

На правах рукописи



КРАСНОПЕРОВ РОМАН НИКОЛАЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ
МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩИМИ В ЦИФРОВЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

Специальность 05.09.12 - Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2021

Работа выполнена на кафедре промышленной электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Панфилов Дмитрий Иванович**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры промышленной электроники
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные

оппоненты:

Зотов Леонид Григорьевич

Доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры Теоретических основ
радиотехники ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный технический университет»

Лоскутов Антон Алексеевич

кандидат технических наук,
доцент кафедры «Электроэнергетика,
электроснабжение и силовая электроника»
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Ведущая организация: ООО «ММП-Ирбис», г. Москва

Защита диссертации состоится «25» ноября 2021 г. В 12 : 00 часов на заседании диссертационного совета МЭИ.009 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус Е, ауд. Е-101а. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

МЭИ.009 к.т.н., доцент



Воронин И.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время мировой и Российской электроэнергетике присуща тенденция к внедрению цифровых активно-адаптивных электрических сетей. В таких сетях с помощью различных устройств управления на основе мониторинга режимов работы сетей осуществляется автоматическая оптимизация режимов их работы в реальном масштабе времени. Реализация такого подхода к построению энергетических систем позволяет повысить их надежность, качество передаваемой потребителям электрической энергии, сформировать инфраструктуру, обеспечивающую максимально эффективный процесс передачи и распределения электроэнергии, присоединения новых потребителей. Стратегические цели по цифровизации электроэнергетики отражаются законодательно во многих странах. В России актуальность развития цифровых электрических сетей отражена в документах: энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, концепция «Цифровая трансформация 2030» ПАО «Россети», концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) ПАО «ФСК ЕЭС» и др.

Современные устройства силовой электроники в своем подавляющем большинстве строятся с использованием полупроводниковых ключей, обладающих массой преимуществ по сравнению с механическими коммутаторами. Такие устройства можно объединить под общим названием полупроводниковых регуляторов мощности (ПРМ). Одним из актуальных направлений развития цифровых электрических сетей является наделение интегрируемых в их состав ПРМ системами управления, позволяющими осуществлять самонастройку и саморегулирование устройствами в режиме реального времени. На сегодняшний день, применяемые коллективами разработчиков решения по построению систем управления ПРМ отличаются разрозненностью подходов, отсутствием унификации реализации их аппаратно-программной части. При этом, в настоящий момент в реализуемые системы управления ПРМ не закладываются возможности автоматической работы в условиях изменяющихся параметров электрических сетей. Обозначенные проблемы в области разработки и реализации систем управления ПРМ осуществляют сильное влияние на темпы построения и развития цифровых электрических сетей. Разработка и аппаратно-программная реализация универсальной системы управления для широкого класса ПРМ, обладающая функциями активно-адаптивного управления в условиях изменяющихся режимов работы электрических сетей в режиме реального времени является крайне актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам разработки систем управления устройств силовой электроники посвящено множество работ российских и

зарубежных ученых, таких как: Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Завгородний Н.Н., Вараксин А.Ю., Панфилов Д.И., Гребенщиков В.И., Качалов А.В., Гусев В.Г., Цытович Л.И., Shrestha G. B.; Kang Y. L.; Lie T. T., Verboomen J. и др.

В настоящее время на разработке и исследовании систем управления инновационных устройств силовой электроники, использующих полупроводниковый коммутатор, специализируются сотрудники кафедры промышленная электроника ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» совместно с коллективом Лаборатории преобразовательной техники им. К.А. Круга АО «ЭНИН».

Объектом исследования являются системы управления полупроводниковых регуляторов мощности, работающих в условиях изменяющихся параметров режима электрических сетей. **Предметом исследования** является разработка универсальной системы управления для широкого класса полупроводниковых регуляторов мощности, обладающая функциями адаптивного управления устройствами при их работе в активно-адаптивных электрических сетях.

Целью диссертационной работы является разработка структуры аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления для широкого класса устройств силовой электроники, предназначенных для управления режимами работы цифровых электрических сетей. Разработка и исследование систем управления различными типами полупроводниковых регуляторов мощности, реализованных на основе предложенной структуры аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления.

Задачи диссертации. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Анализом работы систем управления различных типов ПРМ (фазоповоротных устройств, компенсаторов реактивной мощности, регуляторов напряжения с вольтодобавкой, регуляторов напряжения трансформаторов под нагрузкой, полупроводниковых устройств поперечной компенсации на основе трансформаторов с регулируемым коэффициентом трансформации).

2. Предложением обобщенной структуры аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления для работы ПРМ в цифровых электрических сетях.

3. Формулировкой требований к аппаратно-программному обеспечению и алгоритмам работы отдельных блоков универсальной системы управления.

4. Разработкой алгоритмов работы отдельных блоков универсальной системы управления. Анализом алгоритмов работы блоков универсальной системы управления и их взаимодействия при управлении режимами работы линии электропередачи для различных типов ПРМ. Разработкой общего алгоритма работы универсальной системы управления,

используемого для реализации адаптивного управления ПРМ в составе цифровой электрической сети.

5. Разработкой имитационных моделей отдельных блоков и системы управления в целом в среде MATLAB & SIMULINK. Разработкой подхода по верификации работы аппаратно-программного обеспечения систем управления ПРМ с использованием результатов имитационного моделирования.

6. Разработкой систем управления различных типов ПРМ на основе предложенной структуры аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления.

7. Созданием опытно-промышленных образцов систем управления, проведением анализа работы их аппаратно-программного обеспечения.

8. Проведением опытно-промышленной эксплуатации различных типов ПРМ с разработанными системами управления на объектах ПАО «Россети» с целью подтверждения основных технических характеристик.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложен подход к реализации систем управления ПРМ, обеспечивающих адаптивную работу устройств в цифровых электрических сетях в условиях изменяющихся параметров режима сети.

2. Разработана структура аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления для широкого класса ПРМ, предназначенных для работы в активно-адаптивных электрических сетях. Аппаратно-программное обеспечение системы управления обеспечивает автоматическую коррекцию управления ПРМ при изменяющихся параметрах режима сети.

3. Для рассматриваемых типов ПРМ решена задача актуализации параметров режима сети в месте их установки в линии электропередачи. Разработаны алгоритмы адаптации управляющих воздействий на ПРМ при изменении режимов работы линии электропередачи.

4. Предложена аппаратно-программная реализация отдельных функциональных блоков и универсальной системы управления в целом с учетом специфики построения различных ПРМ.

5. Разработана имитационная модель универсальной системы управления, предназначенная для анализа работы аппаратно-программного обеспечения систем управления различных ПРМ в электрической сети. Предложена методика проверки работы аппаратно-программного обеспечения систем управления ПРМ с использованием имитационной модели универсальной системы управления.

6. Для различных типов ПРМ реализованы системы управления, обеспечивающие адаптацию их управления при изменении параметров режима сети.

7. Разработанные алгоритмы и системы управления различными типами ПРМ защищены 8 патентами на изобретения.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Предложена обобщенная структура универсальной системы управления устройствами силовой электроники, предназначенных для работы в цифровых электрических сетях.

2. Разработано аппаратно-программное обеспечение универсальной системы управления, позволяющее использовать ее для создания систем управления различными устройствами силовой электроники, предназначенными для управления режимами работы электрических сетей.

3. Разработаны и реализованы в опытно-промышленных образцах устройства силовой электроники с системами управления, разработанными на основе аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления.

4. Проведена опытно-промышленная эксплуатация устройств, доработка устройств по итогам опытно-промышленной эксплуатации, защита устройств на научно-техническом совете ПАО «Россети».

5. Устройства регулирования мощности, совместно с разработанными системами управления, переданы для освоения в серийном производстве отечественным заводам - производителям электротехнического оборудования.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались: теория электрических цепей, теоретические основы электротехники, преобразования и передачи электрической энергии в электрических сетях, методы имитационного моделирования в среде MATLAB & SIMULINK, методы программирования и отладки микропроцессорных систем управления и экспериментальные исследования на опытно-промышленных образцах различных полупроводниковых регуляторов мощности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура построения универсальной системы управления ПРМ, работающими в активно-адаптивных электрических сетях.

2. Общий алгоритм работы универсальной системы управления и алгоритмы работы отдельных блоков, положенные в основу реализации программного обеспечения систем управления различных типов ПРМ, предназначенных для работы в цифровых электрических сетях.

3. Математические модели ПРМ и алгоритмы работы систем управления, позволяющие автоматически адаптировать управляющие воздействия на ПРМ при изменениях параметров режима сети.

4. Методика проверки работы аппаратно-программного обеспечения блоков систем управления ПРМ с использованием результатов имитационного моделирования.

5. Разработанные системы управления различными типами ПРМ, на основе предложенной аппаратно-программной платформы универсальной системы управления.

6. Результаты анализа электромагнитных процессов на имитационных моделях и опытно-промышленных образцах ПРМ с системами управления в составе цифровых активно-адаптивных электрических сетей, подтверждающие эффективность разработанных в диссертации решений по реализации аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, соответствием результатов, полученных на имитационных моделях и опытно-промышленных образцах систем управления полупроводниковых регуляторов мощности, работающих в составе цифровых электрических сетей.

Внедрение результатов диссертационной работы:

1. Опытно-промышленная модель фазоповоротного устройства (ФПУ) мощностью 620 кВА с системой управления, исследования работы которого проведены в составе физической модели электрической сети на базе АО «ЭНИН». Проект выполнен в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014 – 2020 годы».

2. Опытно-промышленный образец полупроводникового регулятора реактивной мощности (ПРРМ) мощностью 50 квар и система управления к нему, введенные в эксплуатацию на объекте ПАО «Россети Ленэнерго» (трансформаторная подстанция ТП 2873, присоединенная к фидеру 42/12 ПС 110 кВ Сосновская ПС 29). (работа выполнена в рамках договоров № 18-5822, № 19-16168 между ПАО «Россети Ленэнерго» и ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»).

3. Опытно-промышленный образец трехфазного тиристорного регулятора переменного напряжения (бустера) мощностью 50 кВт с его системой управления, исследования работы которых проведены в ходе опытной эксплуатации в филиале ПАО «МРСК Центра» - «Белгородэнерго».

4. Опытно-промышленный образец полупроводникового устройства регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (ПУРНТ) мощностью 1 МВт с системой управления, прошедший испытания в составе физической модели ТП 10/0,4 кВ на

базе АО «ЭНИН». (работа выполнена в рамках договора № 32/811 между АО ВО «Электроаппарат» и ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в рамках Постановления Правительства №218).

Апробация результатов диссертационной работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. Заседаниях и научно-технических семинарах кафедры промышленная электроника ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в 2020, 2021 гг.
2. 21-я Международная конференция молодых специалистов по микро / нанотехнологиям и электронным устройствам (EDM) (Чемал, Россия, 2020г.) [10].
3. IECON 2019 - 45-я ежегодная конференция Общества промышленной электроники IEEE (Лиссабон, Португалия, 2019г.) [11].
4. Международная молодежная конференция по радиоэлектронике, электротехнике и энергетике, 2019 г. (REEPE) (Москва, Россия, 2019г.) [12].
5. Международных научно-практических конференциях (Вологда, Россия, 2017, 2018, 2019 гг.) [13, 14, 15].

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 15 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, из них 3 статьи [10, 11, 12] в журналах, входящих в международную базу цитирования (Scopus, Web of Science), 1 статья [16] в сборнике трудов, индексируемом в РИНЦ, 3 тезиса конференций [13, 14, 15] и 8 патентов [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24] на изобретение.

Личный вклад автора состоял в:

1. Проведении анализа функциональных характеристик различных типов ПРМ, обусловленных режимами их работы в цифровых электрических сетях.
2. Разработке подхода к построению универсальной системы управления для широкого класса ПРМ, основанном на разбиении системы управления на отдельные функциональные блоки, определении взаимосвязей между блоками, а также алгоритмов их работы в условиях изменения параметров режима сети с целью осуществления адаптивного управления устройствами.
3. Разработке аппаратно-программного обеспечения всех блоков универсальной системы управления.
4. Проведении анализа и определении особенностей реализации аппаратно-программного обеспечения различных ПРМ.
5. Разработка методики проверки аппаратно-программного обеспечения систем управления ПРМ с использованием имитационных моделей устройств с системой управления и электрических сетей.

6. Создании опытных образцов систем управления различных ПРМ.

7. Планировании, проведении и интерпретации экспериментальных исследований, участии в обсуждении и анализе полученных результатов, а также в написании научных публикаций по результатам работы и апробации ее результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Общий объем диссертации (без приложений) составляет 177 страниц машинописного текста, 72 иллюстрации и 16 таблиц. Список литературы изложен на 14 страницах и содержит 106 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, отмечен вклад отечественных и зарубежных авторов по теме диссертации, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования, раскрыта научная новизна, перечислены положения, выносимые на защиту, а также приведена структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрена задача создания универсальной системы управления (УСУ) для широкого класса регуляторов мощности (полупроводниковых устройств регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой (ПУРНТ), тиристорных регуляторов переменного напряжения (ТРПН) с вольтодобавкой (бустеров), трансформаторных управляющих устройства продольной компенсации реактивной мощности (УУПК), полупроводниковых регуляторов реактивной мощности с тиристорно-переключаемой группой реактивных элементов (ПРРМ), фазоповоротных устройств (ФПУ), полупроводниковых устройств поперечной компенсации (УПК) на основе трансформаторов с регулируемым коэффициентом трансформации), предназначенных для работы в цифровых электрических сетях.

Системы управления различных полупроводниковых регуляторов мощности (ПРМ), работающих в цифровых активно-адаптивных электрических сетях, выполняют ряд общих функций: получение информации о режимах работы электрической сети и регулятора посредством датчиков тока и напряжения; прием от оператора или из АСУ ТП параметров требуемого режима работы сети в месте подключения регулятора; формирование управляющего воздействия на полупроводниковый преобразователь регулятора; сбор и передача данных о мониторинге электрических сетей в месте подключения регулятора в АСУ ТП, информирование о событиях. Предложено в основе систем управления различных устройств использовать унифицированную аппаратную платформу с различным программным обеспечением, ориентированным на конкретный класс полупроводниковых

преобразователей. Предложена обобщенная структура УСУ, учитывающая весь функционал систем управления (СУ) различных ПРМ для их работы в составе цифровых активно-адаптивных электрических сетей (рис. 1). В состав УСУ для ПРМ входят блоки: **1** - блок реализации интерфейсов и связи с АСУ ТП; **2** - блок мониторинга режима работы электрической сети и ПРМ; **3** - блок вычисления управляющих воздействий ПРМ в нормальных и аварийных режимах работы электрической сети; **4** - блок определения состояния полупроводникового коммутатора ПРМ; **5** - блок синхронизации; **6** - блок реализации управления полупроводниковым коммутатором ПРМ.

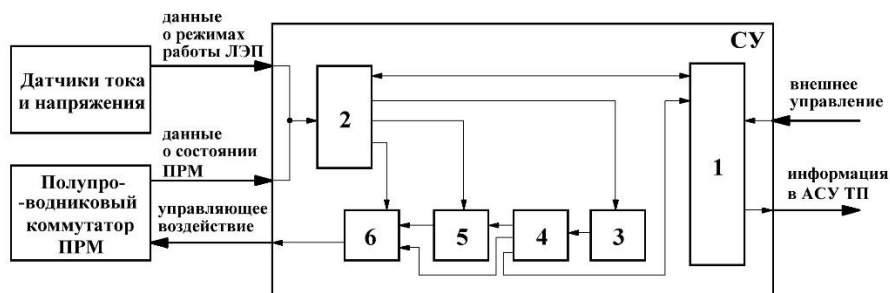


Рис. 1. Обобщенная структура УСУ с взаимосвязями между блоками

Представленная структура УСУ применима для любого из рассматриваемых устройств и способна обеспечивать их работу в составе активно-адаптивных электрических сетей. В главе сформулированы требования к функционалу и аппаратно-программному обеспечению основных блоков обобщенной УСУ, а также алгоритмам их работы, реализующих работу регуляторов в условиях изменения параметров режима сети, а также обеспечивающих интеграцию системы управления ПРМ в общую структуру АСУ ТП цифровых подстанций.

Во второй главе рассмотрены особенности построения алгоритмов работы отдельных блоков УСУ для управления различными ПРМ, проведен анализ взаимосвязей между блоками УСУ при реализации управления ПРМ в режиме реального времени. Разработан обобщенный алгоритм работы УСУ, представляющий собой сложную структуру взаимодействия и обмена информацией между внутренними функциональными блоками УСУ, а также внешними интерфейсами.

Алгоритм работы блока реализации интерфейсов и связи с АСУ ТП (№1 на рис. 1) представлен на рис. 2. Он осуществляет двусторонний обмен данными между СУ ПРМ и АСУ ТП посредством внешних интерфейсов. Блок имеет три информационных входа, связывающих его с АСУ ТП, блоком мониторинга режима работы электрической сети и ПРМ, блоком определения состояния полупроводникового коммутатора ПРМ. Блок имеет два информационных выхода – для передачи данных о режиме работы сети в блок

сети (№3 на рис. 1), определения состояния полупроводникового коммутатора ПРМ (№4 на рис. 1), синхронизации (№5 на рис. 1), реализации управления полупроводниковым коммутатором ПРМ (№6 на рис. 1); описаны взаимосвязи между алгоритмами блоков.

Обобщенный алгоритм работы УСУ, представляющий собой совокупность алгоритмов управления отдельными блоками и взаимосвязей между ними, представлен во 2 главе диссертации и положен в основу разработки программного обеспечения различных типов ПРМ, предназначенных для работы в цифровых электрических сетях.

Третья глава посвящена разработке имитационной модели УСУ для ПРМ в среде MATLAB & SIMULINK. Имитационная модель УСУ представляет собой совокупность имитационных моделей отдельных функциональных блоков и предназначена для анализа работы аппаратно-программного обеспечения систем управления различных ПРМ в электрической сети.

Ряд блоков УСУ отображаются стандартными имитационными моделями. Специфическими блоками имитационной модели универсальной системы управления являются блок вычислений управляющих воздействий на ПРМ и блок синхронизации.

Блок вычисления управляющих воздействий осуществляет вычисления управляющих воздействий на ПРМ в нормальных и аварийных режимах работы электрической сети. Блок вычисляет управляющее воздействие на ПРМ с использованием математических моделей сети и ПРМ. На первом этапе вычисления управляющего воздействия имитационная модель должна обеспечивать актуализацию параметров модели сети. Актуализация параметров модели сети осуществляется на основе измерения токов и напряжений в сети в месте подключения ПРМ. В зависимости от типа ПРМ, алгоритмы управления ПРМ и аналитические выражения для вычисления параметров режима сети по экспериментальным данным токов и напряжений будут различаться. При этом, общий алгоритм проведения вычислений управляющего воздействия на ПРМ будет универсальным. Для различных типов ПРМ в диссертации приведены основные соотношения, положенные в основу имитационной модели блока вычисления управляющих воздействий для актуализации параметров модели линии электропередачи.

Эквивалентная двухмашинная модель линии электропередачи с моделью фазы ПРМ представлены на рис. 4, они задаются независимыми параметрами: эквивалентными ЭДС ($\dot{E}_1, \dot{E}_2$) и эквивалентными сопротивлениями (Z_1, Z_2), $\dot{I}_1$ - током ПРМ. $Z_{\text{ПРМ}}$ - эквивалентным реактивным сопротивлением ПРМ, которое может принимать как индуктивный, так и емкостной характер в зависимости от типа генерируемой реактивной мощности. Величина $Z_{\text{ПРМ}}$ принята в качестве управляющего воздействия на ПРМ, она же характеризует воздействие ПРМ на линию электропередачи. Токи $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ в соответствующих

ветвях линии электропередачи, а также напряжение $\dot{U}_{\text{ПРРМ}}$ в месте подключения ПРРМ к сети являются параметрами, зависящими от режима работы ПРРМ.

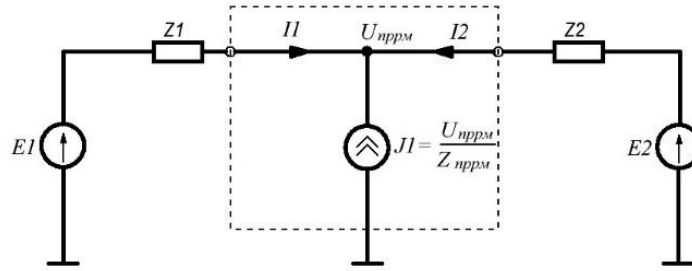


Рис. 4. Однофазная эквивалентная двухмашинная модель линии электропередачи с установленной обобщенной моделью фазы ПРРМ

Вычисление параметров двухмашинной модели сети осуществляется на основе измеренных токов и напряжений в месте установки ПРРМ при двух различных его воздействиях на линию электропередачи на основе выражений (1):

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \frac{i_{1,2} \cdot \dot{U}_{\text{ПРРМ}_1} - i_{1,1} \cdot \dot{U}_{\text{ПРРМ}_2}}{i_{1,2} - i_{1,1}} \\ Z_1 = \frac{\dot{U}_{\text{ПРРМ}_1} - \dot{U}_{\text{ПРРМ}_2}}{i_{1,2} - i_{1,1}} \\ \dot{E}_2 = \frac{i_{2,2} \cdot \dot{U}_{\text{ПРРМ}_1} - i_{2,1} \cdot \dot{U}_{\text{ПРРМ}_2}}{i_{2,2} - i_{2,1}} \\ Z_2 = \frac{\dot{U}_{\text{ПРРМ}_1} - \dot{U}_{\text{ПРРМ}_2}}{i_{2,2} - i_{2,1}} \end{cases} \quad (1)$$

где $i_{1,1}, i_{1,2}, \dot{U}_{\text{ПРРМ}_1}$ – измеренные комплексные значения токов и напряжений на входе и выходе ПРРМ при одном управляющем воздействии на ПРРМ;

$i_{2,1}, i_{2,2}, \dot{U}_{\text{ПРРМ}_2}$ – те же параметры при другом управляющем воздействии на ПРРМ.

При реализации управления режимом работы линии электропередачи с помощью управления напряжением в месте подключения ПРРМ ($U_{\text{ПРРМ}}$), управляющее воздействие на ПРРМ ($Z_{\text{ПРРМ}}$) рассчитывается по выражению (2):

$$\dot{Z}_{\text{ПРРМ}} = \frac{Z_2 \cdot Z_1 \cdot U_{\text{ПРРМ}}}{U_{\text{ПРРМ}} \cdot (Z_2 + Z_1) - (\dot{E}_1 \cdot Z_2 + \dot{E}_2 \cdot Z_1)} \quad (2)$$

При одностороннем питании и использовании ПРРМ для компенсации реактивной мощности нагрузки используется та-же эквивалентная модель линии электропередачи, управляющее воздействие на ПРРМ рассчитывается из условия равенства реактивной мощности сети нулю.

Для полупроводникового устройства поперечной компенсации (УПК), предназначенного для симметрирования токов в сети, схема замещения его работы в сети представлена на рис. 5.

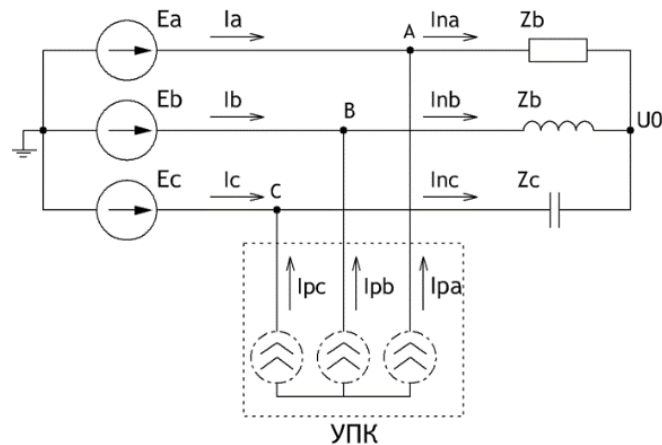


Рис. 5. Эквивалентная трехлинейная модель линии электропередачи с УПК

Для схемы УПК (рис. 5) обобщенная модель представлена в виде управляемых источников тока (I_{pa} , I_{pb} , I_{pc}), которые зависят от параметров УПК (K_a , K_b). Каждая фаза эквивалентной трехлинейной линии электропередачи характеризуется напряжением эквивалентного источника ЭДС ($\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$), нагрузка представлена эквивалентным сопротивлением (Z_a, Z_b, Z_c). Расчет необходимых управляющих воздействий (K_a, K_b) осуществляется УСУ на основе измерения линейных токов нагрузки (I_{na}, I_{nb}, I_{nc}), их разложения на симметричные составляющие и вычисления корректирующих управляющих воздействий по выведенным с помощью эквивалентной модели выражениям.

Блок синхронизации, по измеренным мгновенным значениям токов и напряжений в линии электропередачи, формирует временные интервалы, на которых блок реализации управления полупроводниковым коммутатором ПРМ будет осуществлять управление ПРМ. Сигналы с выхода блока синхронизации позволяют блоку реализации управления полупроводниковым коммутатором ПРМ сформировать необходимую временную диаграмму управления тиристорными ключами. Имитационная модель блока синхронизации представляет из себя стандартный блок Matlab function (рис. 6), реализующий специальный программный код. Временные диаграммы мгновенных значений напряжения и тока в одной фазе на входах блока синхронизации представлены на рис. 7 а) напряжение в фазе ПРМ; б) ток в фазе ПРМ. Временные диаграммы фиксированных интервалов времени на выходах блока синхронизации приведены на рис. 7 в) интервалы времени с разными (логическая 1) и одинаковыми знаками (логический 0) токов и напряжений в фазе ПРМ; г) интервалы времени с положительным (логическая 1) и отрицательным (логический 0) знаками напряжения в фазе ПРМ; д) моменты времени перехода токов и напряжений через ноль.

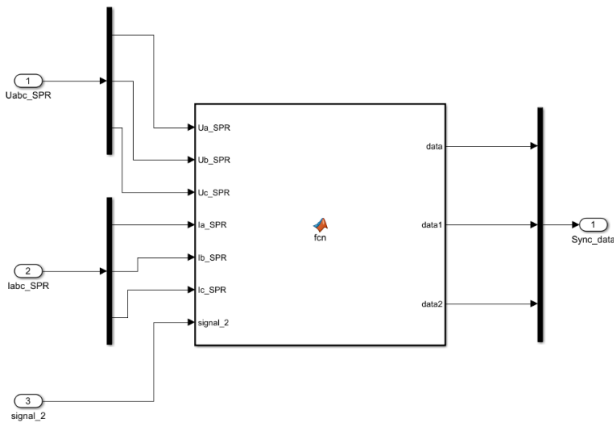


Рис. 6. Структура имитационной модели
блока синхронизации

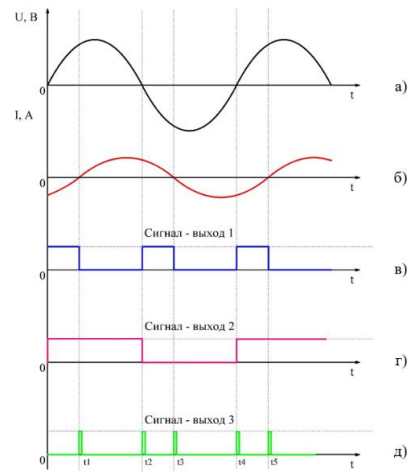


Рис. 7. Осциллограммы сигналов на входах
и выходах блока синхронизации

В диссертации предложено использование результатов имитационного моделирования как отдельных блоков, так и всей системы управления, для отладки аппаратно-программного обеспечения систем управления ПРМ. Путем задания различных комбинаций сигналов с датчиков тока и напряжения линии электропередачи, на имитационных моделях проводится исследование алгоритмов работы отдельных блоков и системы управления в целом. На основе результатов имитационного моделирования проводится исследование аппаратно-программного обеспечения систем управления различных типов ПРМ.

В четвертой главе приведены разработанные системы управления ПРМ для работы в активно-адаптивных сетях. Приведенные системы управления ФПУ, ПРРМ, бустера, ПУРНТ, УПК построены на основе аппаратно-программной реализации УСУ на базе одноплатной микроЭВМ и интерфейсов связи. Структура аппаратно-программной реализации УСУ приведена на рис. 8.

На рис. 9 представлена система управления ПРРМ в виде одноплатной микроЭВМ. Системы управления других устройств построены по тому же принципу.



Рис. 8. Структура аппаратно-программной
реализации УСУ

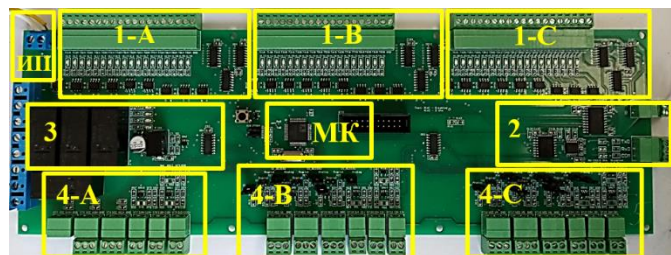


Рис. 9. Система управления ПРРМ

На плате (рис. 9) цифрами обозначены: **МК**: микроконтроллер и разъем его программирования; **1-А, 1-В, 1-С**: Аппаратная часть блока реализации управления полупроводниковым коммутатором для фаз А, В и С; **2**: Блок реализации интерфейсов и связи с АСУ ТП. Представлен каналами передачи данных RS-485, RS-232; **3**: Автоматика системы управления, а также индикация автоматики; **4-А, 4-В, 4-С**: Аппаратная часть блока мониторинга режима работы электрической сети и ПРМ для фаз А, В и С; **ИП**: Разъем питания платы системы управления.

Приведен анализ работы аппаратно-программного обеспечения реализованных макетных образцов систем управления ПРМ с помощью имитационных моделей УСУ. Отмечено, что настройка систем управления проведена соответствующим образом, правильно определяются управляющие воздействия на ПРМ в режиме изменения параметров сетей, что позволяет реализовать адаптивную работу устройств в составе цифровых электрических сетей. В главе представлены результаты исследования работы аппаратно-программной платформы систем управления различных ПРМ в ходе опытной эксплуатации опытно-промышленных образцов ПРМ на объектах ПАО «Россети» и в условиях лаборатории АО «ЭНИН»:

— опытно-промышленный образец ФПУ класса напряжения 10 кВ, мощностью 620 кВА. Система управления ФПУ представлена на рис. 10. На рис. 11 представлены диаграммы тока в фазе А сети при работе ФПУ в условиях изменяющихся нагрузок, номера ступеней ФПУ.



Рис. 10. Шкаф системы управления
ФПУ



Рис. 11. Диаграммы тока в фазе А сети с
установленным ФПУ, номера ступеней ФПУ

— опытно-промышленный образец ПРРМ класса напряжения 0,4 кВ, мощностью 50 квар (ОПО ПРРМ-0,4-50-ТД) (рис. 12). На рис. 13 приведены суточные графики перетоков реактивной мощности, а также напряжение в фазе А сети с подключенным ПРРМ



Рис. 12. ПРРМ на месте опытной эксплуатации

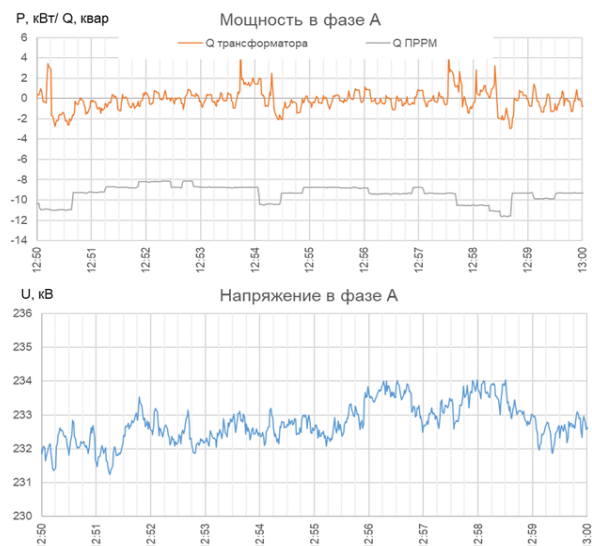


Рис. 13. Графики реактивной мощности и напряжения в точке подключения ПРРМ

— опытно-промышленный образец тиристорно-трансформаторного регулятора переменного напряжения (бустера) класса напряжения 0,4 кВ, мощностью 50 кВА (ТТРН-Б-50/0,4-3) (рис. 14). На графиках рис. 15 представлены результаты замеров входных и выходных напряжений фазы В бустера (05.01.2019г. с 10-00 до 12-00).



Рис. 14. Опытно-промышленный образец бустера

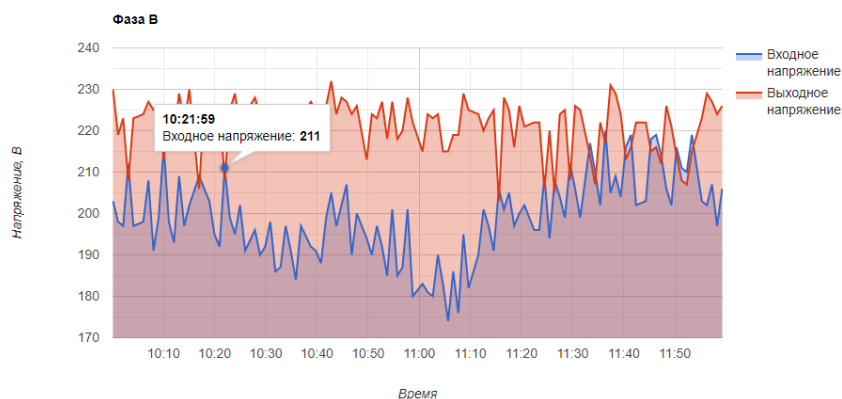


Рис. 15. Результаты суточных замеров входных и выходных напряжений фазы В бустера

— опытно-промышленный образец ПУРНТ напряжением 10 кВ, мощностью 1 МВт.

Отмечено успешное прохождение опытной эксплуатации устройств с их системами управления, построенными на аппаратно-программной платформе УСУ. Системы управления осуществляют управление ПРМ и установку в сети требуемого режима работы в автоматическом режиме в реальном времени, при этом решение об установке того или иного

управляющего воздействия производится в соответствии с методикой, описанной в 3 главе, на основании обработки микроЭВМ поступающей информации от датчиков тока и напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поставлена и решена задача разработки универсального аппаратно-программного обеспечения для систем управления широкого класса ПРМ (ФПУ, ПРРМ, бустеров, ПУРНТ, полупроводниковых устройств поперечной компенсации на основе трансформаторов с регулируемым коэффициентом трансформации) для осуществления их адаптивного управления в составе цифровых электрических сетей.

2. Разработаны функциональные и логические структуры алгоритмов работы отдельных функциональных блоков универсальной системы управления, их взаимодействие в режиме реального времени при работе полупроводниковых регуляторов мощности в составе энергосистемы. Рассмотрены особенности реализации алгоритмов работы отдельных блоков, учитывающих специфику построения и управления различных типов полупроводниковых регуляторов мощности.

3. Разработан и описан общий алгоритм работы универсальной системы управления, положенный в основу реализации аппаратно-программного обеспечения систем управления различных типов полупроводниковых регуляторов мощности.

4. Разработаны имитационные модели отдельных блоков и системы управления в целом в среде MATLAB & SIMULINK.

5. Поставлена и решена задача проверки работы аппаратно-программного обеспечения отдельных блоков универсальной системы управления с использованием результатов имитационного моделирования работы полупроводниковых регуляторов мощности в условиях изменяющихся режимов электрической сети.

6. Разработаны и реализованы физические модели систем управления различных полупроводниковых регуляторов мощности, построенных на основе разработанного аппаратно-программного обеспечения универсальной системы управления.

7. Проведен анализ работы аппаратно-программного обеспечения физических моделей систем управления полупроводниковых регуляторов реактивной мощности с использованием результатов имитационного моделирования.

8. Проведена опытно-промышленная эксплуатация разработанных систем управления устройствами на объектах ПАО «Россети» и в условиях лаборатории АО «ЭНИН». Подтверждена адаптивная работа систем управления устройств:

- опытно-промышленный образец ФПУ класса напряжения 10 кВ, мощностью 620 кВА;
- опытно-промышленный образец ПРПМ класса напряжения 0,4 кВ, мощностью 50 квар (ОПО ПРПМ-0,4-50-ТД);
- опытно-промышленный образец тиристорно-трансформаторного регулятора переменного напряжения (бустера) класса напряжения 0,4 кВ, мощностью 50 кВА (ТТРН-Б-50/0,4-3);
- опытно-промышленный образец ПУРНТ класса напряжения 10 кВ, мощностью 1 МВт.
- Результаты работы внедрены при выполнении работ в рамках договоров на НИОКР с ПАО «ФСК ЕЭС», Минобрнауки РФ, ПАО «Россети Ленэнерго».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Scopus
и Web of Science**

1. Ahmed E. ELGebaly, Dmitry I. Panfilov, Roman N. Krasnoperov. Control Algorithms of Discrete Reactive Power Compensators with PI and Fuzzy Logic Controllers // 21st INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO/NANOTECHNOLOGIES AND ELECTRON DEVICES (EDM 2020), Novosibirsk, Russia, 29 June - 3 July 2020.
2. Dmitry I. Panfilov, Michael G. Astashev, Alexander N. Rozhkov, Roman N. Krasnoperov, Dukhnich M. Elena. Experimental Research of Characteristics of Static VAR Compensators Based on Thyristor-Switched Schemes // IECON 2019 is the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IES). Lisbon, Portugal, October 14 to 17, 2019.
3. Dmitry I. Panfilov, Alexander N. Rozhkov, Michael G. Astashev, Roman N. Krasnoperov. Implementation of Adaptive Power Line Voltage Control at the Place of Controlled Static VAR Compensators Installation // 1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), (IEEE REEPE 2019), Moscow, Russia, March 14-15, 2019.

Патенты

4. Патент на изобретение RU 2670269 «Реакторная группа, коммутируемая тиристорами» / Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Красноперов Р.Н., Печейкина М.А., Духнич Е.М. // опубликован 22.10.2018.
5. Патент на изобретение RU 2677862 «Способ управления тиристорно-переключаемой конденсаторной группой и устройство для его реализации» / Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Духнич Е.М., Красноперов Р.Н. // опубликован 22.01.2019.

6. Патент на изобретение RU 2683964 «Способ управления емкостью управляемой конденсаторной группы и устройство для его осуществления» / Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Духнич Е.М., Красноперов Р.Н. // опубликован 03.04.2019.

7. Патент на изобретение RU 2684307 «Конденсаторная группа, коммутируемая тиристорами» / Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Духнич Е.М., Красноперов Р.Н. // опубликован 08.04.2019.

8. Патент на изобретение RU 2713631 «Конденсаторная группа, коммутируемая тиристорами» / Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Красноперов Р.Н. Духнич Е.М. // опубликован 05.02.2020.

9. Патент на изобретение RU 2715993 «Способ управления ёмкостью управляемой конденсаторной группы» / Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Красноперов Р.Н. Духнич Е.М. // опубликован 05.03.2020.

10. Патент на изобретение RU 2718502 «Конденсаторная группа, коммутируемая тиристорами» / Асташев М.Г., Красноперов Р.Н., Лунин К.А., Панфилов Д.И., Рожков А.Н. // опубликован 08.04.2020.

11. Патент на изобретение RU 2744807 «Устройство управления полупроводниковым регулятором реактивной мощности» / Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Красноперов Р.Н., Рожков А.Н., Шпак Д.А. // опубликован 16.03.2021.

Публикации в других изданиях

12. D.I. Panfilov, A.E. Elgebaly, M.G.Astashev, Rozhkov A.N., E.M Dukhnich, E.A. Vershanskiy, R.N. Krasnoperov. New design approach for static VAR compensators with zero harmonic content // Наука сегодня: история и современность [Текст]: материалы международной научно-практической конференции, г. Вологда, 29 ноября 2017 г. – Вологда: ООО «Маркер», Часть 1, 2017. -144 с.

13. Панфилов Д.И., Красноперов Р.Н., Рожков А.Н., Духнич Е.М. Моделирование тиристорного компенсатора реактивной мощности с высоким качеством регулируемого тока // Наука сегодня: опыт, традиции, инновации [Текст]: материалы международной научно-практической конференции, г. Вологда, 25 июля 2018 г. – Вологда: ООО «Маркер», 2018. – 144 с.

14. Панфилов Д.И., Асташев М.Г., Рожков А.Н., Красноперов Р.Н. Разработка подхода к адаптации управления источниками реактивной мощности в условиях изменения параметров режима линии электропередач // Наука сегодня: факты, тенденции, прогнозы [Текст]: материалы международной научно-практической конференции, г. Вологда, 26 июня 2019 г. – Вологда: ООО «Маркер», 2019. – 88 с. 23-25.

15. Асташев М.Г., Панфилов Д.И., Горчаков А.В., Красноперов Р.Н., Рашитов П.А. Управление полупроводниковыми регуляторами напряжения трансформаторов под нагрузкой в распределительных сетях 6-10 кВ // Международный научно-исследовательский журнал, ISSN 2303-9868 RRINT, ISSN 2227-6017 ONLINE, №4 (106) 2021 часть 1 апрель, - Екатеринбург «А-принт», 2021 – 161 с., 41 – 50.