

*На правах рукописи*



Султонов Оламафруз Олимович

СИММЕТРИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МАЛЫХ ГЭС В  
АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электропривод, мехатроника и электромеханика».

**Научный руководитель –**

**Воронин Сергей Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, научный сотрудник управления научной и инновационной деятельности ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

**Официальные оппоненты:**

**Саплин Леонид Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, научный сотрудник инновационного научно-исследовательского центра ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», г. Челябинск;

**Кашин Яков Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрических машин ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар.

**Ведущая организация –**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный аграрный университет», г. Ижевск.

Защита состоится 17 марта 2025 г., в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.437.14 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на официальном сайте ЮУрГУ по адресу:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243714/sultonov-olamafruz-olimovich>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7 (351)-272-30-30, доб. 7, e-mail: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru)

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.437.14  
д-р техн. наук. профессор



М.А. Григорьев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к использованию в различных отраслях экономики возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Это связано с происходящими изменениями в энергетической политике мировых держав, где определяющее значение приобретает переход на энергосберегающие и ресурсосберегающие технологии. Практическое использование ВИЭ получило сегодня интенсивное развитие во многих странах мира. Республику Таджикистан (РТ) по своей площади можно отнести к странам с небольшой территорией по сравнению с другими странами мира. При этом большая часть населения сосредоточена в условиях удалённости от централизованного электроснабжения, что приводит особенно в зимние периоды к нехватке электроэнергии. Время перерыва электроснабжения потребителей в эти периоды времени составляют 7-9 часов в сутки. Несмотря на то, что РТ располагает 4% от мирового и около 69% гидроэнергетического потенциала в Центральной Азии из-за сложности рельефа местности подвод электроэнергии централизованного электроснабжения с технической точки зрения не всегда целесообразен. При этом как было отмечено выше сложная орография местности позволяет на стоках этих рек с минимальными затратами строить малых ГЭС (МГЭС) тем, самым обеспечить потребителей электроэнергией от автономных источников. В настоящее время в мире накоплен большой опыт строительства и эксплуатации МГЭС. Проблема обеспечения дешевой электроэнергией, как промышленных объектов, так и населенных пунктов, была и остается весьма актуальной. При повышенных требованиях к качеству электроэнергии, обусловленное использованием населения различной бытовой техники: стиральных машин, холодильников, компьютеров и т.д., чувствительных к колебаниям амплитуды и частоты напряжения сети, появилась необходимость создания устройств, обеспечивающих такое качество. Одним из таких способов решения является разработка МГЭС с полупроводниковыми преобразователями в низконапорных реках, которая показывает наибольшую эффективность. Из условия упрощения структур МГЭС, с целью обеспечения их работы в автономном необслуживаемом режиме, предлагается использовать неуправляемые простейшие элементы: турбину в виде центробежного насоса и генератор на основе синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов. Тогда качество энергии будет обеспечиваться полупроводниковым преобразователем напряжения. Очевидно, что надёжность работы таких МГЭС в автономном режиме будет определяться не только надёжностью её функциональных элементов, но также сложностью и объёмом электронных управляющих устройств. Поэтому, чем проще алгоритмы управления и функционирования МГЭС, тем меньше объём электронных управляющих устройств и тем проще обеспечить бесперебойность работы и регламентное обслуживание. Одной из проблем, возникающих при использовании полупроводниковых преобразователей в составе МГЭС, является симметрирование напряжения при несимметричной нагрузке. При решении этой проблемы традиционными методами резко возрастает требуемый объём вычислительных ресурсов, приводящий к усложнению схем и снижению их надёжности. Предлагается решение задачи симметрирования напряжения на выходе трехфазного преобразователя при наличии несимметрии нагрузки

за счёт использования упрощенного алгоритма дискретного регулирования напряжения через дополнительную стойку.

**Степень научной разработанности проблемы.** Значительный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований МГЭС и управление полупроводниковыми преобразователями в автономном режиме внесли как российские, и так зарубежные ученые: Ганджа С.А., Харитонов Г.С., Лукутин Б.В. Дудов М.Х., Лавров Н.П., Обухов С.Г., Февралев А.В., Зиновьев Г.С., Розанов Ю.К., Дудкин М.М. Климаш В.С., Шрейнер Р.Т., Гарганеев А.Г., Lipo Bimal K. Bose, Marvin J. Fisher, R. Zhang, M.E. и др.

При большом количестве научных разработок в этом направлении, проблема симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке полностью не решена. Не определена оптимальная структура МГЭС, не оценена возможность использования дискретного преобразователя напряжения в составе МГЭС. Разработанные алгоритмы и схемотехнические решения сложны и не надежны. Качество симметрированного напряжения при изменении нагрузки и режимов работы не удовлетворяет требованиям, которые необходимы потребителю. Таким образом, при большой распространенности полупроводниковых преобразователей в системах ВИЭ и автономных объектов применение новых схемотехнических и алгоритмических решений, позволяющих повысить качество их работы, является актуальной задачей.

**Целью диссертационной работы является:** обеспечение требуемого качества выходного напряжения МГЭС с полупроводниковым преобразователем при несимметричной нагрузке в различных режимах.

Для этого необходимо решить ряд научно-технических задач:

1. Выбрать и обосновать структурную схему для МГЭС.
2. Оценить возможность использования дискретного преобразователя напряжения в составе МГЭС.
3. Решить вопросы симметрирования напряжения при использовании дискретного преобразователя.
4. Дать пример практической реализации системы симметрирования.

**Объектом исследования** является МГЭС с полупроводниковым преобразователем напряжения.

**Предметом исследования** являются режимы и алгоритмы преобразования напряжения в МГЭС при симметричных и несимметричных режимах работы

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. На основании математического, имитационного и компьютерного моделирования теоретически обоснована и практически показана возможность использования дискретного релейного регулятора для решения задач симметрирования напряжения.
2. Исследована динамика процесса симметрирования напряжения с использованием метода дискретного потактового симметрирования, показывающая ее прак-

тическую целесообразность при работе МГЭС.

3. На основе анализа системных свойств и связей разработаны электрические схемы устройства симметрирования, пригодные для практической реализации на МГЭС.

4. Разработанная имитационная модель МГЭС с полупроводниковым преобразователем с нулевым проводом позволит исследовать и оптимизировать ее статические и динамические режимы в процессе проектирования.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Проведен гармонический анализ напряжения дискретного преобразователя при различных способах коммутации результате которого установлено, что содержание высших гармоник для стандартных способов коммутации ключей инвертора (120, 150, 180 градусов) входит допустимую для бытовых электросетей норму 8%.

2. Теоретически и практически показана возможность использования в МГЭС дискретного преобразователя постоянного напряжения в трёхфазное переменное, что является развитием общей теории электротехнических комплексов.

3. Впервые предложено, теоретически исследовано и практически реализовано устройство потактового дискретного симметрирования напряжения на выходе трёхфазного полупроводникового преобразователя напряжения, что является вкладом в развитие общей теории электротехнических комплексов.

4. Разработан принцип и методика расчёта релейного регулятора для устройства симметрирования на основе математического, имитационного и компьютерного моделирования.

5. Разработаны электрические схемы устройства симметрирования, пригодные для практической реализации на МГЭС при работе в различных режимах;

6. Разработанная имитационная модель МГЭС с полупроводниковым преобразователем с нулевым проводом которая позволяет исследовать и оптимизировать ее статические и динамические режимы в процессе проектирования;

7. Результаты исследований внедрены в Открытое акционерное общество «Барки Точик» и ООО «Южно-Уральский Электромеханический завод» а также в учебном процессе на кафедрах «Электрические станции» Института энергетики Таджикистана (дисциплины «Проектирование гидроэлектростанций для малых рек», «Управления электрическими машинами», «Проектирование электрических станций и подстанций» и «Передачи и распределения электроэнергии на постоянном токе» и «Электроснабжения» Горно-металлургического института Таджикистана (дисциплины «Ветроэнергетика» и «Трансформаторная преобразовательная подстанция»).

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались методы структурного и параметрического синтеза, методы теоретических основ электротехники, математические методы матричных уравнений, метод дискретных систем автоматического управления, имитационное моделирование с применением пакета MATLAB/Simulink, а также методы физического моделирования на основе экспериментальных исследований.

**На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Структура МГЭС, содержащая в себе основные системные свойства и связи электротехнического комплекса, отличающаяся тем, что основные силовые преобразователи энергии – турбина и генератор являются неуправляемыми, а качество энергии обеспечивается выходным полупроводниковым преобразователем постоянного напряжения в переменное.

2. Новый метод дискретного потактового симметрирования, отличающийся от известных преобразователей более простым способом реализации и требующий минимального объема вычислительных процедур.

3. Релейный регулятор для управления процессом симметрирования, позволяющий МГЭС функционировать в различных режимах, что является развитием общей теории электротехнических комплексов и систем применительно к МГЭС.

**Реализация результатов работы.** Внедрены в учебный процесс:

- на кафедре «Электрические станции» Института энергетики Таджикистана;
- на кафедре «Электроснабжения» Горно-металлургический Институт Таджикистан.

**Достоверность научных положений,** результатов и выводов обосновываются корректностью постановки задач, применением известных хорошо апробированных на практике методов физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования, подтверждением адекватности математического моделирования, выполненного в программном пакете *MATLAB/Simulink* по результатам натуральных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Всероссийская научно-практической конференции» в г. Казань 20-21 марта 2019г; «XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов» в г. Санкт-Петербург 27-29 марта 2019г. «XXIV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика» в г. Казань 8-9 декабря 2020г; «XXIV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика» в г. Казань 7-8 декабря 2021г; «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research&Practice (PEAMI)» в г. Магнитогорск 4-5- октября 2019г; «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research&Practice (PEAMI)», в г. Магнитогорске 25-26 сентября 2020г; «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research&Practice (PEAMI)», в г. Магнитогорске 25-26 сентября 2021г; а также на заседаниях и научно-технических семинарах кафедры «Теоретические основы электротехники» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) в 2017-2021 гг.

**Соответствие научной специальности.** Исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствует пунктам 1,2,3 научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в материалах конференций IEEE, входящих в международные системы цитирования Scopus/Web of Science, 6 статей в сборниках докладов и трудах российских и международных конференций РИНЦ, 2 патента на изобретение: 1 патент РФ, 1 патент ЕС.

### **Личный вклад автора**

Все научные результаты, включенные в диссертацию и представленные к защите, получены лично автором, а именно:

- обоснование структуры МГЭС, в которой электромеханический генератор обеспечивает производство энергии, а её качество обеспечивается электронным преобразователем;
- предложение отказаться от сложных и дорогих векторных преобразователей постоянного напряжения в трёхфазное переменное и использовать дискретные простейшие преобразователи;
- осуществлять симметрирование выходного напряжения преобразователя с помощью релейного регулятора напряжения;
- анализ гармонического состава напряжений на выходе полупроводникового преобразователя при различных способах коммутации.

Личный вклад диссертанта в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в определении направлений исследований, постановке задач, разработке математических и имитационных моделей.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 190 страницах, содержит 135 страницы основного текста, 87 рисунков, 27 таблиц и 12 приложений на 36 страницах, 184 наименования библиографического списка.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** показана актуальность выбранной темы. Показаны степень научной разработанности исследуемой темы, задачи исследования, объект и предмет исследования, примененные в работе методы исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту, соответствие паспорту специальности, практическая значимость и результаты внедрения, апробация и публикации по теме диссертационного исследования.

**В первой главе** выполнен анализ состояния развития возобновляемых источников энергии в мире и гидроэнергетических ресурсов, особенности организации проблемы и технико-экономическое обоснование структур электроснабжения отдаленных и труднодоступных районов Республики Таджикистан. Спрос на энергию в мире непрерывно растет с ростом промышленности и с увеличением населения. Чтобы удовлетворить этот спрос, необходимо использовать новые источники энергии. Потребление энергии увеличивается ежегодно, начиная с 1970 года по настоящее время, и возросло на 70% и в 2030 году увеличится на 55% по сравнению с 2010 год. Каждый год в мире проблемы электроснабжения ухудшаются с повышением цен на нефть и изменения климата. При этом в мире требования к возобновляемой энергетике увеличиваются. Гидроэнергетика наиболее зрелая технология возобновляемой энергетике, которая используется более века и стала основным источником электроэнергии для 55 стран. Благодаря большим падениям и значительной водоносности рек, Республика Таджикистан обладает громадным потенциалом, который теоретически составляет 4% от мирового и 69% от потенциала Центральной Азии.

В настоящее время используется только 5% его и вырабатывается 98% электроэнергии за счет гидроэлектростанция. Таджикистан - развивающаяся страна, и по мере развития ее потребности в энергии возрастают на 6-9% в год, тем не менее существует ее острый дефицит энергии. Наиболее рациональным путём решения задач электроснабжения высокогорных труднодоступных районов Таджикистана и устранения дефицита электрической энергии в энергосистеме является строительство и эксплуатация автономных МГЭС для каждого населённого пункта. Для успешного функционирования автономных МГЭС необходимо пересмотреть их структуру с точки зрения развития автономности эксплуатации, повышения надёжности работы и снижения стоимости. В диссертации выполнен анализ режимов работы МГЭС по традиционной схеме и предлагается автоматизированная МГЭС для автономного режима работы. Краткий анализ функциональной схемы традиционных МГЭС показал, что она является достаточно сложным техническим объектом, требующим периодического обслуживания и постоянного наблюдения. Еще на режим работы МГЭС сильно влияют следующие переменные факторы: температурный коэффициент, высота местности локального проживания потребителей энергии над уровнем моря, коэффициент конструктивно-технологических особенностей зданий и сооружений, коэффициент благосостояния потребителей, которые создают несимметричную нагрузку, представленную в таблице 1.

Таблица 1 – Суточный режим работы малых ГЭС «Панчруд 500кВт»

Время час	Мощность кВт	Ток на фазах, А			Напряжения на фазах потребителей, В		
		А	В	С	А	В	С
8:00	260	300	290	170	219	198	202
9:00	230	250	230	120	218	199	202
10:00	200	230	200	100	219	198	202
12:00	250	300	250	150	219	198	202
14:00	220	250	200	120	218	199	202
16:00	240	270	250	150	219	197	202
18:00	260	300	290	190	218	197	202

Вместо этого предлагается обеспечить стабилизацию амплитуды и частоты выходного напряжения МГЭС с помощью электронного преобразователя напряжения, а возбуждение генератора осуществлять от постоянных магнитов. Для реализации МГЭС в таком виде созданы все условия, во-первых, значительное развитие электронной элементной базы, в части существенного повышения передаваемой мощности, уменьшения потерь преобразования, массы и габаритов аппаратуры, во-вторых, появление новых магнитных материалов с высокой удельной энергией. Кроме того, расширение использования электронной аппаратуры позволит сделать МГЭС действительно автономным необслуживаемым объектом. Для этого в её состав необходимо ввести устройства, реализующие функции диагностики состояния узлов и агрегатов МГЭС и функции связи с центральным диспетчерским пунктом системы электроснабжения республики. С учётом изложенного, функциональная схема МГЭС как автономного электротехнического комплекса представлена на

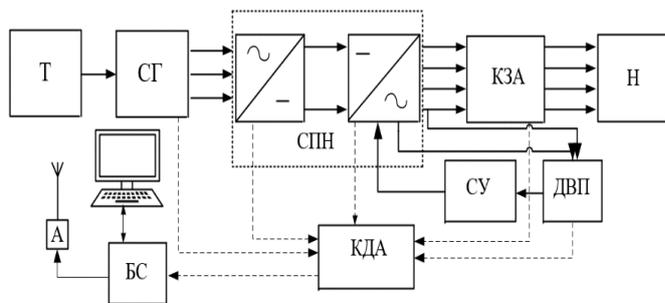


Рисунок 1 – Функциональная схема автономной автоматизированной МГЭС

гностической аппаратуры (КДА), блок связи (БС), антенна (А), системы управления (СУ), нагрузка (Н).

**Во второй главе** выполнен анализ режима работы силового полупроводникового преобразователя напряжения с четвертой стойкой и известных методов симметрирования напряжения на выходе полупроводниковых преобразователей. Предлагается новый метод симметрирования напряжения на выходе полупроводникового преобразователя с дискретной коммутацией с номинальным значением первой гармоники. Во многих случаях, например, для бытовых потребителей, требования по содержанию высших гармоник в напряжении невысокие. Поэтому вместо сложных и дорогостоящих синусоидальных преобразователей напряжения можно использовать более простые устройства с дискретным управлением, например, схему предлагаемого устройства на основе трёхфазного мостового инвертора, изображенную на рисунке 2. При реализации 180-градусной шеститактной коммутации, когда каждый ключ инвертора открыт в течение половины периода, форма фазного напряжения  $U\phi$  на выходе инвертора при симметричной фазной нагрузке будет иметь вид на рисунке 3, а. Несмотря на существенно несинусоидальную форму напряжения,

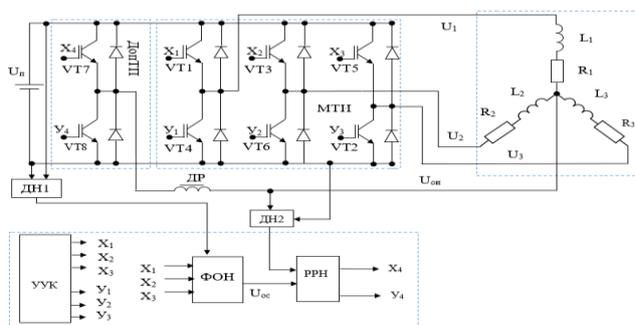


Рисунок 2 – Схема реализации устройства симметрирования

электроснабжения небольших сельских поселений. Но при питании бытовых потребителей нагрузка на каждую фазу может существенно отличаться, вплоть до полного отсутствия на одной или двух из них. При наличии несимметрии нагрузки форма фазного напряжения искажается (рисунок 3, б). Следовательно, в состав преобразователя необходимо вводить дополнительные устройства симметрирования, позволяющие сохранять форму фазного напряжения при наличии несимметрии нагрузки. Поскольку предлагается простейшая схема преобразователя напряжения, нет имеет смысла использовать описанные выше известные, достаточно сложно технически и алгоритмически реализуемые устройства.

рисунке 1

Комплекс содержит следующие элементы: гидротурбину (Т), синхронный трёхфазный генератор (СГ), силовой преобразователь напряжения (СПН), блок датчиков выходных параметров ГЭС (ДВП), блок коммутационно защитной аппаратуры (КЗА), блок контрольно диа-

гностической аппаратуры (КДА), блок связи (БС), антенна (А), системы управления (СУ), нагрузка (Н).  
 содержание высших гармоник в нём оказывается незначительным и действующее значение первой гармоники напряжения составляет 0,955 от действующего значения полного напряжения. Таким образом, такой простейший преобразователь (устройство симметрирования) с успехом может быть использован там, где требования по содержанию высших гармоник в фазном напряжении не очень жёсткие. Например, для

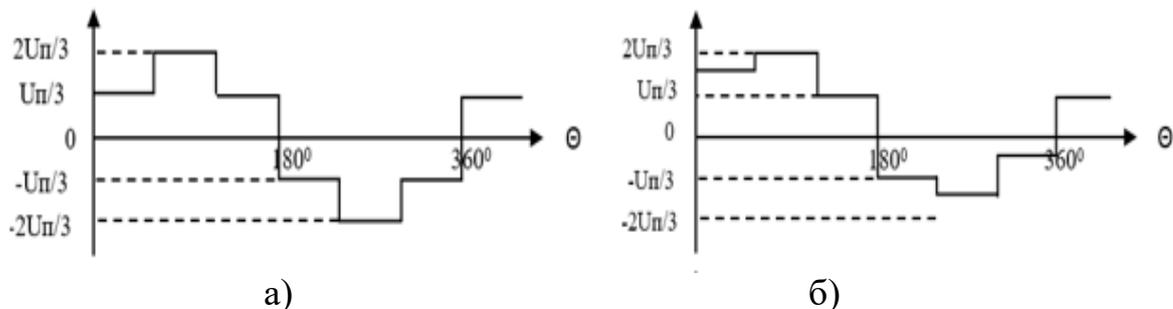


Рисунок 3 – Форма фазного напряжения при 180 градусной коммутации преобразователя при симметричной нагрузке.

В диссертации предлагается решить задачу симметрирования более простыми средствами. Основная идея заключается в измерении напряжения общей точки нагрузки инвертора, соединённой в звезду относительно отрицательной шины источника питания, и поддержания формы этого напряжения, соответствующей случаю симметричной нагрузки. В частности, форма напряжения общей точки нагрузки  $U_{ОН}$  относительно отрицательной шины источника питания имеет вид сплошной линии, а при несимметричной нагрузке - вид пунктирной линии (рисунок 4). Следовательно, в состав преобразователя (устройства для симметрирования напряжения) необходимо ввести устройство, которое бы обеспечивало диаграмму напряжения на нулевой точке, соответствующую симметричному режиму. Устройство содержит: мостовой трёхфазный инвертор (МТИ), состоящий из шести транзисторов (три верхних транзистора  $VT1, VT3, VT5$  управляются сигналами  $X_1, X_2, X_3$  и три нижних транзистора  $VT4, VT6, VT2$  управляются сигналами  $Y_1, Y_2, Y_3$ ). МТИ соединен с дополнительным транзисторным полумостом (ДопТП), который состоит из двух транзисторов  $VT7, VT8$ , которые управляются сигналами  $X_4, Y_4$  и источником электроэнергии  $U_{П}$ . МТИ имеет три выхода, соединенных с трехфазной нагрузкой, дополнительный транзисторный полумост, соединен через дроссель с общей точкой трехфазной нагрузки. Для управления ДопТП в УУК интегрирован формирователь заданного значения напряжения общей точки (ФОН), релейный регулятор напряжения (РРН).

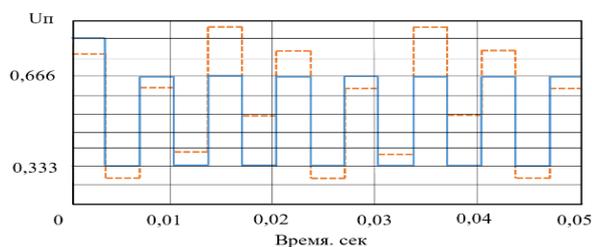


Рисунок 4 – Напряжение нулевой точки источника питания при симметричном (сплошные линии) и несимметричном (пунктирные линии) режиме

значения напряжения общей точки (ФОН), релейный регулятор напряжения (РРН). ФОН имеет четыре входа и один выход, на три входа подаются сигналы  $X_1, X_2, X_3$  УУК, четвертый вход соединен через первый датчик напряжения (ДН1) с источником электроэнергии  $U_{П}$ , выход ФОН соединен с РРН. РРН также имеет два входа и два выхода. Первый вход РРН соединен с ФОН, второй вход соединен через второй датчик напряжения (ДН2) с нулевым проводом относительно шины «минус» МТИ. На выходах РРН формируются сигналы  $X_4, Y_4$ , которые управляют ДопТП. Устройство работает следующим образом: входное напряжение источника питания постоянного тока  $U_{П}$  преобразуется МТИ с использованием 180 градусной дискретной коммутацией в трёхфазное линейное напряжение переменного тока (рисунок 3, а). Для управления МТИ используется УУК с шестью выходными сигналами  $X_1, X_2, X_3$  и  $Y_1, Y_2, Y_3$ . УУК с заданной частотой коммутации ключей  $f_k=300Гц$  формирует

импульсы управления ключами МТИ длительностью 180 электрических градусов. На верхние транзисторы  $VT1, VT3, VT5$  МТИ подаются сигналы  $X_1, X_2, X_3$ . На нижние транзисторы –  $VT4, VT6, VT2$  –  $Y_1, Y_2, Y_3$ . Когда  $X_1 = 1$ , открывается верхний транзистор  $VT1$  – МТИ, когда  $X_1 = 0$  закрывается верхний транзистор  $VT1$  – МТИ, когда  $Y_1 = 1$  открывается нижний транзистор  $VT4$  МТИ, когда  $Y_1 = 0$ , закрывается нижний транзистор  $VT4$  МТИ. При  $180^\circ$  дискретной коммутации одновременно подаются сигналы на три транзисторных ключа МТИ. Открытие транзисторных ключей МТИ происходит по такому алгоритму:  $X_1X_3Y_2 - X_1Y_2V_3 - X_1X_2V_3 - X_2Y_1V_3 - X_2X_3V_2 - Y_1Y_2X_3 - X_1X_3Y_2$  и далее по кругу. Так как одновременно замкнуты транзисторные ключи МТИ абсолютно во всех трех фазах нагрузки, режим называется пофазной дискретной коммутацией. На каждом такте коммутации две нагрузки из трехфазной нагрузки подключены к постоянному источнику  $U_{\Pi}$  параллельно, а третья нагрузка из трехфазной нагрузки последовательно с ними. При симметричной нагрузке в фазах трехфазной нагрузки на выходе датчика напряжений (ДН2) нулевой точки относительно шины «минус» источника питания напряжение  $U_{OH}$  изменяется от  $0,333$  до  $0,666U_{\Pi}$ , что сплошной линией показано на рисунке 4. (на чётных тактах два ключа подключаются к шине плюс и один ключ к шине минус  $U_{OH} = 0,666U_{\Pi}$ , а на нечётных тактах один ключ к шине плюс и два ключа шины минус  $U_{OH} = 0,333U_{\Pi}$ .) Поскольку потенциал периодически от такта к такту коммутации меняется, можно условно принять, что на чётном такте потенциал высокий, а на нечётном – низкий, за начало отсчёта можно взять три импульса на выходе УУК, например,  $X_1, X_2, X_3$ . С помощью ФОН формируется, соответственно симметричной нагрузке, значения потенциала общей точки  $U_{OC}$  на чётных тактах  $0,666U_{\Pi}$  и нечётных тактах  $0,333U_{\Pi}$ . (разность  $U_{OC}$  и  $U_{OH}$  будет нулевой поэтому ДопТП работать не будет). В случае несимметрии нагрузки в фазах форма сигнала на нулевом проводе  $U_{OH}$  относительно шины «минус» МТИ меняется, (пунктирная линия на рисунок 4.). Выходные трёхфазные линейные напряжение переменного тока будут несимметричны, что показано на рисунке 3, б). Определив разность напряжения между  $U_{OC}$  и  $U_{OH}$ , РРН выдает сигналы  $X_4, Y_4$ , которые в свою очередь управляют ДопТП. В этом случае на выходе МТИ напряжение симметрируется (рисунок 3, а). Таким образом, обеспечивается симметрирование напряжения при наличии разных величин активных и индуктивных фазных нагрузок, то есть при несимметричной нагрузке. Тогда алгоритм работы регулятора будет такой:

$$\begin{aligned}
 x_4 = 0, y_4 = 1 &\rightarrow U_{OC} - U_{OH} > \delta U \\
 x_4 = 1, y_4 = 0 &\rightarrow U_{OC} - U_{OH} < \delta U \\
 x_4 = 0, y_4 = 0 &\rightarrow |U_{OC} - U_{OH}| \leq \delta U
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $\delta U$  – зона нечувствительности реле.

Показано, что принцип симметрирования напряжения на выходе преобразователя по тому же алгоритму, что и при дискретной коммутации может быть использован для случая синусоидального выходного напряжения.

**В третьей главе** рассмотрены динамические процессы работы системы в режиме дискретного потактового симметрирования. При этом все элементы системы

представлены в виде стандартных известных в теории управления динамических звеньев. В результате анализа сделан вывод, что использование простого линейного регулятора невозможно. Между тем, использование релейного регулятора существенно может упростить алгоритмы работы системы и обеспечить характерное для таких регуляторов высокое быстродействие. Релейная система стабилизации в виде

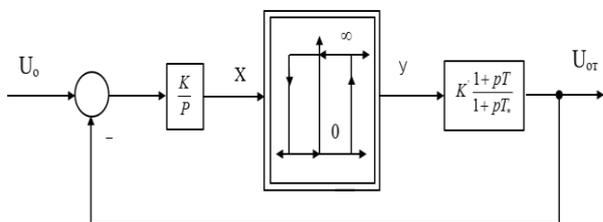


Рисунок 5 – Представление релейной системы в виде нелинейной

нелинейной одноконтурной системы изображена на рисунке 5. Проведён расчёт релейной системы в режиме вибрационного регулирования напряжения. При этом была поставлена задача создания инженерной методики расчёта и настройки релейной системы автоматической стабилизации напряжения, обеспечения устойчиво-

сти и заданных динамических свойств её работы, удобной при практическом использовании. Графоаналитические методы расчёта автоколебаний отличаются повышенной трудоёмкостью и не позволяют сформулировать рекомендации по настройке релейной системы. Широко применяемый в инженерной практике метод расчёта релейных систем – метод гармонической линеаризации, в данном случае неприменим, так как не выполняется гипотеза фильтра и условие непрерывности производной периодической составляющей входного сигнала релейного элемента  $\tilde{x}(t)$  в моменты переключений напряжения, необходимое для существования автоколебаний. Для решения поставленной задачи воспользуемся точным аналитическим методом расчёта автоколебательного режима работы релейной системы, учитывающим высшие гармонические составляющие в отличие от метода гармонической линеаризации. Метод использует понятие годографа релейной системы  $J(\omega)$ :

$$J(\omega) = -\frac{1}{\omega} \dot{\tilde{z}}\left(\frac{\pi}{\omega}\right) - j\tilde{z}\left(\frac{\pi}{\omega}\right). \quad (2)$$

Здесь  $\tilde{z}\left(\frac{\pi}{\omega}\right)$  – периодически изменяющийся выходной сигнал релейной системы.

Годографы релейной автоматической системы можно использовать для анализа периодических режимов, с их помощью очень удобно качественно и количественно исследовать влияние параметров релейного элемента, структуры и параметров линейной части системы на частоту и форму автоколебаний. Годограф  $J(\omega)$  с учётом разложения в ряд Фурье последовательности прямоугольных импульсов  $\tilde{y}(t)$  и реакции на эти импульсные воздействия линейной части системы представлен в следующем виде:

$$J(\omega) = \frac{4K_p}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \left\{ R_l[(2l-1)\omega] + j \frac{I_l[(2l-1)\omega]}{2l-1} \right\}, \quad (3)$$

где  $R_l(\omega)$  и  $I_l(\omega)$ , соответственно, действительная и мнимая частотные характеристики линейной части системы. Выделим действительная и мнимая составляющие годографа релейной системы:

$$Re J(\omega) = -\frac{1}{\omega} \dot{\tilde{z}}\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = \frac{4K_p}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} R_l[(2l-1)\omega], \quad (4)$$

$$Im J(\omega) = -\tilde{z}\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = \frac{4K_p}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{I_l[(2l-1)\omega]}{2l-1}. \quad (5)$$

Эти выражения далее используются для расчёта параметров автоколебательного режима работы системы. Условия существования автоколебаний частоты  $\omega_0$  в релейной системе с учётом введённого понятия годографа релейной системы  $J(\omega)$  будут:

$$\begin{cases} Im J(\omega_0) = -\Delta, \\ Re J(\omega_0) < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Эти условия полностью соответствуют условиям надлежащего момента переключения и надлежащего направления переключения. Что касается амплитуды автоколебаний, то поскольку

$$\max \tilde{z}(t) = \Delta, \quad (7)$$

то амплитуда автоколебаний равна  $\Delta$ , т.е. автоколебания происходят внутри петли гистерезиса. Это является следствием отмеченной выше существенной нелинейности рассматриваемой релейной системы управления. При настройке релейной системы частота автоколебаний, как правило, ограничена сверху и снизу. При этом релейная система должна работать в режиме вибрационного регулирования на высокой частоте автоколебаний. К повышению частоты приводит либо уменьшение ширины петли гистерезиса  $\Delta$ , либо увеличение коэффициента усиления линейной части системы  $K$ . Для передаточной функции линейной части системы  $W_L(p)$  выражения  $R_L(\omega)$  и  $I_L(\omega)$  будут иметь следующий вид:

$$R_L(\omega) = \frac{K(T-T_*)}{1+\omega^2 T_*^2}, \quad (8)$$

$$I_L(\omega) = -\frac{K(1+\omega^2 T T_*)}{\omega(1+\omega^2 T_*^2)}. \quad (9)$$

Тогда условия существования автоколебаний переписутся в виде:

$$\begin{cases} Im J(\omega_0) = -\frac{4KK_p}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1+[(2l-1)\omega_0]^2 T T_*}{(2l-1)^2 \omega_0 \{1+[(2l-1)\omega_0]^2 T_*^2\}} = -\Delta, \\ Re J(\omega_0) = \frac{4KK_p}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{T-T_*}{1+[(2l-1)\omega_0]^2 T_*^2} < 0. \end{cases} \quad (10)$$

Эти соотношения использовались для расчёта автоколебательного режима работы релейной системы стабилизации напряжения. Можно отметить низкую трудоёмкость расчётных соотношений, их высокую точность. Расчёт по первому (линейному) приближению годографа релейной системы, что примерно соответствует точности метода гармонической линеаризации, для рассчитанного примера приводит к погрешности в 23%. Можно сделать вывод, что предлагаемая инженерная методика расчёта и настройки релейной системы, обеспечения устойчивости и заданных динамических свойств её работы достаточно проста при использовании, легко автоматизируется и может быть рекомендована для практического применения. Проведённое в работе имитационное моделирование и экспериментальное исследование полностью подтвердили сделанные выводы. Задание по напряжению обрабатывается без перерегулирования за 0,4мс. В релейной системе устанавливается устойчивый предельный цикл заданной амплитуды и частоты.

В четвертой главе для проверки его работоспособности предложенного принципа симметрирования в разных режимах работы реализована имитационная модель полупроводникового преобразователя напряжения с ДопТП в среде *MATLAB/Simulink* (рисунок 6).

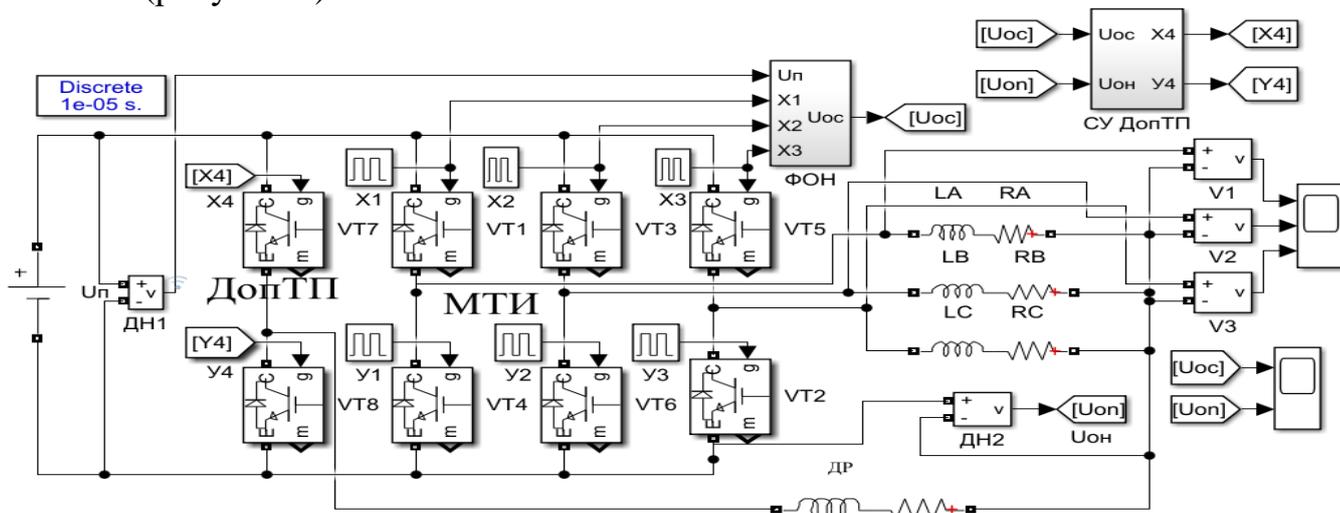


Рисунок 6 – Модель устройства симметрирования на основе релейного регулятора в *MATLAB/Simulink*

В модели реализована дискретная коммутация силовых ключей и дискретный потактовый метод симметрирования напряжения посредством релейного регулятора. В процессе моделирования нагрузки были взяты согласно таблице 2 (симметричная и несимметричная). Результаты, получаемые в имитационной модели полупроводникового преобразователя напряжения с ДопТП при симметричной нагрузке показаны на рисунке 7, а при несимметричной нагрузке показаны на рисунке 8. Форма фазного напряжения полупроводникового преобразователя с ДопТП после симметрирования при несимметричной нагрузке показана на рисунке 9.

Таблица 2 – Трехфазная симметричная и несимметричная нагрузки

№	Симметричной нагрузки						Несимметричной нагрузки					
	Ом			мГн			Ом			мГн		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
1.	10	10	10	1	1	1	10	7	5	1	0,7	0,5
2.	10	10	10	1	1	1	5	6	9	0,5	0,6	1,2
3.	10	10	10	1	1	1	9,5	8	6	1,1	0,8	0,65

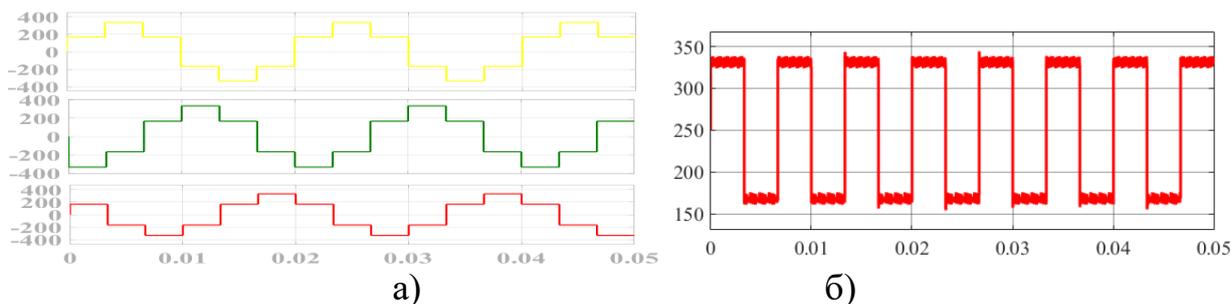


Рисунок 7 – Форма фазного напряжения и напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания при симметричной нагрузке

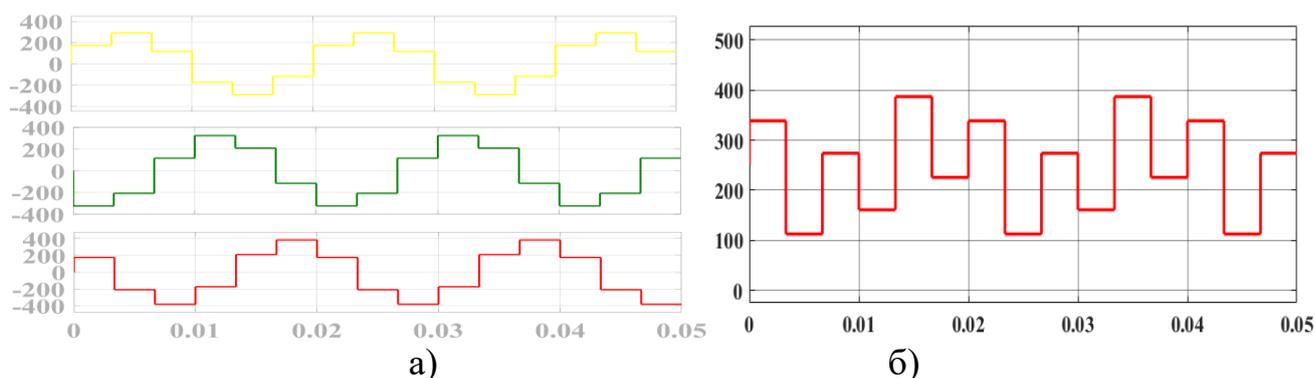


Рисунок 8 – Форма фазного напряжения и напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания при несимметричной нагрузке

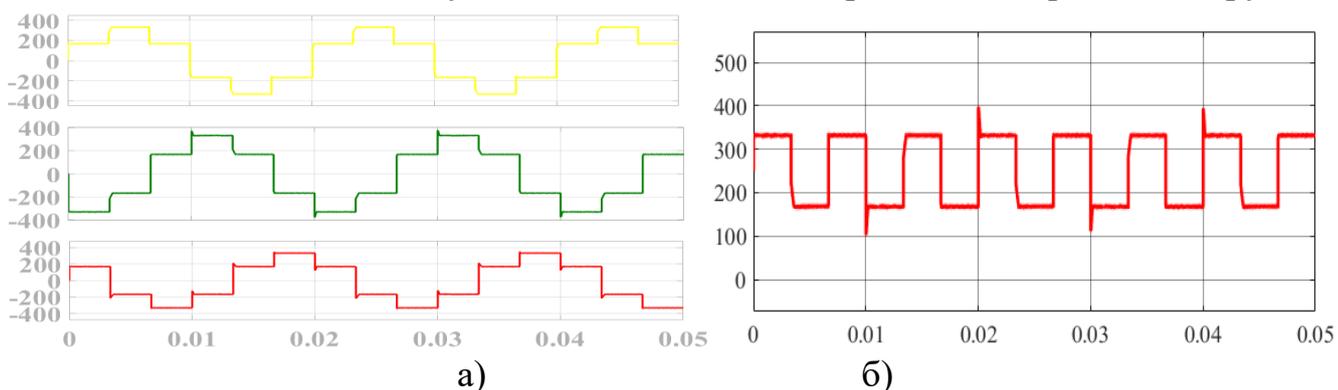


Рисунок 9 – Форма фазного напряжения и напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания после симметрирования

Результат моделирование подтвердил, что дискретной коммутацией силовых ключей можно реализовать синусоидальное входное напряжение, а использование в релейном регуляторе дискретного потактового метода можно осуществить симметрирование напряжения при несимметричной нагрузке.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований и практические результаты работы. Также была проведена сравнительная оценка традиционных и предложенных схем симметрирования и показано, что предложенная схема оказывается дешевле традиционной на 10% и реализуется на российской элементной базе на основе простейших восьмиразрядных процессоров. Для проверки адекватности предложенных методов и алгоритмов симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке в автономном режиме был реализован полупроводниковый преобразователь с дополнительным транзисторным полумостом в лабора-



Рисунок 10 – Общий вид экспериментальная установка

тории кафедры «Теоретические основы электротехники» ЮУрГУ (ауд. 213). На рисунке 10 показана экспериментальная установка. Был собран макет, в котором в качестве МТИ были взяты три транзисторных полумоста *IGBT SKM600GB66D*; в качестве ДопТП – один транзисторный полумост *IGBT SKM600GB66D*; датчики напряжения ДН1, ДН2 выполнены по дифференциальной схеме включения операционного усилителя

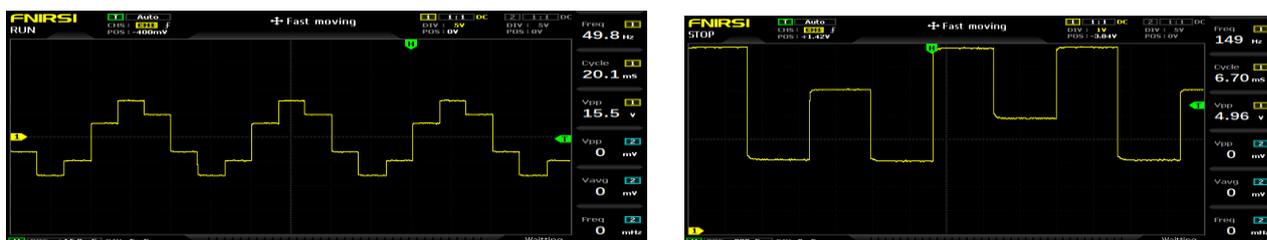
TLV272; для осуществления функций управления используется микроконтроллер *STM32F303VCT6*, в котором блок УКК является основной программой и используется для управления МТИ, а ФОН и РРН являются подпрограммами и используются для управления ДопТП. В эксперименте используются нагрузки из таблицы 2 и условия эксплуатации, соответствующие компьютерной модели. На рисунке 11 показано фазное напряжение полупроводникового преобразователя с дополнительным транзисторным полумостом, подключенным к симметричной нагрузке. Из рисунка 11, а) видно, что при симметричных нагрузках напряжение на выходе полупроводникового преобразователя не изменяется. В этом случае напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания не изменяется, как показано на рисунке 11, б). Далее, в эксперименте сбалансированная нагрузка была заменена несбалансированной нагрузкой. В результате несимметрии выходные напряжения искажаются, что показано на рисунке 12. На рисунке 13 показано выходное напряжение полупроводникового преобразователя с дополнительным транзисторным полумостом при несимметричной нагрузке с симметрированием.



а)

б)

Рисунок 11 – Форма фазного напряжения и напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания при симметричной нагрузке



а)

б)

Рисунок 12 – Форма фазного напряжения и напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания при несимметричной нагрузке



а)

б)

Рисунок 13 – Форма фазного напряжения и напряжение нулевой точки относительно шины «минус» источника питания после симметрирования

Результаты эксперимента подтвердили реализацию в релейном регуляторе дискретного потактового метода симметрирования напряжения при несимметричной нагрузке.

Дальнейшее направление исследования:

- детальное исследование работы предлагаемого принципа симметрирования в преобразователях с синусоидальным напряжением;
- методика расчёта оптимальных параметров дросселя для разных мощностей нагрузки;
- внедрение в опытную эксплуатацию разработанного метода симметрирования на МГЭС и его совершенствование на основе накопленного опыта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационной работы был рассмотрен ряд теоретических и практических вопросов, связанных с развитием принципов построения энергетических комплексов для электроснабжения труднодоступных горных районов Таджикистана. К основным результатам работы можно отнести следующее:

1. Обоснована и выбрана структура МГЭС. Показано, что наиболее рациональным путём решения задач электроснабжения высокогорных, труднодоступных районов Таджикистана во многих случаях является строительство и эксплуатация малых автономных автоматических МГЭС индивидуально для каждого населённого пункта. Для этого пересмотрена структура МГЭС с точки зрения развития автономности эксплуатации, повышения надёжности работы и снижения стоимости.
2. Предложено для обеспечения надёжного функционирования МГЭС использовать простейшие высоконадёжные функциональные элементы: в качестве турбин центробежной насос, в качестве генератора синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов, в качестве преобразователя входного напряжения генератора в трёхфазное напряжение промышленной частоты простейший выпрямитель и полупроводниковый мостовой инвертор.
3. Обосновано, что работа МГЭС в автономном режиме должна быть обеспечена за счёт использования средств самодиагностики и непрерывной связи её с центральным диспетчерским пунктом районной РЭС по каналам интернет или спутниковой связи.
4. Показано, что для преобразования постоянного напряжения в переменное трёхфазное промышленной частоты весьма эффективно, с точки зрения стоимости, надёжности и простоты реализации, является использование трёхфазного автономного инвертора с дискретной коммутацией ключей.
5. Предложен новый принцип решения вопроса симметрирования выходного напряжения трёхфазного инвертора с помощью релейного регулятора напряжения нулевого провода на каждом такте коммутации инвертора, обеспечивающий точность симметрирования 1...2%, время переходного процесса при возникновении несимметрии около 0,4 миллисекунд, отличающегося простотой алгоритмов реализации и, как следствие, меньшей на 10%, по сравнению с известными схемами стоимостью и на порядок более высокой надёжностью.

6. Разработаны математическая и имитационная модели МГЭС, отражающие процесс симметрирования напряжены на входе автономного инвертора при использовании разработанных алгоритмов управления ключами четвёртой стойки и позволяющая решать задачи синтеза регуляторов для конкретных параметров систем электроснабжения.

### Научные публикации по теме диссертации:

#### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Воронин, С.Г., Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана [Текст] / С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, **О.О. Султонов**, Б.И. Косимов, Д.Ю. Гулов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика.2019. Т.19. №3. С100-107.
2. Воронин, С.Г. Мостовой инвертор как преобразователь напряжения для автономных трёхфазных сетей малой мощности [Текст] / С.Г. Воронин, **О.О. Султонов** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 11. С. 408-416.
3. Воронин, С.Г. Симметрирование напряжений на выходе трёхфазного инвертора при несимметричной нагрузке [Текст] / С.Г. Воронин, **О.О. Султонов** //Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2020. № 35. С. 71-86.

#### Публикации в базе SCOPUS и WoS:

4. Voronin S. Voltage balancing at the output of three-phase semiconductor converter [Text] / S Voronin., **O. Sultonov**, D Gulov // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2019, pp. 94-98, doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915374.
5. Voronin S. Features of balancing a three-phase step voltage at the output of semiconductor converters [Text] / S. Voronin, **O. Sultonov**, A. Davlatov //2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2020, pp. 119-123, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234355.
6. Aminov, D. Development of a water-submersible Hydrogenerator as a renewable source of electricity for small rivers [Text] / D. Aminov, B. Kosimov, **O. Sultonov** //2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2020, pp. 1079-1084, doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208214.
7. Voronin, S. Features of the Construction and Use of Small Hydroelectric Power Plants for Power Supply of Mountainous Regions of Tajikistan [Text] / S. Voronin, **O. Sultonov**, A. Davlatov // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con), 2021, pp. 634-638, doi:10.1109/UralCon52005.2021.955925.

#### Публикации в зарубежных журналах топ 10 и Q4 SJR:

8. Tavarov, S. Sh. Modelling the operating mode of the urban electrical network and developing a method for managing these modes [Text] / S. Sh. Tavarov, A.I. Sidorov, **O.O. Sultonov** // Mathematical modelling of engineering problems. 2021. Т. 8. №5. С. 813-818. doi: <https://doi.org/10.18280/mmep.080518>

9. Tavarov, S. Sh. Learning algorithm of artificial neural network factor forecasting power consumption of users [Text] / S. Sh. Tavarov, A.I. Sidorov, Sh. M. Shonazarova, **O.O. Sulstonov**, P. Yunusov// Bulletin of Electrical Engineering and Informatics Vol. 11, No. 2, April 2022, pp. 602-612, DOI: 10.11591/eei.v11i2.3172

### Патенты на изобретения

10. Воронин С. Г., **Султонов О.О.**, Шабуров П.О., Клиначев Н.В., Курносков Д. А., Давлатов А.М. Устройство симметрирования трехфазного напряжения на выходе электронного полупроводникового преобразователя при несимметричной нагрузке // Патент Российской Федерации № 2021133548.18.11.2021.

11. Воронин С. Г., **Султонов О.О.**, Шабуров П.О. Устройство симметрирования трехфазного напряжения на выходе электронного полупроводникового преобразователя при несимметричной нагрузке //Евразийский патент на изобретение № 044229.02.08.2023.

### Другие научные публикации:

12. Смолин, Н.И. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветроэлектростанция и малых ГЭС Таджикистан [Текст] / Н.И. Смолин, Д.Ю. Гулов, Б.И. Косимов, **О.О. Султонов**// в сборнике: Приоритетные направления развития энергетики в АПК. Материалы I Всероссийской научно-практической конференции. 2017. С. 100-105.

13. Исмаатов, Ф.Х. Оценка эффективности использования возобновляемых источников энергии в Таджикистане [Текст] / Ф.Х. Исмаатов, Г.Т. Абдурахмонов, З.Г. Вохидов, **О.О. Султонов**, Н.М. Раупов // в сборнике: Приоритетные направления развития энергетики в АПК. Сборник статей по материалам II всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Под общей редакцией С.Ф. Сухановой. 2018. С. 95-99.

14. Давлатов, А.М. Повышение экономической эффективности малых гидроэлектростанций республики Таджикистан. [Текст] / А.М. Давлатов, Б.И. Косимов, Д.Ю. Гулов, **О.О. Султонов**// в сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Материалы всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 456-461.

15. **Султонов О.О.** Мини-ГЭС для труднодоступных районов Таджикистана[Текст] / **О.О. Султонов** // Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов 12-16 апреля 2021 года Санкт-Петербург, 2021. – С. 223-224.

16. **Султонов, О.О.** Методы симметрирования напряжения при несимметричной нагрузки в автономном МГЭС [Текст] / **О.О. Султонов**, Ф.Х. Исмаатов // XXV Всероссийский аспирантско - магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика 7 –8 декабря 2021 г. Казань, 2022. – С.429-432.

17. **Султонов О.О.** Выбор регулятора для симметрирования напряжения на выходе полупроводникового преобразователя[Текст] / **О.О. Султонов**, С.А. Кунцев //Актуальные проблемы недропользования. Тезисы докладов XVIII Международном Форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» 16-20 мая 2022 года Санкт-Петербург, 2022. – С. 223-224.

**Султонов Оламафруз Олимович**

**СИММЕТРИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ МАЛЫХ ГЭС В  
АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать \_\_ 01.2025. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76.