить, что в случае применения данного способа формирования опорного трехфазного напряжения достаточно исходного напряжения только одной фазы. Это означает, что предложенный способ может быть использован в том числе в случае несимметрично нагруженных фаз генератора, в отличие от первого предложенного способа. Основным недостатком такого способа формирования опорного трехфазного напряжения является достаточно сложная схема ФС.

4.3 Схема разрешения работы при пуске трехфазного ККМ

Важным аспектом при функционировании трехфазного ККМ является обеспечение безопасного режима пуска устройства при работе в режиме нагрузки. В случае, если трехфазный ККМ коммутируется напрямую к работающему трехфазному МЭГ, например, путем замыкания контактора, возникает переходный процесс, сопровождающийся многократным увеличением фазных токов и тока нейтрали вследствие заряда изначально полностью разряженных выходных электролитических конденсаторов трехфазного ККМ. На рисунке 4.19 на временной диаграмме, полученной при помощи ИКМ, показан такой переходный процесс.

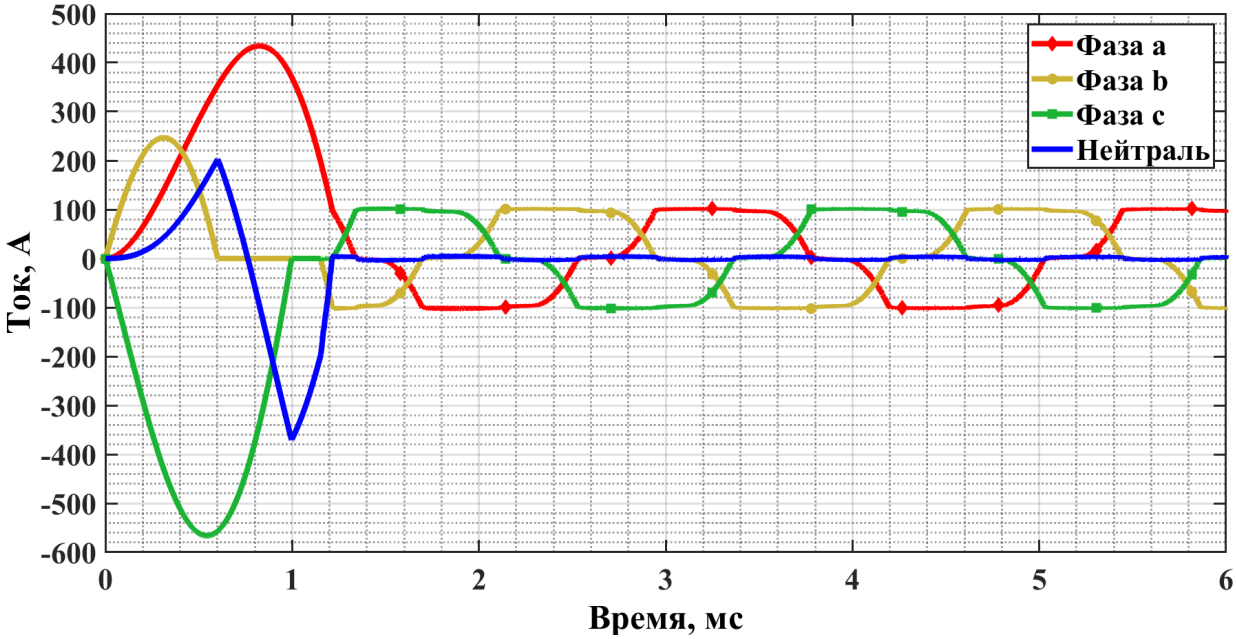


Рисунок 4.19 – Переходный процесс при пуске трехфазного ККМ, работающего в режиме нагрузки

На рисунке 4.19 видно, что при номинальном фазном токе амплитудой 100 А во время переходного процесса амплитуда фазных токов превышает 500 А, а тока нейтрали – 300 А. При протекании фазных токов, многократно превышающих номинальные, возникает проблема замагничивания сердечников трансформаторов тока, используемых в качестве датчиков фазных токов, сигналы которых поступают в схему управления трехфазного ККМ. В таком режиме в схеме управления происходят переходные процессы, не позволяющие обеспечить надлежащее регулирование фазных токов и корректную работу контура управления трехфазным ККМ в целом. Работа схемы управления в таком режиме может привести к аварийному режиму работы трехфазного ККМ с выходом из строя всего СПК. Для обеспечения безаварийного режима работы трехфазного ККМ при пуске с подключенной на выходе нагрузкой необходимо введение временного ограничения на разрешение работы схемы управления трехфазного ККМ. Для разрешения выдавать сигналы управления, идущие на СТК, входящие в состав СПК трехфазного ККМ, необходимо выполнение следующих условий:

1) установилось номинальное напряжение питания схемы управления, равное выходному напряжению БВН;

2) схема управления вышла на установившийся режим работы (все переходные процессы завершились).

Была разработана схема разрешения работы при пуске трехфазного ККМ, обеспечивающая выполнение этих условий. Созданная имитационная компьютерная модель предложенной схемы показана на рисунке 4.20. Разработанная схема включает реле напряжения питания (РНП) и таймер. РНП выполнено на транзисторах Q1, Q2 и стабилитроне U1. Таймер выполнен на транзисторах Q6, Q7, стабилитроне U2, времязадающем конденсаторе C1 и времязадающем резисторе R9. Резистор R17 и конденсатор C2 установлены в модели для имитации выхода напряжения БВН V1 на установившийся режим.

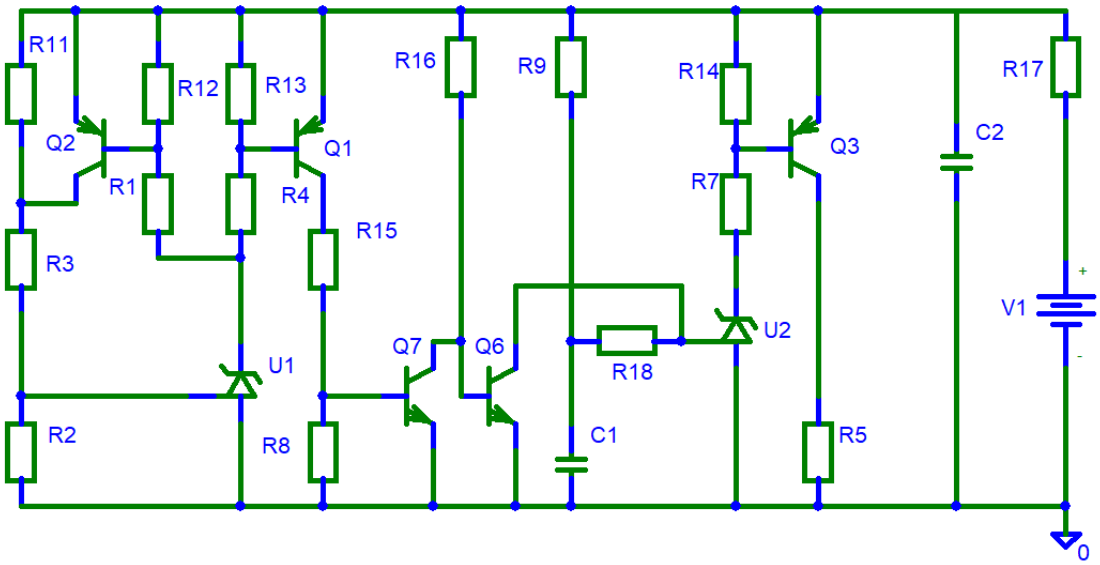


Рисунок 4.20 – Имитационная компьютерная модель схемы разрешения работы при пуске трехфазного ККМ

На рисунке 4.21 показаны временные диаграммы процессов при работе разработанной схемы, полученные при помощи ИКМ.

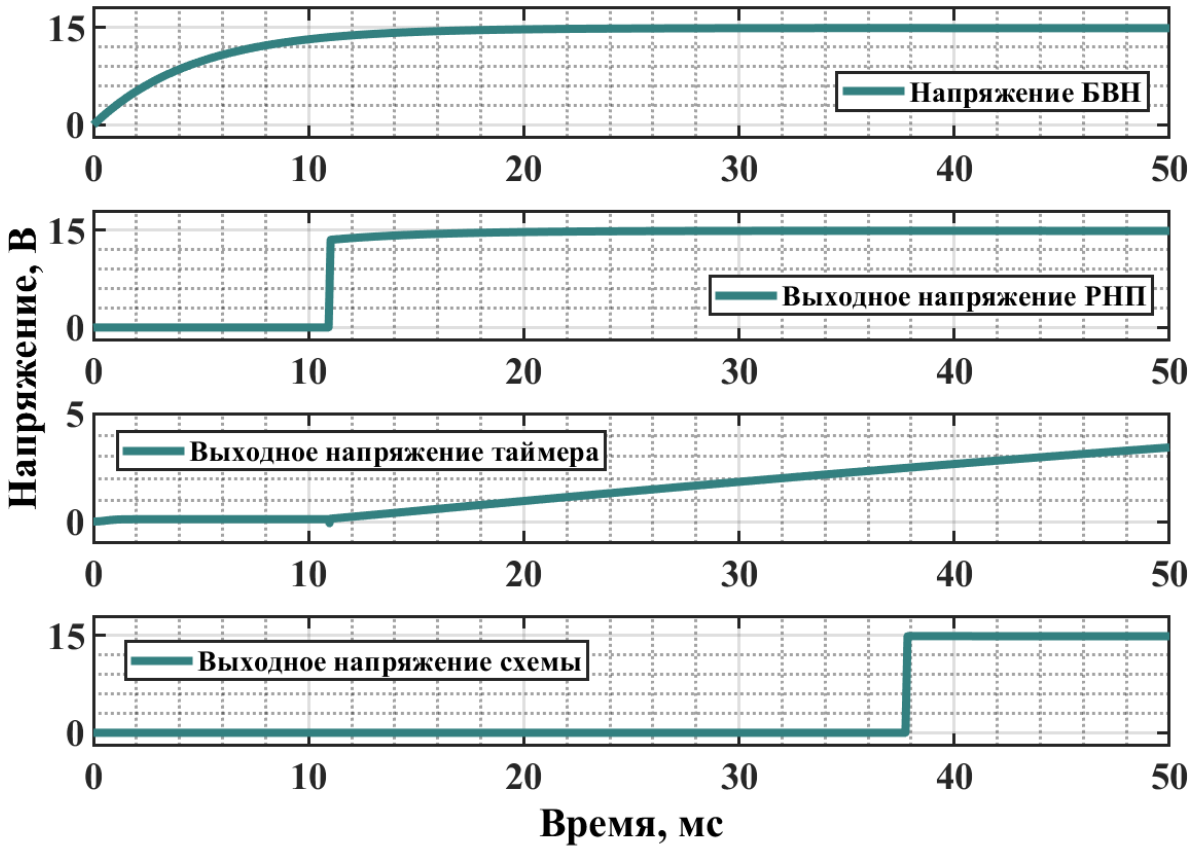


Рисунок 4.21 – Временные диаграммы процессов при работе схемы разрешения работы при пуске трехфазного ККМ

Сначала при помощи РНП выполняется первое условие проверки номинального напряжения питания схемы управления, равного выходному напряжению БВН. При достижении выходным напряжением БВН номинального уровня, на выходе РНП появляется сигнал, по которому начинает работать таймер. Таймер устанавливает задержку по времени для завершения переходных процессов в СУЗ. Следует отметить, что номиналы времязадающих элементов C1 и R9 должны быть подобраны на этапе отладки схемы управления. При выполнении всех заданных условий, на выходе схемы появляется сигнал, разрешающий работу основной схемы управления трехфазного ККМ.

Следует подчеркнуть, что в состав любой схемы управления трехфазного ККМ вне зависимости от выбранного способа управления СПК должен входить такой функциональный узел, как схема разрешения работы, содержащая РНП и таймер для обеспечения безаварийного режима работы трехфазного ККМ.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. При помощи ИКМ показано существенное влияние схем ФТП на уровень динамических потерь при переключениях СТК.

2. Предложены схемотехнические решения активных формирователей безопасной низкоэнергетической траектории переключения СТК, входящих в составе силового каскада трехфазного ККМ.

3. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем активных ФТП для СТК.

4. Приведены временные диаграммы процессов, демонстрирующие работоспособность предложенных схем активных ФТП, полученные при помощи ИКМ.

5. Предложены способы формирования опорного трехфазного напряжения для трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением, применимые для четырехпроводных и трехпроводных сетей.

6. Предложен способ формирования фазных напряжений из линейных без использования нейтрали в случае трехпроводных сетей.

7. Разработаны схемотехнические решения предложенных способов формирования опорного трехфазного напряжения.

8. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем формирователей опорного трехфазного напряжения.

9. Приведены временные диаграммы процессов, демонстрирующие работоспособность предложенных способов формирования опорного трехфазного напряжения, полученные при помощи ИКМ.

10. Разработана схема разрешения работы при пуске трехфазного ККМ и создана ее имитационная компьютерная модель.

11. Приведены временные диаграммы процессов, демонстрирующие работоспособность разработанной схемы разрешения работы при пуске трехфазного ККМ, полученные при помощи ИКМ.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТРЕХФАЗНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК

Разработка экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением и проведение экспериментальных исследований его параметров и характеристик производились с целью подтверждения достоверности теоретических положений и результатов, полученных при помощи ИКМ.

5.1 Разработка и изготовление экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением

Перед началом разработки были заданы основные входные и выходные параметры для экспериментального образца трехфазного ККМ, приведенные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные входные и выходные параметры экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Входное трехфазное напряжение, В	110…220
2	Частота входного напряжения, Гц	100…400
3	Выходное постоянное напряжение, В	± 270
4	Допустимое отклонение выходного напряжения, В	± 10
5	Выходная мощность, кВт	18

В таблице 5.1 заданы диапазоны изменения входного трехфазного напряжения и его частоты в силу того, что подразумевается работа трехфазного ККМ совместного с трехфазным МЭГ, выходные параметры которого

пропорциональны его частоте вращения. При этом ввиду того, что трехфазный ККМ строится как преобразователь электроэнергии повышающего типа, имеющий выходное постоянное напряжение 540 В (± 270 В), был задан верхний уровень фазного напряжения 220 В, соответствующий уровню линейного напряжения менее 540 В. Верхний уровень фазного напряжения был вычислен при помощи выражения (5.1).

$$U_{\text{ф}.max} = \frac{U_{\text{вых}}}{k_a\sqrt{3}}, \tag{5.1}$$

где $U_{\text{ф}.max}$ – верхний уровень фазного напряжения, В; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение трехфазного ККМ, В; k_a – коэффициент амплитуды. Коэффициент амплитуды был принят равным 1,414.

Для разрабатываемого экспериментального образца трехфазного ККМ был произведен выбор способа управления СПК из способов, рассмотренных в Главе 2. Было принято решение о построении трехфазного ККМ с совместным общим релейным управлением с подчиненным регулированием по пиковому значению фазных токов. Такой выбор обоснован наибольшей простотой схемотехнической реализации СУЗ, во-первых, в связи с довольно простой топологией схемы и малого требуемого количества электронных компонентов, и, во-вторых, в связи с возможностью ее исполнения без использования микропроцессорных средств и, соответственно, отсутствием необходимости разработки специального программного обеспечения [57]. При этом выбранный способ управления позволяет проверить работоспособность трехфазного ККМ в целом и его основных составляющих узлов, исследовать параметры и характеристики с целью верификации полученных теоретических положений и результатов ИКМ.

В соответствии с выбранным способом управления, был произведен выбор структуры СПК трехфазного ККМ. Было принято решение об использовании структуры СПК №1 (рисунок 1.3 (а)) с дросселями

переменного тока, одним СТК постоянного тока и двумя блокирующими диодами, исследованной в разделе 1.1 Главы 1. Такой выбор обоснован малым требуемым количеством силовых полупроводниковых компонентов. В частности, требуется только один силовой транзистор и, соответственно, только один простой одноканальный драйвер, что также упрощает реализацию экспериментального образца трехфазного ККМ. Выбор структуры СПК именно с дросселями переменного тока обоснован возможностью экспериментальной отработки использования обмоток якоря трехфазного МЭГ, обладающих относительно высокой индуктивностью, в качестве входных дросселей переменного тока.

Было принято решение о построении преобразователя электроэнергии по двухпоточной схеме путем сборки двух идентичных каналов с одинаковыми структурами СПК. Разработанная имитационная компьютерная модель трехфазного ККМ, построенного по двухпоточной схеме, в соответствии с которой осуществлялось изготовление экспериментального образца, показана на рисунке 5.1.

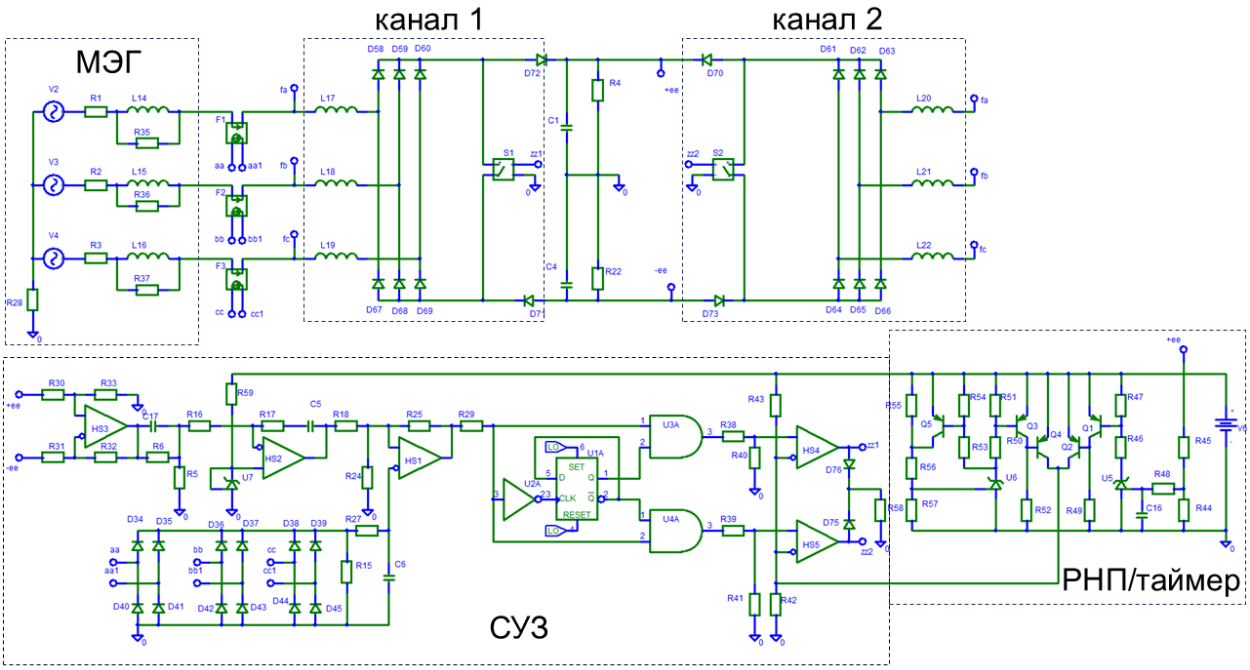


Рисунок 5.1 – Имитационная компьютерная модель экспериментального образца трехфазного ККМ

Были выбраны силовые полупроводниковые компоненты для изготовления экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением, указанные в таблице 5.2 и представленные на рисунке 5.2.

Таблица 5.2 – Силовые полупроводниковые компоненты, используемые в экспериментальном образце трехфазного ККМ

№ п/п	Назначение компонента	Наименование компонента	Количество
1	Трехфазный выпрямительный мост	VUO160-12NO7	1
2	СТК	VS-GT180DA120U	1
3	Блокирующий диод	VS-HFA140FA120	2

а) б) в)

Рисунок 5.2 – Силовые полупроводниковые компоненты, используемые в экспериментальном образце трехфазного ККМ
(а – VUO160-12NO7; б – VS-GT180DA120U; в – VS-HFA140FA120)

В таблице 5.2 указано количество компонентов, требуемое на каждый канал преобразователя электроэнергии в соответствии с компьютерной моделью на рисунке 5.1. Модуль VUO160-12NO7 содержит шесть диодов, включенных по схеме двухполупериодного выпрямительного моста.

Предельно допустимое действующее значение прямого тока составляет 200 А [83]. Модуль VS-GT180DA120U содержит одиночный IGBT ключ со встроенным обратным диодом. Предельно допустимое действующее значение прямого тока через ключ составляет 185 А [84]. Модуль VS-HFA140FA120 содержит два параллельно включаемых сверхбыстрых диода. Время обратного восстановления диодов составляет 48 нс. Предельно допустимое действующее значение прямого тока через модуль составляет 140 А [85]. Предельно допустимое значение повторяющегося импульсного обратного напряжения для всех выбранных компонентов составляет 1200 В, что с запасом покрывает их условия функционирования в цепях с выходным постоянным напряжением 540 В (±270 В).

Изготовленный экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением представлен на рисунке 5.3.

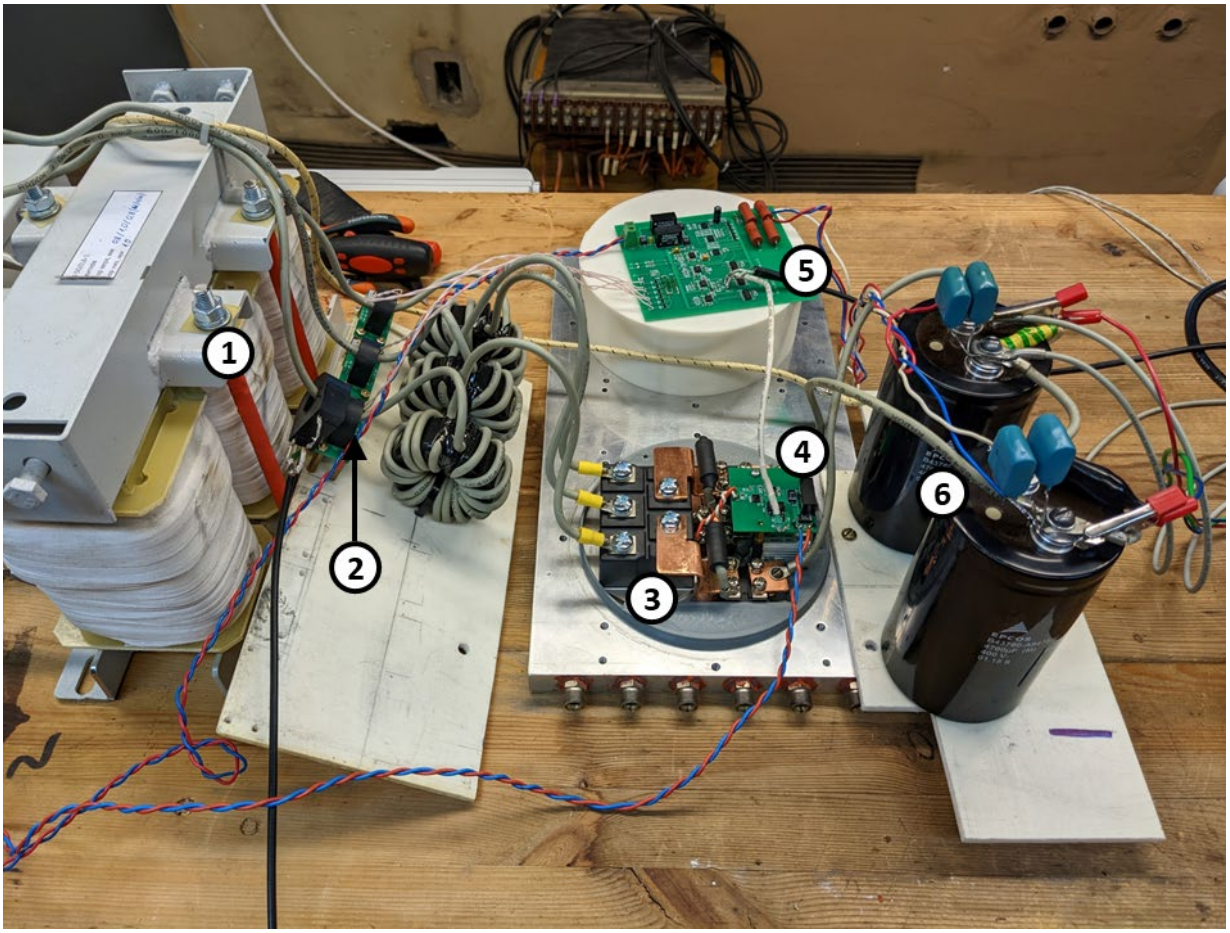
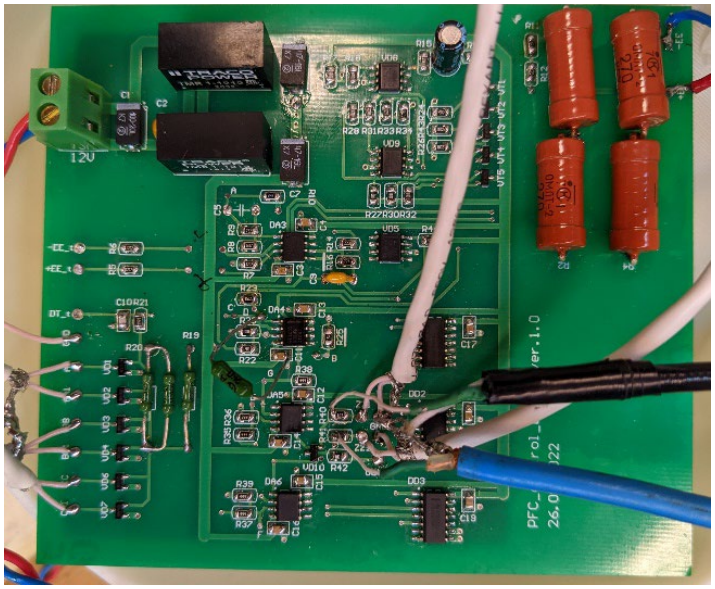


Рисунок 5.3 – Изготовленный экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением

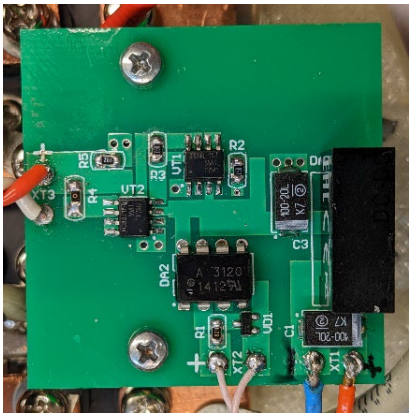
На рисунке 5.3 приведены следующие обозначения: 1 – входной трехфазный дроссель переменного тока; 2 – датчики фазных токов; 3 – СПК; 4 – драйвер СТК; 5 – СУЗ; 6 – выходные электролитические и керамические конденсаторы.

Величина индуктивности каждой обмотки используемого лабораторного дросселя переменного тока составляла приблизительно 800 мкГн. Величина емкости электролитических конденсаторов выходного фильтра составляла 4700 мкФ. Были использованы два конденсатора B43760-A9478-M (EPCOS) с максимальным рабочим напряжением 400 В, включенные последовательно с подключением нейтрали к средней точке.

Были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы СУЗ трехфазного ККМ и драйвера СТК. Для этого выполнены трассировка, изготовление и монтаж соответствующих печатных плат, показанных на рисунке 5.4. Драйвер СТК выполнен на основе микросхемы HCPL-3120 [129].



а)



б)

Рисунок 5.4 – Изготовленные печатные платы экспериментального образца трехфазного ККМ (а – СУЗ; б – драйвер СТК)

5.2 Испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением

Для проведения исследований параметров и характеристик разработанного экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением был подготовлен испытательный стенд, представленный на рисунке 5.5.

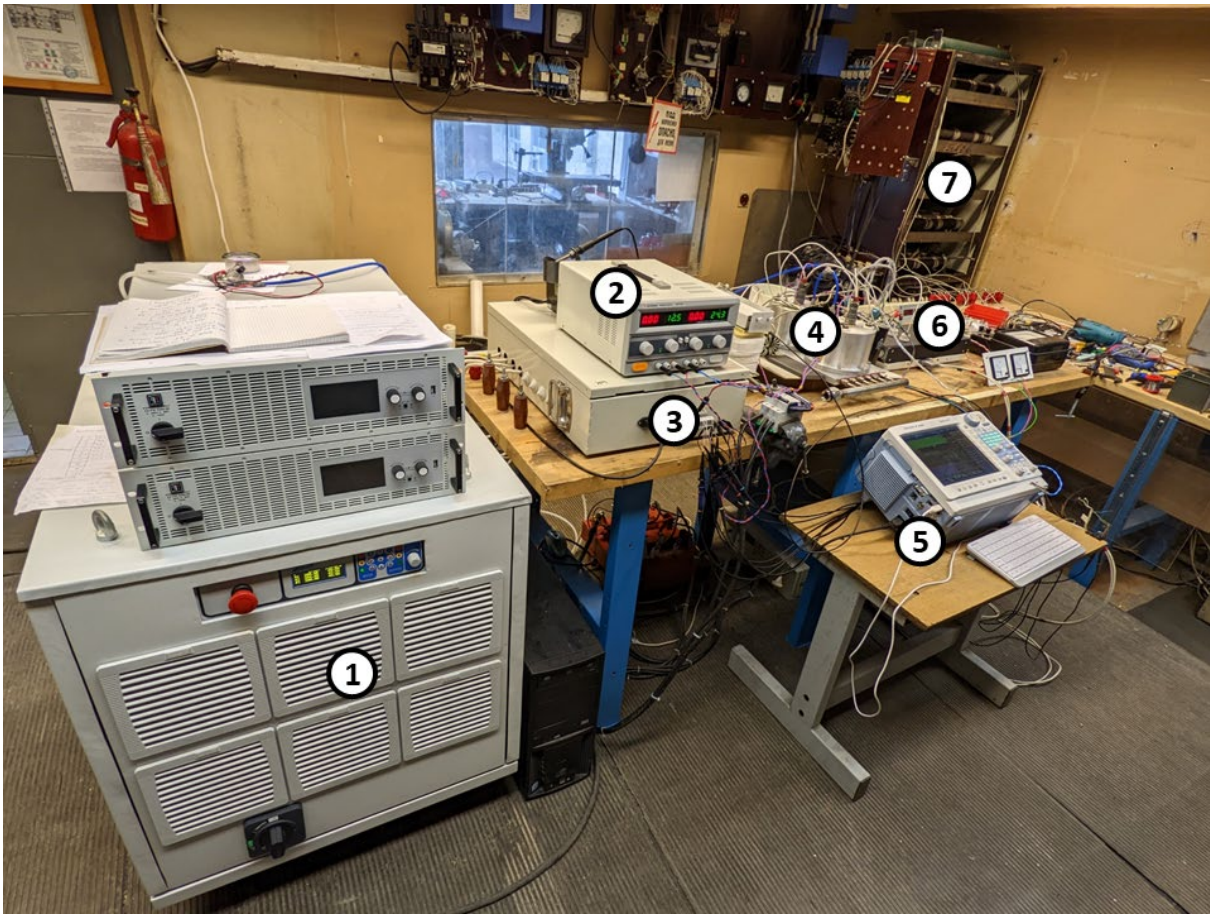


Рисунок 5.5 – Испытательный стенд для проведения исследований экспериментального образца трехфазного ККМ

На рисунке 5.5 приведены следующие обозначения: 1 – входной трехфазный лабораторный источник питания; 2 – вспомогательный лабораторный источник питания; 3 – блок измерений входных фазных токов и напряжений; 4 – экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением; 5 – система сбора данных (ССД); 6 – блок измерений выходных постоянных токов и напряжений; 7 – нагрузка.

В качестве первичного источника электроэнергии на испытательном стенде использован трехфазный лабораторный источник ПНБА33-32/300/1200-ИР («НТЦ АКТОР») номинальной мощностью 32 кВА [130]. В блоках измерений входных фазных токов и напряжений и выходных постоянных токов и напряжений использованы датчики тока LF205-S и датчики напряжения CV3-1000 (LEM) [131-132]. Роль ССД выполняет осциллограф-самописец DL-850E (Yokogawa) [133]. Использованное измерительное оборудование представлено на рисунке 5.6.

а) б) в)

Рисунок 5.6 – Измерительное оборудование, использованное в составе стенда для проведения исследований экспериментального образца трехфазного ККМ (а – DL-850E; б – LF205-S; в – CV3-1000)

5.3 Исследование параметров и характеристик экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением

При проведении исследований изготовленного экспериментального образца трехфазного ККМ проверялась общая работоспособность преобразователя электроэнергии, в частности корректность работы СУЗ, построенной способом совместного общего релейного управления, вычислялись показатели качества потребляемой электроэнергии, обеспечиваемые трехфазным ККМ и его КПД. КПД экспериментального образца вычислялся при помощи выражений (5.2) – (5.5).

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\%; \tag{5.2}$$

$$P_{\text{вых}} = (U_{+270} + |U_{-270}|) \cdot I_{\text{н}}; \tag{5.3}$$

$$P_{\text{вх}} = \sum_{n=1}^{3} P_n\,; \tag{5.4}$$

$$P_n = \frac{1}{T}\int_0^T u_n(t) i_n(t) dt\,, \tag{5.5}$$

где η – коэффициент полезного действия, %; $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность трехфазного ККМ, Вт; $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки, А; $P_{\text{вх}}$ – входная активная мощность трехфазного ККМ, Вт; P_n – мощность, потребляемая по n-й фазе, Вт.

Экспериментальные исследования проводились при максимальной выходной мощности 18 кВт. На первичном трехфазном лабораторном источнике были заданы симметричные фазные напряжения постоянной частотой 400 Гц. Производились включения экспериментального образца трехфазного ККМ, и в процессе его работы при помощи ССД записывались осциллограммы токов и напряжений. Временная развертка при записи осциллограмм составляла 100 мс в клетке, что соответствовало записываемому временному интервалу, равному одной секунде. Частота дискретизации во время записи равнялась одному миллиону точек в секунду [133]. Сначала было выполнено включение экспериментального образца трехфазного ККМ при выходной мощности 3,5 кВт. На рисунке 5.7 продемонстрирована записанная осциллограмма токов и напряжений при работе экспериментального образца трехфазного ККМ при такой выходной мощности. После этого постепенно выходная мощность была увеличена до 18 кВт.

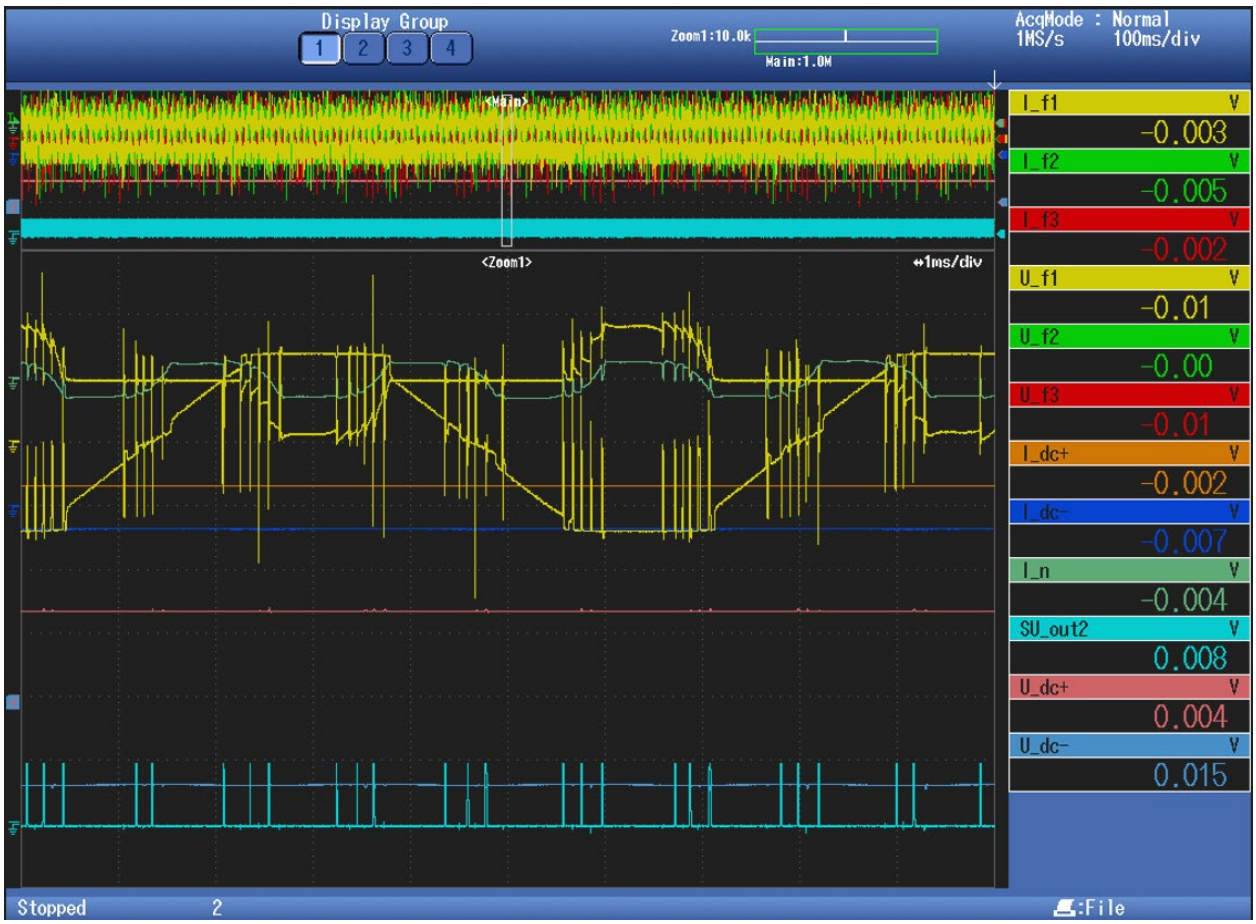


Рисунок 5.7 – Осциллограмма токов и напряжений при работе экспериментального образца трехфазного ККМ

Экспериментальные данные, записанные при проведении испытаний экспериментального образца трехфазного ККМ, были подвергнуты последующей обработке в среде Matlab. При обработке первичных экспериментальных данных для фильтрации записанных сигналов от шумов, из-за электромагнитных помех, вызванных коммутационными процессами, были применены фильтры Савицкого-Голея и рекурсивные фильтры с бесконечной импульсной характеристикой (IIR-фильтры) с неравномерностью частотной характеристики [134-137]. По результатам обработки экспериментальных данных были построены временные диаграммы токов и напряжений при работе экспериментального образца трехфазного ККМ на симметричную нагрузку суммарной мощностью 18 кВт. На рисунке 5.8 показана временная диаграмма фазных напряжений и выходных постоянных напряжений, на рисунке 5.9 показана временная диаграмма фазных токов и тока нейтрали.

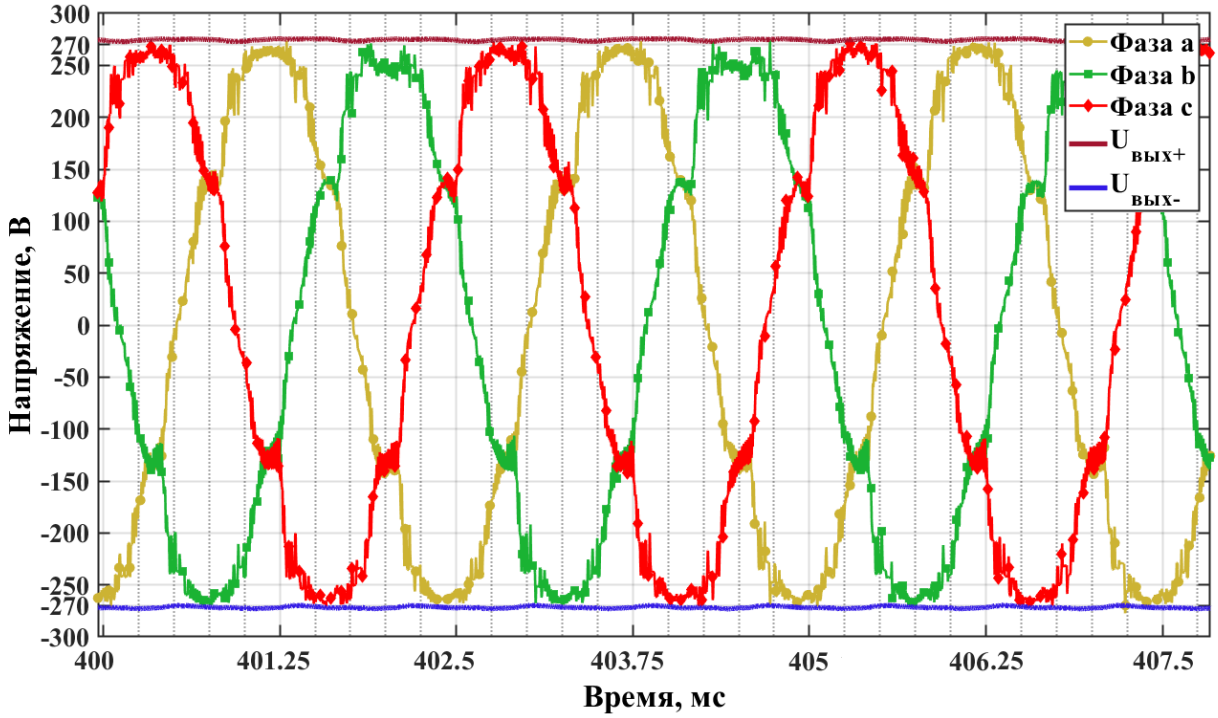


Рисунок 5.8 – Временная диаграмма фазных напряжений и выходных постоянных напряжений экспериментального образца трехфазного ККМ при выходной мощности 18 кВт

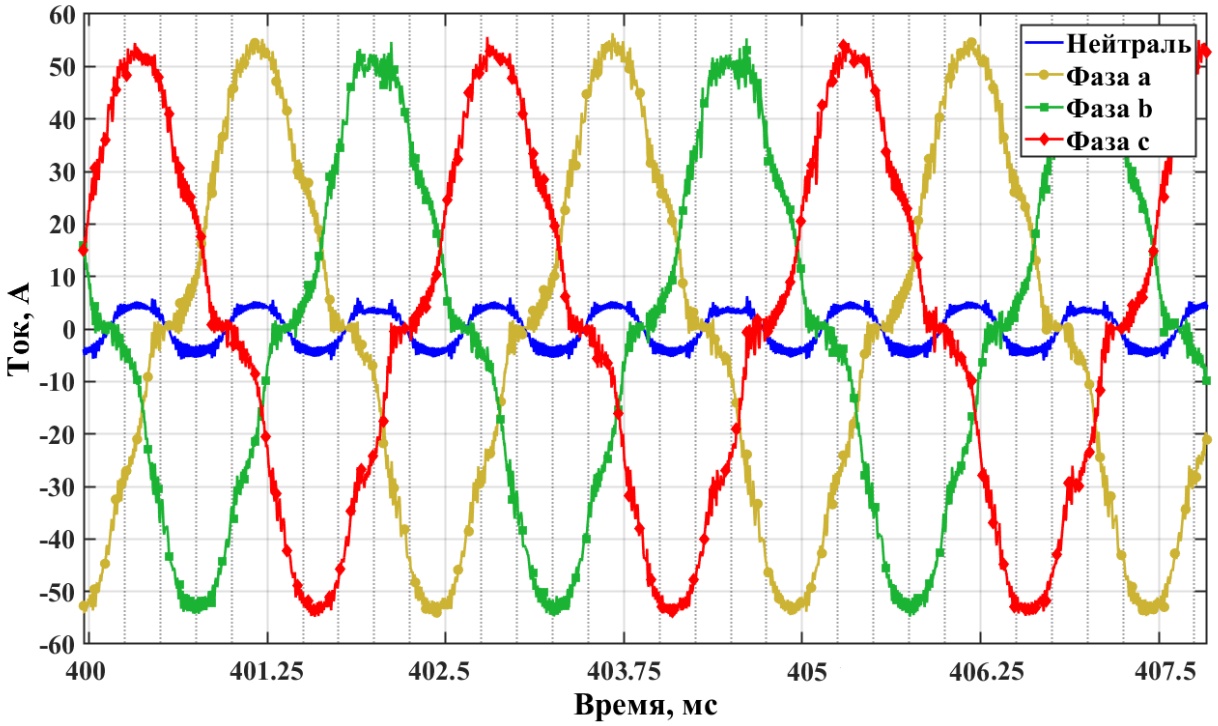


Рисунок 5.9 – Временная диаграмма фазных токов и тока нейтрали экспериментального образца трехфазного ККМ при выходной мощности 18 кВт

Временные диаграммы, показанные на рисунках 5.8-5.9 построены в установившемся режиме. По рисунку 5.8 видно, что выходные напряжения, обозначенные $U_{вых+}$ и $U_{вых-}$ стабилизируются на уровнях +270 В и -270 В относительно нейтрали, соответственно, формируя двуполярное выходное напряжение ±270 В. Фазные напряжения имеют синусоидальную форму, искаженную высокочастотными гармоническими составляющими вследствие процессов коммутации СПК при работе трехфазного ККМ. Временная диаграмма фазных напряжений наглядно демонстрирует необходимость применения предложенных схем формирователей опорного трехфазного напряжения в случае разработки трехфазных ККМ с раздельным пофазным управлением, которые были рассмотрены в разделе 4.2 Главы 4. На рисунке 5.10 представлена временная диаграмма фазного напряжения и фазного тока при работе экспериментального образца трехфазного ККМ на симметричную нагрузку суммарной мощностью 18 кВт.

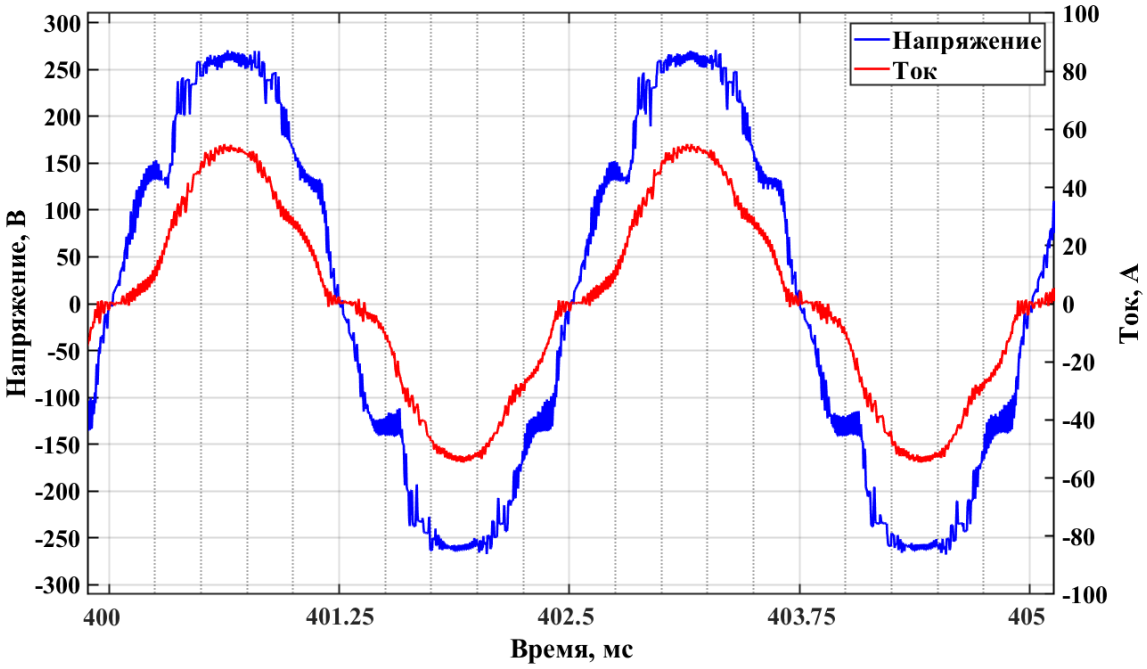


Рисунок 5.10 – Временная диаграмма фазного напряжения и фазного тока экспериментального образца трехфазного ККМ при выходной мощности 18 кВт

Среднее значение частоты коммутации СТК, входящих в состав СПК каждого из двух каналов, составило приблизительно 10 кГц. Эквивалентная

частота преобразования при работе двухпоточной схемы преобразования электроэнергии составила 20 кГц.

По результатам обработки экспериментальных данных были вычислены основные показатели качества потребляемой электроэнергии при мощности нагрузки 18 кВт. Среднее значение коэффициента мощности по трем фазам, вычисленное при помощи выражения (1.1), составило 0,976. Среднее значение коэффициента гармоник потребляемых фазных токов по трем фазам, вычисленное при помощи выражения (1.2), составило 7,321%. Для проведения сравнения и верификации результатов компьютерного моделирования разработанной схемы трехфазного ККМ, показанной на рисунке 5.1, при помощи ИКМ были вычислены основные показатели качества потребляемой электроэнергии при симметричной нагрузке суммарной мощностью 18 кВт. Обеспечиваемый коэффициент мощности по результатам ИКМ составил 0,957. Коэффициент гармоник потребляемых фазных токов по результатам ИКМ составил 7,26 %.

Был проведен сравнительный анализ основных показателей качества потребляемой электроэнергии при выходной мощности 18 кВт, полученных по результатам ИКМ и по результатам проведенных экспериментальных исследований. Результаты сравнения приведены в таблице 5.3.

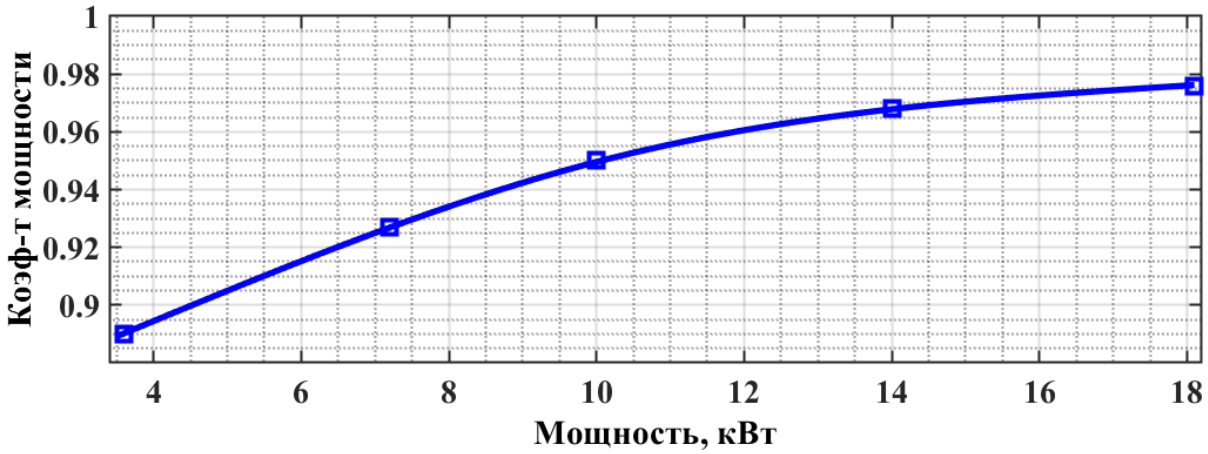
Таблица 5.3 – Показатели качества потребляемой электроэнергии по результатам ИКМ и по результатам экспериментальных исследований

	ИКМ	Эксперимент	Расхождение, %
Коэффициент мощности	0,957	0,976	1,98
Коэффициент гармоник, %	7,26	7,321	0,84

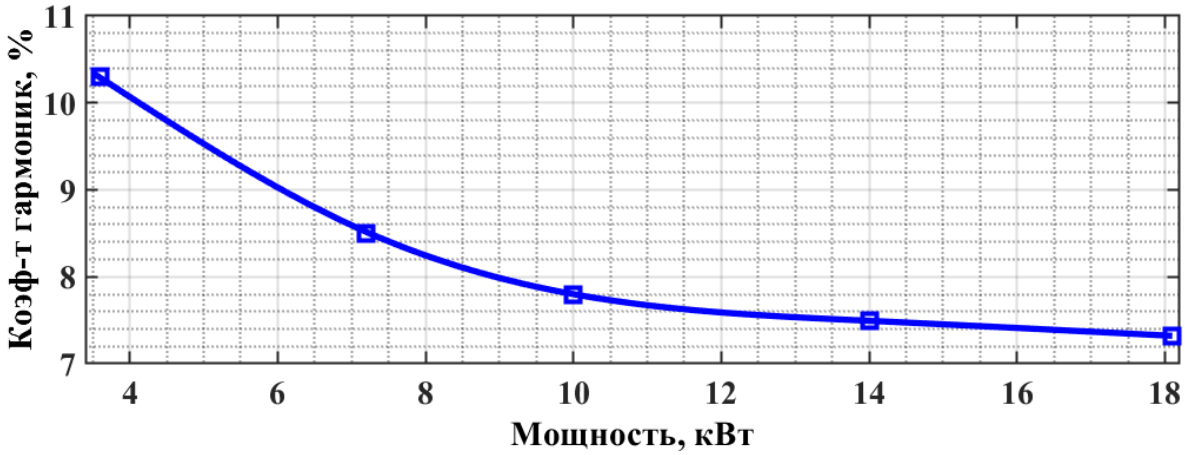
Расхождение между полученными значениями коэффициентов мощности составило 1,98 %, коэффициентов гармоник – 0,84 %. Имеющиеся расхождения обусловлены свойствами реальных компонентов, некоторые из

которых не учитываются в имитационных компьютерных моделях, а также особенностями работы трехфазного лабораторного источника питания.

По результатам обработки полученных экспериментальных данных при работе экспериментального образца 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 5.11.



а)



б)

Рисунок 5.11 – Графики зависимостей показателей качества потребляемой электроэнергии от выходной мощности экспериментального образца трехфазного ККМ (а – коэффициент мощности; б – коэффициент гармоник)

Вычисленный КПД экспериментального образца трехфазного ККМ при работе на симметричную нагрузку суммарной мощностью 18 кВт составил 97,2 %. График зависимости КПД экспериментального образца трехфазного

ККМ от выходной мощности, построенный по результатам обработки полученных экспериментальных данных, представлен на рисунке 5.12.

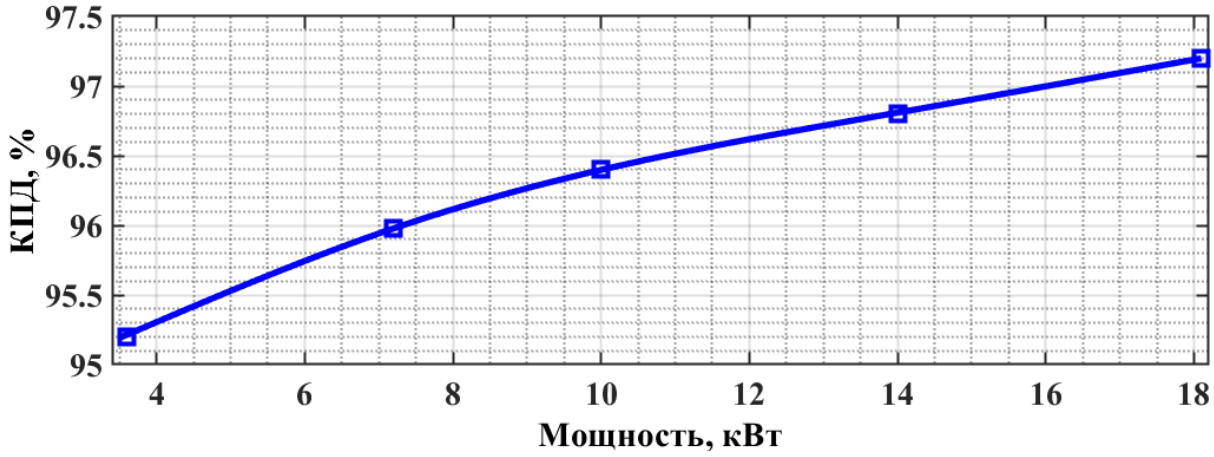


Рисунок 5.12 – График зависимости КПД экспериментального образца трехфазного ККМ от выходной мощности

На рисунке 5.12 видно, что наблюдается некоторое снижение КПД преобразователя электроэнергии при уменьшении мощности нагрузки. При этом, обеспечивается КПД не менее 95 % во всем исследованном диапазоне выходной мощности.

Результаты сравнения показателей качества потребляемой электроэнергии, полученные при помощи ИКМ и при проведении исследований экспериментального образца трехфазного ККМ, а также временные диаграммы электрических процессов, построенные на основании полученных экспериментальных данных, позволяют сделать вывод о работоспособности предложенных схемотехнических решений, касающихся построения трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением, а также о корректности соответствующих разработанных имитационных компьютерных моделей.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

1. Разработан и изготовлен экспериментальный образец трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением с совместным общим управлением.

2. Подготовлен испытательный стенд для проведения экспериментальных исследований трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением.

3. Проведены экспериментальные исследования параметров и характеристик изготовленного экспериментального образца трехфазного ККМ.

4. Произведена обработка полученных экспериментальных данных, по результатам которой построены временные диаграммы токов и напряжений и вычислены основные обеспечиваемые показатели качества потребляемой электроэнергии при работе экспериментального образца трехфазного ККМ.

5. Проведено сравнение показателей качества потребляемой электроэнергии, полученных по результатам ИКМ и по результатам исследований экспериментального образца трехфазного ККМ.

6. Экспериментально получены зависимости показателей качества потребляемой электроэнергии и КПД от выходной мощности экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Проведен обзор существующих разработанных решений в области трехфазных ККМ.

2. Проведен сопоставительный анализ различных структур СПК трехфазных ККМ с совместным общим управлением и с раздельным пофазным управлением, исследованных при помощи ИКМ.

3. Предложены авторские способы построения устройств управления трехфазных ККМ с совместным общим и с раздельным пофазным управлением.

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

5. Разработаны новые схемотехнические решения активных ФТП для СТК, обеспечивающие их безопасную работу в составе СПК трехфазных ККМ.

6. Разработаны способы построения функциональных узлов и схемотехнические решения, обеспечивающие работоспособность трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением.

7. Созданы имитационные компьютерные модели принципиальных электрических схем трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением.

8. Выполнено исследование параметров и характеристик созданных имитационных компьютерных моделей трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением при помощи ИКМ.

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

10. Проведены исследования параметров и характеристик разработанного экспериментального образца трехфазного ККМ с двуполярным выходным напряжением.

11. Проведено сопоставление результатов, полученных при помощи ИКМ и при проведении экспериментальных исследований, подтвердившее достоверность теоретических положений и предложенных новых решений, приведенных в диссертационной работе, а также корректность разработанных имитационных компьютерных моделей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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. DOI: https://doi.org/10.24160/0013-5380-2024-1-10-17.

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.

6. **Алексеев А.О.** Стабилизированное выпрямительное устройство с криогенным охлаждением для перспективных авиационных систем электроснабжения // Сборник трудов научно-исследовательских работ студентов МАИ 2023. – М.: Издательство «Перо», 2023. – С. 6-12.

7. **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.

8. **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), Novosibirsk, Russian Federation, 2024. – P. 1100–1110. – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615120.

9. 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), Novosibirsk, Russian Federation, 2024. – P. 1240–1243. – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615218.

10. 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), Novosibirsk, Russian Federation, 2024. – P. 1210–1213. – DOI 10.1109/EDM61683.2024.10615200.

11. **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.

12. **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.

13. **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.

14. 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 2 825 437 C1, 26.08.2024. Заявка № 2024107031 от 18.03.2024.

15. 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.

16. 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. G. Buticchi The More-Electric Aircraft and Beyond / G. Buticchi, P. Wheeler, D. Boroyevich // Proceedings of the IEEE, 2022. – p. 1-15.
2. V. Madonna Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities / V. Madonna, P. Giangrande, M. Galea // IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 4 №3, September 2018. – p. 646-659.
3. P. Wheeler The More Electric Aircraft: Technology and Challenges / P. Wheeler, S. Bozhko // IEEE Electrification Magazine, Vol. 2, 2014. – p. 6-12.
4. B. Sarlioglu More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft / B. Sarlioglu, C.T. Morris // IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 1 №1, June 2015. – p. 54-64.
5. Лёвин А.В. Электрический самолёт: от идеи до реализации / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв // Москва: Машиностроение, 2010 – 288 с.
6. C.R. Avery Electrical Generation and Distribution for the More Electric Aircraft / C.R. Avery, S.G. Burrow, P.H. Mellor // 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference. – IEEE, 2007.
7. C. Shaw More Electric Power System Concepts for an Environmentally Responsible Aircraft (N+2) / C. Shaw, S.D.A. Fletcher, P.J. Norman, S.J. Galloway // 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Uxbridge, UK, 2012. – p. 1-6.
8. B. Rahrovi A Review of the More Electric Aircraft Power Electronics / B. Rahrovi, M. Ehsani // 2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), College Station, TX, USA, 2019. – p. 1-6.
9. H. Abu-Rub Power Electronics for More Electric Aircraft / H. Abu-Rub, M. Malinowski, K. Al-Haddad // in: Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications. – IEEE, 2014. – p. 365-386.
10. Y. Yan More Electric Aircraft and Power Electronics / Y. Yan, H. Qin, C. Gong, H. Wang // 2014. – p. 11-18.

11. X. Roboam New Trends and Challenges of Electrical Networks Embedded in More Electrical Aircraft / X. Roboam // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, 2011. – p. 26-31.

12. I. Moir More-Electric Aircraft-System Considerations / I. Moir // Proc. IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft, 1999. – p. 10/1-10/9.

13. J.A. Rosero Moving Towards a More Electric Aircraft / J.A. Rosero, J.A. Ortega, E. Aldabas, L. Romeral // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 22 №3, March 2007. – p. 3-9.

14. X. Roboam More Electricity in the Air: Toward Optimized Electrical Networks Embedded in More-Electrical Aircraft / X. Roboam, B. Sareni, A.D. Andrade // IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 6 №4, December 2012. – p. 6-17.

15. J. Devatour Electrical Generation Trends & Prospective for Next Generation Aircraft / J. Devatour // MEA 2019 Conference, February 2019.

16. I. Hakyemez Conceptual Design of Modernized 270 VDC Electrical Power Distribution System for Hercules C-130 Aircraft / I. Hakyemez, O.K. Keles, O. Kalenderli, M. Bagriyanik // IEEE Access, Vol. 12, 2024. – p. 112053-112061.

17. 270VDC Power Systems [Электронный ресурс] // Champion Aerospace – URL: https://www.championaerospace.com/products/270vdc-power-systems (дата обращения: 20.04.2025).

18. R. Osman Report On the Electric System Design of the B787 / R. Osman, A. Gul, A. Bagheshwa, M. Elnemr // 2020.

19. T.A. Stoneham F-22 Aircraft Battery-Charger-Controller System / T.A. Stoneham // SAE Transactions, Vol. 108, 1999. - p. 14-23.

20. A.K. Hyder A Century of Aerospace Electrical Power Technology / A.K. Hyder // Journal of Propulsion and Power, Vol. 19 №6, 2003. - p. 1155-1179.

21. I. Moir Electrical Systems / I. Moir, A. Seabridge, M. Jukes // in: Civil Avionics Systems, 2nd ed. - Wiley, 2013. - p. 235-290.

22. Вольский С.И., Кузнецов Н.В., Юлдашев М.В., Сорокин Д.А., Юлдашев Р.В. Бортовая система электроснабжения для электрических самолетов // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 43—50.

23. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Перспективные системы электроснабжения самолета с полностью электрифицированным оборудованием // Доклады ТУСУР. 2009. №2 (20).

24. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. Централизованные транзисторные преобразователи электроэнергии для систем электроснабжения летательных аппаратов / под ред. Е.В. Машукова. — М.: Издательство МАИ, 2013. — 184 с.

25. Бачурин П.А., Коробков Д.В., Харитонов С.А., Хлебников А.С. Система электропитания постоянного тока с магнитоэлектрическим генератором // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2016. №3 (146).

26. G. Buticchi On-Board Microgrids for the More Electric Aircraft—Technology Review / G. Buticchi, S. Bozhko, M. Liserre, P. Wheeler, K. Al-Haddad // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 66 №7, July 2019. - p. 5588-5599.

27. I. Cotton Higher Voltage Aircraft Power Systems / I. Cotton, A. Nelms, M. Husband // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol. 23 №2, February 2008. - p. 25-32.

28. F. Gao An Improved Voltage Compensation Approach in a Droop-Controlled DC Power System for the More Electric Aircraft / F. Gao, S. Bozhko, G. Asher, P. Wheeler, C. Patel // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31 №10, October 2016. - p. 7369-7383.

29. F. Gao Comparative Stability Analysis of Droop Control Approaches in Voltage-Source-Converter-Based DC Microgrids / F. Gao et al. // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32 №3, March 2017. - p. 2395-2415.

30. ГОСТ Р 54073-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 53 с.

31. 15 kW, three-phase Vienna rectifier with low cost mixed-signal control for power factor correction [Электронный ресурс] // STMicroelectronics – URL: https://www.st.com/en/evaluation-tools/stdes-viennarect.html (дата обращения: 10.05.2025);

32. High frequency three-phase PFC solutions for high power charging stations [Электронный ресурс] // Würth Elektronik – URL: https://www.we-online.com/files/pdf1/wuerth-elektronik_stmicroelectronics_digital-days.pdf (дата обращения: 10.05.2025);

33. On Board Charger (OBC) Three-phase PFC Converter [Электронный ресурс] // Onsemi – URL: https://www.onsemi.com/pub/collateral/and9957-d.pdf (дата обращения: 11.05.2025);

34. Electrical Power Solutions: PFC Units [Электронный ресурс] // Crane aerospace & electronics – URL: https://www.craneae.com/active-power-factor-correction-pfc (дата обращения: 11.05.2025);

35. Сорокин Д.А., Вольский С.И. Математическая модель трехфазного корректора мощности с улучшенным коэффициентом полезного действия // Электричество. - 2019. - №5;

36. Краснов И.Ю., Черемисин В.Н. Проектирование активного корректора коэффициента мощности и имитационное моделирование его работы // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — № 4. — С. 92-97.

37. Чаплыгин Е.Е., Во Минь Тьинь, Нгуен Хоанг Ан. Виенна-выпрямитель – трехфазный корректор коэффициента мощности // Силовая электроника. — 2006. — № 1. — С. 20—24.

38. Овчинников Д.А., Кастров М.Ю., Лукин А.В., Малышков Г.М. Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. — 2002. — Вып. 6. — С. 12—39.

39. J.W. Kolar The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems - Part I / J.W. Kolar, T. Friedli // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28 №1, January 2013. - p. 176-198.

40. T. Friedli The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems - Part II / T. Friedli, M. Hartmann, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29 №2, February 2014. - p. 543-560.

41. B. Singh A Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters / B. Singh, B.N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, D.P. Kothari // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51 №3, June 2004. - p. 641-660.

42. K.-F. Liao Analysis and Implementation of Boost PFC for Aircraft Power Supply / K.-F. Liao, T.-J. Liang, H.-K. Liao // 2021 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Taipei, Taiwan, 2021. - p. 1-6.

43. R. Greul The Delta-Rectifier: Analysis, Control and Operation / R. Greul, S.D. Round, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21 №6, November 2006. - p. 1637-1648.

44. N.N. Lopatkin Controllable Rectifiers with Input Power Factor Correction / N.N. Lopatkin, G.S. Zinoviev // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 2021. - p. 150-153.

45. R. Ridley Three-Phase Power Factor Correction Circuits - Part 1 / R. Ridley // Proceedings of HFPC'94, 1994. - p. 278-321.

46. J.-C. Crebier Loss Free Gate Driver Unipolar Power Supply for High Side Power Transistors / J.-C. Crebier, N. Rouger // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23 №3, May 2008. - p. 1565-1573.

47. L. Huber Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers / L. Huber, Y. Jang, M.M. Jovanovic // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23 №3, May 2008. - p. 1381-1390.

48. J.W. Kolar Three-Phase Power Factor Correction Technology / J.W. Kolar, J. Sun // IEEE PESC'01 (Seminars 1 & 4), Vancouver, BC, Canada, June 17-22 2001.

49. R. Burgos Space Vector Modulation for Vienna-Type Rectifiers Based on the Equivalence between Two- and Three-Level Converters: A Carrier-Based

Implementation / R. Burgos, R. Lai, Y. Pei, F. Wang, D. Boroyevich, J. Pou // 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL, USA, 2007. - p. 2861-2867.

50. H. Mao Review of High-Performance Three-Phase Power-Factor Correction Circuits / H. Mao, F.C.Y. Lee, D. Boroyevich // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44, August 1997. - p. 437-446.

51. L. Huber Open-Loop Control Methods for Interleaved DCM/CCM Boundary Boost PFC Converters / L. Huber, B.T. Irving, M.M. Jovanovic // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23 №4, July 2008. - p. 1649-1657.

52. A.R. Prasad An Active Power Factor Correction Technique for Three-Phase Diode Rectifiers / A.R. Prasad, P.D. Ziogas, S. Manias // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 6, January 1991. - p. 83-92.

53. R.L. Alves Analysis and Implementation of a Hybrid High-Power-Factor Three-Phase Unidirectional Rectifier / R.L. Alves, I. Barbi // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24 №3, March 2009. - p. 632-640.

54. N.-Y. Dai Application of a Three-Level NPC Inverter as a Three-Phase Four-Wire Power Quality Compensator by Generalized 3DSVM / N.-Y. Dai, M.-C. Wong, Y.-D. Han // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21 №2, March 2006. - p. 440-449.

55. R. Greul Analysis and Control of a Three-Phase, Unity Power Factor Y-Rectifier / R. Greul, S.D. Round, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22 №5, September 2007. - p. 1900-1911.

56. A. Stupar Towards a 99% Efficient Three-Phase Buck-Type PFC Rectifier for 400-V DC Distribution Systems / A. Stupar, T. Friedli, J. Minibock, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27 №4, April 2012. - p. 1732-1744.

57. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника: монография. — М.: Техносфера, 2005. — 632 с.

58. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. — М.: Энергоатомиздат, 1988.

59. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 376 с.

60. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я. Топологии корректоров коэффициента мощности в автономных системах электропитания. — Морской вестник, 2013, № 1(10), с. 37-40.

61. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. В 3-х ч. Ч.1 Линейные электрические цепи: Учебник для вузов. – 5-е изд., испр. И доп. -М.: Энергия, 1978 – 592с. Ил.

62. ГОСТ IEC 61000-4-30-2017 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-30. Методы испытаний и измерений. Методы измерений качества электрической энергии.

63. ГОСТ IEC/TS 61000-1-2-2015 Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 1-2. Общие положения. Методология достижения функциональной безопасности электрических и электронных систем, включая оборудование, в отношении электромагнитных помех.

64. А. О. Алексеев., Д. А. Шевцов. Методы обеспечения равномерного токораспределения в силовых ячейках многопоточных преобразователей электроэнергии. – Практическая силовая электроника. 2025. №1 (97). С. 36-40.

65. J.W. Kimball A Stabilizing, High-Performance Controller for Input Series-Output Parallel Converters / J.W. Kimball, J.T. Mossoba, P.T. Krein // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23 №3, May 2008. - p. 1416-1427.

66. M. Lee Modeling and Design for a Novel Adaptive Voltage Positioning (AVP) Scheme for Multiphase VRMs / M. Lee, D. Chen, K. Huang, C.-W. Liu, B. Tai // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23 №4, July 2008. - p. 1733-1742.

67. C. Rech Impact of Hybrid Multilevel Modulation Strategy on Input and Output Harmonic Performances / C. Rech, J.R. Pinheiro // 2005 IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Austin, TX, USA, 2005. - p. 444-450 Vol.1.

68. O. Garcia Digital-Control-Based Solution to the Effect of Nonidealities of the Inductors in Multiphase Converters / O. Garcia, A. de Castro, P. Zumel, J.A. Cobos // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22 №6, November 2007. - p. 2155-2163.

69. O. Garcia Current Self-Balance Mechanism in Multiphase Buck Converter / O. Garcia, P. Zumel, A. de Castro, P. Alou, J.A. Cobos // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24 №6, June 2009. - p. 1600-1606.

70. S. Kim A Parallel-Connected Single Phase Power Factor Correction Approach with Improved Efficiency / S. Kim, P.N. Enjeti // 2002 IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Dallas, TX, USA, 2002. - p. 263-269 Vol.1.

71. A. Payman Energy Management in a Fuel Cell/Supercapacitor Multisource/Multiload Electrical Hybrid System / A. Payman, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24 №12, December 2009. - p. 2681-2691.

72. P. Zumel Differential-Mode EMI Reduction in a Multiphase DCM Flyback Converter / P. Zumel, O. Garcia, J.A. Oliver, J.A. Cobos // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24 №8, August 2009. - p. 2013-2020.

73. X. Bai A Novel Current Mirror Sensing Based Current Balance Method for Multi-Phase Buck DC-DC Converter / X. Bai, M. Zhao, S. Zhang, Z. Yang, X. Wu // 2017 International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), Hsinchu, Taiwan, 2017. - p. 1-2.

74. K.K. Leong A Single Stage 54V to 1.8V Multi-Phase Cascaded Buck Voltage Regulator Module / K.K. Leong, G. Deboy, K. Krischan, A. Muetze // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), Charlotte, NC, USA, 2015. - p. 1966-1973.

75. P. Azer Generalized State Space Average Model for Multi-Phase Interleaved Buck, Boost and Buck-Boost DC-DC Converters: Transient, Steady-

State and Switching Dynamics / P. Azer, A. Emadi // IEEE Access, Vol. 8, 2020. - p. 77735-77745.

76. Машуков Е.В., Шевцов Д.А., Ульященко Г.М. Многофазный стабилизированный конвертор // Транзисторные устройства распределения, преобразования и регулирования электроэнергии: Тематический сборник научных трудов. — М.: Экон, 1999. — С. 30-33.

77. Кадацкий А.Ф., Саксонов А.В. Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при безразрывных токах дросселей // Электронная техника в автоматике. — 1985. — Т. 16.

78. Кадацкий А.Ф., Саксонов А.В. Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при безразрывных токах дросселей // Электронная техника в автоматике. — 1985. — Т. 16.

79. Мелешин В.И., Овчинников Д.А. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. — М.: Техносфера, 2011. — 576 с.

80. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учебное пособие. — 5-е изд., испр. и доп. — М.: Юрайт, 2012. — 667 с.

81. IGBT Loss Calculation [Электронный ресурс] // Renesas electronics – URL: https://www.renesas.com/en/document/apn/igbt-loss-calculation?srsltid=AfmBOorgFOuxfp_QUw7J7udjnCV0rMmuVuZOjwsSpkSqF0zXBVMhYctG (дата обращения: 06.03.2025).

82. Волкович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого- цифровых электронных устройств, 2-е изд., испр. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 528с., ил.

83. VUO160-12NO7 Datasheet (PDF) – IXYS Corporation [Электронный ресурс]. URL: https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/126184/IXYS/VUO160-12NO7.html (дата обращения: 12.04.2025).

84. Vishay. VS-GT180DA120U – 180 A, 1200 V, Generation 3, N-Channel IGBT [Электронный ресурс]. URL: https://www.vishay.com/docs/96044/vs-gt180da120u.pdf (дата обращения: 16.03.2025).

85. Vishay. VS-HFA140FA120 – 140 A, 1200 V, Fast Recovery Diode [Электронный ресурс]. URL: https://www.vishay.com/docs/94746/vs-hfa140fa120.pdf (дата обращения: 16.03.2025).

86. L. Dalessandro Discontinuous Space-Vector Modulation for Three-Level PWM Rectifiers / L. Dalessandro, S.D. Round, U. Drofenik, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23 №2, March 2008. - p. 530-542.

87. Y. Jang A New PWM ZVS Full-Bridge Converter / Y. Jang, M.M. Jovanovic // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22 №3, May 2007. - p. 987-994.

88. W. Huang A New Family of Zero-Voltage-Transition PWM Converters with Dual Active Auxiliary Circuits / W. Huang, G. Moschopoulos // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21 №2, March 2006. - p. 370-379.

89. T. Nussbaumer Improving Mains Current Quality for Three-Phase Three-Switch Buck-Type PWM Rectifiers / T. Nussbaumer, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21 №4, July 2006. - p. 967-973.

90. T. Nussbaumer Comprehensive Design of a Three-Phase Three-Switch Buck-Type PWM Rectifier / T. Nussbaumer, M. Baumann, J.W. Kolar // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22 №2, March 2007. - p. 551-562.

91. M.-C. Wong Cylindrical Coordinate Control of Three-Dimensional PWM Technique in Three-Phase Four-Wired Trilevel Inverter / M.-C. Wong, J. Tang, Y.-D. Han // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18 №1, January 2003. - p. 208-220.

92. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1972. — 768 с.

93. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. — М.: Наука, 1977. — 560 с.

94. Юрьевич Е.И. Теория автоматического управления: учебник для студентов высших технических учебных заведений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1975.

95. Конев Ю.И., Гулякович Г.Н., Полянин К.П [и др.] Микроэлектронные электросистемы: применения в радиоэлектронике / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1987. — 240 с.: ил.

96. Мрыкин С.В. Системы электроснабжения самолётов: учебное пособие. — Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2023. — 64 с.: ил.

97. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В 2 т. Т. 1: Системы электроснабжения летательных аппаратов / под ред. С.А. Грузкова. — М.: Изд-во МЭИ, 2005. — 568 с.

98. Кондряков А.Д., Леонтьев М.К. Электрические силовые установки летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 2. С. 49-61.

99. What is a safe operating area? [Электронный ресурс] // Toshiba electronic devices and storage corporation – URL: https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/faq/mosfet_igbt/igbt-008.html (дата обращения: 11.02.2025).

100. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. — М.: Высшая школа, 1983. — 271 с.

101. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: учебник для вузов. — 6-е изд., стер. — СПб.: Лань, 2002. — 480 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

102. Березин О.К., Костиков В.Г., Парфенов Е.М. [и др.] Проектирование источников электропитания электронной аппаратуры: учебное пособие / под ред. В.А. Шахнова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: КНОРУС, 2016. — 536 с.

103. Букреев С.С., Головацкий В.А., Гулякович Г.Н. [и др.] Источники вторичного электропитания / под ред. Ю.И. Конева. — М.: Радио и связь, 1983. — 280 с.: ил.

104. Головацкий В.А., Гулякович Г.Н., Конев Ю.И. [и др.] Источники вторичного электропитания / под ред. Ю.И. Конева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1990. — 280 с.: ил.

105. P. Friedrichs Silicon Carbide Power-Device Products - Status and Upcoming Challenges with a Special Attention to Traditional, Nonmilitary Industrial Applications / P. Friedrichs // Physica Status Solidi B, Vol. 245 №7, 2008. - p. 1232-1238.

106. O.J. Guy Silicon Carbide Schottky Diodes and MOSFETs: Solutions to Performance Problems / O.J. Guy, M. Lodzinski, A. Castaing, P.M. Igic, A. Perz-Tomas, M.R. Jennings, P.A. Mawby // IEEE Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 1, 2008. - p. 2464-2471.

107. W. Janke Silicon Carbide Schottky Diode - A Promising Device for Power Electronics / W. Janke, A. Hapka, M. Oleksy // PPEE, Vol. 1, 2007. - p. 247-252.

108. W. Janke DC Characteristics of the SiC Schottky Diodes / W. Janke, A. Hapka, M. Oleksy // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, Vol. 1, 2011. - p. 183-188.

109. J.-I. Itoh A New Bidirectional Switch With Regenerative Snubber to Realize a Simple Series Connection for Matrix Converters / J.-I. Itoh, K.-I. Nagayoshi // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24 №3, March 2009. - p. 822-829.

110. B. Ivanovic A Novel Active Soft Switching Snubber Designed for Boost Converter / B. Ivanovic, Z. Stojiljkovic // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19 №3, May 2004. - p. 658-665.

111. Y. Tsuruta Snubber-Assisted Zero-Voltage and Zero-Current Transition Bilateral Buck and Boost Chopper for EV Drive Application and Test Evaluation at 25 kW / Y. Tsuruta, Y. Ito, A. Kawamura // IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56 №1, January 2009. - p. 4-11.

112. R.T.H. Li Use of Hybrid PWM and Passive Resonant Snubber for a Grid-Connected CSI / R.T.H. Li, H.S.-H. Chung, W.-H. Lau, B. Zhou // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25 №2, February 2010. - p. 298-309.

113. Снижение уровня динамических потерь: "мягкая" коммутация и снабберы / А. Винтрих, У. Николаи, В. Турски [и др.] // Силовая электроника. – 2013. – Т. 6, № 45. – С. 58-64.

114. Ли, П. Выбор, проектирование и расчет схемы снаббера / П. Ли, М. Хердин // Силовая электроника. – 2022. – № 2(95). – С. 8-11.

115. M. Zarghani An Energy Recovery Scheme for RCD Snubber in the Series Configuration of IGBTs / M. Zarghani, S. Peyghami, F. Iannuzzo, F. Blaabjerg, S. Kaboli // 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Vancouver, BC, Canada, 2021. - p. 5183-5189.

116. T. Lu Active Clamping Circuit With Status Feedback for Series-Connected HV-IGBTs / T. Lu, Z. Zhao, S. Ji, H. Yu, L. Yuan // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50 №5, September-October 2014. - p. 3579-3590.

117. H.-J. Choe Passive Snubber for Reducing Switching-Power Losses of an IGBT in a DC-DC Boost Converter / H.-J. Choe, Y.-C. Chung, C.-H. Sung, J.-J. Yun, B. Kang // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29 №12, December 2014. - p. 6332-6341.

118. T.F. Wu Soft-Switching Boost Converter with a Flyback Snubber for High Power Applications / T.F. Wu, Y.D. Chang, C.H. Chang, J.G. Yang // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27 №3, March 2012. - p. 1108-1119.

119. J. Lin Active-Clamp Forward Converter With Lossless-Snubber on Secondary-Side / J. Lin, S. Lee, C. Ting, F. Syu // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34 №8, August 2019. - p. 7650-7661.

120. R. Parvari RCD Snubber Design Based on Reliability Consideration: A Case Study for Thermal Balancing in Power Electronic Converters / R. Parvari, M. Zarghani, S. Kaboli // Microelectronics Reliability, Vol. 88-90, September 2018. - p. 1311-1315.

121. C. U-Yaisom The Study and Analysis of the Conducted EMI Suppression on Power MOSFET Using Passive Snubber Circuits / C. U-Yaisom, W. Khanngern, S. Nitta // 2002 3rd International Symposium on Electromagnetic Compatibility, May 2002. - p. 561-564.

122. H.K. Patel Voltage Transient Spikes Suppression in Flyback Converter Using Dissipative Voltage Snubbers / H.K. Patel // 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, June 2008. - p. 897-901.

123. M. Son Impact of Snubber Parameters on Voltage Sharing in Series-Connected Insulated Gate Bipolar Transistors / M. Son, T. Lee, S. Kwon, Y. Cho // Journal of Power Electronics, Vol. 20 №4, July 2020. - p. 1002-1014.

124. R.T.H. Li Passive Lossless Snubber for Boost PFC With Minimum Voltage and Current Stress / R.T.H. Li, H.S. Chung, A.K.T. Sung // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25 №3, March 2010. - p. 602-613.

125. S. Aiswariya Simulation and Analysis of a Single Phase AC-DC Boost PFC Converter with a Passive Snubber for Power Quality Improvement / S. Aiswariya, R. Dhanasekaran // 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies, Ramanathapuram, India, 2014. - p. 421-425.

126. S. Aiswariya Performance Enhancement of a PFC Converter with a New Passive Snubber Circuit for High Power Applications / S. Aiswariya, R. Dhanasekaran // 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, Coimbatore, India, 2015. - p. 1-6.

127. Новиков П. Снаббер — это просто // Силовая электроника. - 2019. - №2. - С. 4-7.

128. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

129. HCPL-3120 [Электронный ресурс] // TME – URL: https://www.tme.eu/Document/dde4b33e41c14c71ffd1089c37a0b6d6/HCPL3120.pdf (дата обращения: 19.04.2025).

130. Преобразователь напряжения ПНБА33-32/300/1200-ИР [Электронный ресурс] // НТЦ АКТОР – URL: https://www.aktorstc.ru/production/pnba33-32-300-1200-ir (дата обращения: 15.02.2025).

131. LF205-S [Электронный ресурс] // LEM – URL: https://www.lem.com/en/product-list/lf-205s (дата обращения: 15.02.2025).

132. CV3-1000 [Электронный ресурс] // LEM – URL: https://www.lem.com/en/product-list/cv-31000 (дата обращения: 15.02.2025).

133. DL850E/DL850EV ScopeCorder [Электронный ресурс] // Yokogawa Test&Measurement – URL: https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/dl850edl850ev-scopecorder/#Documents-Downloads____downloads_8 (дата обращения: 15.05.2025).

134. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. — М.: Сов. радио, 1980.

135. Рабинер Л.Р., Гоулд В. Теория и применение цифровой обработки сигналов. — М.: Мир, 1978.

136. Savitzky, A. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures / Savitzky, A., Golay, M.J.E. // Analytical Chemistry. 1964, 36 (8): 1627–39.

137. Savitzky-Golay filter design - MATLAB [Электронный ресурс] // Mathworks – URL: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/sgolay.html (дата обращения: 15.05.2025).

Минобрнауки России

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
тел.: +7 499 158-92-09 | www.mai.ru | e-mail: mai@mai.ru
ОКПО 02066606 | ОГРН 1037739180820 | ИНН 7712038455 | КПП 774301001

20.06.2025 № 310-18/26

на № от

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича «Трехфазный корректор коэффициента мощности с двуполярным выходным напряжением для перспективных авиационных систем электроснабжения» в учебный процесс кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы»

Результаты диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича «Трехфазный корректор коэффициента мощности с двуполярным выходным напряжением для перспективных авиационных систем электроснабжения» в частности:

- имитационные компьютерные модели трехфазных ККМ с двуполярным выходным напряжением;
- способы построения устройств управления трехфазными четырехпроводными ККМ;
- способы симметрирования выходного напряжения при несимметричной нагрузке

используются в учебных курсах лекций и практических занятий по дисциплинам: «Компьютерное моделирование преобразователей электроэнергии», «Статические преобразователи электроэнергии систем электроснабжения летательных аппаратов», «Силовые электронные регуляторы» для студентов, обучающихся по профилям «Информационные технологии в электроэнергетических и электромеханических системах» и «Электрооборудование летательных аппаратов» на кафедре 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы».

Директор дирекции института №3
«Системы управления, информатика и электроэнергетика» Следков Ю. Г.

Заведующий кафедрой 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Ковалев К. Л.

Общество с ограниченной ответственностью
«РЭСТАР»
Москва, 125080, Волоколамское ш, д.2, цок. эт.,
пом. I, комн. 137
ИНН/КПП 7743034958/774301001
ОГРН 1157746014293
тел./факс (499) 640-13-11, (916) 1-746-746
e-mail: rstart@mail.ru

Исх. № 09 от 17.06.2025

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук «Трехфазный корректор коэффициента мощности с двуполярным выходным напряжением для перспективных авиационных систем электроснабжения», выполненной Алексеевым Алексеем Олеговичем, используются в разработках ООО «РЭСТАР».

Перечень внедренных результатов:

1. Схемы активных формирователей безопасной недиссипативной траектории переключения силовых транзисторных ключей.
2. Способы совместного и раздельного управления трехфазными ККМ.
3. Схемотехнические решения функциональных узлов устройств управления с совместным и раздельным управлением.

Полученные результаты диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича позволяют обеспечивать безопасную работу силовых транзисторных ключей за счет применения двух- и четырехключевых схем с активными формирователями низкоэнергетической недиссипативной траектории переключения. Результаты работы использованы при разработке и проектировании транзисторных регуляторов бесколлекторных электродвигателей постоянного тока.

Генеральный директор _____/Сухов Д.В.

Общество с ограниченной ответственностью ОГРН 1157746014293 * г. Москва *

Подготовлено:
Ведущий инженер-электроник
Крикунов А.А.

ООО «ТРАНСКОНВЕРТЕР»

119071, г. Москва, ул. Малая Калужская 15, стр.17, Э 2, пом. X, комн. 16,
тел.: +7 (495) 955-93-70, факс: +7 (499) 753-93-70
Р/с 407 028 100 000 106 626 65 в АО «ЮниКредит Банк» г. Москва, к/с 301 018 103 000 000 005 45,
БИК 044525545, ИНН 7733541959, КПП 772501001, ОКПО 77451428, ОГРН 1057746715047

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Трансконвертер»
_____ Вольский С. И.
« 19 » июня 2025 г.

АКТ №2/07-2025

о практическом использовании результатов диссертационной работы Алексеева Алексея Олеговича «Трехфазный корректор коэффициента мощности с двухполярным выходным напряжением для перспективных авиационных систем электроснабжения» в ООО «Трансконвертер»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук «Трехфазный корректор коэффициента мощности с двухполярным выходным напряжением для перспективных авиационных систем электроснабжения» Алексеева Алексея Олеговича были использованы в ООО «Трансконвертер» при модернизации четвертой секции испытательного СИП200 ТКС200.900.000.00.

Результаты диссертационной работы Алексеева А.О., а именно:

– предложенный способ построения управления трехфазного корректора мощности с совместным одновременным и с раздельным независимым управлением;

– разработанный алгоритм обеспечения симметричного двухполярного выходного напряжения трехфазного корректора мощности при работе на несимметричную нагрузку;

– оригинальные схемотехнические решения активных формирователей траектории переключения для силовых транзисторов, обеспечивающие их безопасную работу в составе трехфазного корректора мощности;

– предложенный способ формирования опорных синусоидальных сигналов для трехфазных корректоров мощности посредством раздельного управления,

внесли практический вклад в успешное завершение модернизации четвертой секции стенда испытательного СИП200 ТКС200.900.000.00.

Практическое использование указанных результатов диссертационной работы Алексеева Алексеева Алексея Олеговича обеспечило снижение действующего значения тока, потребляемого стендом испытательным СИП200, при уменьшении суммарного коэффициента гармонических составляющих на более 3,5%.

Начальник конструкторского бюро Ю.Ю. Скороход