

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

Усков Алексей Юрьевич

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМИ ПРОЦЕССАМИ ЗДАНИЯ
С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Кирпичникова Ирина Михайловна

Челябинск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЗДАНИЙ	10
1.1 Исследование патентного ландшафта.....	13
1.1.1 Описание объекта исследования	14
1.1.2 Определение динамики патентования	15
1.1.3 Определение географии патентования	17
1.1.4 Исследование по индексам МПК	20
1.1.5 Определение ключевых правообладателей.....	23
1.1.6 Определение ключевых изобретателей	25
1.1.7 Анализ наиболее цитируемых документов	25
1.1.8 Исследование карты технологий.....	27
1.1.9 Анализ технологий беспроводных систем.....	32
1.1.10 Выводы по патентному ландшафту	35
1.2 Обоснование эффективности использования ВИЭ	37
1.2.1 Расчет объема выработки электроэнергии.....	38
1.2.2 Оценка эффективности использования ВИЭ	43
1.3 Основные выводы по Главе 1	44
2 СПОСОБ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ.....	45
2.1 Сравнительный анализ способов коммутации.....	47
2.1.1 Полупроводниковые элементы коммутации.....	47
2.1.2 Электромеханические коммутационные реле	51
2.2 Усовершенствованный способ коммутации	57
2.3 Схемотехническое решение для коммутатора.....	60
2.4 Основные выводы по Главе 2	62

3 ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ.....	63
3.1 Сравнительный анализ стандартов связи	63
3.2 Построение адаптивной Wi-Fi MESH-сети	74
3.3 Беспроводной коммутатор электрической нагрузки.....	77
3.3.1 Схемотехническое решение.....	77
3.3.2 Встроенное программное обеспечение	81
3.3.3 Серверное программное обеспечение	83
3.4 Основные выводы по Главе 3	85
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	86
4.1 Экспериментальная исследовательская установка.....	86
4.2 Работа сети с самоорганизующейся топологией	98
4.3 Основные выводы по Главе 4	105
5 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ	106
5.1 Оценка экономического эффекта	107
5.2 Оценка влияния на углеродный след	108
5.3 Оценка влияния ВИЭ на эффективность	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Исходный код встроенного ПО коммутатора	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Исходный код встроенного ПО для ЭИУ	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Многие эксперты отмечают, что в России наметилась тенденция миграции населения из крупных мегаполисов в загородные жилые комплексы. При этом темпы развития электросетей в загородных жилых комплексах существенно отстают, что влечет за собой дефицит подводимой мощности сети электроснабжения. Решением данной проблемы может стать комплексный подход к созданию «Умных домов» в рамках жилого комплекса, заключающийся в применении, наряду с центральными линиями электроснабжения, возобновляемых источников энергии (далее ВИЭ), а также средств комплексной автоматизации инженерных систем зданий. Благодаря использованию ВИЭ осуществляется снижение нагрузки на центральные линии электроснабжения жилого комплекса, а применение систем управления энергосберегающими процессами повышает эффективность использования энергетических ресурсов.

Средства комплексной автоматизации инженерных систем зданий и отдельных помещений в настоящее время получают все большее распространение в России. При этом в Европе применение систем комплексной автоматизации уже является стандартом для любого здания. Одним из важнейших элементов системы комплексной автоматизации зданий является устройство коммутации электрической нагрузки. Но основным сдерживающим фактором их массового распространения в России является небольшой ресурс службы в виду выхода из строя коммутирующего элемента и отсутствие устойчивого беспроводного канала связи.

В настоящий момент практически не существует надежных беспроводных коммутаторов электрической нагрузки для зданий, которые обладали бы увеличенным сроком службы (сопоставимым со сроком эксплуатации здания), а также надежным каналом беспроводной связи для передачи управляющих команд и электротехнической информации от объекта управления (без необходимости установки дополнительного оборудования – ретрансляторов, преобразователей сигнала и так далее), что в конечном итоге обеспечивало бы безопасную и эффективную эксплуатацию систем электроснабжения в здании. Таким образом, активное развитие и внедрение систем «Умный дом» свидетельствует о возникновении

острой необходимости в создании адаптивных систем управления энергосберегающими процессами, которые отвечают данным требованиям.

Актуальность темы исследования также подтверждается результатами анализа Патентного ландшафта на тему «Системы «Умный дом», который был выполнен ООО «Центр интеллектуальной собственности «Сколково» (г. Москва) от 30.06.2020 по заказу ООО «Инсмартавтоматика» (г. Челябинск).

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области совершенствования адаптивных систем управления энергосберегающими процессами занимались следующие ученые, научные труды которых внесли неоценимый вклад в развитие темы исследования и легли в основу данной диссертационной работы: В.Б. Атабеков, П.П. Безруких, Ю.П. Валявский, В.И. Велькин, Н.И. Данилов, А.Н. Дядюнов, С.В. Егоров, В.В. Елистратов, А.М. Ершов, С.Е. Кокин, Г.И. Нудлер, А.В. Паздерин, Ю.А. Распаев, Д.С. Стребков, Т.М. Татарникова, И.К. Тульчин, Л.Ф. Файда, М.И. Хакимьянов, С.Е. Щеклеин и другие.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – разработка адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания с ВИЭ, обладающей повышенным ресурсом, надежным беспроводным каналом управления и малыми габаритными размерами.

В соответствии с указанной целью были поставлены следующие **задачи**:

- 1 Обосновать эффективность использования ВИЭ в электроснабжении потребителей в условиях загородных жилых комплексов Челябинской области.
- 2 Разработать способ коммутации электрических нагрузок зданий, обладающий повышенной надежностью и увеличенным сроком службы коммутирующего элемента за счет снижения искрообразования на контактах коммутирующего элемента (далее КЭ).
- 3 Разработать принципы и средства управления, а также алгоритмы эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий, повышающие безопасность и эффективность эксплуатации систем.
- 4 Разработать экспериментальную исследовательскую установку (далее ЭИУ) и провести анализ надежности разработанного способа коммутации элект-

трических нагрузок зданий, принципов и средств управления, а также алгоритмов управления.

5 Оценить экономический эффект от внедрения разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания.

Объектом исследования диссертационной работы является система управления энергосберегающими процессами здания.

Предметом исследования диссертационной работы является способ повышения надежности и увеличения срока службы системы управления энергосберегающими процессами здания.

Научная новизна:

1 Исследована эффективность использования солнечной энергии в качестве ВИЭ для электроснабжения потребителей в условиях загородных жилых комплексов Челябинской области.

2 Предложен способ коммутации электрических нагрузок зданий, обладающий повышенной надежностью и увеличенным сроком службы КЭ, отличающийся снижением искрообразования на контактах КЭ.

3 Разработаны принципы и средства управления, а также алгоритмы эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий, повышающие безопасность и эффективность эксплуатации систем.

4 Разработана ЭИУ и методика испытаний устройств коммутации для оценки срока службы их КЭ при работе на нагрузки различных типов.

Теоретическая значимость работы:

1 На основе сравнительного анализа существующих способов коммутации электрических нагрузок в зданиях предложен способ, обладающий повышенной надежностью и увеличенным сроком службы КЭ.

2 На основе сравнительного анализа существующих способов построения беспроводных сетей в зданиях для передачи управляющих команд и электро-технической информации от объекта управления разработаны принципы и средства управления, а также алгоритмы эффективного управления устройствами коммутации, повышающие безопасность и эффективность эксплуатации систем.

Практическая значимость работы:

1 Уточнена методика расчета с учетом снижения выбросов CO₂ и выбраны параметры солнечной энергоустановки для питания части электропотребителей загородного жилого комплекса «Твоя Привилегия» в Челябинской области.

2 Разработана адаптивная система управления энергосберегающими процессами здания, которая позволяет осуществлять удаленное управление электроприборами, автоматическую работу по заданным сценариям, обладает увеличенным сроком службы, надежным каналом беспроводной связи, а также малыми габаритными размерами.

3 Разработана и изготовлена универсальная ЭИУ, управляющее программное обеспечение и методика испытаний устройств коммутации, позволяющие оценить срок службы КЭ при работе на нагрузки различных типов.

Исследования и разработки по теме диссертационной работы поддержаны:

— Инновационным центром «Сколково» (15.11.2019 присвоен статус участника проекта создания и обеспечения функционирования инновационного центра «Сколково», основной регистрационный номер 1122856);

— грантами Фонда «Сколково» на сопровождение сделок по патентованию и работы по охране интеллектуальной собственности, создание прототипа или опытного образца продукта;

— грантом в рамках программы «СТАРТ-1» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере («Фонд содействия инновациям»).

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы разработки принципов и средств управления, а также алгоритмов эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий; разработанный способ коммутации электрической нагрузки и алгоритмы эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий подтверждались экспериментальными исследованиями и оценкой эффективности работы. Разработка опытного образца системы производилась в САПР – Altium Designer и КОМПАС-3D.

Положения, выносимые на защиту:

- 1 Исследована эффективность использования ВИЭ в электроснабжении потребителей в условиях загородных жилых комплексов Челябинской области.
- 2 Способ коммутации электрических нагрузок зданий, увеличивающий срок службы КЭ при сохранении малых габаритных размеров устройства коммутации в целом.
- 3 Система адаптивного беспроводного управления коммутацией электрических нагрузок зданий, повышающая надежность беспроводного канала связи без использования внешних дополнительных коммутационных устройств.
- 4 ЭИУ, предназначенная для практического сравнительного анализа сроков службы КЭ для различных способов коммутации электрических нагрузок зданий различных типов.
- 5 Результаты экспериментальных исследований опытных образцов системы управления энергосберегающими процессами здания, подтверждающие теоретические положения диссертационной работы.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы базируется на использовании известных положений электротехники, электроники, теории автоматического управления и подтверждаются адекватностью экспериментальных исследований.

Результаты диссертационной работы внедрены на следующих предприятиях: ООО «Инсмартавтоматика», ООО «Научно-производственная корпорация «Подъемные платформы», ООО «Нейрокс», в рамках опытной эксплуатации системы в здании, расположенном в поселке Западный Сосновского района Челябинской области (Клубный поселок «Твоя Привилегия»), а также в учебный процесс кафедры ЭССиСЭ в дисциплине «Энергосбережение в социальной сфере» магистерской программы «Комплексное использование возобновляемых источников энергии» по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» на очном отделении Политехнического института ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на 8 научно-практических конференциях, в том числе: 5 международных, 1 всероссийской, 2 региональных.

Публикации по теме диссертационной работы. По результатам выполненного исследования по теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 7 статей в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 2 статьи в журналах, индексируемых в международных базах SCOPUS и WoS; получено 2 патента РФ на изобретение, 1 патент РФ на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие научной специальности. Исследования, проводимые в рамках диссертационной работы, полностью соответствуют направлениям исследований (п. 4-5), приведенным в паспорте специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, разработке методов исследования по системам управления энергосберегающими процессами зданий; разработке способа коммутации электрической нагрузки в зданиях; созданию принципов и средств управления, а также алгоритмов эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий; разработке и изготовлению универсальной ЭИУ, управляющего программного обеспечения и методики испытаний устройств коммутации; изготовлению опытных образцов адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания с ВИЭ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы из 161 наименования (отечественных и зарубежных авторов) и 2 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 148 страниц машинописного текста, в том числе 128 страниц основного текста, включающего в себя 65 рисунков, 12 таблиц и 20 страниц приложений.

1 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЗДАНИЙ

Системы автоматизации зданий, которые зачастую называют системами «Умный дом», набирают популярность и демонстрируют активный рост мирового рынка. Причем данная тенденция отмечается и на территории России в то время, как для европейского рынка и рынка США «Умные дома» уже стали повседневной реальностью и «правилом хорошего тона» для застройщиков [1].

Системы автоматизации зданий призваны обеспечивать экономию энергетических и, как следствие, финансовых ресурсов, безопасность эксплуатации инженерных систем и сетей здания, и при этом создавать комфортные условия для человека (пользователя системы «Умного дома»).

История создания систем «Умный дом» началась в 1950 году, когда появились первые единичные внедрения кнопочного проводного управления «Умным домом» (Push-Button Manor). Позже в 1966 году американский инженер Джеймс Сазерленд разработал компьютер Echo IV, который управлял работой климатической техники в доме и коммутацией некоторых электроприборов. При этом первый специализированный стандарт для «Умного дома» был создан только в 1975 году шотландской компанией Pico Electronics. Обновленная система «Умного дома» уже обладала функциональными возможностями мониторинга и управления электрооборудованием, в частности, включение и выключение освещения, а также управление яркостью. Тогда же впервые было применено беспроводное управление (на частоте 310 МГц), что существенно упростило монтаж системы и способствовало широкому распространению. Стандарт получил название «X10».

В 1980 году произошло сегментирование рынка «Умных домов». Стандарт «X10» доминировал в США, но был неприменим в Европейских странах в виду существующих ограничений. При этом ряд Европейских электротехнических компаний, объединяясь в ассоциации, создали свои стандарты: EIB, VatiBus, EHS, что привело к несовместимости устройств различных производителей.

Термин «Умный дом» в современном его понимании появился лишь в 1984 году благодаря американской Ассоциации жилищно-строительных компаний (National Association of Home Builders), но понимания концепции «Умного дома» у

рядовых обывателей на тот момент еще не было. И тогда в 1999 году студия Disney запустила в прокат фильм «Smart Home», в котором наглядно демонстрировались возможности системы и абсолютно новый для того времени образ жизни.

В 1988 году концепция «Умного дома» начала активно набирать популярность в Японии. И в 1989 году при участии 15 японских компаний был реализован проект «TRON Intelligent House» (создание «Умного дома» будущего).

В 1999 году разработчики систем «Умного дома» пришли к выводу о необходимости обеспечения совместимости между собой устройств различных производителей и стандартов в рамках единой экосистемы. И в 2002 году сегментированные стандарты Европейских компаний были объединены в открытый протокол, который получил название «KNX». Это один из важнейших этапов развития «Умных домов» в мире.

Спустя 11 лет произошел фундаментальный переворот в системах «Умного дома». Благодаря широкому распространению смартфонов и удаленных облачных систем хранения данных, появились устройства с возможностью управления со смартфона (то есть из любой точки мира). Впервые стали появляться устройства с функционалом самообучения, например, терморегулятор «Nest» [2].

В 2012 году на рынок вышла компания «Smart Things» с целой экосистемой устройств «Умного дома». При этом стоимость устройств была существенно ниже аналогов, а программное обеспечение позволяло подключать к экосистеме «Smart Things» устройства сторонних производителей [3 – 5].

Активное развитие систем «Умного дома» не осталось без внимания крупнейших игроков рынка бытовой техники и IT-индустрии, что свидетельствует о понимании ими высокого потенциала данной технологии в плане дальнейшей коммерциализации. Например, компания «Samsung» приобрела «Smart Things», а IT-гигант «Google» приобрел «Nest», который на тот момент считался еще стартапом. Появился тренд на создание открытых экосистем «Умного дома» с применением беспроводных стандартов связи и реализующих технологии энергосбережения при сохранении комфорта для пользователя.

Следующий фундаментальный сдвиг произошел в 2014 году, когда компания «Amazon» вывела на рынок голосового ассистента «Alexa», который служил в том числе и для управления «Умным домом». Позже компании «Google», «Apple» и «Xiaomi» разработали аналогичных самообучающихся голосовых ассистентов и вышли на высококонкурентный рынок.

В России первый голосовой ассистент – «Алиса» появился в 2018 году и был разработан компанией «Яндекс» [6]. На тот момент это был единственный русскоязычный голосовой ассистент. При этом данный голосовой ассистент был создан на открытой платформе, что дает широкие возможности для пользователей и разработчиков «Умного дома» по интеграции устройств различных производителей в рамках единой экосистемы голосового ассистента [7 – 10].

Таким образом, ретроспективный анализ показывает три существенных тренда, которые определяют дальнейшее развитие систем автоматизации зданий: беспроводная система управления, открытая платформа и возможность голосового управления с использованием существующего ассистента.

Одним из наиболее востребованных устройств в сегменте «Умных домов» являются беспроводные коммутаторы электрической нагрузки [11], потому что управление именно электрическими приборами дает возможность контролировать большую часть техники, находящейся в доме.

С целью определения актуальных направлений исследования в рамках системы «Умный дом» было проведено изучение патентного ландшафта, который представлен в разделе 1.1. При этом была доказана актуальность разработки адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания и определены основные технические требования к системе. Также для повышения энергетической эффективности объекта (в рамках опытной эксплуатации) был произведен расчет и обоснована эффективность использования ВИЭ, что представлено в разделе 1.2. При этом в методику оценки эффективности, помимо энергетической и финансовой составляющих, была включена экологическая составляющая, а именно – влияние на углеродный след. В разделе 1.3 приведены основные выводы, которые были сделаны по результатам исследований в рамках Главы 1.

1.1 Исследование патентного ландшафта

Патентный ландшафт (далее ПЛ) представляет собой отчёт о состоянии патентной активности в определённой технологии в данной стране, регионе или в мире [12]. Построение ПЛ начинается с исследования уровня техники, то есть с поиска опубликованных в доступных базах данных сведений о средствах того же назначения, что и рассматриваемое решение или технология. Результаты поиска затем анализируются с целью дать ответы на ряд характерных для ПЛ вопросов, например, анализ определенной области науки и техники, инновационной и патентной активности, тенденций развития технологии. Патентный ландшафт служит хорошей доказательной базой при обсуждении политики компании, при стратегическом планировании исследований или при трансфере технологий. За рубежом ПЛ широко используется, и многие компании определяют свою политику, основываясь на данных анализа мировой патентной и публикационной активности. Например, по результатам исследований Института Интеллектуальной Собственности (Токио) результаты ПЛ для различных целей использовали более 85 % компаний и организаций в Японии за 2012 год [13].

Целью исследования является построение ПЛ по теме «Системы «Умный дом». Проведение исследований для выбранной области техники включает:

- анализ исследуемой технологии с определением области техники, подлежащей исследованию;
- проведение патентного поиска с целью выявления релевантных документов, относящихся к исследуемой области;
- проведение статистического и интеллектуального анализа документов представленного массива;
- подготовка отчета, содержащего графическое отображение результатов аналитической и статистической обработки массива отобранных патентных документов, включающего, информацию об исследуемой технологии, динамике патентования в данной области техники, географии патентования, информацию об индексах Международной патентной классификации (далее

МПК), информацию об основных правообладателях, карту ПЛ рассматриваемой технологии, список наиболее цитируемых документов, перечень наиболее активных изобретателей в исследуемой области.

1.1.1 Описание объекта исследования

Исследуемая технология относится к устройствам системы «Умный дом», которые относятся к средствам комплексной автоматизации инженерных систем жилых зданий и помещений.

В частности, в адаптивной системе управления энергосберегающими процессами здания с ВИЭ будут использоваться беспроводные коммутаторы электрической энергии. При этом данные устройства будут иметь функцию управления с помощью смартфона и сторонних голосовых ассистентов.

Конкурентные преимущества разрабатываемой системы:

- повышенный срок эксплуатации КЭ и подключенных к нему электроприборов за счет функции адаптивной коммутации нагрузки;
- возможность работы отдельных устройств коммутации вне зоны покрытия Wi-Fi-сигнала за счет построения между ними беспроводной MESH-сети.

При проведении исследований ПЛ была использована поисковая система PatSeer, представляющая собой патентно-информационную систему с мощными инструментами поиска и анализа патентов. Платформа использует данные из патентных семейств более чем 90 наиболее значимых Патентных ведомств мира, а также из 6 региональных офисов (EPO, WIPO, OAPI, ARIPO, EAPO и CGC).

При проведении исследований дополнительно также были использованы базы данных:

- Патентного Ведомства Российской Федерации (RUPTO);
- Патентного Ведомства США (USPTO);
- Европейского Патентного Ведомства (Espacenet);
- Всемирной Организации Интеллектуальной Собственности (Patentscope);
- Евразийского Патентного Ведомства (EAPATIS).

Основные технологические направления, к которым относятся выявленные патентные документы, представлены на рисунке 1.1. При проведении исследований ПЛ были использованы следующие поисковые термины:

- Smart home, smart socket, smart relay, temperature controller, leakage protection, smart valve, microclimate adaptive control, wireless sensors, smart lighting, fire safety, electric power switches, heating controller.
- Умный дом, умная розетка, умное реле, терморегулятор, защита от протечек, умный клапан, адаптивное управление микроклиматом, беспроводные датчики, умное освещение, пожарная безопасность, коммутаторы электрической энергии, регулятор отопления.

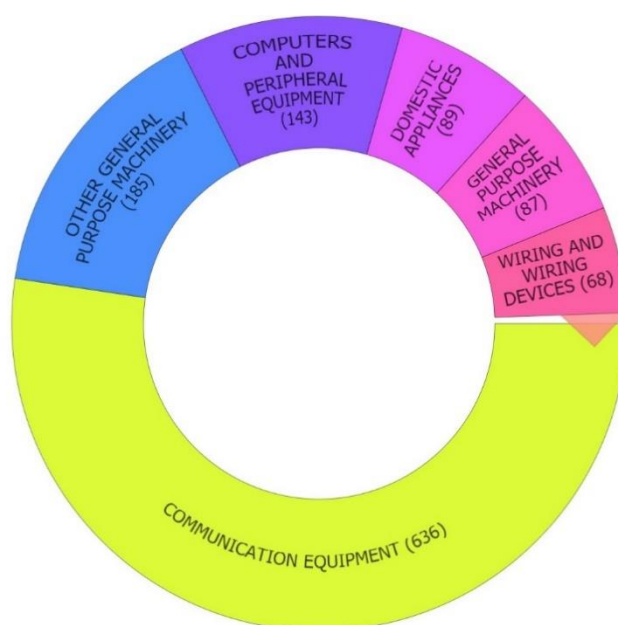


Рисунок 1.1 – Основные технологические направления, к которым относятся выявленные патентные документы

1.1.2 Определение динамики патентования

В результате проведенного поиска был отобран массив из 1292 патентных документов, относящихся к технологии систем «Умный дом».

Выбранный массив содержит документы, которые были поданы в патентные ведомства, начиная с 2006 года и которые эксперты или заявители отметили, как относящиеся к технологии «Умный дом».

Начиная с 2012 года наблюдается резкий рост количества патентных документов, что отражает постоянный не снижающийся интерес компаний к поиску новых подходов для создания систем «Умный дом».

Начиная с 2014 года график, представленный на рисунке 1.2, демонстрирует стабильное количество ежегодно подаваемых заявок по исследуемой технологии, что свидетельствует о снижении количества основных разработок и усовершенствовании отдельных элементов технологии.

Видимый спад на графике в 2019 – 2020 годах, может быть вызван тем, что время публикации заявки составляет 18 месяцев и поэтому не все документы были опубликованы ведомствами, в связи с чем сейчас не находятся в открытом доступе и не отражены на диаграмме. При этом спад патентной активности за последние 5 лет не наблюдается.

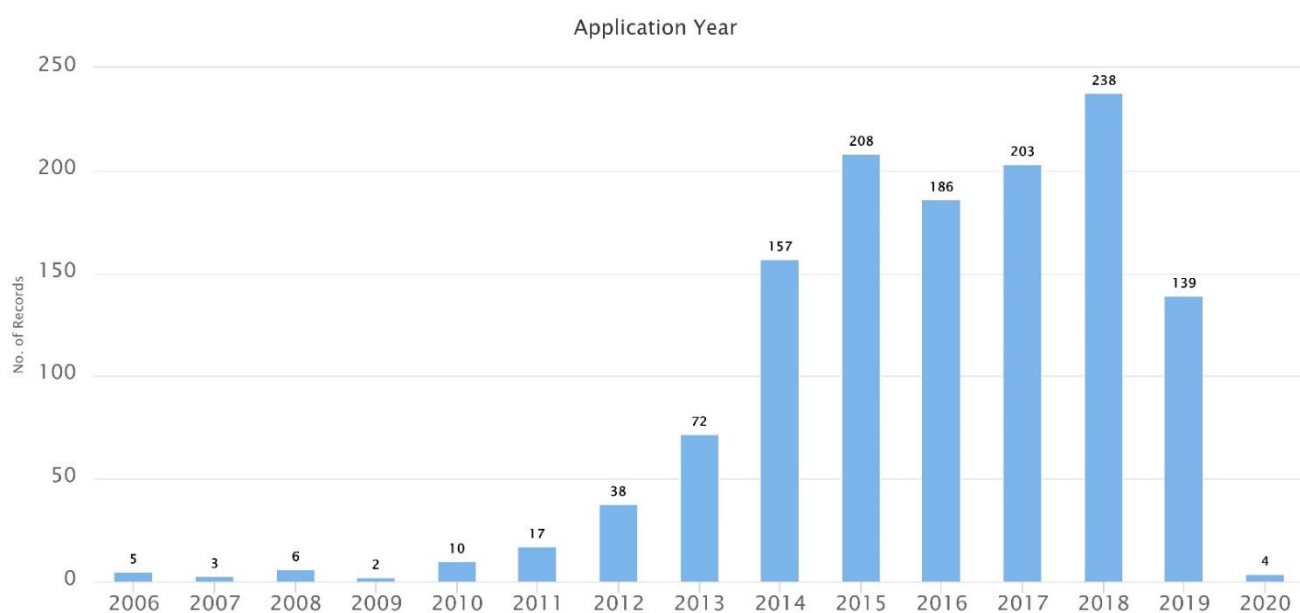


Рисунок 1.2 – Динамика изобретательской активности

На рисунке 1.2 и всех других диаграммах представленные данные за 2019 – 2020 годы отражены неточно, поскольку большая часть заявок на выдачу патента, поданных за последние 18 месяцев, еще не опубликована и, следовательно, не доступна для анализа (срок публикации заявки обычно составляет 18 месяцев с даты ее подачи).

1.1.3 Определение географии патентования

На диаграмме, которая представлена на рисунке 1.3, отображена информация о распределении поданных приоритетных патентных заявок по патентным ведомствам разных стран, что отражает исследовательскую активность компаний, занимающихся разработками в области исследуемой технологии. Приоритетная заявка (приоритетный документ) – наиболее ранняя поданная национальная или международная заявка, по которой испрашивается приоритет.

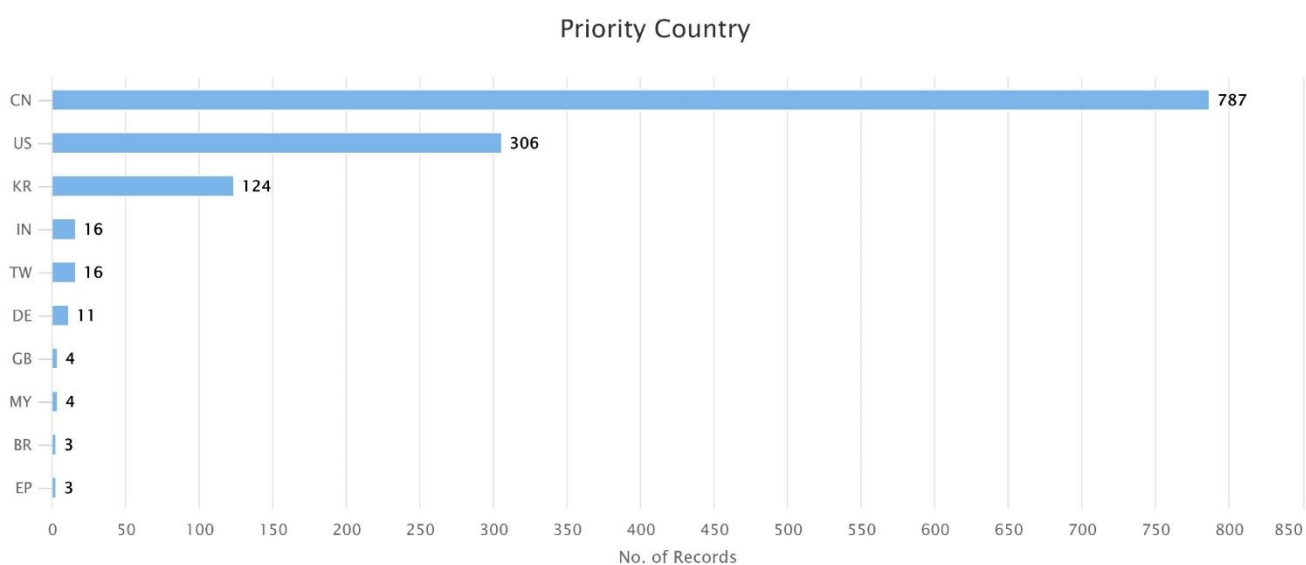


Рисунок 1.3 – Диаграмма распределения поданных приоритетных заявок по патентным ведомствам разных стран

Диаграмма распределения приоритетных патентных документов по странам позволяет сделать предположение о том, что в странах с наибольшим количеством поданных заявок сконцентрировано большинство исследований и разработок в исследуемой области.

Из диаграммы (рисунок 1.3) видно, что Китай (CN) является безусловным лидером по этому показателю, следом идут США (US) и Корея (KR).

Со значительно меньшим количеством поданных приоритетных заявок на диаграмме присутствуют Индия (IN), Тайвань (TW), Германия (DE).

Приведенная ниже диаграмма (рисунок 1.4) отражает рыночную стратегию компаний, занимающихся исследованиями технологии «Умный дом». Рынки указанных стран воспринимаются компаниями как приоритетные.

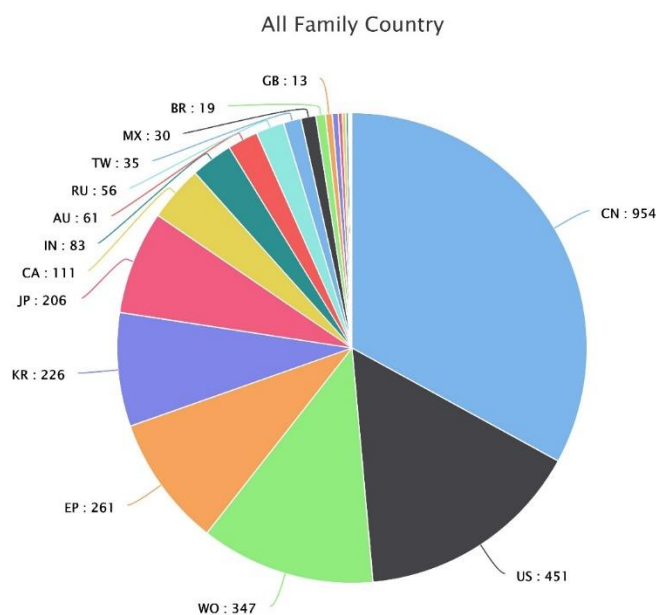


Рисунок 1.4 – Страны патентной защиты изобретений

Данная диаграмма (рисунок 1.4) построена с использованием всех патентных документов, которые входят в патентные семейства, относящиеся к одному и тому же техническому решению, и отражает рыночную стратегию компаний, занимающихся исследованиями и разработками в анализируемой области. Можно предположить, что рынки приведенных на диаграмме стран воспринимаются компаниями как приоритетные.

Патентное семейство (англ. Patent family) – это группа патентов (и заявок на выдачу патента), выданных более чем в одной стране и относящихся к одному и тому же техническому решению, раскрытому конкретным изобретателем или изобретателями.

Понятие «патентное семейство» определяется не национальными или международными законами, а патентными базами данных, в связи с чем существуют некоторые различия в объединении патентных документов в семейства в различных патентных базах данных. В целом, признаются следующие определения простых и расширенных патентных семейств. Простое патентное семейство – все патентные документы имеют одну и ту же дату приоритета или комбинацию дат приоритета. Расширенное патентное семейство – все патентные документы относятся к патентному семейству через прямую или косвенную связь с одним приоритетным документом. В расширенные патентные семейства, помимо докумен-

тов, имеющих одну и ту же дату приоритета или комбинацию дат приоритета, входят и документы, имеющие другую дату приоритета (например, если заявка была подана слишком поздно, чтобы испрашивать приоритет или если заявка была подана, в том числе, в одну из стран, не подписавших Парижскую конвенцию), но относящиеся к одному и тому же техническому решению.

Степень заинтересованности компаний в рынке каждой отдельной страны пропорциональна количеству поданных в данной стране заявок на выдачу патента, что отражается на приведенной диаграмме (рисунок 1.4) в виде количества опубликованных в данной стране документов.

Необходимо отметить присутствие на диаграмме международных заявок РСТ (обозначены как WO), что свидетельствует о выборе стратегии патентования посредством использования процедуры РСТ.

В таблице 1.1 представлены расширенные данные по всем патентным документам, которые входят в патентные семейства, в том числе приведенные на предыдущей диаграмме (рисунок 1.4).

Таблица 1.1 – Распределение патентных документов по странам

Код страны	Количество патентных документов	Код страны	Количество патентных документов
CN	954	TW	35
US	451	MX	30
WO	347	BR	19
EP	261	GB	13
KR	226	DE	12
JP	206	IL	8
CA	111	SG	7
IN	83	ES	5
AU	61	VN	2
RU	56	AR	1

Наибольшее количество заявок, относящихся к технологии систем «Умный дом», было подано в патентное ведомство Китая (CN) – 954 документа.

В Китае (CN), США (US) и Корее (KR) соотношение числа поданных первоначальных заявок компаниями-резидентами и общего числа опубликованных заявок составляет, соответственно, 787 против 954, 306 против 451 и 124 против 226. Обращает на себя внимание количество заявок, опубликованных Европейским патентным ведомством – 261 (EP) документ, в то время как заявок от европейских исследовательских компаний было подано всего 3, что может свидетельствовать об интересе зарубежных компаний к европейскому рынку.

Следует обратить внимание на количество поданных заявок в Японию (JP) и Канаду (CA), в то время как данные страны не являются странами разработок.

Россия (RU), которая находится на 13-ом месте по числу разработок, по числу опубликованных заявок находится на 10-ом месте, что свидетельствует о том, что рынок России (RU) в последнее время стал привлекательным для зарубежных компаний (что свидетельствует о 56 поданных заявках от компаний-резидентов), производящих системы «Умный дом».

1.1.4 Исследование по индексам МПК

Международная патентная классификация (МПК) [14, 15] (англ. International Patent Classification, IPC) создана в соответствии со Страсбургским соглашением 1971 года и предусматривает иерархическую систему независимых от языка символов для классификации изобретений и полезных моделей в зависимости от различных областей технологии, к которым они относятся. МПК является средством для единообразного в международном масштабе классифицирования патентных документов. Каждый патентный документ имеет, по крайней мере, один классификационный индекс МПК с указанием области техники, к которой относится техническое решение. Для одного документа также может быть назначено несколько индексов МПК для более подробного информирования о содержании исследуемого документа.

МПК используется в более чем 100 странах для классификации патентных документов и постоянно обновляется в соответствии с техническим прогрессом. Индексы МПК являются мощным инструментом исследователя по поиску аналогичных патентов, заявок на выдачу патентов, принадлежащих одному технологическому классу, а также средством объединения групп патентов и заявок со схожими технологическими решениями.

Существуют также и другие классификации, например, Cooperative Patent Classification (CPC) для более точного поиска в европейских и американских базах данных, или FI/F – для поиска в японских базах данных, однако МПК позволяет искать патентные документы повсеместно.

Диаграмма, представленная на рисунке 1.5, наглядно демонстрирует количество найденных документов по разным индексам МПК. В таблице 1.2 приведена расшифровка основных индексов МПК диаграммы рисунка 1.5.

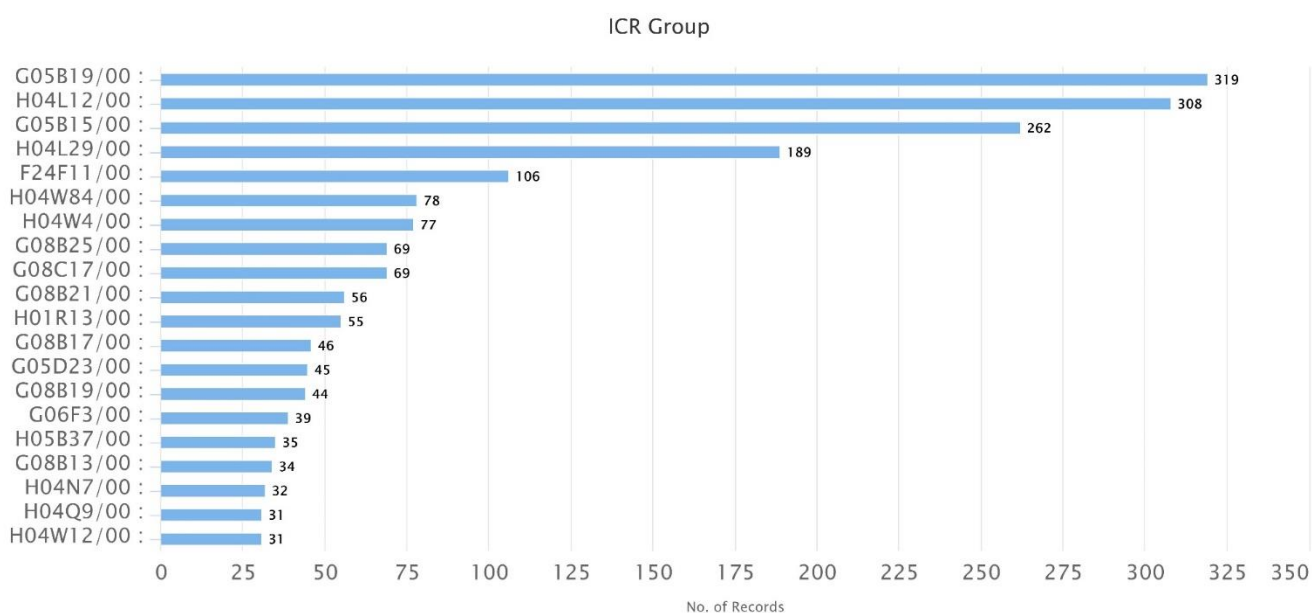


Рисунок 1.5 – Индексы Международной патентной классификации

Анализ основных рубрик МПК документов выбранного массива показывает, что большая часть исследований и разработок технологии систем «Умный дом» за последние 10 лет связана с системами управления в целом. При этом большое внимание уделяется как непосредственно самим системам управления,

так и сетям передачи данных для построения систем управления. В частности, беспроводным сетям передачи данных и их топологии.

Таблица 1.2 – Описание индексов МПК

Индекс МПК	Количество документов	Описание индекса в соответствии с классификацией МПК
G05B19/00	319	Системы программного управления
H04L12/00	308	Сети переключения сигналов (передачи данных)
G05B15/00	262	Системы, управляемые вычислительными устройствами
H04L29/00	189	Устройства, установки, цепи или системы, не отнесенные ни к одной из групп
F24F11/00	106	Устройство для управления или обеспечения безопасности
H04W84/00	78	Топологии сети
H04W4/00	77	Сервисы, специально предназначенные для беспроводных сетей связи; средства их обслуживания
G08B25/00	69	Системы подачи сигналов тревоги с передачей на центральную станцию сигналов, определяющих местоположение пункта, в котором возникли условия, вызвавшие появление сигнала тревоги
G08C17/00	69	Устройства для передачи сигналов, отличающиеся использованием беспроводной электрической связи
G08B21/00	56	Сигнализация, реагирующая на один определенный нежелательный или ненормальный режим работы, не отнесенная к другим группам
H01R13/00	55	Элементы конструкции соединительных устройств, отнесенных к группам 12/70 или 24/00 – 33/00
G08B17/00	46	Пожарная сигнализация; сигнализация, реагирующая на взрывы

1.1.5 Определение ключевых правообладателей

В данном разделе и далее под термином «ключевые правообладатели» подразумеваются компании, организации или физические лица, являющиеся заявителями или указаны в качестве правообладателей в наибольшем количестве патентных документов.

Приведенная на рисунке 1.6 диаграмма разделена на сектора по количеству заявок, поданных разными правообладателями на различные технические решения. Размер сектора определяется количеством патентных документов (технических решений в исследуемой области), принадлежащих одному правообладателю. Данная диаграмма отражает компании и организации, наиболее интенсивно развивающие анализируемую технологию.

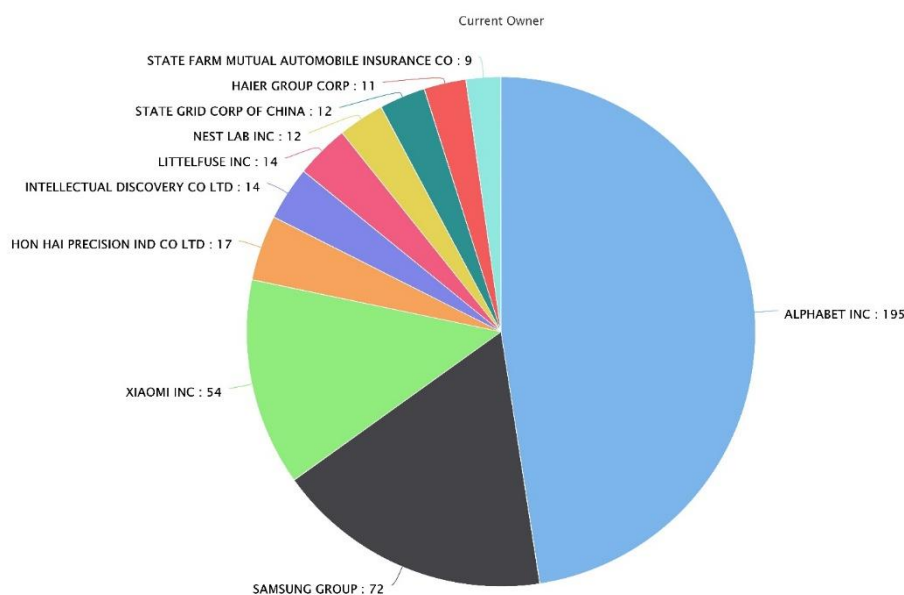


Рисунок 1.6 – Наиболее крупные заявители и патентообладатели

На диаграмме, приведенной на рисунке 1.7, показано количество патентных документов по направлению «Системы «Умный дом», принадлежащих ключевым правообладателям в различных странах. Данная диаграмма построена с использованием всех патентных документов, которые входят в патентные семейства.

Диаграмма (рисунок 1.7) показывает, в каких странах мира стремятся защитить свои решения обладатели наибольших патентных портфелей в анализируемой технологии.

Current Owner – Publication Country



Рисунок 1.7 – Диаграмма патентных документов по направлению «Системы «Умный дом»

На диаграмме, приведенной на рисунке 1.8, представлена информация о количестве заявок, поданных ключевыми правообладателями на разные технические решения в разные годы.

Current Owner – Application Year

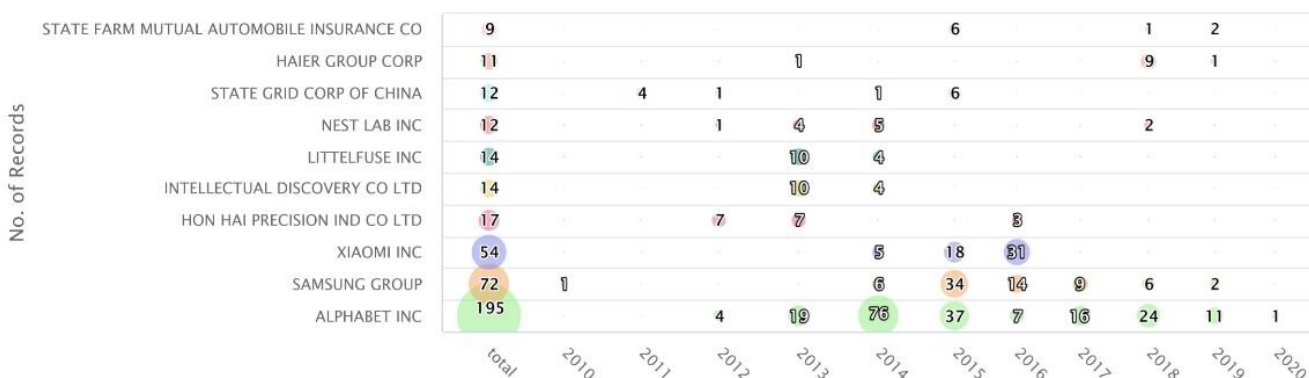


Рисунок 1.8 – Диаграмма количества заявок, поданных ключевыми правообладателями

Диаграмма (рисунок 1.8) демонстрирует, насколько интенсивно создавались новые технические решения отдельными компаниями, организациями или физическими лицами, обладающими наибольшими патентными портфелями в анализируемой области, в разные годы.

Ни одна компания не показывает стабильность в подаче заявок, однако наибольшую активность в 2014 и 2015 годах проявили компании Google и Samsung, что может свидетельствовать о разработке новых технических решений в области систем «Умный дом».

1.1.6 Определение ключевых изобретателей

Диаграмма, представленная на рисунке 1.9, демонстрирует количество патентных заявок, в которых в качестве автора указан конкретный изобретатель. Данная диаграмма позволяет сделать вывод о том, какие изобретатели создали наибольшее количество изобретений в направлении «Системы «Умный дом».

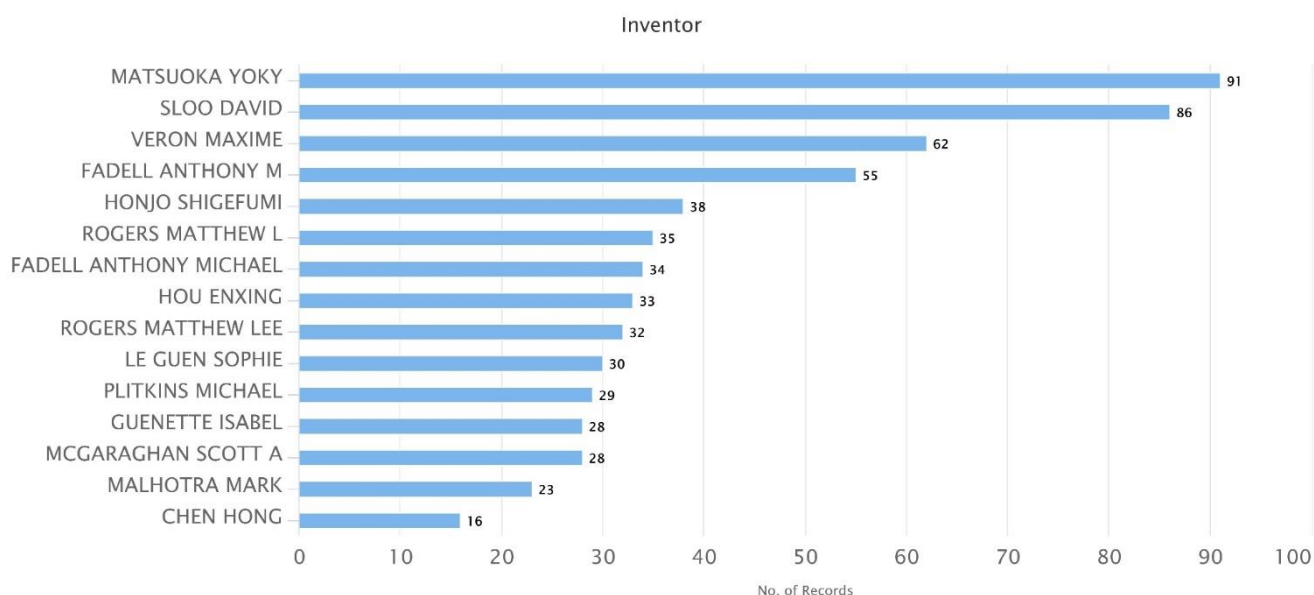


Рисунок 1.9 – Диаграмма ключевых изобретателей по направлению «Системы Умный дом»

1.1.7 Анализ наиболее цитируемых документов

Связи между патентными документами проливают свет на соотношение между различными направлениями изобретательской деятельности. Обычно рассматриваются два типа цитирования.

Обратное цитирование – цитирование предшествующих работ в патентных заявках на технологии. Оно отражает влияние более ранних изобретений на новые разработки. Удельный вес не патентной литературы в общем объеме цитирований

показывает уровень связей между научной и изобретательской деятельностью. Патентные заявки на технологии с высоким уровнем цитирования таких источников можно считать наукоемкими изобретениями. Период между датой цитируемого известного технического решения и подачей патентной заявки на технологию показывает, насколько быстро появляются последовательные изобретения. Внезапные изменения продолжительности временных лагов служат свидетельством технологических прорывов либо меняющихся тенденций технологического развития.

Прямое цитирование – цитирование патентных заявок на технологии в других заявках. Количество прямых цитат принято считать показателем экономической или технологической ценности патентов [16].

На диаграмме, приведенной на рисунке 1.10, представлены патентные документы, которые обладают наибольшим количеством прямых цитирований. Как правило, большое количество цитирований документа связано с его экономической и технологической ценностью.

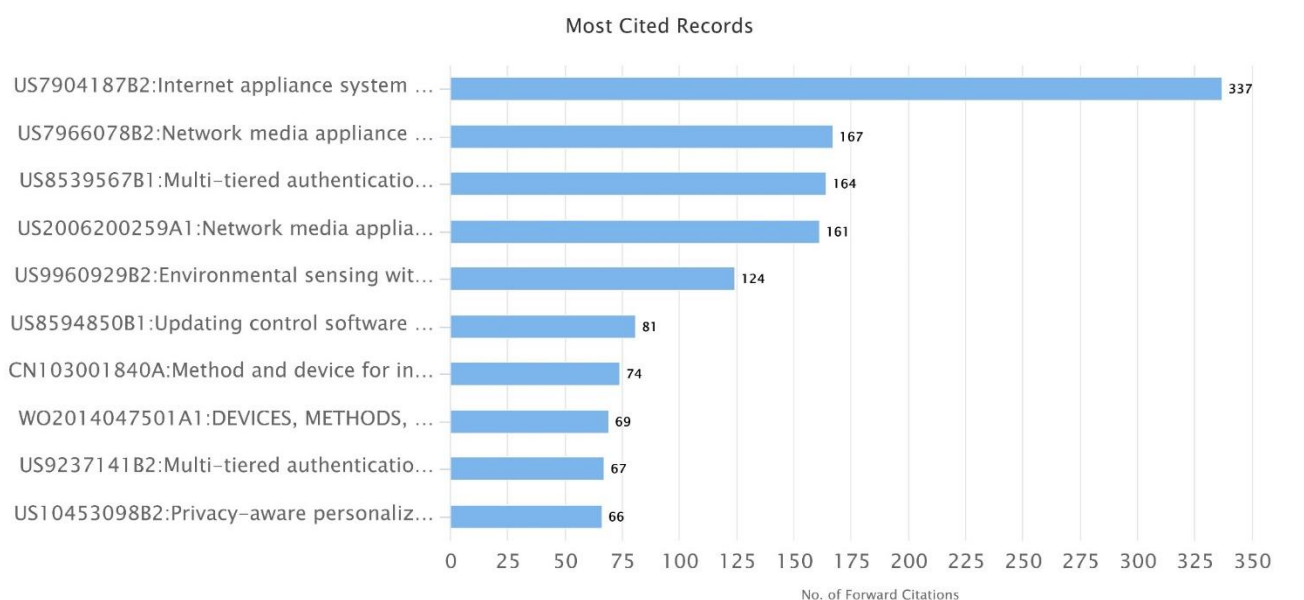


Рисунок 1.10 – Диаграмма количества прямых цитирований

Далее приводятся патентные документы, обладающие наибольшим количеством прямых цитирований, так как именно они показывают экономическую и технологическую ценность.

Подробная информация о тридцати наиболее цитируемых документах:

- | | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| — [17] – 337 цитирований; | — [27] – 65 цитирований; |
| — [18] – 167 цитирований; | — [28, 29, 30] – 64 цитирования; |
| — [19] – 164 цитирования; | — [31, 32] – 61 цитирование; |
| — [20] – 161 цитирование; | — [33] – 59 цитирований; |
| — [21] – 124 цитирования; | — [34] – 56 цитирований; |
| — [22] – 81 цитирование; | — [35, 36, 37, 38] – 55 цитирований; |
| — [23] – 74 цитирования; | — [39, 40] – 53 цитирования; |
| — [24] – 69 цитирований; | — [41, 42, 43] – 52 цитирования; |
| — [25] – 67 цитирований; | — [44, 45, 46] – 51 цитирование. |
| — [26] – 66 цитирований; | |

1.1.8 Исследование карты технологий

В основе построения карты ПЛ лежит метод измерения «расстояний» между двумя патентными документами (входящими в разные патентные семейства). «Расстояние» между ними определяется на основании количества ключевых слов анализируемого раздела патентного документа (например, формулы изобретения или реферата), по которым они сходны, а также количества ключевых слов, по которым они различаются.

ПЛ строится по массиву предварительно отобранных патентов; то есть не существует единой картографической основы, на которую можно нанести патенты и увидеть их глобальное взаиморасположение.

Если у двух патентных документов, для которых вычисляется расстояние, нет общих ключевых слов, то расстояние вычисляется как максимальное в данном массиве, и наоборот.

Карта ландшафта позволяет увидеть, насколько близки по технической сущности патентные документы разных правообладателей, и как они распределены по направлениям развития технологии.

Наиболее популярные направления исследовательской деятельности анализируемой области на карте ландшафта объединены в крупные «материки».

При анализе ландшафта необходимо помнить, что выведенные на карте слова с высокой вероятностью относятся именно к тому, на что направлено решение, а не описывают технический признак, который может быть присущ всем или большинству решений, описанных в документах.

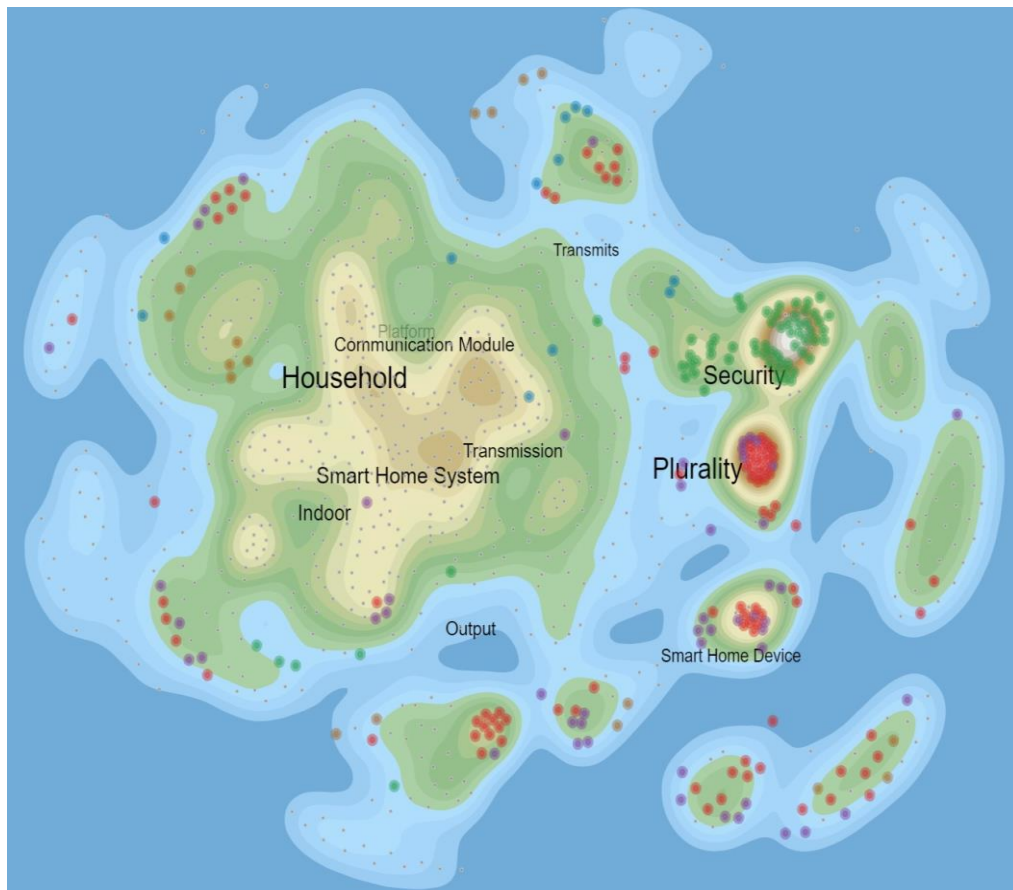


Рисунок 1.12 – Карта интересов ключевых правообладателей по тематике «Системы «Умный дом»

●	GOOGLE INC
●	SAMSUNG ELECTRONIC CO LTD
●	GOOGLE LLC
●	XIAOMI INC
●	HON HAI PRECISION IND CO LTD

Рисунок 1.13 – Ключевые правообладатели для карты интересов (рисунок 1.12)

На карте интересов, представленной на рисунке 1.12, выделены патенты 5-ти компаний из списка ведущих патентообладателей – GOOGLE INC, SAMSUNG ELECTRONIC CO LTD, GOOGLE LLC, XIAOMI INC, а также HON HAI PRECISION IND CO LTD. Легенда к карте интересов ключевых правообладателей представлена на рисунке 1.13.

Можно сделать вывод о том, что сферы интересов GOOGLE, рассредоточены, но особый интерес уделяется совмещению технологий. Сфера интересов SAMSUNG – в области безопасности.

Для более углубленного исследования карты технологий необходимо осуществить переход от терминов, характеризующих функциональные направления «Систем «Умного дома», к терминам, характеризующим конкретные технические решения в виде «Устройств «Умного дома».

Диаграмма, представленная на рисунке 1.14, наглядно демонстрирует используемые термины для построения карты по тематике «Устройства «Умного дома». Центральное место в диаграмме (рисунок 1.14) занимает «семейство» устройств коммутации электрической нагрузки (32 наименования).

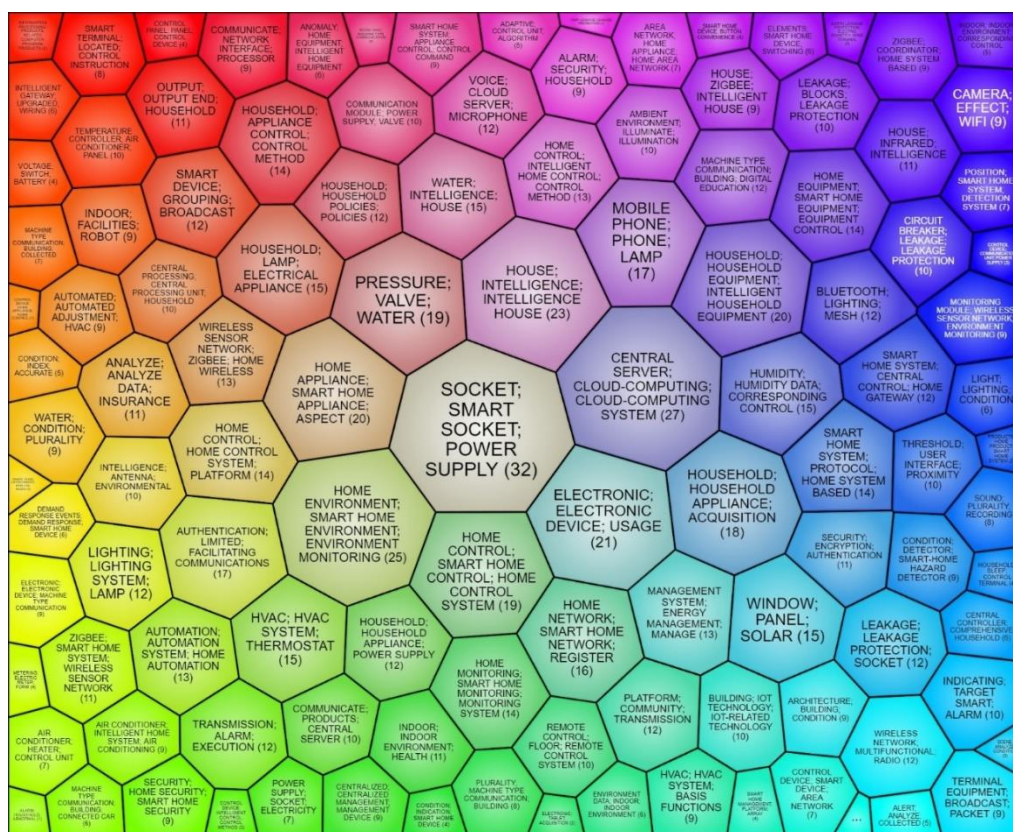


Рисунок 1.14 – Термины, используемые для построения карты

На карте интересов, представленной на рисунке 1.15, выделены патенты 5-ти компаний из списка ведущих патентообладателей. Легенда к карте ключевых правообладателей представлена на рисунке 1.16. Следует отметить, что есть области, к которым ключевые патентообладатели не проявляют интерес.

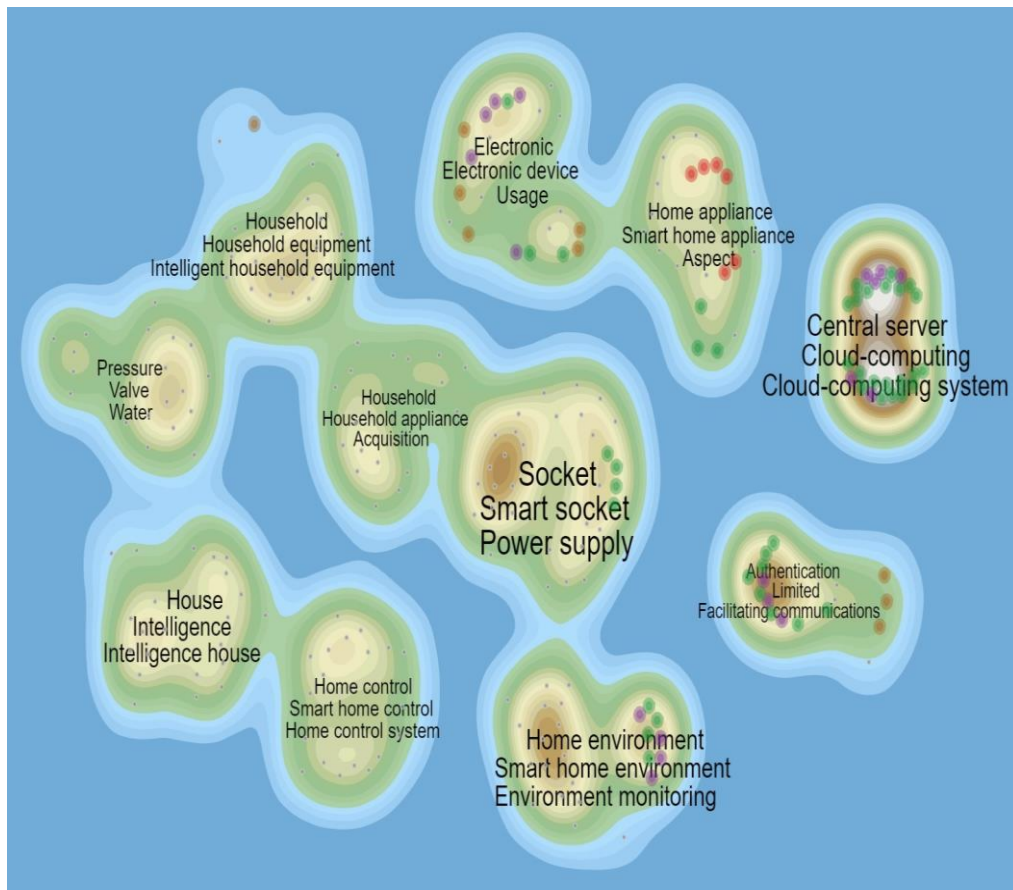


Рисунок 1.15 – Карта областей интересов ключевых правообладателей по тематике «Устройства «Умного дома»

	GOOGLE INC
	GOOGLE LLC
	SAMSUNG ELECTRONIC CO LTD
	INTELLECTUAL DISCOVERY CO LTD
	RADIOPULSE INC

Рисунок 1.16 – Ключевые правообладатели для карты областей интересов (рисунок 1.15)

Ключевыми правообладателями по тематике «Устройства «Умного дома» являются следующие международные компании: GOOGLE INC, GOOGLE LLC, SAMSUNG ELECTRONIC CO LTD, INTELLECTUAL DISCOVERY CO LTD, а также RADIOPULSE INC (рисунок 1.15).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее актуальными в настоящее время являются исследования в смежных направлениях, в частности, в области систем коммутации электрической нагрузки, беспроводных сетей передачи данных и управления. На основе синтеза указанных технологий создаются устройства, обладающие новыми функциональными возможностями.

1.1.9 Анализ технологий беспроводных систем

Из общего массива документов, содержащего 1 292 документа, была выделена область «wireless sensor network», содержащая 105 документов, относящихся к беспроводной сенсорной сети.

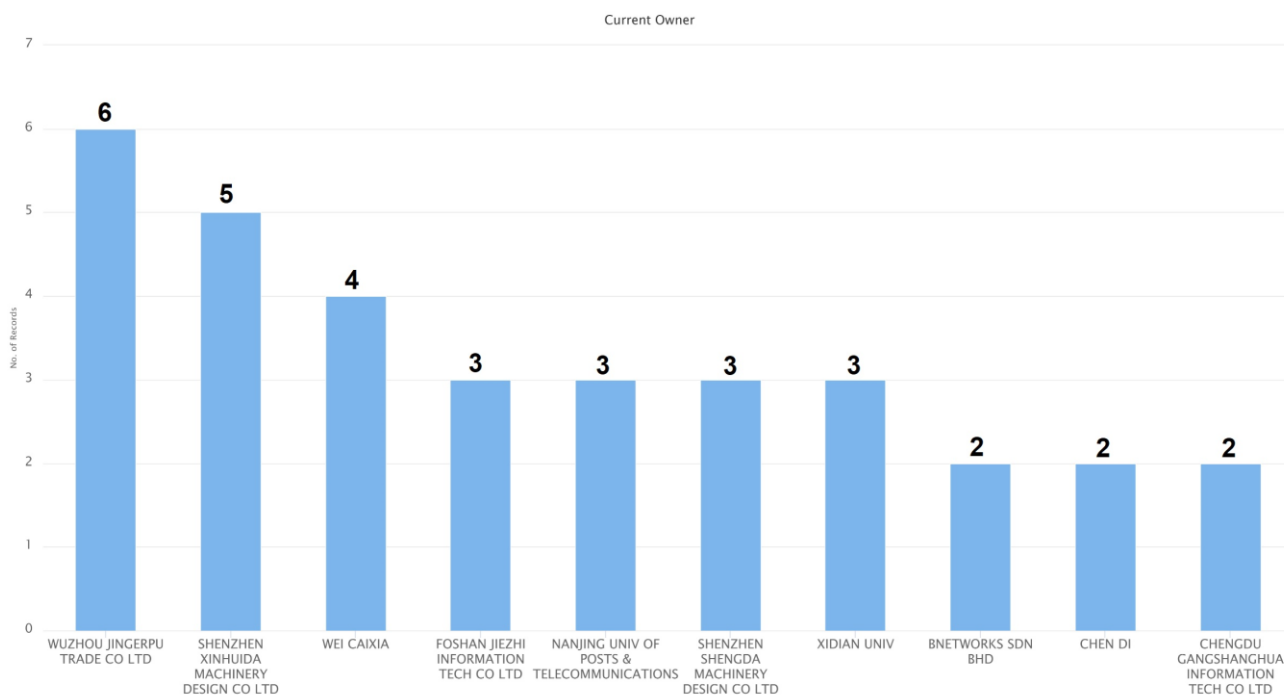


Рисунок 1.17 – Ключевые заявители и патентообладатели в области «wireless sensor network»

Ключевыми заявителями и патентообладателями в анализируемой области являются международные компании WUZHOU JINGERPU TRADE, SHENZHEN

XINHUIDA MACHINERY DESIGN и WEI CAIXIA, на долю которых суммарно приходится 15 патентных документов (рисунок 1.17).

На рисунке 1.18 приведена динамика патентования по годам с 2011 по 2019 год включительно. Видимый спад на графике в 2019 – 2020 годах, может быть вызван тем, что не все заявки ещё опубликованы ведомствами (рисунок 1.18).

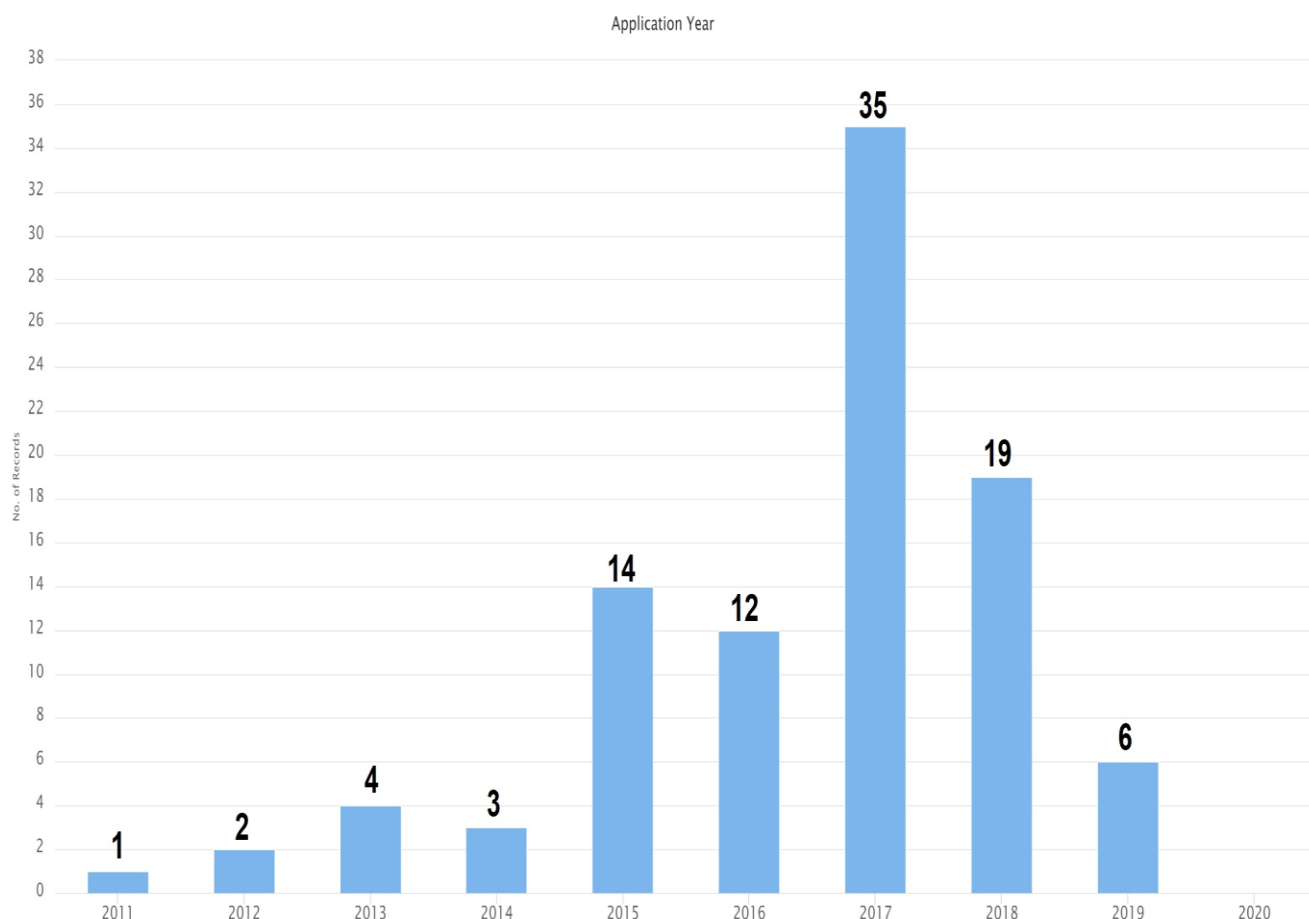


Рисунок 1.18 – Динамика патентования по годам

В 2015 году наблюдается рост количества поданных заявок, что отражает развитие данной области (рисунок 1.18).

В 2017 году наблюдается резкий рост количества патентных документов, что отражает постоянный и не снижающийся интерес компаний к поиску новых подходов для создания новых решений в данной области (рисунок 1.18).

Начиная с 2015 – 2018 годов график демонстрирует стабильное количество ежегодно подаваемых заявок по данной области, что свидетельствует о развитии анализируемой технической области (рисунок 1.18).

На диаграмме, представленной на рисунке 1.19, отображена информация о распределении поданных приоритетных патентных заявок по патентным ведомствам разных стран. Из диаграммы видно, что Китай является безусловным лидером, где сконцентрировано большинство исследований и разработок в мире в рамках анализируемой области.

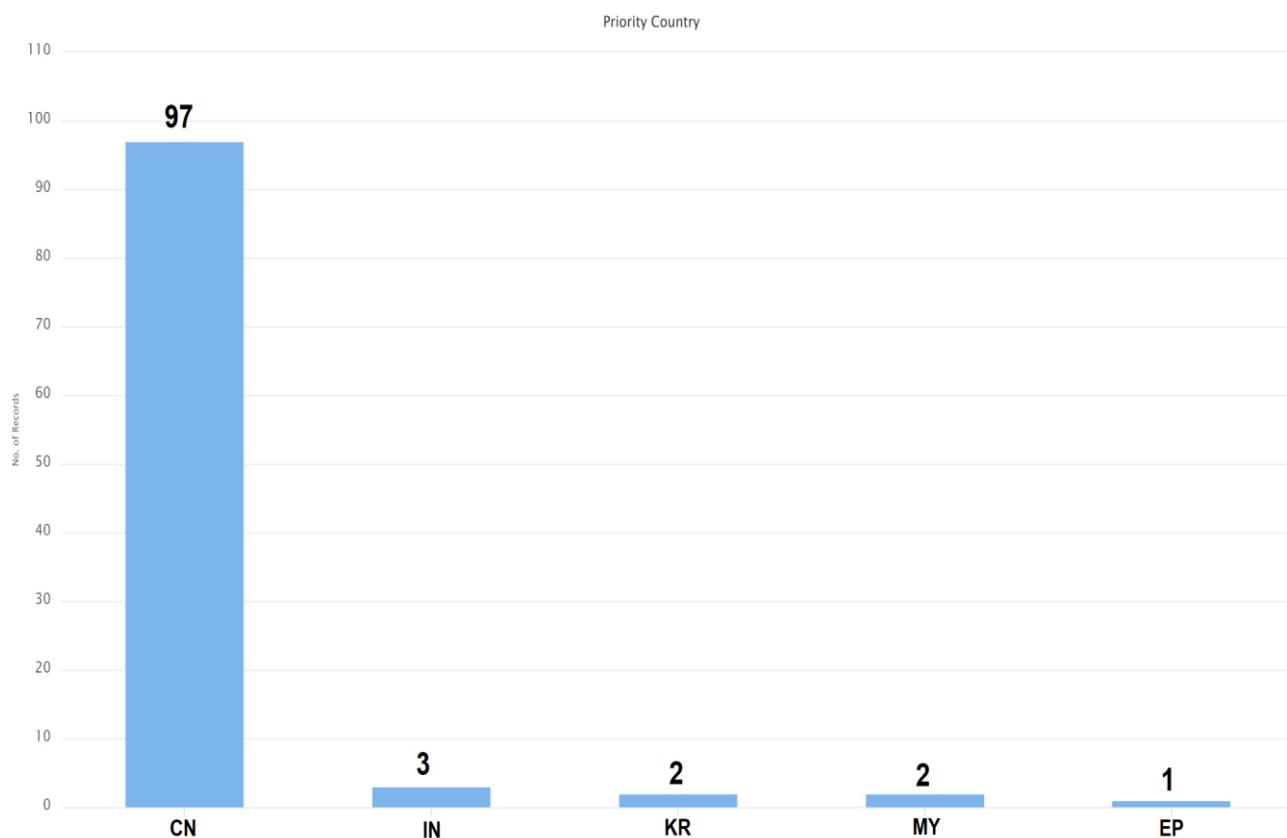


Рисунок 1.19 – Диаграмма распределения заявок по патентным ведомствам разных стран

Диаграмма на рисунке 1.20 наглядно показывает распределение технологических направлений внутри исследуемой области. Как видно из диаграммы (рисунок 1.20), ключевыми направлениями являются разного рода модули и контроллеры, которые образуют домашнюю среду и системы.

Как правило, большое количество цитирований документа связано с его экономической и технологической ценностью. По результатам анализа 50 наиболее цитируемых документов исследуемой области [48 – 97] можно сделать вывод о том, что вопрос повышения надежности беспроводной связи в различных элементах систем «Умный дом» особенно актуален в настоящее время. К тому же в

разрабатываемых устройствах необходимо придерживаться общепринятых стандартов (протоколов) связи для обеспечения возможности взаимной интеграции систем «Умный дом» различных производителей.

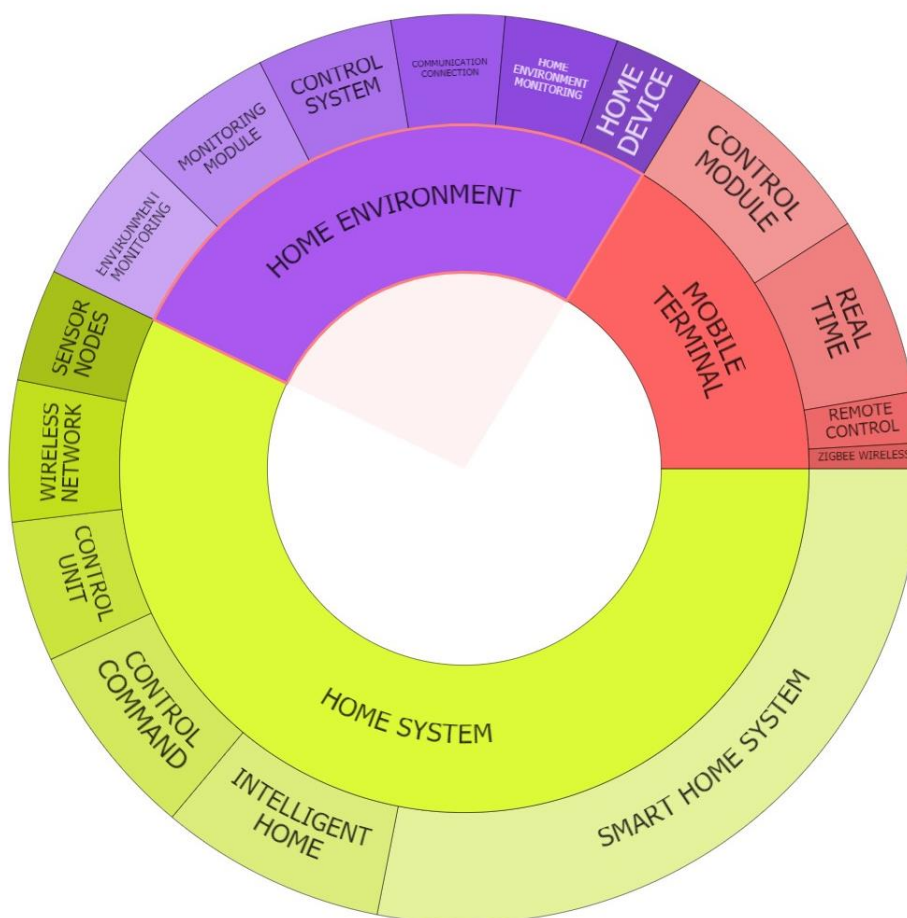


Рисунок 1.20 – Диаграмма распределения технологических направлений внутри исследуемой области

1.1.10 Выводы по патентному ландшафту

В результате построения патентного ландшафта по теме «Системы «Умный дом» были сделаны следующие выводы:

1 Значительный рост патентной активности в области «Системы «Умный дом» начался в 2011 – 2012 годах. Следует отметить, что поскольку срок публикации заявки обычно составляет 18 месяцев с даты её подачи, поэтому на момент проведения данного исследования не все документы за период 2019 – 2020 годов были опубликованы и, следовательно, доступны для анализа.

2 Страны, в которых проводится наибольшее количество исследований и разработок в исследуемой области: Китай, США, Корея, Индия.

3 Страны, в которых наиболее часто стремятся защитить свои решения правообладатели: Китай, США, страны ЕПК, Корея, Япония, Канада, Индия, Австралия, Россия.

4 Необходимо также отметить присутствие значительного количества международных заявок РСТ (3-е место по количеству поданных заявок в странах патентной защиты), что свидетельствует о выборе большинством правообладателей стратегии патентования с использованием процедуры РСТ, а также о стремлении правообладателей получить защиту своих изобретений на территории большого количества стран.

5 Основными компаниями-правообладателями в области технологии систем «Умный дом», являются зарубежные компании GOOGLE (ALPHABET), SAMSUNG, XIAOMI. В условиях отсутствия отечественных разработчиков «Систем «Умный дом» рынок России является перспективным, о чем свидетельствует патентная активность зарубежных компаний в разрезе РСТ заявок.

6 Анализ основных рубрик МПК (Международной Патентной Классификации) документов выбранного массива показывает, что большая часть исследований и разработок в области систем «Умный дом» за последние 20 лет связана с применением способов и устройств управления как общей системой в целом, так и отдельно взятого устройства в системе, а также способов и устройств передачи данных в рамках системы управления.

7 Важнейшим элементом «Системы «Умный дом» является устройство коммутации электрической нагрузки, входящее в состав системы управления и обладающее возможностью обмена данными с центральным устройством системы управления по надежному (защищенному) каналу беспроводной связи.

8 Установившиеся тренды патентной активности свидетельствуют о необходимости исследований в областях смежных технологий, что позволяет наделять устройства «Системы «Умный дом» новыми свойствами и функциональными возможностями.

1.2 Обоснование эффективности использования ВИЭ

Концепция «Умный дом» помимо использования современных энергосберегающих устройств и управления этими устройствами с целью обеспечения энергетической эффективности, предполагает также использование ВИЭ. Наиболее эффективным для загородных жилых комплексов на территории Челябинской области будет использование солнечных энергоустановок для питания части электропотребителей в зданиях.

Для территории Челябинской области наиболее целесообразно использование солнечной и ветровой энергии, энергетический потенциал которых является достаточно высоким.

Однако, для такого загородного поселка, как «Твоя привилегия» применение ветроэнергетических установок (далее ВЭУ) не целесообразно, поскольку требует дополнительные площади отчуждения, что невозможно сделать в условиях плотной застройки. Кроме того, поселки расположены среди лесного массива, создающего ветровую тень, что будет снижать выработку электроэнергии ВЭУ.

Наиболее эффективным будет использование солнечных энергоустановок для питания части электропотребителей постоянным током, вырабатываемым солнечными модулями [98].

По величине поступающей суммарной солнечной радиации в Челябинской области можно выделить четыре следующих зоны, которые наглядно представлены на рисунке 1.21:

- суммарная солнечная энергия за год составляет 1200 – 1250 кВт·ч/м² (Брединский район, южные части Кизильского и Карталинского районов);
- суммарная солнечная энергия за год составляет 1150 – 1200 кВт·ч/м² (северная часть Кизильского и Карталинского районов, Агаповский, Чесменский и Троицкий районы, южная часть Октябрьского района);
- суммарная солнечная энергия за год составляет 1100 – 1150 кВт·ч/м² (Уйский, Верхнеуральский, Увельский, Еткульский, южные части Сосновского, Красноармейского и северная часть Октябрьского районов);

- суммарная солнечная энергия за год составляет 1050 – 1100 кВт·ч/м² (Чебаркульский, Аргаяшский районы, южная часть Кунашакского района, северная часть Сосновского и Красноармейского районов);
- суммарная солнечная энергия за год составляет менее 1050 кВт·ч/м² (Нязепетровский, Каслинский районы, северная часть Кунашакского района).

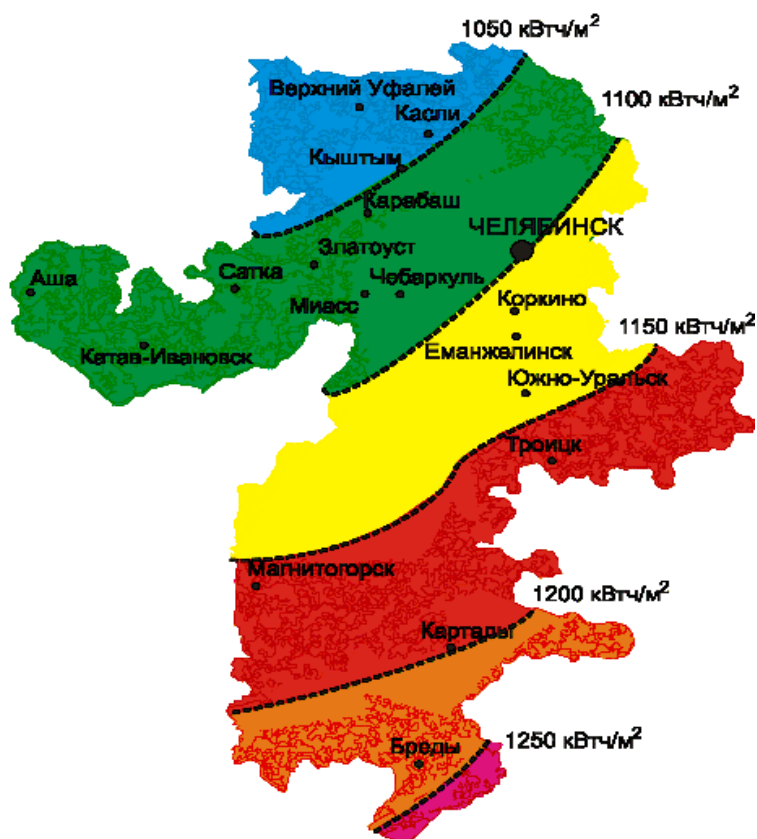


Рисунок 1.21 – Зонирование территории Челябинской области по годовому количеству солнечной радиации

В данную градацию не вошли районы горнозаводской зоны. Эта территория имеет неоднородность не только пространственную, но и по высоте над уровнем моря. Имеющихся данных с метеостанций недостаточно для принятия решения о зонировании данных районов.

1.2.1 Расчет объема выработки электроэнергии

Загородные жилые комплексы на территории Челябинской области преимущественно географически относятся к зоне поступления солнечной радиации от 1100 до 1150 кВт·ч/м² в год. Рассмотрим потенциал солнечной энергии для ука-

занного района, в котором расположен поселок «Твоя привилегия», имеющего географические координаты 55°10'85" с.ш. и 61°25'01" в.д.

Вероятность среднемесячной продолжительности солнечного сияния составляет 0,4 – 0,6. Такой потенциал считается вполне приемлемым для получения электрической энергии при преобразовании солнечных лучей.

Для расчета объема выработки электроэнергии рассмотрим широко распространенный солнечный модуль типа PSM4-150 на кремниевых монокристаллических солнечных элементах производства Рязанского завода металлокерамических приборов (далее РЗМКП). Модули предназначены для работы в автономных фотоэлектрических системах совместно с аккумуляторными батареями. Внешний вид модуля PSM4-150 и его вольтамперная характеристика (далее ВАХ) при уровне освещенности 800 Вт/м² приведены на рисунке 1.22.

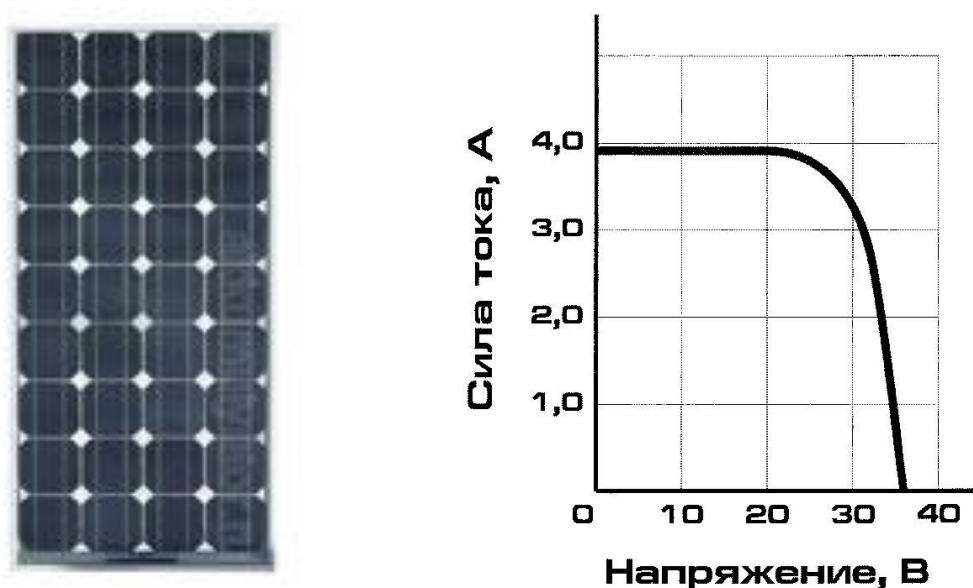


Рисунок 1.22 – Внешний вид модуля PSM4-150 (слева) и его вольтамперная характеристика (справа)

Для одного выбранного типа модуля выработка электрической энергии в условиях географического местоположения для каждого месяца года определяется выражением 1.1 (кВт·ч):

$$E_i = E_{\text{ВАЛ}} \cdot F_{\text{СМ}} \cdot \eta_{\text{К}} \cdot K_{\text{Т}} \cdot \eta_{\text{ДР}}^m \cdot \eta_{\text{ДЭ}}^m \quad (1.1)$$

где $E_{\text{ВАЛ}}$ – удельный валовой приход солнечной энергии на местность ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$), $F_{\text{СМ}}$ – площадь одного солнечного модуля (м^2), $\eta_{\text{К}}$ – коэффициент полезного действия (далее КПД) кремниевого солнечного элемента (в расчетах принимается равным 11 %), K_{T} – коэффициент, учитывающий влияние температуры солнечного модуля на его КПД (в расчетах принимается равным 1,47), $\eta_{\Delta\text{Р}}^{\text{м}}$, $\eta_{\Delta\text{Э}}^{\text{м}}$ – соответственно потери мощности, определяемые последовательным соединением элементов (в расчетах принимается равным 0,97) и передачей энергии до потребителя (в расчетах принимается равным 0,90).

При расположении солнечных модулей на кровле зданий они устанавливаются под углом, равным географической широте местности, то есть приблизительно 55° . Для такого угла установки ($\beta=55^\circ$) валовой приход солнечной радиации для каждого месяца рассчитан и представлен в таблице 1.3 [99].

Таблица 1.3 – Ежемесячный валовой приход солнечной радиации для $\beta=55^\circ$

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
$E_{\text{ВАЛ}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$	114,6	116,3	150,6	129,1	128,2	137,6
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$E_{\text{ВАЛ}}$, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$	145,2	147,5	154,3	147,8	97,9	107,9

Таким образом, на основе данных таблицы 1.3 можно сделать вывод о том, что годовое поступление солнечной радиации для рассматриваемой местности составит 1577 $\text{кВт}\cdot\text{ч}$.

Технические характеристики фотоэлектрического модуля PSM4-150 на основе монокристаллического кремния приведены в таблице 1.4. Площадь солнечного модуля $F_{\text{СМ}}$ (м^2) определяется по данным технических характеристик при помощи выражения 1.2:

$$F_{\text{СМ}} = F_{\text{СЭ}} \cdot n \cdot K_{\text{ЗАП}} \quad (1.2)$$

где $F_{\text{СЭ}}$ – площадь одного солнечного элемента (далее СЭ) (м^2), n – количество СЭ в солнечном модуле, $K_{\text{ЗАП}}$ – коэффициент заполнения.

Таблица 1.4 – Технические характеристики фотоэлектрического модуля PSM4-150

Характеристика	Значение
Общая площадь модуля в корпусе, м ²	1,28
Масса, кг	19
Материал рамы	крашеный алюминий
Солнечные элементы	ФЭП 125/150
Количество элементов, шт.	72
Форма элемента	псевдоквадрат
Размеры элемента, мм	125 x 125
Напряжение при максимальной мощности, В	34
Напряжение холостого хода, В	43,2
Ток при пиковой мощности, А	4,5
Ток короткого замыкания, А	4,8
Максимальная мощность, Вт	150
Срок службы, лет	20

Солнечные элементы типа ФЭП 125/150 имеют форму «псевдоквадрат» с размерами элемента 125 x125 мм (таблица 1.4). При такой форме коэффициент заполнения ($K_{зап}$) будет равен 0,97. Количество СЭ в солнечном модуле $n=72$ (таблица 1.4). Тогда полезная площадь одного солнечного модуля (рабочая площадь, на которой происходит преобразование солнечных лучей в электроэнергию), определяется выражением 1.3:

$$F_{CM} = (0,125 \times 0,125) \text{ м}^2 \cdot 72 \cdot 0,97 = 1,09 \text{ м}^2 \quad (1.3)$$

Используя выражение 1.1, значения $E_{вал}$ из таблицы 1.3, а также рассчитанное значение F_{CM} из выражения 1.3, произведем расчет месячной выработки электроэнергии одним солнечным модулем (выражения 1.4 – 1.15) и построим графическую зависимость (рисунок 1.23).

$$E_1 = 114,6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 17,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.4)$$

$$E_{II} = 116,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 17,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.5)$$

$$E_{III} = 150,6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 23,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.6)$$

$$E_{IV} = 129,1 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 19,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.7)$$

$$E_V = 128,2 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 19,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.8)$$

$$E_{VI} = 137,6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 21,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.9)$$

$$E_{VII} = 145,2 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 22,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.10)$$

$$E_{VIII} = 147,5 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 22,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.11)$$

$$E_{IX} = 154,3 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 23,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.12)$$

$$E_X = 147,8 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 22,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.13)$$

$$E_{XI} = 97,9 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 15,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.14)$$

$$E_{XII} = 107,9 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 1,09 \text{ м}^2 \cdot 0,11 \cdot 1,47 \cdot 0,97 \cdot 0,90 = 16,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.15)$$

Исходя из полученных значений (1.4 – 1.15) месячной выработки электроэнергии, суммарное значение выработки электроэнергии одним солнечным модулем модели PSM4-150 на основе монокристаллического кремния при уровне внешней освещенности 800 Вт/м² составит 243 кВт·ч в год.

Средняя нагрузка одного жилого помещения в здании с системой управления энергосберегающими процессами составляет 1350 кВт·ч в год, в том числе светодиодные источники освещения 140 кВт·ч в год.

Таким образом, потребность в электроэнергии для светодиодного освещения в жилом помещении может быть полностью удовлетворена за счет использования ВИЭ. Оставшийся объем вырабатываемой электроэнергии (103 кВт·ч в год) могут расходоваться на питание бытовых электрических приборов в моменты пи-

ковой нагрузки на центральные сети электроснабжения, которые происходят в интервалы времени с 07:00 до 09:00 и с 17:00 до 20:00. Это позволит снизить нагрузку на сеть приблизительно на 8,5 %, что является отличным показателем.

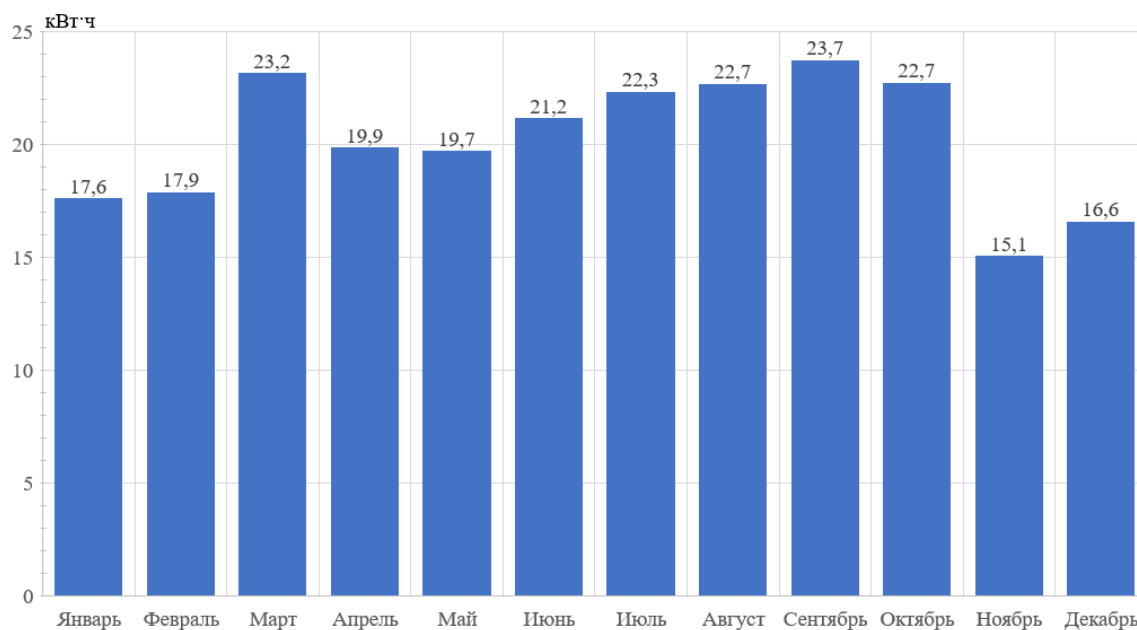


Рисунок 1.23 – Графическая зависимость месячной выработки электроэнергии одним солнечным модулем модели PSM4-150 при уровне освещенности 800 Вт/м²

1.2.2 Оценка эффективности использования ВИЭ

Расчет объема выработки электроэнергии используемой ВИЭ (раздел 1.2.2) показал энергетическую целесообразность и эффективность применения ВИЭ в электроснабжении жилого объекта в загородном поселке «Твоя привилегия».

Энергетическая эффективность влечет за собой экономический эффект, расчет которого произведен в разделе 5.1. При этом не учитывалась себестоимость оборудования для создания ВИЭ, поскольку данный параметр является индивидуальным для каждого объекта и может быть включен в итоговую финансовую модель для расчета срока окупаемости ВИЭ [100].

Важнейшим параметром оценки эффективности использования ВИЭ также является снижение влияния на углеродный след (раздел 5.2). Расширив методику оценки эффективности за счет этого параметра, удастся получить комплексную модель эффективности ВИЭ в разрезе трех составляющих: энергетическая, экономическая и экологическая [101].

1.3 Основные выводы по Главе 1

Работа по созданию адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания с ВИЭ обладает особой актуальностью и практической значимостью в настоящее время, что подтверждается результатами исследования патентного ландшафта (раздел 1.1) и обоснованием эффективности использования ВИЭ (раздел 1.2).

Одним из важнейших элементов системы «Умный дом» является устройство коммутации электрической нагрузки зданий, к которому в настоящее время предъявляется ряд требований.

Во-первых, длительный срок службы коммутирующего элемента и надежность коммутации, что обеспечивает безопасность функционирования всей системы в целом и существенно увеличивает её ресурс.

Во-вторых, наличие системы эффективного управления по каналу беспроводной связи, обеспечивающей надежность передачи данных. Проводной канал связи обладает высокой надежностью, но при этом вводит существенные ограничения на монтаж устройств в здании.

В-третьих, устройство должно обладать возможностью получения электротехнической информации о состоянии сети (напряжение, потребляемая мощность) для последующего анализа центральным элементом системы «Умный дом» и оптимизации алгоритма управления с целью повышения его эффективности.

Адаптивная система управления энергосберегающими процессами здания служит для автоматизации процесса работы электроприборов в помещении и сокращения влияния человеческого фактора, что в конечном итоге приносит энергетический (повышение эффективности использования энергетических ресурсов, в частности, электрической энергии) и, как следствие, финансовый эффект. Разрабатываемые в рамках системы управления коммутаторы электрической нагрузки устанавливаются непосредственно в помещении, наделяя бытовые выключатели и розетки функциями удаленного мониторинга, управления и автоматизации. А использование ВИЭ дополнительно повышает эффективность работы всей системы и «сглаживает» графики нагрузки в пиковые часы потребления.

2 СПОСОБ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Создание адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания служит основой для повышения энергетической эффективности в целом, что в свою очередь является одним из приоритетных направлений при проектировании жилых зданий. Активное развитие и повсеместное внедрение систем автоматизации привело к тому, что технические решения, которые ранее использовались преимущественно только в промышленности, стали доступны сферам строительства и обслуживания зданий [102].

В настоящее время на этапе проектирования объекта в документацию закладываются системы управления зданием, которые осуществляют управление освещением, микроклиматом в помещениях [103], мониторинг параметров состояния инженерных систем и сетей здания и передают данные аналитики управляющим компаниям и непосредственно владельцам помещений в режиме реального времени. При этом обеспечивается и режим удаленного ручного управления.

На сегодняшний день появилась возможность удаленного управления практически всеми инженерными системами здания в целом и отдельно взятого помещения в частности. Например, тепловые режимы работы системы отопления [104, 105], сценарии освещения, телекоммуникационные сети и системы, водоснабжение и водоотведение, вентиляция и многие другие.

Важнейшим элементом адаптивных систем управления энергосберегающими процессами здания являются устройства коммутации электрической нагрузки, которые предназначены для управления процессом коммутации силовых цепей и мониторинга текущего состояния параметров сети.

Современные системы «Умный дом» содержат в своем составе устройства коммутации бытовых электрических нагрузок ($U_C \sim 220$ В, $F=50$ Гц, $I_{MAX}=16$ А). Данный класс устройств предназначен для реализации возможности удаленного управления электрическими нагрузками (включение и выключение), осуществления автономной работы системы по заданному сценарию, а также для мониторинга текущего состояния сетевого напряжения и потребляемой нагрузкой мощности.

В данной главе рассматривается вопрос разработки способа коммутации электрической нагрузки в зданиях, повышающего срок службы коммутирующего элемента (в частности, электромеханического реле), который должен быть сопоставим со сроком эксплуатации здания в целом. Основными потребителями электроэнергии в зданиях являются бытовые электроприборы, питающиеся от сети переменного тока напряжением ~ 220 В и током потребления до 16 А.

Наиболее широко в качестве исполнительных механизмов в условиях ограниченного пространства, а также большой коммутируемой мощности применяются электромеханические коммутационные реле. Электромеханические реле (далее ЭР) имеют меньшие габариты, чем полупроводник в сочетании с радиатором. Но при этом ЭР подвержены механическому износу в виду наличия движущихся элементов в конструкции, а также эрозии контактов в процессе коммутации.

При размыкании контактов ЭР между ними образуется электрическая дуга, а при замыкании наблюдается возникновение искрового эффекта, что ведет к эрозии контактов ЭР и к дальнейшему их «залипанию», а это уже в свою очередь к неправильной работе устройства коммутации в целом и, как следствие, возможности возникновения аварийной ситуации.

В данной главе представлены современные полупроводниковые элементы для коммутации нагрузок в сетях переменного тока, а также способы снижения электромагнитных помех в сети при их использовании. И предложен способ коммутации электрических нагрузок жилых помещений, который основан на объединении преимуществ ЭР и полупроводниковых элементов. Данное решение позволяет при сохранении малого габарита конечного устройства существенно увеличить электрический ресурс коммутирующего устройства за счет исключения явления искрообразования на контактах в процессе коммутации нагрузки.

На решение, являющееся синтезом предложенного способа коммутации и беспроводного канала управления (MESH) с функцией мониторинга параметров сети (Глава 3) в рамках единого микроконтроллера, получены патенты на изобретение [106] и на полезную модель [107], подана международная РСТ заявка [108].

2.1 Сравнительный анализ способов коммутации

В настоящее время приоритет в выборе исполнительного механизма системы коммутации отдается нескольким решениям [109 – 111]. Основными коммутирующими устройствами в цепях переменного тока являются: электромеханические или твердотельные реле, симисторы, тиристоры, схемы на биполярных, полевых или IGBT транзисторах.

При коммутации нагрузки с током до 0,1 А и напряжением до 10 В проблем с выбором исполнительного механизма не возникает ввиду отсутствия искрения контактов реле, либо сравнительно невысокой рассеиваемой мощности на полупроводниковом ключевом элементе, дополнительно не требующей обеспечения его принудительного охлаждения [112].

В рамках адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания рассматривается вопрос коммутации бытовых электрических нагрузок, питание которых осуществляется от сети переменного тока напряжением ~220 В и током потребления до 16 А. При этом необходимо обеспечить такой ресурс работы коммутирующего устройства, который позволял бы использовать его без обслуживания на протяжении нескольких десятков лет. Выбор того или иного решения будет зависеть от преимуществ и недостатков исполнительного механизма при текущих условиях эксплуатации и видах нагрузки [112].

2.1.1 Полупроводниковые элементы коммутации

Использование симистора в качестве коммутатора нагрузки влечет за собой проблему отвода тепла, при протекании через него токов более 0,5 А (симистор в данном случае будет рассеивать на своем корпусе мощность около 0,8 Вт, при среднем падении напряжения на симисторе 1,6 В), что в последствии приведет к его разрушению [112]. Этот факт влечет за собой необходимость установки радиатора охлаждения в устройстве коммутации и, как следствие, существенное увеличение массогабаритных и стоимостных характеристик всей системы управления, что не всегда допустимо.

Симистор является наиболее распространенным полупроводниковым элементом, используемым в настоящее время для коммутации переменного тока. Вольтамперная характеристика симистора представлена на рисунке 2.1 [113].

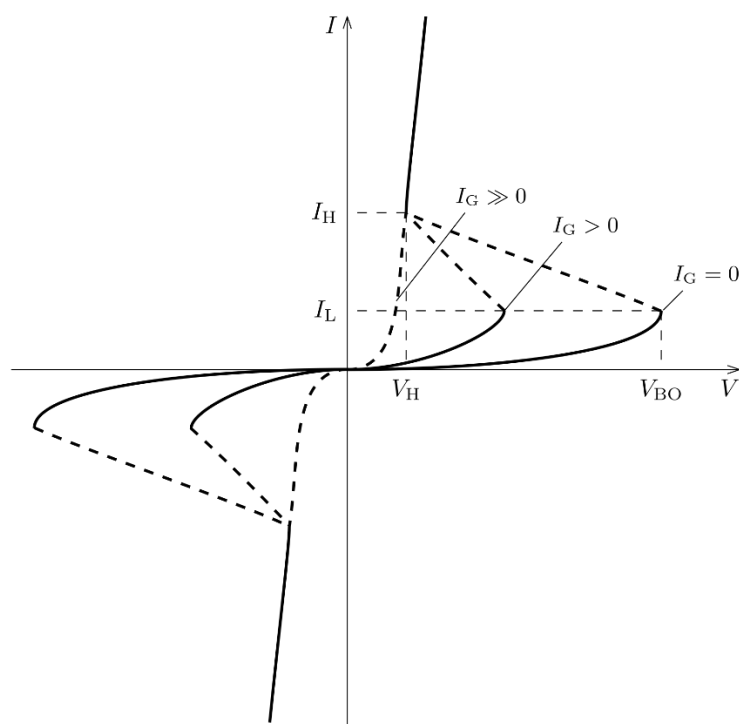


Рисунок 2.1 – Вольтамперная характеристика симистора

При управлении процессом коммутации электрической нагрузки основные выводы симистора включаются последовательно в цепь нагрузки в разрыв линии фазы. Пока симистор закрыт, проводимость между основными выводами отсутствует и, следовательно, электрическая нагрузка отключена от цепи питания. При подаче потенциала на управляющий вывод симистора происходит его открытие и между основными выводами начинает протекать электрический ток, подаваемый в коммутируемую нагрузку, которая в свою очередь включается. Симистор остается во включенном состоянии до тех пор, пока на управляющем выводе присутствует потенциал и пока значение тока, протекающего в нагрузке, не станет ниже порогового значения тока удержания симистора. Таким образом, даже при отсутствии потенциала на управляющем выводе симистора, закрытие проводимости между основными выводами произойдет только в тот момент, когда ток в нагрузке снизится до «безопасного» для процесса коммутации значения.

Анализируя процесс коммутации того или иного элемента необходимо рассматривать его работу на наиболее неблагоприятные виды нагрузок. Электрические нагрузки можно условно разделить на пять основных групп: резистивные, индуктивные, емкостные, электродвигатели, лампы накаливания.

Так, например, при управлении индуктивной нагрузкой, такой как электродвигатель, или при наличии помех в сети, напряжение может достигнуть величины, при которой симистор сможет самопроизвольно открыться. Чтобы избежать негативного влияния подобных выбросов напряжения, параллельно основным выводам симистора подключается варистор [114].

Для защиты симистора от превышения скорости изменения напряжения – dU/dt применяют цепь защиты (RC-цепь), подключаемую параллельно основным выводам симистора. Подобная RC-цепь в зарубежной литературе получила наименование «снабберной» цепи. В настоящее время появились симисторы, которые уже имеют встроенную защитную цепь, например ВТА 16-600BW [115].

Также необходимо учитывать параметр dI/dt – максимальная скорость изменения тока при открытии симистора. При превышении этого значения симистор не успевает полностью открыться, что может привести к разрушению его кристалла. Так, например, для вышеприведенного симистора ВТА 16-600BW значение dI/dt составляет 50 А/мкс [112].

Для увеличения ресурса работы симистора, а также снижения рассеиваемой на нем мощности в моменты коммутации и уменьшения уровня помех в сети, для управления симистором рекомендуется использовать специализированные драйверы с детектором нуля на основе оптопар, например, МОС3063 [116]. В данном случае обеспечивается также гальваническая развязка между управляющими и высоковольтными цепями, что является просто необходимым [112].

Симисторы используются для коммутации в цепях переменного тока, величина тока каждый период снижается до нуля, в эти моменты, в случае отсутствия потенциала на управляющем выводе симистора, происходит отключение нагрузки и поэтому отсутствует необходимость в дополнительных цепях, которые обеспечивали бы надежное запирающее симистора.

Рассмотрим применение схем на IGBT транзисторах, преимуществом которых является более высокая частота коммутации, чем у симистора [117]. В качестве примера приведена зависимость тока коллектора IGBT транзистора K50H603 от частоты коммутации при напряжении коллектор-эмиттер 400 В (рисунок 2.2).

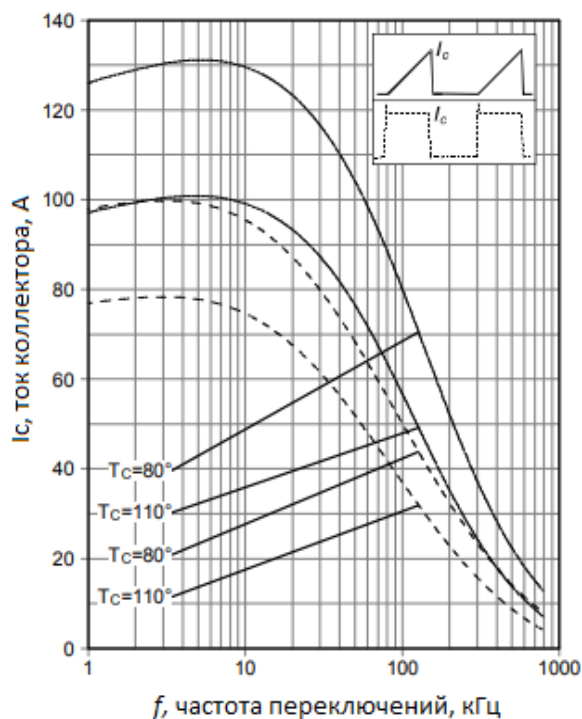


Рисунок 2.2 – Зависимость тока коллектора IGBT транзистора K50H603 от частоты коммутации

Но при работе с бытовыми электрическими нагрузками высокая частота коммутации не требуется и отказ от применения схем на биполярных и полевых транзисторах также связан с проблемами отвода тепловой энергии и большими габаритными размерами. Поэтому IGBT транзисторы находят широкое применение в цепях напряжением более 1000 В, так как потери в открытом состоянии IGBT транзистора обратно пропорциональны протекающему току и напряжению.

Учитывая требуемые характеристики, наиболее подходящим КЭ является симистор, так как обладает возможностью коммутации нагрузок без искрообразования в виду отсутствия механически подвижных частей, что гарантирует при необходимом теплоотводе и соблюдении рекомендаций по его защите практически неограниченный ресурс работы КЭ.

2.1.2 Электромеханические коммутационные реле

Правильный выбор реле для конкретного проекта является важнейшей задачей, так как напрямую связан со сроком службы устройства коммутации в целом. Существует четыре основных типа реле, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками:

1 Герконовые реле – устройства с замыкающими контактами, которые состоят из двух контактных сердечников, обладающих высокой магнитной проницаемостью. Эти сердечники размещены в стеклянном герметичном баллоне, который заполнен инертным газом, чистым азотом или смесью азота с водородом. Преимущества: высокая скорость переключения, низкое сопротивление контактов, изолированность. Недостатки: не предназначены для работы с высокими напряжениями и токами.

2 Ртутные реле – устройства, использующие ртуть в качестве переключающего элемента. Преимущества: длительный срок службы, не подвержены эрозии и дрейбу контактов, низкое сопротивление контактов. Недостатки: чувствительны к положению при установке, не соответствуют требованиям по экологической безопасности.

3 Электромеханические реле – устройства, которые реагируют на величину электрического тока посредством притяжения якоря или сердечника при прохождении тока через обмотку. Преимущества: предназначены для работы с высокими напряжениями и токами, низкое сопротивление контактов. Недостатки: низкая скорость переключения, подвержены эрозии контактов.

4 Твердотельные реле – устройства, являющиеся отдельным видом реле, в которых отсутствуют механические движущиеся части, служащие для включения и выключения цепи высокой мощности с помощью низких напряжений, подаваемых на клеммы управления. Преимущества: предназначены для работы с высокими напряжениями и токами, не подвержены эрозии и дрейбу контактов. Недостатки: более высокое проходное сопротивление, увеличенные габаритные размеры, высокая стоимость.

Наиболее подходящим типом КЭ для решения поставленных задач являются ЭР, но они имеют выраженный недостаток, а именно – подвержены эрозии контактов, что существенно сокращает ресурс, заявленный производителем.

Действительный срок службы ЭР будет зависеть от величины коммутируемой мощности и типа нагрузки. Например, для резистивных нагрузок спецификации производителей довольно точны, но для коммутации нагрузок других типов требуется введение в расчеты поправочных коэффициентов, которые снижают номинальные значения технических характеристик реле и, как следствие, сокращают расчетный срок их службы [118].

Международная приборостроительная компания Keysight Technologies, осуществляющая разработку, производство и внедрение высокотехнологичного контрольно-измерительного оборудования, провела исследования параметров, от которых зависит срок службы электромеханического реле. Специалисты Keysight Technologies пришли к выводу, что наиболее значимым параметром, который непосредственно влияет на ресурс КЭ, является тип коммутируемой нагрузки.

Резистивные нагрузки

Резистивная нагрузка представляет собой резистивный элемент, ток через который не будет изменяться скачкообразно. Незначительные броски тока могут произойти только в момент коммутации по причине искрения контактов. Именно на резистивную нагрузку ориентируются производители электромеханических реле при расчете их срока службы. В целом, расчеты ресурса КЭ для данного типа нагрузки являются достаточно точными, но промышленная практика эксплуатации показывает, что для достижения указанного производителем ресурса, необходимо снизить номинальную коммутируемую мощность до 75 % от заявленной.

Индуктивные нагрузки

Индуктивная нагрузка является достаточно сложной при коммутации, потому что ток через контакты КЭ продолжает протекать в процессе их размыкания (в соответствии с законом Лоренца), что вызывает образование электрической дуги. При коммутации индуктивных нагрузок рекомендуется использовать схемы

гашения дуги, а также для сохранения расчетного ресурса снизить номинальную коммутируемую мощность до 40 % от заявленной.

Емкостные нагрузки

Емкостная нагрузка характерна очень высокими значениями тока в момент коммутации, так как конденсатор в момент включения представляет собой короткозамкнутый участок электрической цепи. Для ограничения пускового тока с целью защиты КЭ от явления «залипания» контактов, рекомендуется последовательно устанавливать токоограничивающие резисторы. При коммутации емкостных нагрузок для сохранения расчетного ресурса необходимо снизить номинальную коммутируемую мощность до 75 % от заявленной.

Электродвигатели

При коммутации электродвигатель имеет низкий импеданс и для его запуска требуется большое значение силы тока, чтобы создать магнитное поле. При этом во время работы электродвигатель генерирует обратную электродвижущую силу (ЭДС), которая в момент отключения создает эффект индуктивной нагрузки и образования электрической дуги между контактами КЭ. При коммутации электродвигателей для сохранения расчетного ресурса необходимо снизить номинальную коммутируемую мощность до 20 % от заявленной.

Лампы накаливания

Лампа накаливания зачастую считается резистивной нагрузкой, но сопротивление нити, состоящей из вольфрама (W^{74}) в момент включения в 10-15 раз ниже, чем в горячем состоянии. Поэтому при коммутации возникает бросок тока в холодную нить накала. Для снижения величины пускового тока при коммутации ламп накаливания также используются токоограничивающие резисторы, а для сохранения расчетного ресурса необходимо снизить номинальную коммутируемую мощность до 10 % от заявленной.

В таблице 2.1 приведены усредненные значения коэффициента снижения номинальных характеристик современных малогабаритных реле в процентах в зависимости от типа нагрузки [118]. Наиболее неблагоприятными режимами работы, по данным таблицы 2.1, являются коммутации лампы накаливания, электро-

двигателя, индуктивной и емкостной нагрузок. При этом даже коммутация резистивной нагрузки не обеспечивает характеристики, заявляемые производителем.

Таблица 2.1 – Снижение номинальных характеристик реле от типа нагрузки

Тип нагрузки	Процент от номинального значения, %
Резистивная	75
Индуктивная	40
Емкостная	75
Электродвигатель	20
Лампа накаливания	10

Использование электромеханических реле влечет за собой необходимость обеспечения требуемого ресурса работы (срока службы изделия в целом). Электрический ресурс реле выражается в количестве срабатываний реле под нагрузкой и зависит от типа нагрузки и величины тока нагрузки. Например, зависимость электрического ресурса от вида нагрузки реле RT314005 производства компании SCHRACK приведена в таблице 2.2 [119].

Таблица 2.2 – Зависимость ресурса от вида нагрузки реле RT314005

Тип нагрузки	Количество циклов
16A, 250VAC, NO contact, 85°C, DF 10%, UL508	50×10^3
16A, 250VAC, NO contact, 70°C, 30min-1	53×10^3
20A, 250VAC, NO contact, 85°C, UL508	6×10^3
1000W incandescent lamp, 250VAC	$1,2 \times 10^3$
10A, 250VAC, $\cos\varphi=0.6$, CO contact, 70°C	200×10^3
5A, 250VAC, $\cos\varphi=1$, motor, NO contact, 10min-1	$1,1 \times 10^6$
0.26A, 230VAC, $\cos\varphi=0.38$, valve, NO, 25min-1	$7,6 \times 10^6$

Согласно данным производителя, электрический ресурс реле RT314005 при работе на резистивную нагрузку с коммутируемым током до 16 А составляет

50×10^3 циклов срабатывания. В то же время для аналогичной нагрузки с коммутируемым током до 20 А ресурс составляет 6×10^3 срабатываний [119]. При частоте срабатываний 1 раз в 10 минут, в случае работы на номинальную нагрузку, срок службы указанного реле будет менее десяти лет. Но при увеличении тока до 20 А срок службы уменьшается до одного года.

Рассмотрим подробно причины образования электрической дуги на контактах КЭ при коммутации электрической нагрузки индуктивного типа.

Электрическая дуга при размыкании контактов реле возникает вследствие непрерывности тока. Это объясняется законом Лоренца – в цепи возникает ЭДС, препятствующая изменению тока (выражение 2.1):

$$E_L = -L \frac{d_i}{d_t} \quad (2.1)$$

Поэтому ток протекает через воздушный зазор между удаляющимися контактами реле и появляется электрическая дуга [120].

На рисунке 2.3 показаны графики зависимостей напряжения и тока на дуге между контактами электромеханического реле при переменном токе в процессе коммутации электрической нагрузки.

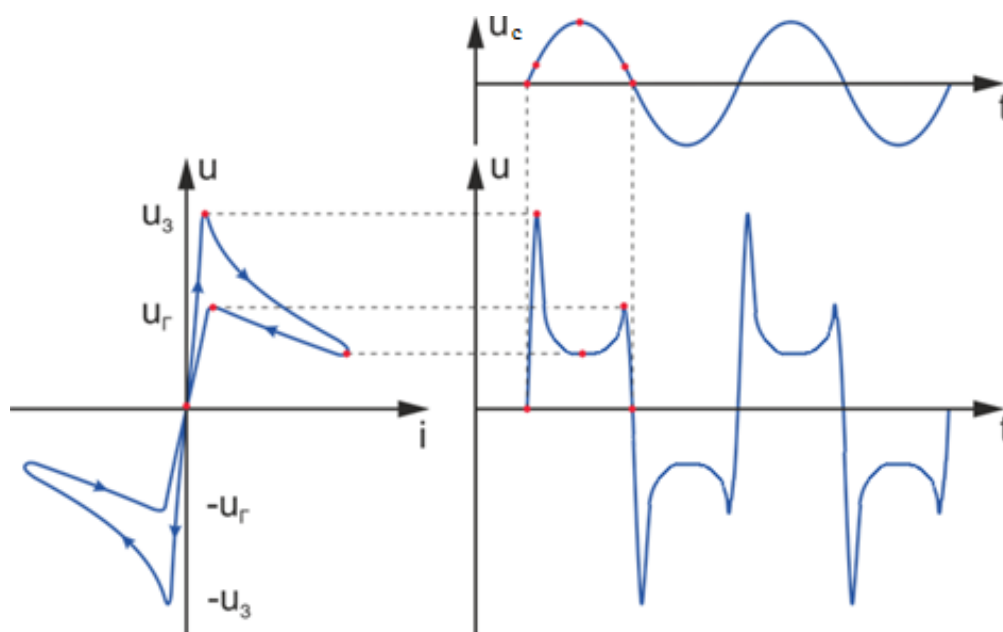


Рисунок 2.3 – Графики зависимостей напряжения и тока на дуге между контактами реле при переменном токе

Электрическая дуга возникает между контактами реле при напряжении U_3 и угасает при напряжении $U_Г$ (рисунок 2.3). Таким образом, отключение реле в моменты, когда напряжение фазы (U_C) равно нулю и ниже напряжения U_3 , не влечет за собой образования электрической дуги на контактах реле.

В случае емкостной нагрузки разряженная емкость в начальный момент времени является короткозамкнутым участком цепи. При этом значение тока уменьшается по мере заряда емкости. На рисунке 2.4 показана упрощенная схема коммутации нагрузки, имеющей емкостной характер [113].

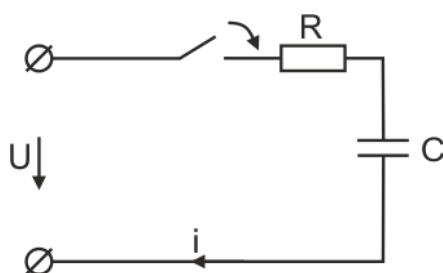


Рисунок 2.4 – Упрощенная схема коммутации емкостной нагрузки

Переходный процесс при этом может быть описать формулой 2.2:

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \left[\cos\varphi \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin\varphi \cdot \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (2.2)$$

где U_m – максимальное напряжение в сети переменного тока, R – активное сопротивление нагрузки, φ – угол между током и напряжением в сети, ω – угловая частота синусоидального тока, ψ – начальная фаза синусоидального тока, τ – постоянная времени.

В момент коммутации цепи формула 2.3 преобразуется в формулу 2.3, из которой видно, что максимальный ток будет протекать через контакты реле в случае включения в момент, когда начальная фаза равна $\pi/2$.

$$i(0) = \frac{U_m}{R} \sin(\psi) \quad (2.3)$$

При этом в момент возникновения переходного процесса происходит всплеск тока i , как следствие, искрообразование на контактах реле (рисунок 2.5). В дальнейшем с течением времени значение тока снижается.

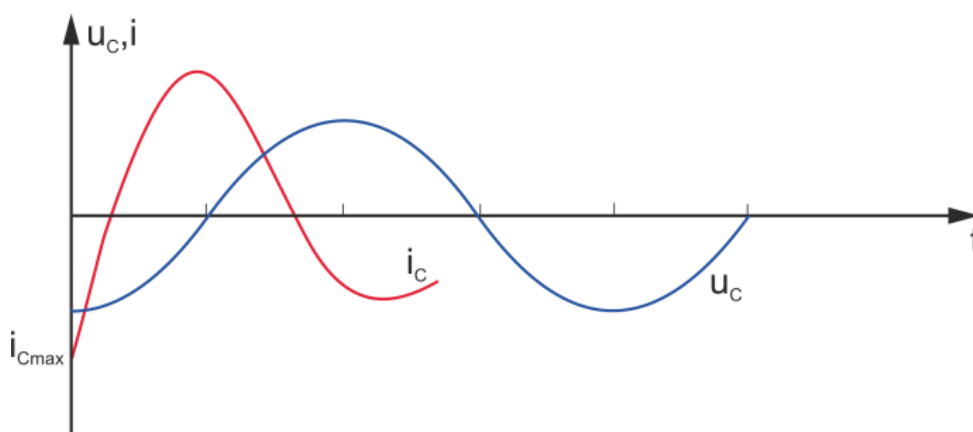


Рисунок 2.5 – График переходного процесса

Увеличивать ресурс работы реле можно путем использования различных способов искрогашения [121]. Одним из решений проблемы могло бы стать добавление в схему устройства коммутации элемента, осуществляющего контроль и переключение контактов реле именно в моменты перехода фазы через ноль. Но данное решение физически невозможно реализовать из-за разброса характеристик ЭР и инерционности самого механизма.

При отсутствии ограничений по габаритам устройства увеличение ресурса работы возможно при применении реле с увеличенным расстоянием между контактными группами и имеющими в своем составе постоянные магниты, которые в свою очередь вытесняют электрическую дугу из зазора между контактами (магнитный обдув) [122]. Но подобное решение не отвечает требованиям, предъявляемым к адаптивной системе управления энергосберегающими процессами здания.

2.2 Усовершенствованный способ коммутации

Эффективный способ коммутации должен обеспечивать уменьшение тока по сравнению с номинальным значением в момент коммутации. Существует два возможных варианта реализации данного способа [112, 123].

Первый вариант – применение реле с многократным запасом по коммутируемому току (актуально при управлении объектами, имеющими сравнительно небольшое энергопотребление).

Второй вариант – объединение преимуществ полупроводниковых элементов и электромеханических реле в одном схмотехническом решении, а именно реа-

лизация безопасного переключения контактов путем параллельного включения к контактам электромеханического реле полупроводникового коммутационного элемента, в частности симистора. Рассмотрим данный вариант подробнее.

Увеличение ресурса достигается наличием в коммутаторе помимо электро-механического реле еще и симистора с параллельным включением, как это показано на структурной схеме коммутатора (рисунок 2.6).

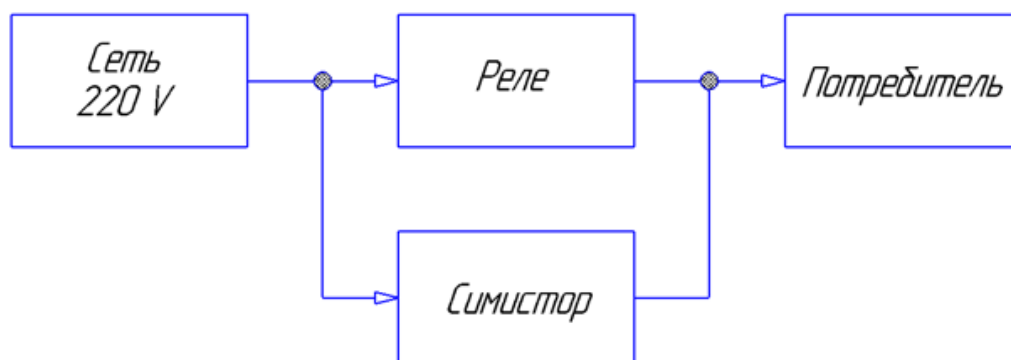


Рисунок 2.6 – Структурная схема коммутатора

Устройство коммутации содержит контактное реле с параллельно подключенным полупроводниковым симистором, управляемым оптическим драйвером с детектором нуля. В предлагаемом решении [106] вначале замыкается симистор (при прохождении фазы через нулевую отметку) и только потом замыкается реле для предотвращения перегрева симистора (рисунок 2.7).

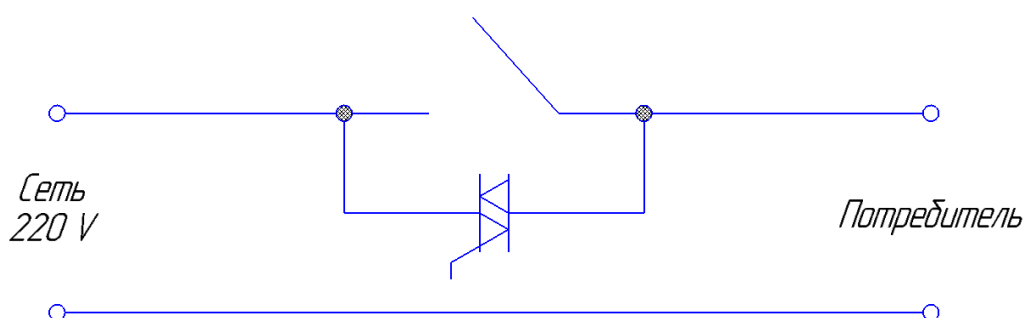


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема включения реле

Этот принцип позволяет избежать появления электрической дуги при размыкании и искрении при замыкании контактов (так как в момент перехода фазы через нулевую отметку напряжение равно нулю, а размыкание происходит при сниженном токе в нагрузке), то есть не будет происходить эрозии контактов. Как

следствие, существенно увеличивается ресурс устройства коммутации электрической нагрузки в целом.

Повышение ресурса устройства коммутации электрической нагрузки достигается за счет использования схемы параллельного включения электромеханического контактного реле и полупроводникового симистора. Для увеличения ресурса работы симистора, а также снижения рассеиваемой на нем мощности в момент коммутации и уменьшения уровня помех в сети, для управления симистором используется драйвер с детектором нуля (например, на основе оптопар).

Управление симистором осуществляется с помощью оптического драйвера с детектированием пересечения нуля. В начальный момент времени выполнять коммутацию электрической нагрузки будет симистор. Это обусловлено тем, что электромеханическое реле имеет подвижные элементы и соответствующий коэффициент инерционности, причем коэффициент инерционности изменяется как в течение эксплуатации реле, так и различается в разных моделях реле, что не позволяет осуществлять замыкание контактов строго в момент перехода фазы через ноль. Кроме того, при замыкании или размыкании контактов реле, возникает искрение или электрическая дуга, соответственно, которые сокращают срок службы изделия и в конечном счете могут привести к «залипанию» контактов.

Симистор, управляемый драйвером с детектированием пересечения нуля, позволяет осуществлять практически мгновенное замыкание цепи без образования искрового эффекта. Однако при длительной работе симистор будет в значительной степени нагреваться, что потребует дополнительного теплоотвода. Но в нашем случае для длительного удержания цепи в замкнутом состоянии будет использоваться уже именно электромеханическое реле, которое будет замыкаться после открытия симистора по параллельной цепи и шунтировать его. В результате чего между контактами электромеханического реле не будет происходить эрозия.

Таким образом, с одной стороны обеспечивается гарантированное подключение нагрузки в момент перехода фазы через ноль, с другой стороны – отсутствие перегрева и перегрузки электронных компонентов. Данная опция позволит существенно увеличить ресурс работы устройства.

В момент отключения электрической нагрузки сперва будут размыкаться контакты реле, затем окончательно цепь будет размыкать симистор при снижении уровня тока в нагрузке ниже значения тока удержания симистора. Основным преимуществом симистора является его возможность коммутации нагрузок без искрообразования и отсутствие механически подвижных частей, а также возможность отключения электрической нагрузки при снижении значения силы тока ниже порога удержания. Это гарантирует практически неограниченный ресурс работы устройства коммутации в целом.

2.3 Схемотехническое решение для коммутатора

Для разработки схемотехнической реализации коммутатора электрической нагрузки используем симистор с драйвером управления, обладающим встроенным детектором нулевой фазы на основе оптопары, что позволит обеспечить гальваническую развязку цепей управления от силовых цепей коммутации. Катушка реле конструктивно и так имеет гальваническую развязку от переключающих контактов. При этом детектор перехода фазы через ноль позволит снизить помехи в сети в моменты коммутации, а также продлит ресурс работы самого симистора. Упрощенная схема электрическая принципиальная совместного использования малогабаритного электромеханического реле и симистора приведена на рисунке 2.8.

Системы управления энергосберегающими процессами здания в подавляющем большинстве предусматривают наличие управляющего МК, поэтому применение драйвера с входом совместимым с выходами МК значительно облегчает задачу управления симистором и исключает наличие некоторых элементов обвязки.

На схеме, приведенной на рисунке 2.8, слева расположены входы управления реле и симистора (выходы МК). Подача логической единицы на оптрон запускает встроенный детектор нуля и в момент перехода фазы через ноль будет подан сигнал управления для открытия симистора, то есть коммутации нагрузки.

Нагрузка (рисунок 2.8) подключена к силовой цепи (коммутатор в разрыве проводника фазы). Микроконтроллер программными средствами реализует вре-

менную задержку в 100 мс для того, чтобы симистор гарантированно открылся. Затем МК подачей логической единицы на второй вход управления включает реле. Управление малогабаритным электромеханическим реле наиболее легко осуществлять при помощи цифрового MOSFET транзистора (рисунок 2.8).

Электромеханическое реле замыкается после замыкания симистора по параллельной цепи, в результате чего, не возникает электрическая дуга на его контактах. По предварительным расчетам время работы симистора (в момент включения или выключения) не будет превышать 100 мс – за такой короткий промежуток времени его конструкция не будет успевать нагреваться до критической температуры. В результате, с одной стороны обеспечивается гарантированное подключение нагрузки в момент перехода фазы через ноль, с другой стороны – обеспечивается отсутствие перегрева и перегрузки электронных компонентов [112].

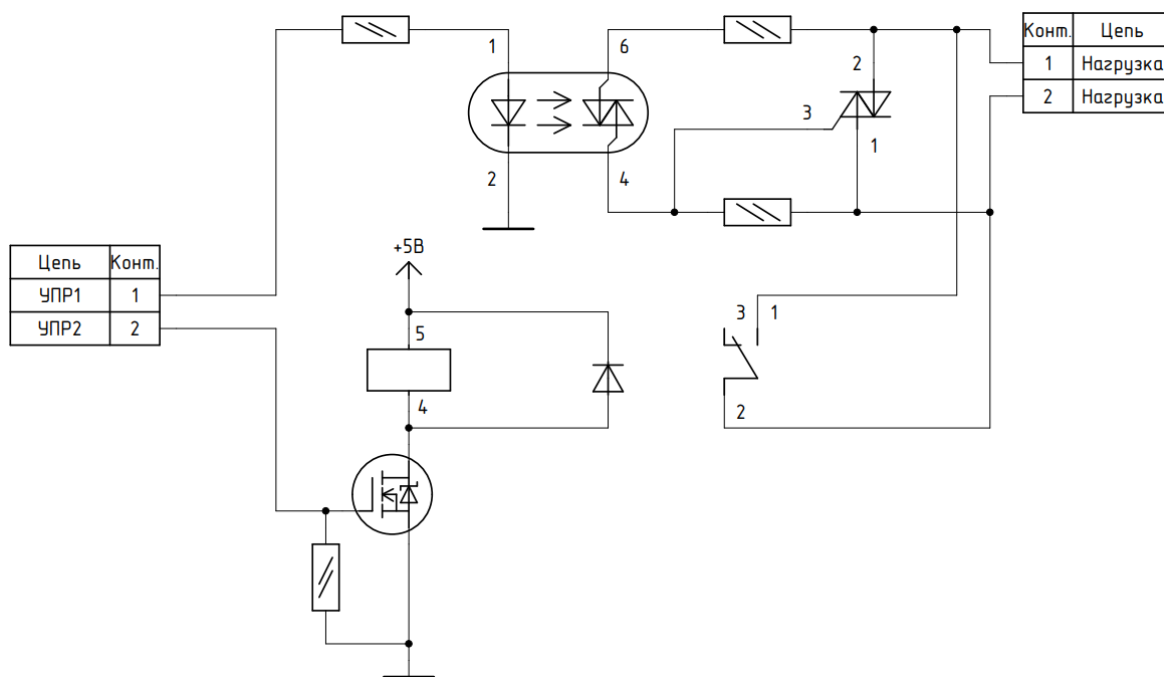


Рисунок 2.8 – Упрощенная схема электрическая принципиальная совместного использования малогабаритного реле и симистора

Контакты реле шунтируют симистор до самого выключения нагрузки, а МК его отключает, поэтому ток через симистор не протекает и падения напряжения на нем не происходит, что в свою очередь не ведет к его саморазогреву и необходимость в отведении от него тепловой энергии полностью отсутствует, то есть установка радиатора не требуется, что сокращает габарит устройства в целом.

Выключение нагрузки происходит в обратном порядке. Сперва МК осуществит коммутацию симистора, подачей сигнала на его управляющий вывод, а затем отключит катушку реле и программными средствами реализует временную задержку в 100 мс (эта задержка нужна чтобы дождаться следующего спада тока нагрузки в полупериоде ниже тока удержания симистора). Затем МК будет подан сигнал на запираение самого симистора. И в момент, когда ток в нагрузке будет ниже значения силы тока удержания симистора, последний отключит нагрузку от цепи питания. Данный способ коммутации, а именно – подключения и отключения нагрузки, является наиболее безопасным для коммутирующего элемента.

2.4 Основные выводы по Главе 2

При построении систем «Умного дома» особенно актуален вопрос создания системы дистанционного управления электрическими нагрузками. На эту тему написано большое количество научных статей [124–128]. Таким образом, схемотехническое решение, представленное в Главе 2, позволит значительно улучшить технические характеристики устройств автоматизации, поскольку данное решение позволяет, при сохранении малых габаритов конечного устройства, многократно продлить электрический ресурс КЭ.

Новизна заключается в подходе к коммутации нагрузки, подключенной к сети электропитания здания. А именно, созданная на основе предлагаемого решения система коммутации, осуществляет коммутацию нагрузки только при прохождении фазы синусоидального изменения питающего напряжения через ноль, а отключает при снижении тока в нагрузке ниже порогового значения, что значительно увеличивает срок службы как системы коммутации, так и подключенного электрического устройства. При этом управляет процессом коммутации МК.

Особо необходимо отметить, что в предложенном схемотехническом решении полностью исключается необходимость в использовании теплоотвода в виде радиатора для полупроводникового элемента. Отказ от использования дополнительного теплоотвода позволит осуществлять скрытый монтаж коммутирующего устройства в жилом помещении.

3 ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ

В данной главе рассматривается вопрос разработки принципов и средств управления, а также алгоритмов эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий, повышающих безопасность и эффективность эксплуатации систем управления в целом. При этом осуществляется синтез беспроводного устройства коммутации электрической нагрузки.

Основной проблемой при построении беспроводной сети связи для передачи сигналов управления является ограничение дальности действия (зона покрытия сети). При этом требуется найти такое решение, которое комбинирует в себе надежность канала связи, гибкость перенастройки системы под новые задачи, децентрализацию системы передачи данных и отсутствие необходимости применения специального дорогостоящего оборудования (шлюзов и ретрансляторов).

3.1 Сравнительный анализ стандартов связи

При проектировании адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания в первую очередь необходимо решить вопрос обеспечения устойчивой связи между отдельными элементами системы. Эта проблема особенно остро возникает в условиях больших площадей помещений, либо некорректно выбранных связующих элементах, поэтому при разработке адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания необходимо решить задачу обеспечения надежного канала связи между всеми звеньями системы и устройством управления. К решению данной задачи существует два подхода. Далее рассмотрим каждый из них.

Первый подход заключается в применении проводных линий связи между элементами системы. Но данный подход имеет существенные ограничения на осуществление монтажа системы управления, а именно – до проведения отделочных работ в помещении. Поскольку проводные линии связи требуют специальной прокладки в заранее подготовленных каналах, то о применении систем управления энергосберегающими процессами здания с проводными линиями связи необходимо задумываться еще на этапе проектирования самого здания [129].

Преимущество данного решения заключается в высокой надежности канала связи и простоте его реализации. Недостатком такого подхода является его не универсальность. Если в дальнейшем потребуются модернизация, либо расширение функциональных возможностей системы автоматизации, то необходимо будет сначала провести демонтажные и монтажные работы для изменения состава элементов сети связи. При этом стоимость модернизации системы может оказаться экономически нецелесообразной. Данный подход не обеспечивает гибкость системы и не соответствует современному уровню развития технологий связи [130].

Второй подход заключается в применении для решения поставленных задач беспроводных сетей связи. Например, широкое распространение получили такие стандарты как Wi-Fi и Bluetooth. Преимуществом данного подхода является возможность оперативной установки системы без вмешательства в элементы отделки здания и помещений, а также возможность гибкой настройки и конфигурирования (расширения) системы управления в дальнейшем. Недостатком подобных решений является ограниченная зона покрытия сети. Например, для бытового Wi-Fi роутера максимальный радиус зоны покрытия сети на открытом пространстве не превышает 200 м. При работе в условиях жилого здания, где присутствует большое количество перекрытий с различными пропускающими свойствами материалов, а также в условиях сложной внешней электромагнитной обстановки, зона покрытия бытового Wi-Fi роутера сокращается до 20 м. Существует обратная зависимость ослабления Wi-Fi сигнала от расстояния между передатчиком и приемником. График этой зависимости представлен на рисунке 3.1 [131].

Идентичные проблемы свойственны и такому стандарту беспроводной связи как Bluetooth, у которого зона покрытия сети даже на открытом пространстве не превышает 20 м. Возможным способом решения проблемы является установка большого числа ретрансляторов сигнала. Но данный подход приводит к существенному удорожанию системы управления в целом и требует дополнительных проектных работ. Таким образом, задача создания адаптивной беспроводной сети, сочетающей в себе надежность канала передачи электротехнических данных и сигналов управления с гибкостью перенастройки и монтажа – актуальна сейчас!

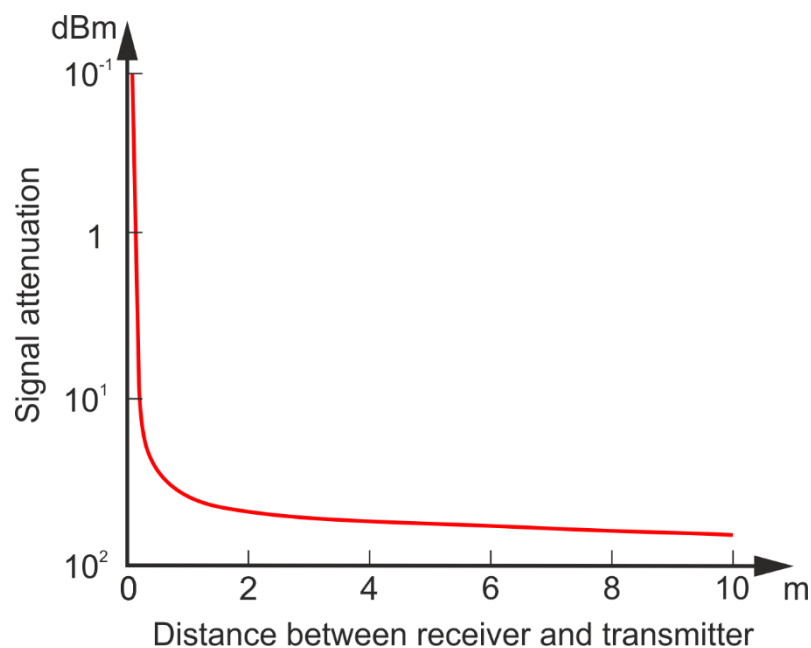


Рисунок 3.1 – График ослабления Wi-Fi сигнала в зависимости от расстояния

Наиболее распространенными в настоящее время в системах «Умный дом» являются следующие стандарты беспроводной связи: ZigBee, Z-Wave, Thread, Bluetooth Low Energy и ESP-MESH. Рассмотрим каждый из них и определим достоинства и недостатки в разрезе поставленной задачи.

ZigBee – это протокол связи по радиоканалу, утвержденный ZigBee Alliance в 2004 году. Передача данных описывается стандартом IEEE 802.15.4. Протокол ZigBee был разработан для безопасной передачи данных между устройствами, работающими от автономного источника питания, на небольших скоростях передачи данных и обеспечивает пониженное энергопотребление [132].

ZigBee работает в частотных диапазонах 868 МГц, 915 МГц и 2,4 ГГц. При работе на частоте 2,4 ГГц наблюдается наибольшая пропускная способность и помехоустойчивость канала связи. Каждый диапазон разбит на 16 частотных каналов с шагом 5 МГц. Максимальная скорость передачи данных при этом составляет 250 кбит/с, включая служебную информацию. Средняя пропускная способность канала связи находится в пределах от 5 до 40 кбит/с и зависит от загруженности сети и количества ретрансляций. При этом ZigBee поддерживает ячеистую топологию сети, то есть MESH-сеть [130].

MESH-сеть – это сеть с децентрализованным управлением, в которой беспроводные устройства объединяются многочисленными соединениями, образуя

щими ячеистую топологию [133]. Такая топология сети позволяет связываться с любым устройством напрямую или через промежуточные узлы сети. Алгоритм работы MESH-сети основан на поиске кратчайшего пути между узлами. Сообщение транслируется от устройства к устройству пока не достигнет получателя.

Важнейшими преимуществами MESH-сетей являются: использование беспроводного канала связи, устойчивость сети к отключению отдельных узлов, возможность развертывания зоны плотного информационного покрытия. Все указанные преимущества достигаются за счет того, что MESH-сеть обладает адаптивной самоорганизующейся топологией.

В сетях связи стандарта ZigBee присутствует 4 вида устройств: координатор, роутер, конечное и спящее устройства.

Координаторы являются основными устройствами всей сети, так как именно они осуществляют построение топологии сети, определение политики безопасности и условий добавления новых устройств в сеть.

Роутеры выполняют роль маршрутизаторов данных и всегда находятся в активном режиме, поэтому низкое энергопотребление им не свойственно. В связи с этим в системах «Умного дома» в качестве роутеров не используются автономные устройства, а только те, которые постоянно подключены к сети электропитания.

Конечные устройства обычно являются автономными, то есть работают от встроенного в них элемента питания. Поэтому конечные устройства обладают низким энергопотреблением. Примерами конечных устройств в системах «Умного дома» служат датчики параметров микроклимата, беспроводные выключатели.

Спящие устройства – это отдельная категория устройств, которые проявляют активность при возникновении определенных событий, либо по расписанию. Спящие устройства обладают сверхнизким энергопотреблением и служат для передачи малого объема информации.

Преимуществом стандарта ZigBee является возможность работы с автономными энергосберегающими устройствами с быстрым откликом. Находясь в спящем режиме, устройства могут в течение 15 мс осуществить пробуждение и перейти в режим передачи данных. Схема маршрутизации показана на рисунке 3.2.

Недостатком стандарта ZigBee является необходимость установки дополнительного оборудования для обеспечения связи локальной ZigBee сети с внешней IP-сетью, что является важнейшей задачей для систем «Умный дом» при реализации функционала удаленного управления. Также, стандарт ZigBee отличается низкой скоростью передачи данных, что накладывает существенные ограничения на тип передаваемой информации.

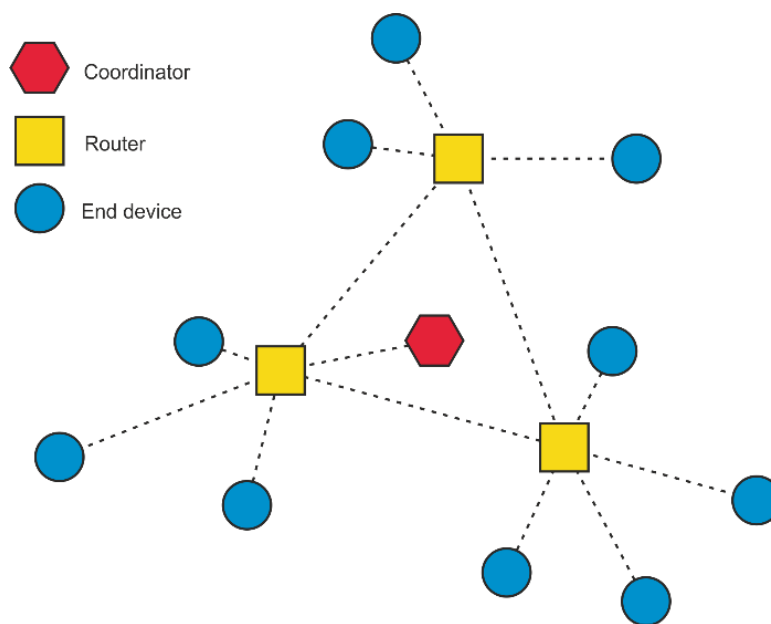


Рисунок 3.2 – Схема маршрутизации сети ZigBee

Z-Wave – это беспроводная технология связи с низким энергопотреблением элементов сети. Рабочий диапазон частот Z-Wave – до 1 ГГц. Устройства передают короткие команды с минимальными задержками. Функционирование данного стандарта по каналу с частотой ниже сетей Wi-Fi позволяет уменьшить помехи в каналах управления. Z-Wave практически идентичен ZigBee, но отличается спецификацией протокола. Устройства Z-Wave строятся на модулях Sigma Designs, что в свою очередь обеспечивает совместимость друг с другом. К недостаткам интерфейса можно отнести малое количество доступного программного обеспечения, но при этом оно совместимо с любым оборудованием Z-Wave [134].

Thread – это стандарт беспроводной связи для устройств с низким энергопотреблением, который основан на IP протоколе. Устройства Thread, объединяясь в единую локальную сеть, имеют также доступ и к внешней сети через граничный

роутер, то есть устройство, которое преобразует пакеты данных стандарта 802.15.4 в IP-интерфейс.

Технология использует физический уровень взаимодействия (PHY) и уровень доступа к среде (MAC) по стандарту IEEE 802.15.4. Передача данных происходит в частотном диапазоне 2,4 ГГц с пропускной способностью до 250 кбит/с. Thread поддерживает стандарт 6LoWPAN (IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks) и специализируется на передаче данных между устройствами с низким энергопотреблением [130].

В сетях стандарта Thread присутствует 2 типа устройств: маршрутизатор (роутер) и конечный узел (устройство).

Маршрутизатор отвечает за поиск оптимальных маршрутов в топологии сети для передачи информации и ретрансляцию сообщений. Среди маршрутизаторов назначается «лидер», который хранит информацию о всей топологии сети. В случае смены «лидера», назначается новый среди маршрутизаторов, в котором уже хранится точная копия информации о сети, которая до этого была у «лидера».

Конечные узлы не могут осуществлять операций, связанных с маршрутизацией. Вся связь осуществляется исключительно через маршрутизаторы.

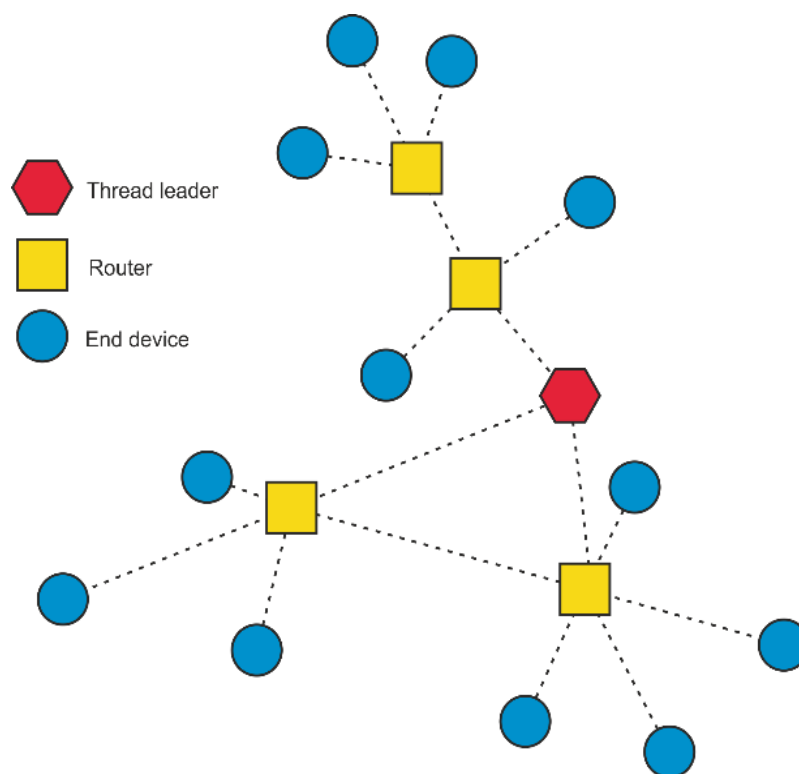


Рисунок 3.3 – Схема маршрутизации сети Thread

Преимущества Thread заключаются в синтезе в рамках одного стандарта поддержки сетей с ячеистой топологией и IP-протоколом для доступа к внешней глобальной сети (например, стандарт Wi-Fi). Схема маршрутизации сети Thread приведена на рисунке 3.3.

Недостатки сетей Thread идентичны недостаткам сетей ZigBee, а именно – необходимость установки дополнительного оборудования для обеспечения связи локальной Thread сети с внешней IP-сетью (граничный роутер) и низкая скорость передачи данных, что накладывает существенные ограничения на тип передаваемой информации.

Bluetooth – первый стандарт беспроводной сети для устройств «Умного дома», зона покрытия составляет до 20 метров, рабочий диапазон частот 2,4 ГГц. При этом системы «Умного дома» являются важнейшим рынком внедрения стандарта Bluetooth. Для этих целей был разработан протокол BLE (Bluetooth Low Energy), обеспечивающий передачу данных на скорости до 1 Мбит/с от энергосберегающих (автономных) устройств. Передача данных в технологии BLE описана в стандарте IEEE 802.15.1 [135], схема маршрутизации приведена на рисунке 3.4.

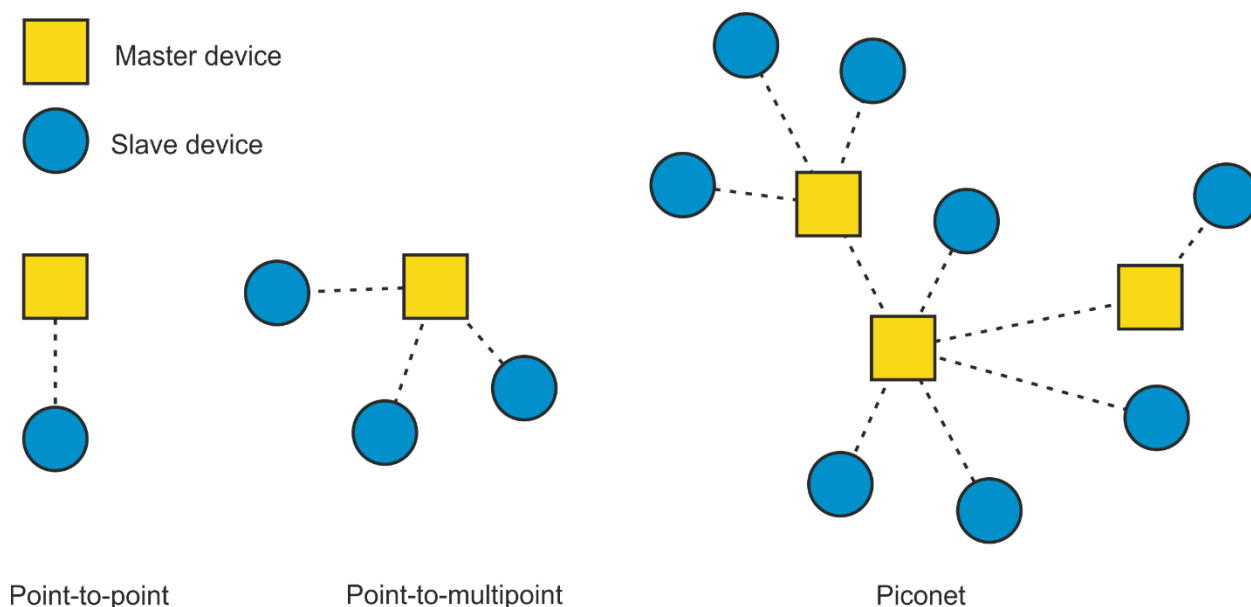


Рисунок 3.4 – Схема маршрутизации сети Bluetooth

Bluetooth поддерживает соединения сети типа «точка-точка» и «точка-много точек» [136]. Если два и более устройств используют один и тот же канал, то это пикосеть. Взаимодействующие пикосети образуют «распределенную сеть».

В сетях стандарта Bluetooth присутствует два типа устройств: мастер и подчиненный. Мастер инициирует обмен данными, а подчиненный передает данные в ответ на запрос от мастера.

Сеть ESP-MESH обладает свойствами самоорганизации и самовосстановления. Эти свойства делают развертывание сети и ее обслуживание полностью автономными. ESP устройства образуют древовидную топологию сети. Любой из узлов сети может иметь как восходящие соединения, так и нисходящие, а высокая скорость передачи данных (до 10 Мбит/с) не накладывает ограничений на тип передаваемой информации.

Протокол ESP-MESH описывает пять видов узлов: корневой (верхний узел в дереве), дочерний (узел, находящийся дальше от корневого узла, чем тот, к которому он подключен), родительский (обратный дочернему узлу), суб-дочерний (доступ к нему осуществляется через повторный переход от родительского к дочернему), узел-брат (подключенный к одному родительскому узлу).

Каждый из рассмотренных стандартов обладает своими преимуществами и недостатками, поэтому для выбора того или иного стандарта необходимо руководствоваться задачами, которые поставлены в проекте. Так для решения задачи создания адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания наиболее эффективным будет применение стандарта ESP-MESH.

Технология построения сети ESP-MESH обладает важнейшими преимуществами: высокая скорость передачи данных, отсутствие необходимости в дополнительных устройствах коммутации (реализована поддержка IP-подключения), но устройства сети ESP-MESH не являются энергосберегающими и требуют подключения к сети питания. При этом беспроводные коммутаторы электрических нагрузок, являющиеся основной разрабатываемой системы управления, потребляют предельно малый объем энергии и всегда подключены к сети ~220 В. Поэтому целесообразно наделять беспроводные коммутаторы функцией корневого узла, что в будущем позволит подключить дополнительные элементы сети и расширить зону покрытия. Таким образом решается проблема последующей модернизации системы автоматизации зданий в целом.

Также широкое распространение сетей Wi-Fi упрощает разработку проектов по автоматизации зданий с помощью технологии ESP-MESH. Инструмент ESP-MDF – это средства для разработки MESH-приложений на базе модулей ESP32 и сетевого протокола ESP-MESH, развернутого «поверх» протокола Wi-Fi [137].

В таблице 3.1 приведена сравнительная характеристика интерфейсов ESP-MESH, Bluetooth Low Energy, ZigBee и Thread [138].

Таблица 3.1 – Сравнительная характеристика интерфейсов

Протокол	ESP-MESH	Bluetooth Low Energy	ZigBee	Thread
Диапазон	2,4 ГГц			
Пропускная способность	<10 Мбит/с	<2 Мбит/с	<250 кбит/с	
Дальность действия	<200 м	<100 м		
Тип и срок службы элемента питания	Питание от сети	CR2032 <10 лет		
Топология сети	Ячеистая сеть	«Точка-точка», «Точка-много точек», Пикосеть	Ячеистая сеть	
Безопасность	Аутентификация на основе паролей и сертификатов, поддерживающая все стандарты безопасности на основе IP	Асимметричное шифрование для генерации и обмена ключами, соединение парных ключей	Опциональное сетевое шифрование и аутентификация через установленный код	Обязательное шифрование; основанная на пароле аутентификация с протоколом Datagram Transport Layer Security (DTLS)
Возможность IP-подключения	Встроена	Необходима установка дополнительного оборудования		Адресация IPv6; установка дополнительного преобразователя из 802.15.4 в IP-интерфейс

Применение беспроводной сети ESP-MESH в коммутаторах электрических нагрузок адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания одновременно решает несколько задач, поэтому является эффективным.

Рассмотрим классическую схему организации сети Wi-Fi, «точка-много точек», которая представлена на рисунке 3.5. В схеме присутствует центральный узел (роутер), который связан со всеми узлами напрямую. Роутер выполняет сразу несколько функций: передача данных между ней и узлами, ретрансляция из внешней или внутренней IP-сети [130]. Данная организация сети отличается ограниченной зоной покрытия и количеством подключаемых устройств (определяются возможностями роутера и обычно составляет 255 устройств). Это существенные ограничения для прямого применения Wi-Fi сетей в системах «Умного дома».

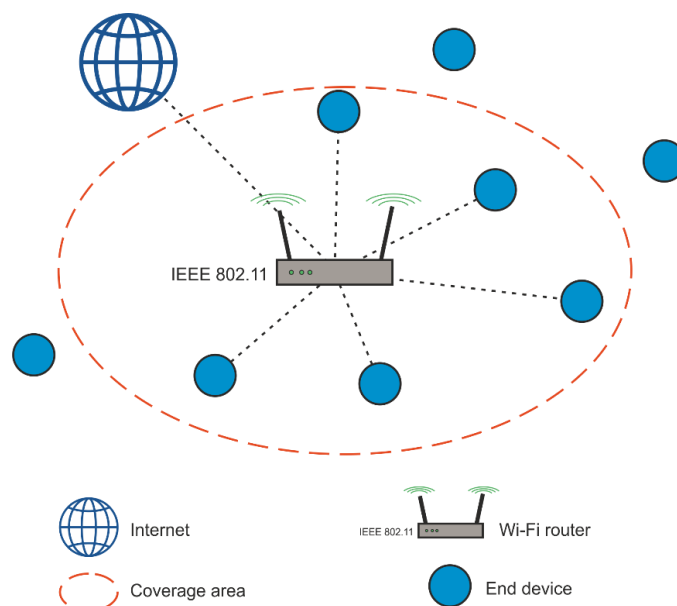


Рисунок 3.5 – Схема маршрутизации сети Wi-Fi

Схема маршрутизации сети ESP-MESH показана на рисунке 3.6. При этом все устройства в данной сети являются полностью идентичными между собой беспроводными коммутаторами электрических нагрузок, но различающиеся ролями, которые они выполняют в рамках сети. Роли распределяются автоматически в рамках самоорганизующейся топологии сети. Так корневой узел подключится к Wi-Fi роутеру, который в настоящее время присутствует в каждом помещении здания, определит все дочерние и конечные узлы, каждому из устройств присвоит свой внутренний MAC адрес. Такая организация сети позволит подклю-

чать большое количество устройств к одному Wi-Fi роутеру, не перегружая его, так как со стороны Wi-Fi роутера будет поддерживаться обмен данными только с одним устройством сети, а не всеми одновременно.

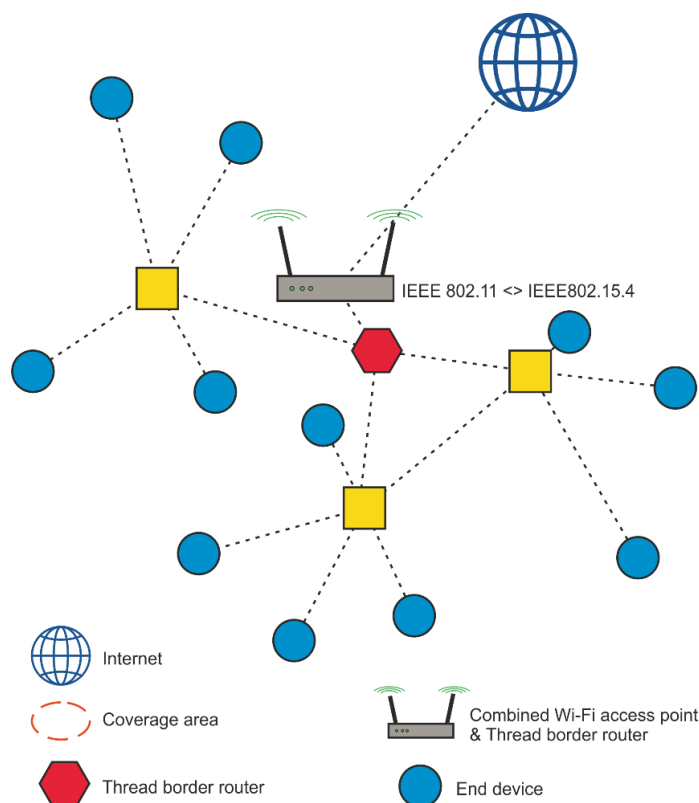


Рисунок 3.6 – Схема маршрутизации сети ESP-MESH

К дополнительным преимуществам данного решения можно отнести наличие в открытом доступе большого количества инструментов для разработчика, которые позволяют в кратчайшие сроки развернуть сеть ESP-MESH. Например, на рисунке 3.7 представлена отладочная плата ESP32-DEVKITC [139].



Рисунок 3.7 – Отладочная плата ESP32-DEVKITC

Надежность ячеистой топологии сети подтверждается исследованиями, проведенными в источнике [140]. В данной статье был проведен эксперимент на математической модели. В результате анализа была получена зависимость вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов. При отказе даже большого количества узлов связь была восстановлена.

В результате обзора современных беспроводных технологий для решения задачи удаленного управления электрическими нагрузками в системах автоматизации жилых зданий была выбрана технология самоорганизующихся сетей с ячеистой топологией ESP-MESH, основным преимуществом которой является IP-адресация и как следствие – высокая интеграция с такими распространенными сетевыми технологиями как Wi-Fi и Ethernet [130].

Предложенный вариант позволяет при проектировании систем автоматизации жилых зданий решить задачи по обеспечению надежности связи благодаря самоорганизации топологии сети, покрытию зон с размерами, превышающими дальность связи традиционных систем «точка-точка», обеспечивая при этом безопасность передачи данных за счет, предоставляемых разработчиками протокола ESP-MESH, технологий шифрования.

3.2 Построение адаптивной Wi-Fi MESH-сети

Повышение надежности связи и увеличение радиуса действия беспроводных коммутаторов электрической нагрузки в рамках адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания достигается путем интеграции в устройства MESH-модуля на основе технологии Wi-Fi для построения MESH-сети. Наличие MESH-модуля в коммутаторе позволяет построить беспроводную сеть между такими же устройствами (рисунок 3.8), тем самым зона покрытия сети устройств Wi-Fi сигналом (от роутера) увеличивается на площадь образованной беспроводной сети с помощью коммутаторов с MESH-модулями.

При этом МК со встроенным MESH-модулем осуществляет не только процесс обмена данными между устройствами сети, но и управление процессом коммутации электрической нагрузки в рамках предложенного в Главе 2 способа. Это

главный отличительный признак от существующих аналогов [141-155]. В соответствии с методикой, описанной в [156], был произведен анализ патентной чистоты предложенного в данной работе решения, который показал его уникальность (Отчет о патентных исследованиях в объеме экспертизы на патентную чистоту в отношении Российской Федерации по теме «Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки»).

MESH-сеть позволяет соединять многочисленные устройства, расположенные на большой площади (как внутри, так и вне помещений), в рамках одной беспроводной локальной сети. Такая сеть является самоорганизующейся и самовосстанавливающейся. Это означает, что сеть может строиться и поддерживаться автономно. Традиционные инфраструктуры сети Wi-Fi отличаются тем, что имеют ограниченную зону покрытия. Кроме того, традиционные сети Wi-Fi подвержены перегрузке, поскольку максимальное количество подключаемых устройств ограничено возможностями роутера.

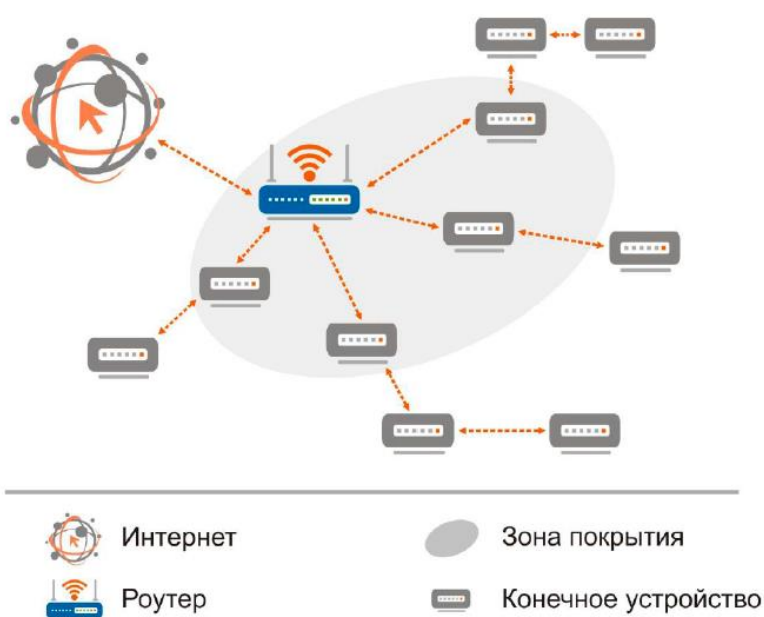


Рисунок 3.8 – Структурная схема MESH-сетей

Благодаря использованию MESH-технологии, подключенным устройствам не требуется соединяться с центральным узлом. Вместо этого им разрешено соединяться с соседними устройствами. Устройства несут взаимную ответственность за ретрансляцию информации друг другу. Это позволяет сети MESH иметь

большую зону покрытия, поскольку устройства могут связываться друг с другом без необходимости находиться в зоне покрытия центрального узла или роутера. Аналогичным образом, сеть MESH также менее восприимчива к перегрузке, поскольку количество узлов, разрешенных в сети, больше не ограничено единственным центральным узлом.

Таким образом, совмещение в одном устройстве усовершенствованного способа коммутации электрической нагрузки и технологии обмена данными в рамках адаптивной сети с самоорганизующейся топологией, позволяет решить задачи повышения надежности работы системы управления в целом!

Дальнейшее сокращение габаритов устройств может достигаться путем каскадного объединения ЭР без индивидуальных модулей беспроводной MESH-сети, при этом ко всей группе подключается только один модуль беспроводной MESH-сети, с помощью которого возможно управление каждым коммутатором в отдельности. Структурная схема каскадного объединения коммутаторов представлена ниже на рисунке 3.9.

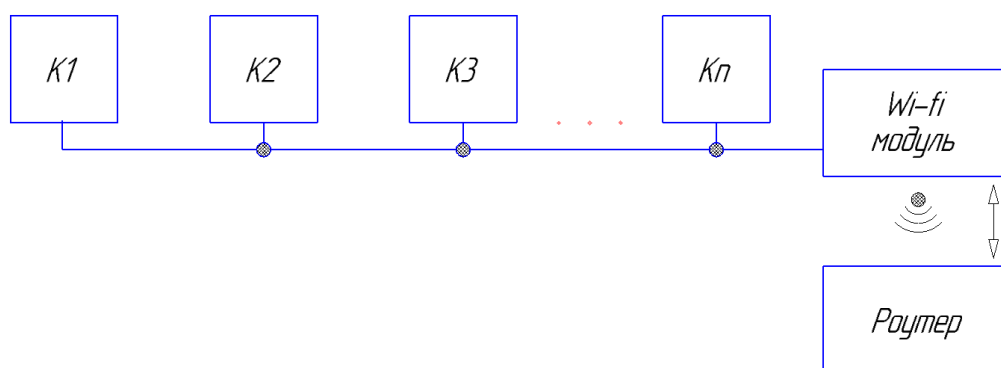


Рисунок 3.9 – Структурная схема каскадного объединения коммутаторов

Отсутствие индивидуальных модулей позволяет уменьшить габариты группы устройств. При использовании группы подобных устройств коммутации (каскадное соединение) к ним добавляется лишь один модуль беспроводной MESH-сети, который соединяется с ними с помощью проводной линии связи. При этом беспроводные устройства коммутации электрической нагрузки уже не содержат встроенных модулей беспроводной MESH -сети, что позволяет сократить их стоимость и габаритные размеры.

3.3 Беспроводной коммутатор электрической нагрузки

После того как выбор интерфейса и протокола передачи данных завершен, возникает вопрос выбора элементной базы для реализации в серийно выпускаемых изделиях. На сегодняшний день на рынке электронных компонентов присутствует следующие производители: Texas Instruments, STMicroelectronics и Philips. Одним из немногих решений, доступных для разработчиков в России, является производитель модулей с поддержкой MESH-сетей – Espressif Systems. В качестве экспериментального образца средства управления был выбран модуль ESP32-WROOM-32D с увеличенным объемом встроенной памяти, который поддерживает стеки протоколов Wi-Fi и Bluetooth Low Energy. На его основе были разработаны и изготовлены опытные образцы беспроводного устройства коммутации электрической нагрузки.

3.3.1 Схемотехническое решение

Основанный на 40-нм технологии, ESP32 представляет собой надежную платформу, которая помогает удовлетворить потребности в эффективном энергопотреблении, компактной конструкции, безопасности, высокой производительности и надежности.

Espressif предоставляет базовые аппаратные и программные ресурсы, чтобы помочь разработчикам приложений реализовать проекты с использованием оборудования серии ESP32. Среда разработки программного обеспечения от Espressif предназначена для разработки приложений технологии «Интернета вещей» (IoT) с Wi-Fi, Bluetooth, управлением питанием и некоторыми другими функциями системы. Внешний вид модуля ESP32-WROOM показан на рисунке 3.10.

В качестве информации, передаваемой между управляющим сервером и беспроводным устройством коммутации электрической нагрузки в рамках алгоритма эффективного управления, используются команды включения и выключения канала коммутации, запроса текущего статуса канала коммутации и запроса текущих параметров сети. При этом в качестве системы измерения параметров сети (напряжение, потребляемая мощность) используется микросхема HLW8012 с

частотным выходом. С целью реализации указанного алгоритма эффективного управления было разработано программное обеспечение: встроенное для модуля ESP32-WROOM (Приложение А) и серверное.



Рисунок 3.10 – Внешний вид модуля ESP32-WROOM

Основой схемы электрической принципиальной беспроводного коммутатора электрической нагрузки является модуль ESP32-WROOM (рисунок 3.12). При этом модуль имеет классическую обвязку фильтрующих конденсаторов по линии питания, подключенный к нему разъем программирования (XS3), светодиодную индикацию (VD6) и тактовую кнопку (SA1) для перевода устройства в режим настройки параметров беспроводной сети.

Микросхема HLW8012 имеет частотный выход, её внутренняя структура представлена на рисунке 3.11. В зависимости от наличия сигналов на управляющих входах CF и CF1 – на выходе HLW8012 частота следования импульсов будет пропорциональна либо напряжению питающей сети, либо потребляемой нагрузкой мощности (с учетом коэффициентов, которые указаны в описании производителя). Измерение производится на резисторе R3 номиналом 0,001 Ом, а резисторы R2, R6, R9, R10 и R12, установленные последовательно, служат для рассеивания мощности (рисунок 3.12).

Обвязка для микросхемы HLW8012 является рекомендованной и регламентирована в описании от производителя. Подсчет импульсов и интерпретация в измеряемую величину производится ПО МК модуля ESP32-WROOM. Запуск процесса измерения инициируется модулем ESP32-WROOM, подачей сигнала

управления на транзистор (VT2), который в свою очередь управляет подачей сигнала SEL на 8-ой вывод микросхемы HLW8012.

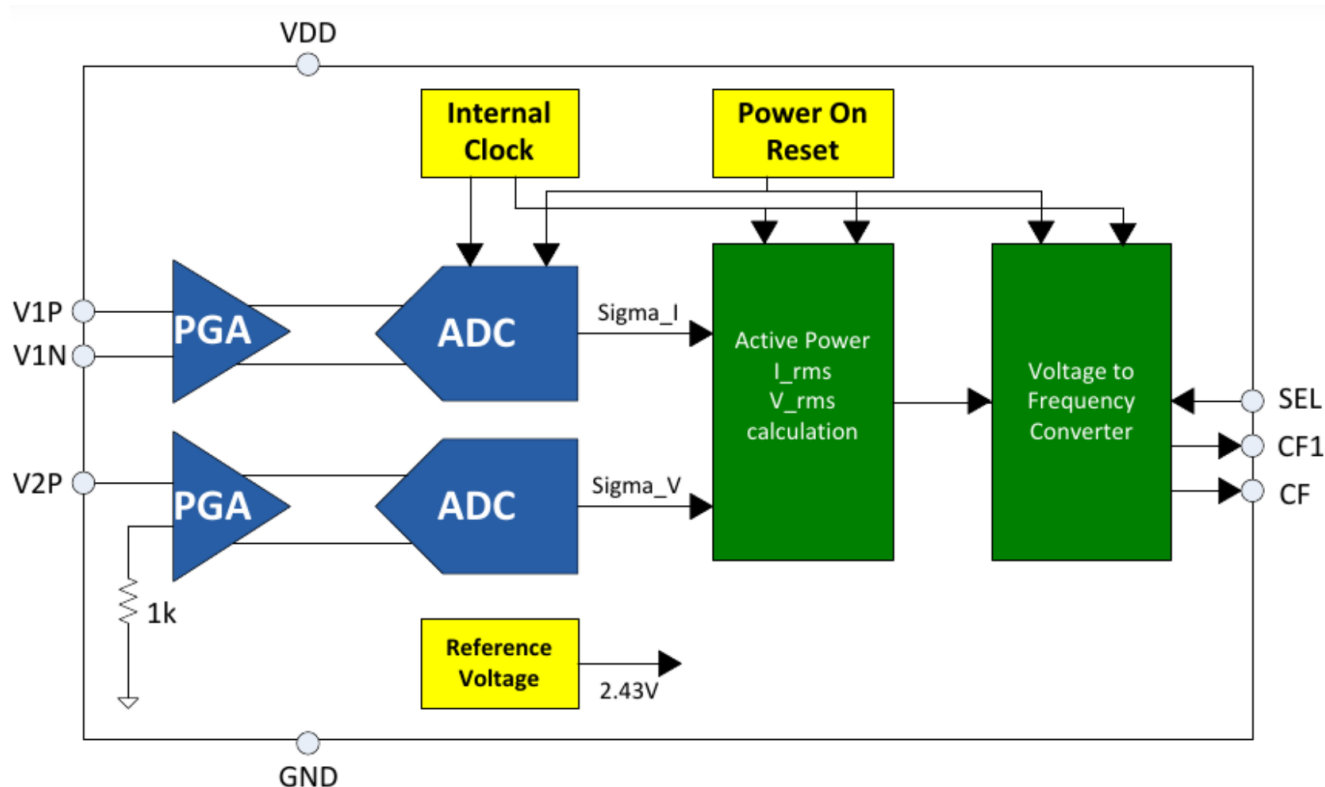


Рисунок 3.11 – Внутренняя структура микросхемы HLW8012

Схема коммутации, реализующая предложенный способ, представлена на схеме электрической принципиальной (рисунок 3.12) симистором (VS1) с управляющим драйвером (U1) и электромеханическим реле (К1) с управляющим транзистором (VT1). Расчетные номиналы элементов указаны на схеме электрической принципиальной.

В верхней части схемы электрической принципиальной, представленной на рисунке 3.12, изображена схема источника питания, осуществляющего питание постоянным током элементов схемы. При этом генерируются следующие номиналы питающего напряжения: 12 В – для питания обмотки коммутирующего электромеханического реле, 5 В – для питания измерительной микросхемы HLW8012 и 3,3 В – для питания непосредственно управляющего МК модуля.

В соответствии со схемой электрической принципиальной (рисунок 3.12) была осуществлена трассировка печатной платы и изготовление (монтаж) опытных образцов (Глава 4).

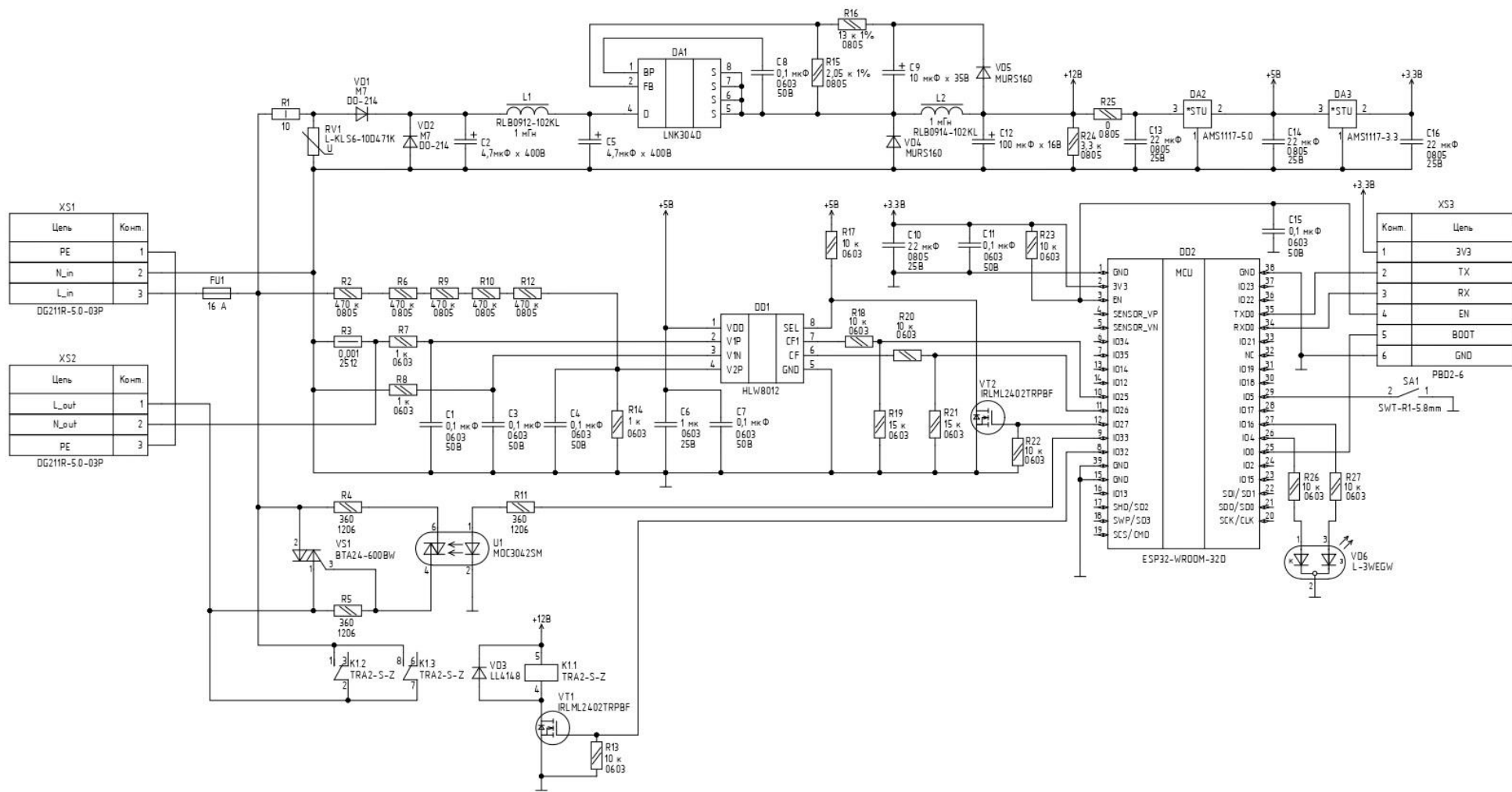


Рисунок 3.12 – Схема электрическая принципиальная беспроводного коммутатора электрической нагрузки

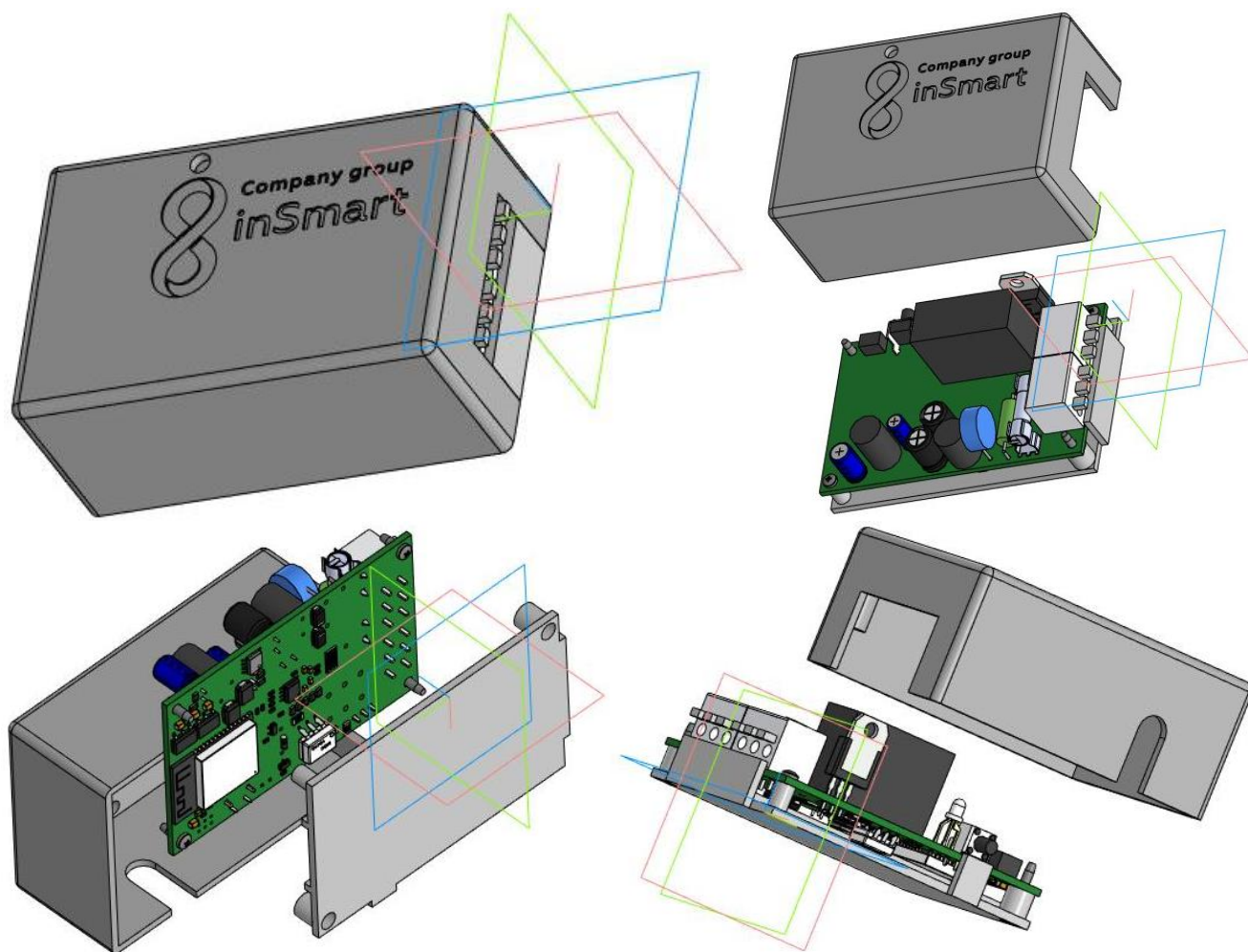


Рисунок 3.13 – 3D-модель корпуса беспроводного коммутатора нагрузки

На рисунке 3.13 представлена 3D-модель корпуса с установленной печатной платой беспроводного коммутатора электрической нагрузки. Корпус состоит из двух частей – основания и крышки. Части корпуса скрепляются между собой винтами. Также, к основанию корпуса на винты крепится печатная плата устройства. Корпус имеет вырезы под контактные клеммы на печатной плате, а также, толкатель для тактовой кнопки. Клеммы для подключения питающей сети и нагрузки являются быстрозажимными, что упрощает монтаж устройства на объекте.

3.3.2 Встроенное программное обеспечение

Встроенное программное обеспечение (далее ПО) опытного образца беспроводного коммутатора электрической нагрузки позволяет принимать управляющие команды от сервера и выполнять их на устройстве коммутации электрической нагрузки. В частности, программа позволяет: подключать и отключать

нагрузку; считывать и передавать на сервер текущие параметры электрической сети, к которой подключено устройство; считывать и передавать на сервер текущие параметры потребляемой электрической мощности; считывать и передавать на сервер уровень Wi-Fi сигнала; определять выбор устройства-ретранслятора с наиболее высоким уровнем Wi-Fi сигнала; создавать MESH-сеть из нескольких устройств; распределять по слоям несколько устройств в рамках MESH-сети и передавать информацию о каждом слое на сервер. На данное программное обеспечение было получено свидетельство на программу для ЭВМ №2021610356 от 13.01.2021 «Встроенное программное обеспечение беспроводного устройства коммутации электрической нагрузки» [159].

Язык программирования: С.

Среда разработки: Espressif mesh development framework.

Объем программы: 1,5 КБ.

Основной исходный код встроенного ПО беспроводного коммутатора электрической нагрузки представлен в Приложении А.

Алгоритм эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки заключается в автоматической реализации в рамках беспроводной Wi-Fi MESH-сети следующих действий (рисунок 3.14):

- определение корневого узла по максимальному уровню сигнала от роутера путем сравнения данных от всех устройств, находящихся в сети;
- определение дочерних узлов по максимальному уровню сигнала от корневого узла путем сравнения данных от всех устройств, находящихся в сети;
- определение конечных узлов и соотнесение их с дочерними узлами по максимальным уровням сигнала от дочерних узлов;
- построение карты сети и передача данных о топологии сети по восходящей иерархии.

Данный процесс называется «выборы». При этом в случае отключения одного из узлов сети автоматически производятся «перевыборы» и сеть адаптивно изменяет свою топологию, что повышает надежность канала управления. Экспе-

риментальные исследования показали, что время изменения топологии сети из 10 устройств при отключении одного из них не превышает 3 с.

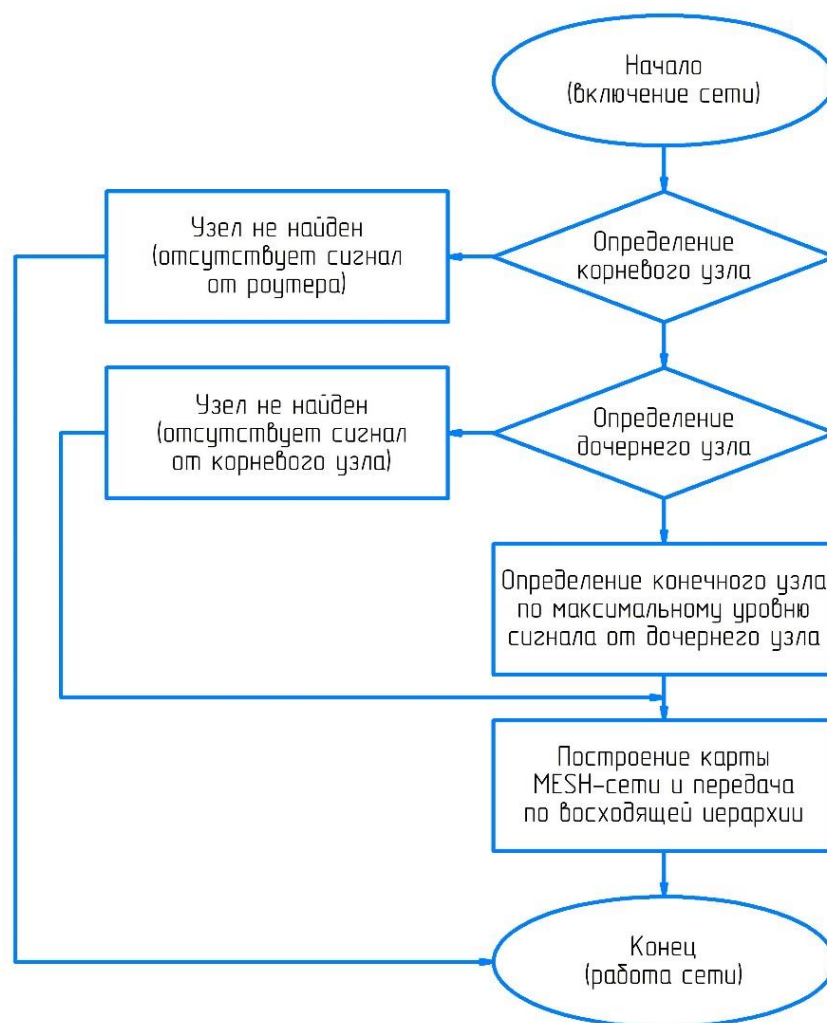


Рисунок 3.14 – Блок-схема адаптивного построения топологии MESH-сети

3.3.3 Серверное программное обеспечение

Серверное программное обеспечение беспроводного коммутатора электрической нагрузки состоит из 3 основных разделов: «Backend», «Frontend» и провайдер «Алиса». Программа позволяет осуществлять удаленный мониторинг состояния беспроводных коммутаторов электрической нагрузки, обработку и сохранение, получаемых параметров электрической сети, к которой подключено устройство: напряжение, потребляемый ток, мощность, а также параметры сети обмена данными: номер слоя, на котором расположено устройство и всю структуру топологии сети в целом.

Также, программа позволяет генерировать команды управления для каждого отдельного беспроводного коммутатора электрической нагрузки как посредством личного кабинета (desktop приложения), так и при помощи голосового ассистента «Алиса».

Язык программирования: JavaScript, TypeScript, PHP.

Среда разработки (фреймворк): Laravel (framework), Vue.js, Node.js.

Объём программы:

- раздел «Backend» – 43 КБ;
- раздел «Frontend» – 133 КБ;
- провайдер «Алиса» – 87 КБ.

В серверное программное обеспечение была интегрирована опция управления устройствами с помощью голосового ассистента «Алиса». На рисунке 3.15 приведены скриншоты интерфейса настройки голосового управления беспроводными коммутаторами электрической нагрузки в мобильном приложении Яндекс.

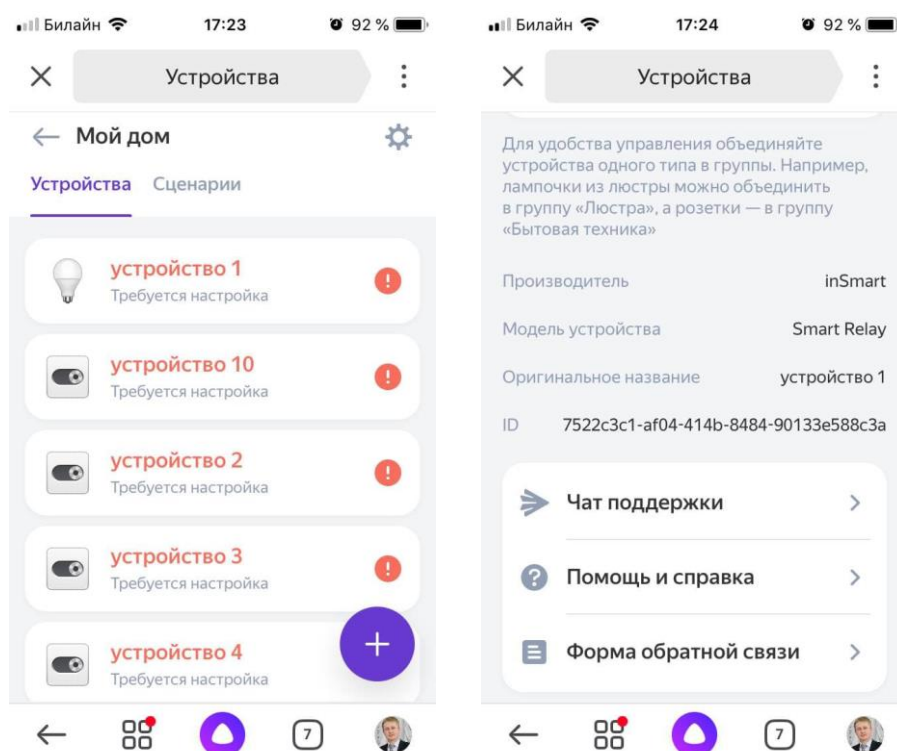


Рисунок 3.15 – Настройка работы голосового ассистента с коммутатором

Разработанное программное обеспечение прошло модерацию компании Яндекс и признано пригодным к использованию для коммутаторов нагрузки.

3.4 Основные выводы по Главе 3

По результатам проведенных исследований был осуществлен выбор технологии построения беспроводной сети обмена данными с самоорганизующейся топологией для беспроводных коммутаторов электрической нагрузки. При этом был также выбран стандарт, на основе которого данная технология была применена. И в результате была построена сеть Wi-Fi MESH, что дает ряд преимуществ. Во-первых, полная децентрализация сети. Во-вторых, отсутствие необходимости в дополнительном коммуникационном оборудовании в виде ретрансляторов. В-третьих, многократное увеличение зоны покрытия стандартной и наиболее широко распространенной Wi-Fi сети и снижение нагрузки на роутер.

Также был разработан беспроводной коммутатор электрической нагрузки в объеме конструкторской документации достаточной для изготовления опытных образцов. Коммутатор, являясь основным элементом адаптивной системы управления, служит решением всех поставленных для данного устройства задач.

Разработанная адаптивная система управления энергосберегающими процессами здания позволяет не только осуществлять удаленное управление процессом коммутации электрических нагрузок и мониторинг текущего состояния параметров сети, но и работать в автоматическом режиме по заранее созданным сценариям. Причем, учитывая адаптивность разработанной системы, критериями управления могут служить абсолютно любые параметры, данные о которых доступны серверному программному обеспечению. Например, календарь и текущее время, данные о погодных условиях и уровне освещенности, параметры электрической сети (напряжение, потребляемая электрическими приборами мощность), параметры микроклимата в здании (температура, уровень влажности) а также любые другие данные от прочих SMART устройств «Умного дома» [160, 161].

Таким образом, возможность введения дополнительных параметров управления позволяет пользователю создавать «сложные» многоступенчатые сценарии автоматической работы адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания и тем самым достигать максимальной энергетической эффективности работы системы в целом.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной главе приводятся результаты экспериментальных исследований, направленных на оценку эффективности разработанного способа коммутации электрической нагрузки и алгоритмов эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий.

Для проведения испытаний различных способов коммутации электрической нагрузки на предмет наработки электромеханического реле «на отказ» была разработана и изготовлена ЭИУ, а также управляющее программное обеспечение с графическим интерфейсом пользователя, которое служит для управления ЭИУ. Во время работы к ЭИУ был подключен осциллограф для исследования переходных процессов в момент коммутации различных типов электрических нагрузок и сняты осциллограммы для проведения сравнительного анализа.

Для проведения испытаний отказоустойчивости канала управления беспроводных коммутаторов электрической нагрузки разработано серверное программное обеспечение, которое наглядно демонстрирует карту топологии беспроводной Wi-Fi MESH-сети и передаваемые в рамках работы системы управления данные. При этом также были изготовлены прототипы беспроводных коммутаторов электрической нагрузки в количестве 10 штук для построения беспроводной сети с самоорганизующейся топологией.

В разделе 4.3 производится анализ итоговых результатов проведенных испытаний, а также делаются основные выводы по данной главе.

4.1 Экспериментальная исследовательская установка

С целью экспериментального подтверждения теоретических положений раздела 2 данной работы, была разработана и изготовлена ЭИУ, которая позволяет управлять коммутацией электрических нагрузок по четырем независимым каналам коммутации при помощи персонального компьютера. При этом в каналах 1 и 3 реализована стандартная схема коммутации посредством электромеханического реле, а в каналах 2 и 4 – усовершенствованная (раздел 2.3). Схема электрическая принципиальная пары каналов коммутации приведена на рисунке 4.1.

ЭИУ содержит в своем составе 4 канала коммутации, в которых попарно (1 и 2, 3 и 4 каналы) установлены электромеханические реле одного производителя с идентичными техническими характеристиками. При этом в каналах коммутации 1 и 3 использован классический способ коммутации электрической нагрузки (только электромеханическое реле), а в каналах коммутации 2 и 4 использован разработанный способ коммутации электрической нагрузки (электромеханическое реле и симистор). Разработанное управляющее программное обеспечение для персонального компьютера позволяет вручную и в автоматическом режиме (по таймеру) осуществлять коммутацию подключенных к ЭИУ электрических нагрузок и вести учет количества срабатываний каждого канала коммутации.

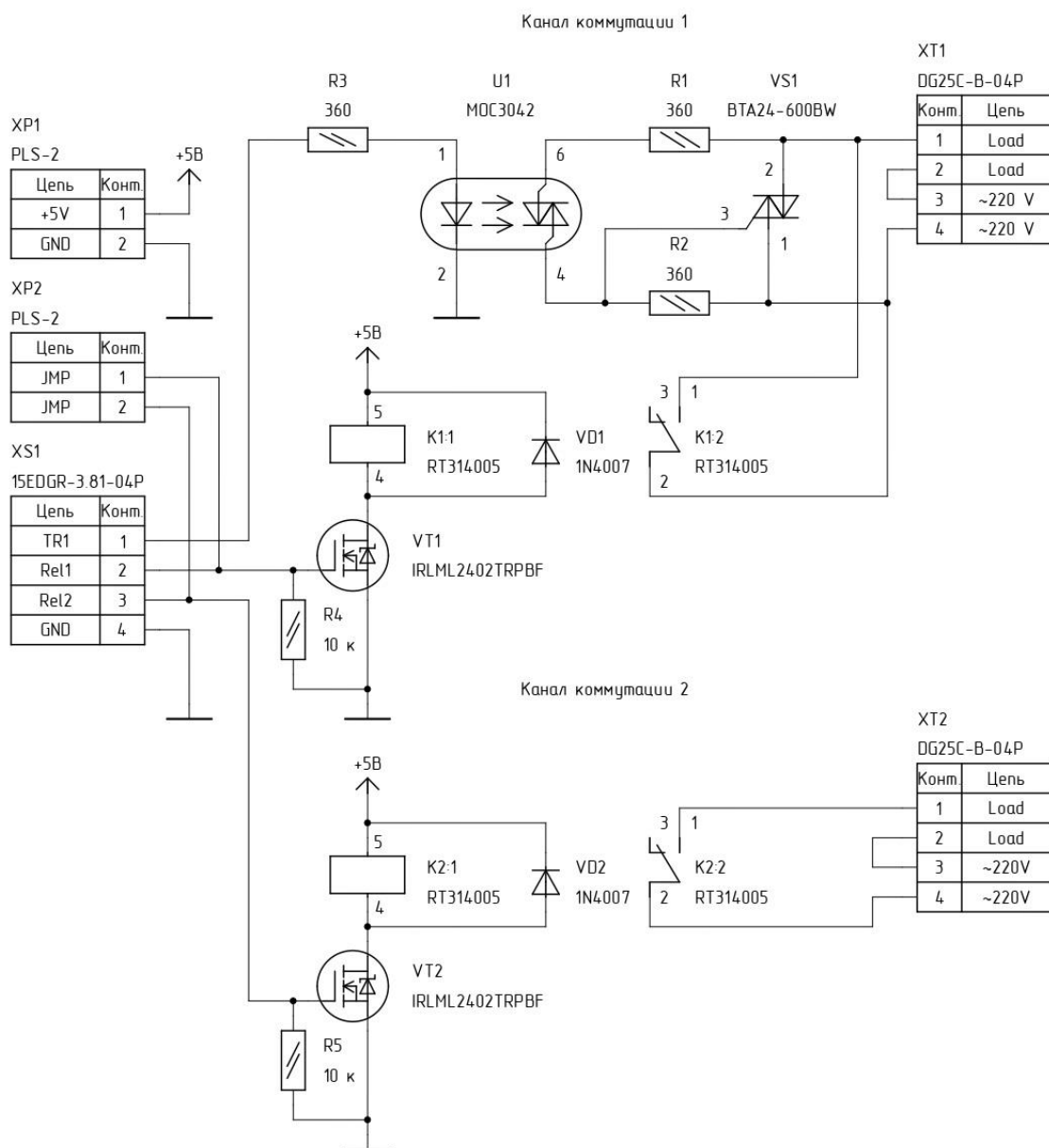


Рисунок 4.1 – Схема электрическая принципиальная каналов коммутации ЭИУ

На основе разработанной схемы электрической принципиальной, приведенной на рисунке 4.1, была произведена трассировка топологии печатных плат (рисунок 4.2), которые впоследствии были изготовлены в количестве 2 штук для организации 4 каналов коммутации в рамках ЭИУ. Системой управления для ЭИУ (управляющим МК) служит отладочная плата STM Discovery с разработанным встроенным программным обеспечением, которое приведено в приложении Б.

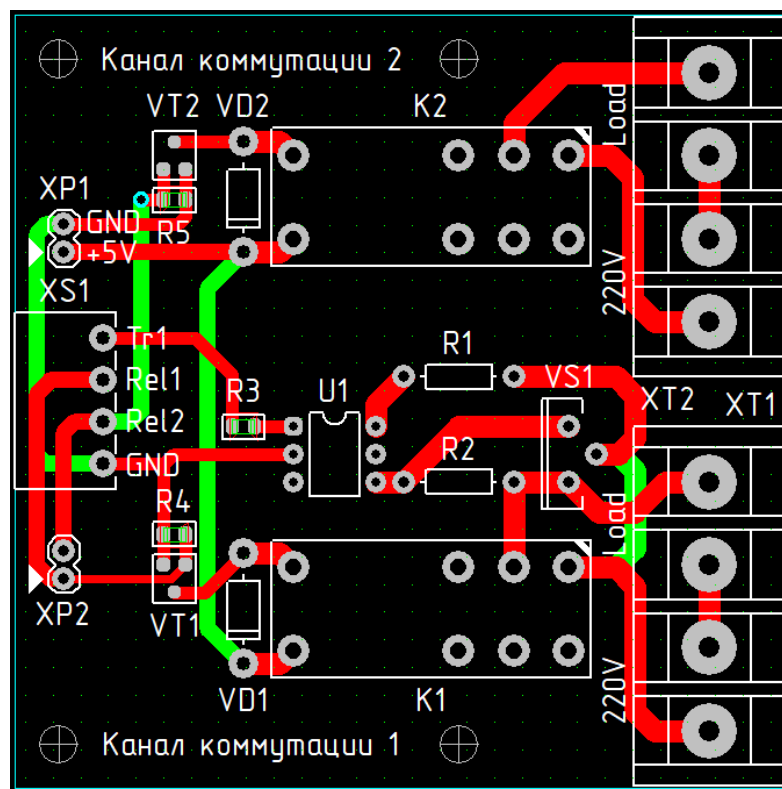


Рисунок 4.2 – Процесс трассировки топологии 2-канальной печатной платы для ЭИУ

Общий вид изготовленной ЭИУ с подключенными нагрузками показан на рисунке 4.3. ЭИУ используется для проведения двух видов исследований – переходных процессов при коммутации электрических нагрузок и наработки «на отказ» КЭ электромеханических реле в рамках проведения сравнительного анализа двух способов коммутации электрических нагрузок.

Управляющее программное обеспечение ЭИУ, внешний вид которого представлен на рисунке 4.4, позволяет не только вручную управлять моментами включения каждого канала коммутации, но и устанавливать время задержки включения реле (для усовершенствованного варианта коммутации), а также осуществ-

лять автоматическую коммутацию нагрузок выбранных каналов с заданными временными интервалами. Эта функция программного обеспечения позволяет осуществить испытания на отказоустойчивость различных способов коммутации.

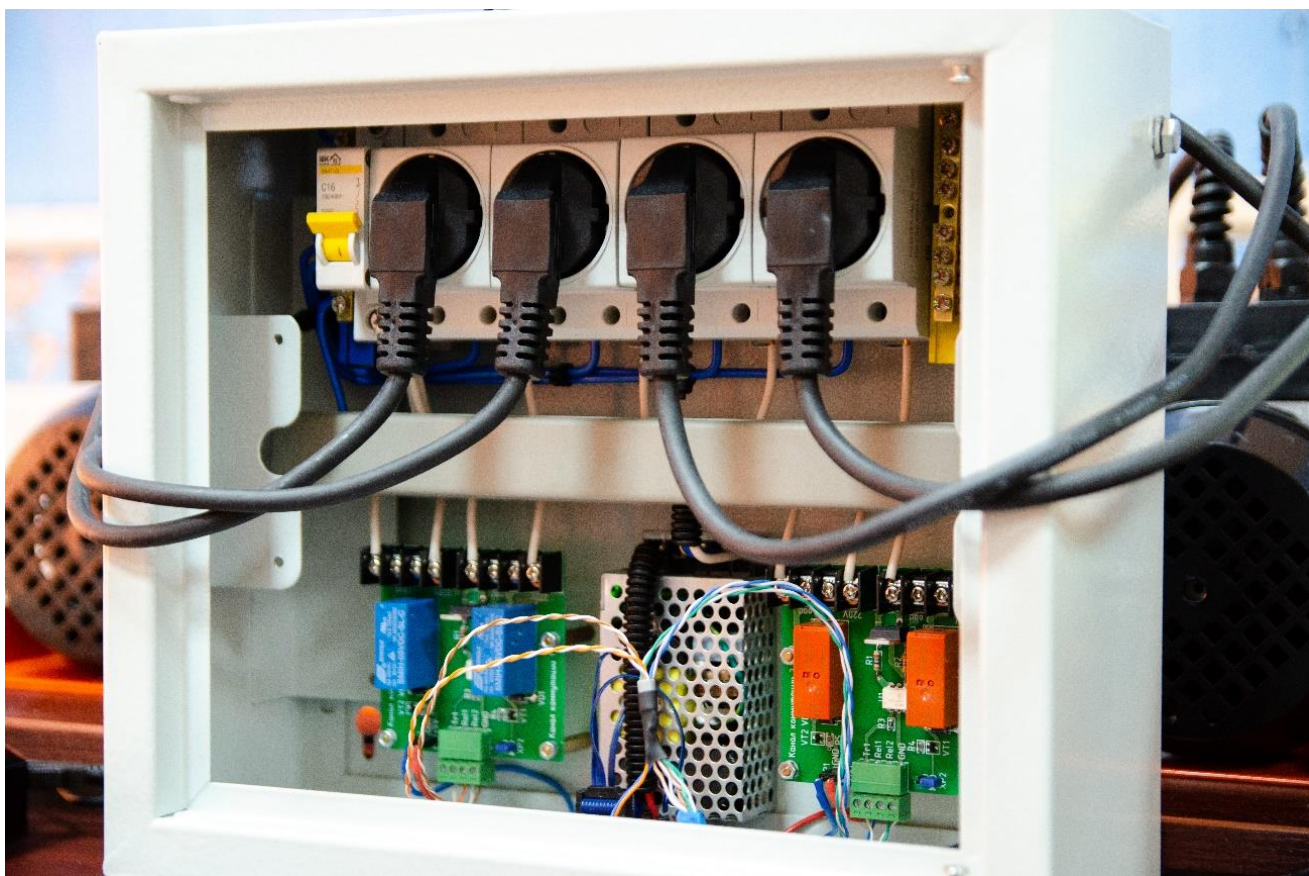


Рисунок 4.3 – Общий вид ЭИУ с подключенными нагрузками

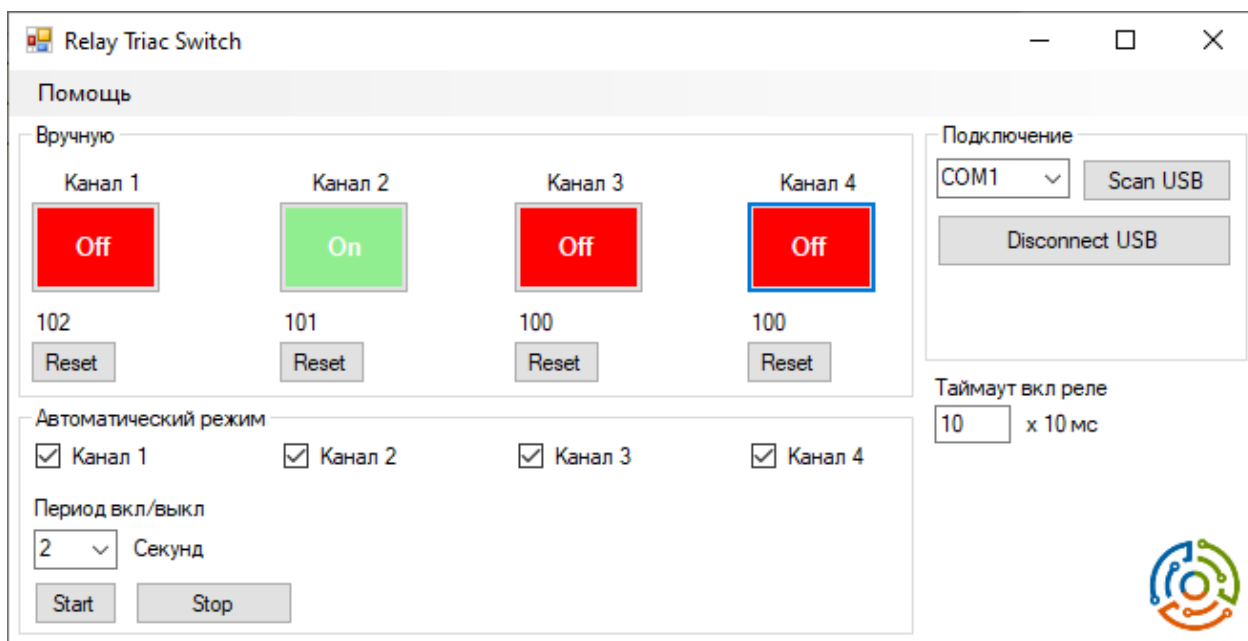


Рисунок 4.4 – Внешний вид основного окна управляющей программы ЭИУ

Цель исследований – сравнить переходные процессы в моменты коммутации различных типов электрической нагрузки с помощью предложенного способа (симистор в совокупности с электромеханическим реле) с переходными процессами в моменты коммутации различных типов электрических нагрузок с помощью одного электромеханического реле.

В качестве электрических нагрузок различных типов использовались лампы накаливания мощностью 90 Вт, а также электрические двигатели талей мощностью 500 Вт – как наиболее «неблагоприятные» типы нагрузок по результатам теоретических исследований, приведенных в разделе 2.1.

К ЭИУ через развязывающий трансформатор был подключен осциллограф модели Rigol DS1054Z в соответствии со схемой, представленной на рисунке 4.5.

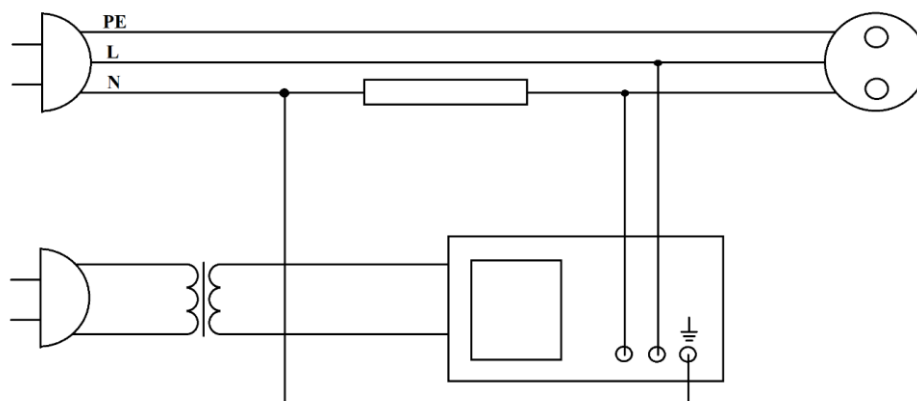


Рисунок 4.5 – Схема подключения Rigol DS1054Z к ЭИУ

При этом были сняты осциллограммы моментов включения (рисунки 4.6 – 4.9) и отключения (рисунки 4.10 – 4.11) электрических нагрузок. На осциллограммах канал 1 (желтая линия) отображает изменение сетевого напряжения, а канал 2 (голубая линия) отображает изменение тока в нагрузке. При этом осциллограммы наглядно демонстрируют наличие бросков тока в момент коммутации нагрузок при классическом способе коммутации (рисунки 4.6 – 4.9 сверху) и отсутствие бросков тока при разработанном способе коммутации (рисунки 4.6 – 4.9 снизу). А также в момент отключения нагрузок при классическом способе коммутации наблюдаются выбросы напряжения (рисунки 4.10 – 4.11 сверху), а при раз-

работанном способе коммутации они отсутствуют (рисунки 4.10 – 4.11 снизу), что полностью подтверждает теоретические положения диссертационной работы.

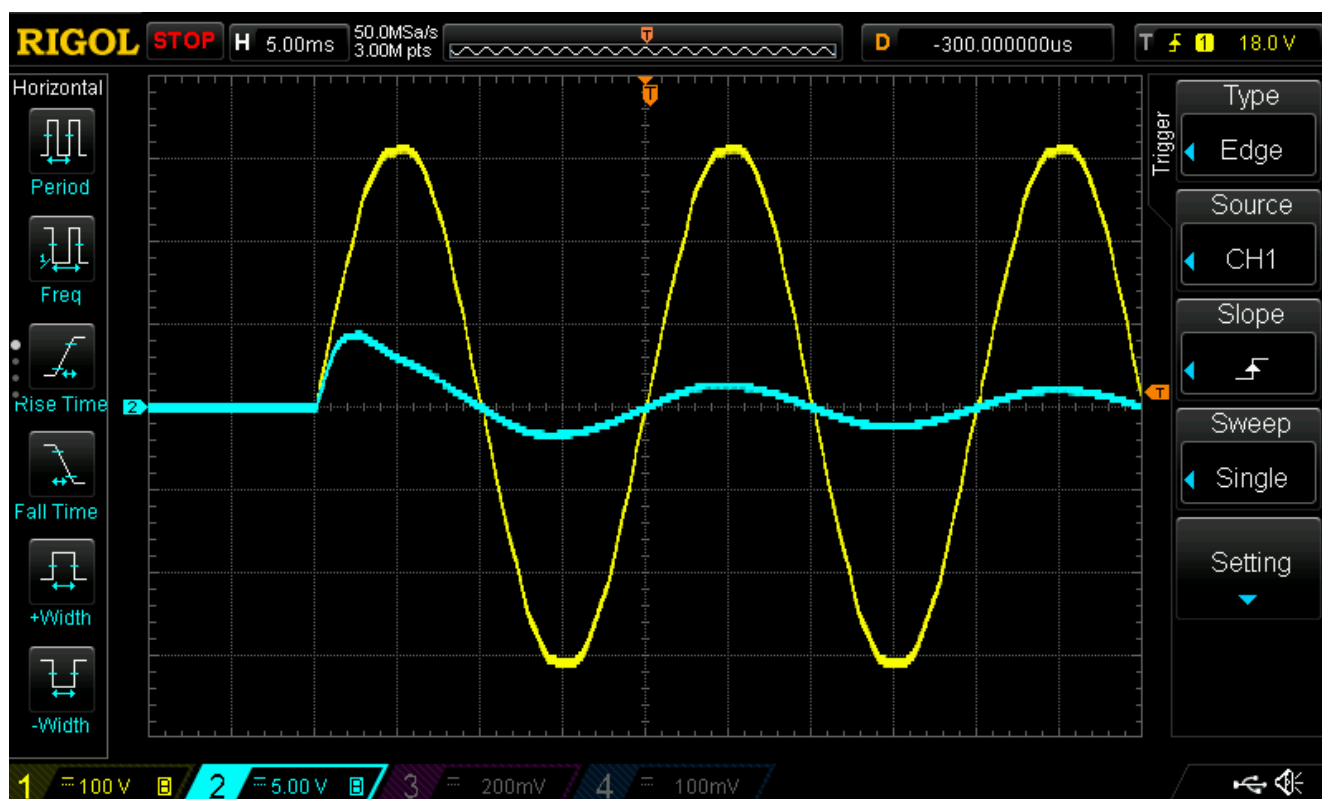


Рисунок 4.6 – Осциллограммы включения лампы накаливания 90 Вт
(канал коммутации 1 сверху, канал коммутации 2 снизу)

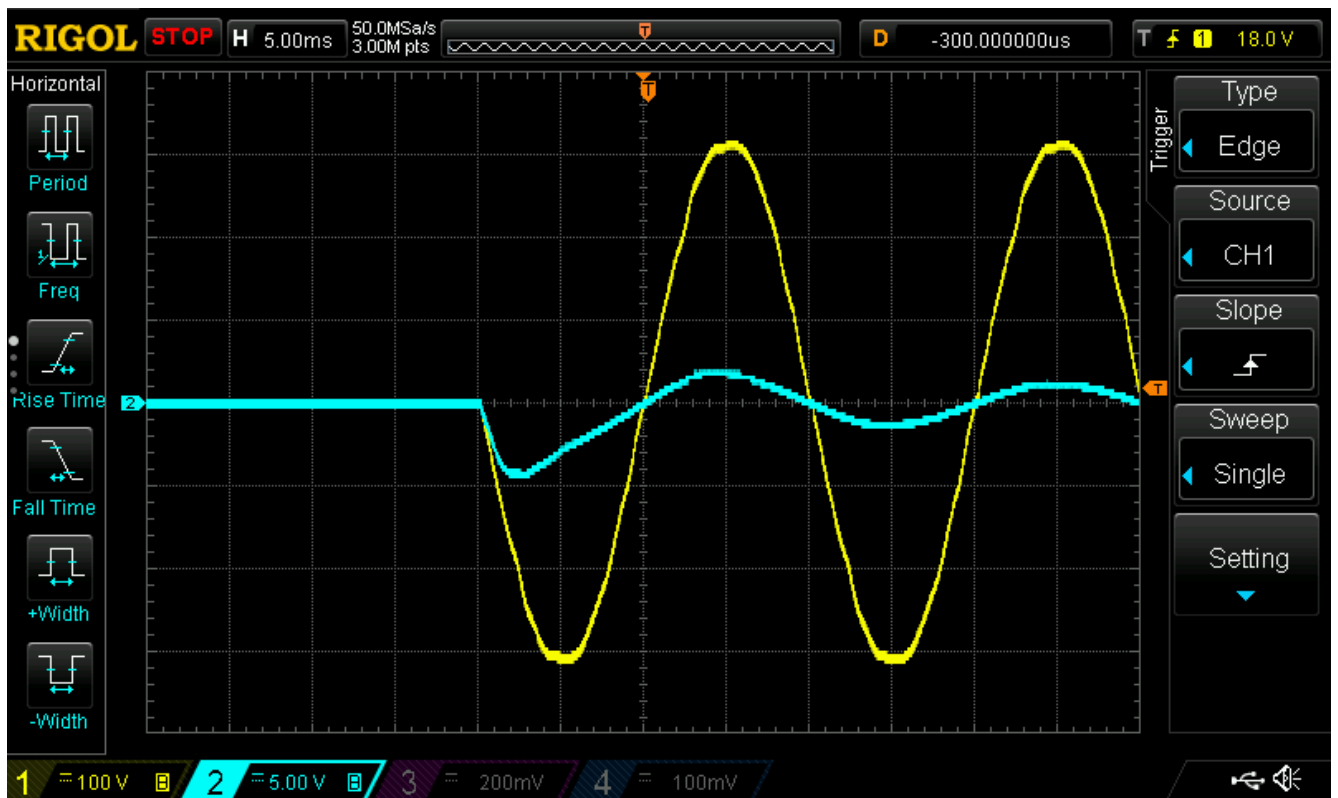
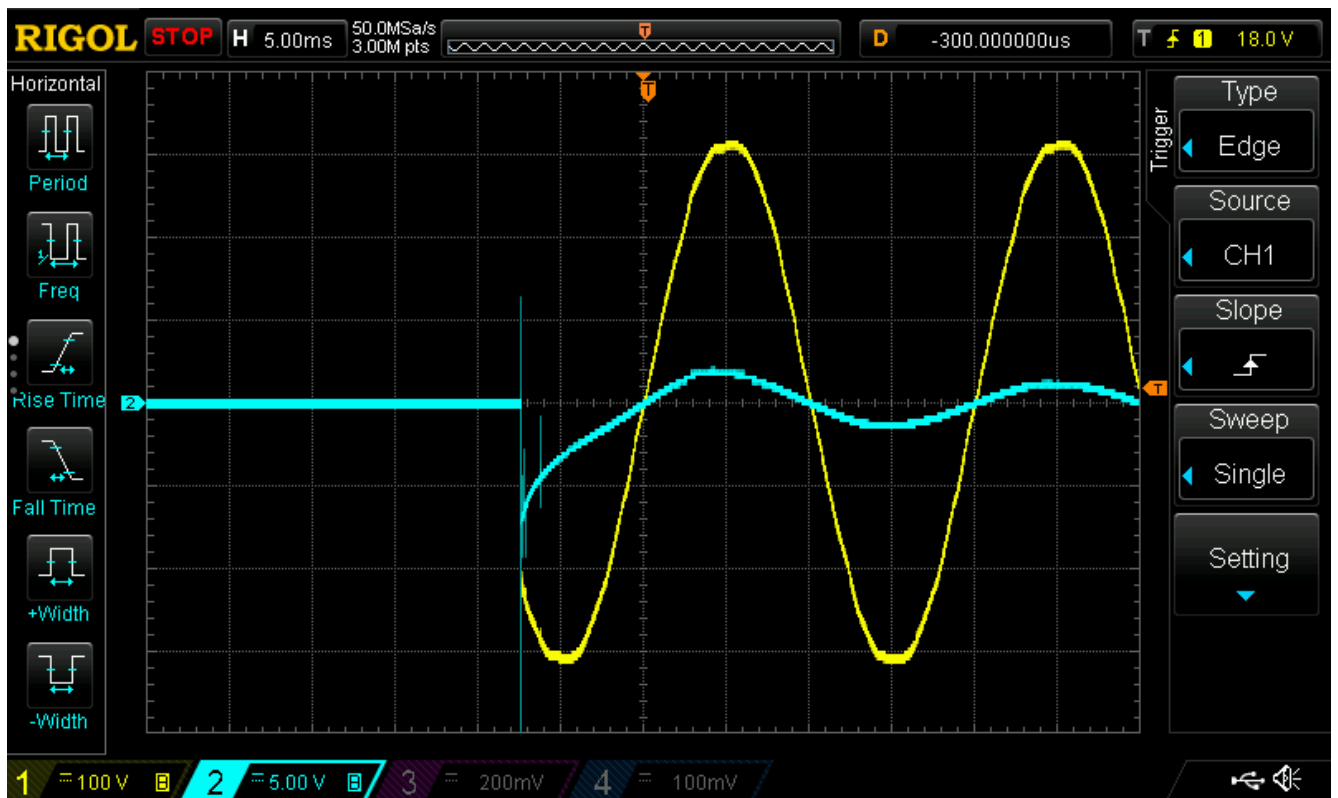


Рисунок 4.7 – Осциллограммы включения лампы накаливания 90 Вт
(канал коммутации 1 сверху, канал коммутации 2 снизу)

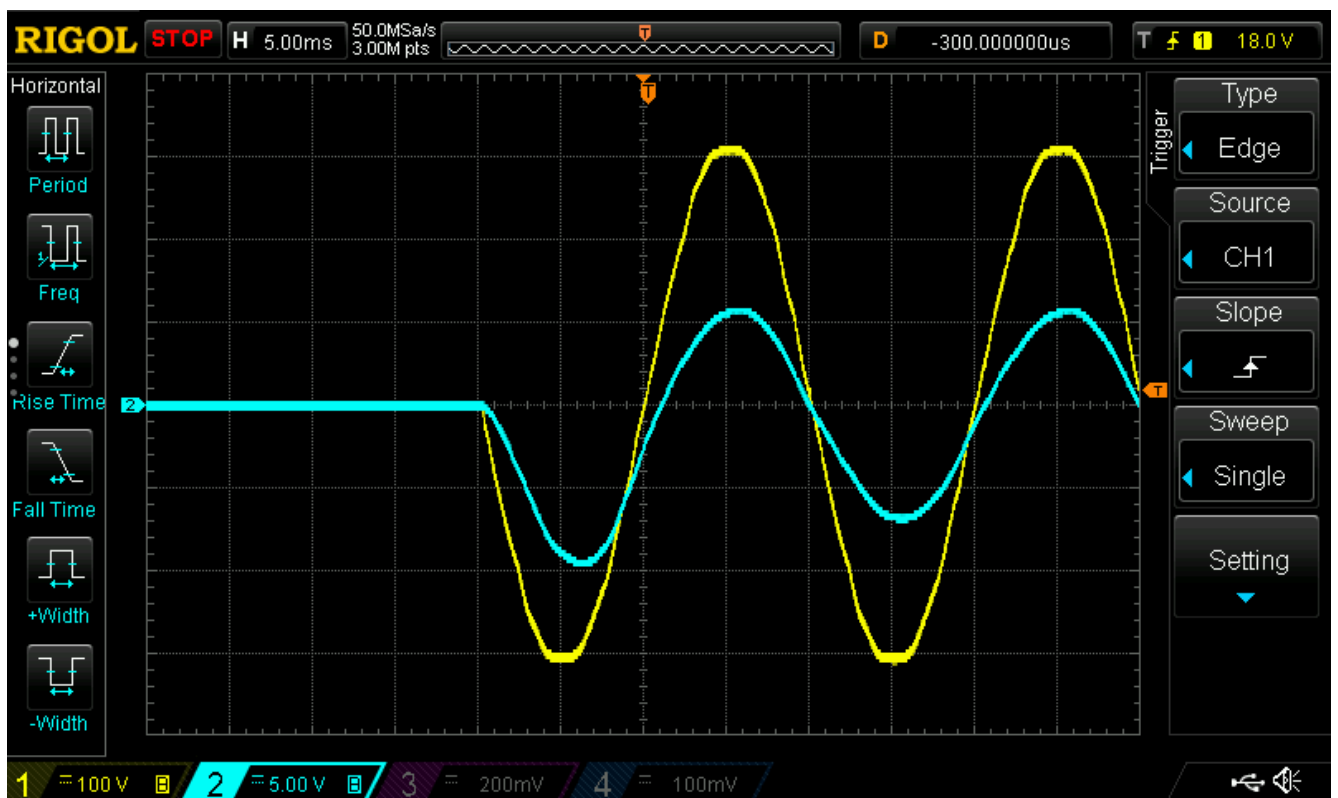


Рисунок 4.8 – Осциллограммы включения электродвигателя 500 Вт
(канал коммутации 1 сверху, канал коммутации 2 снизу)

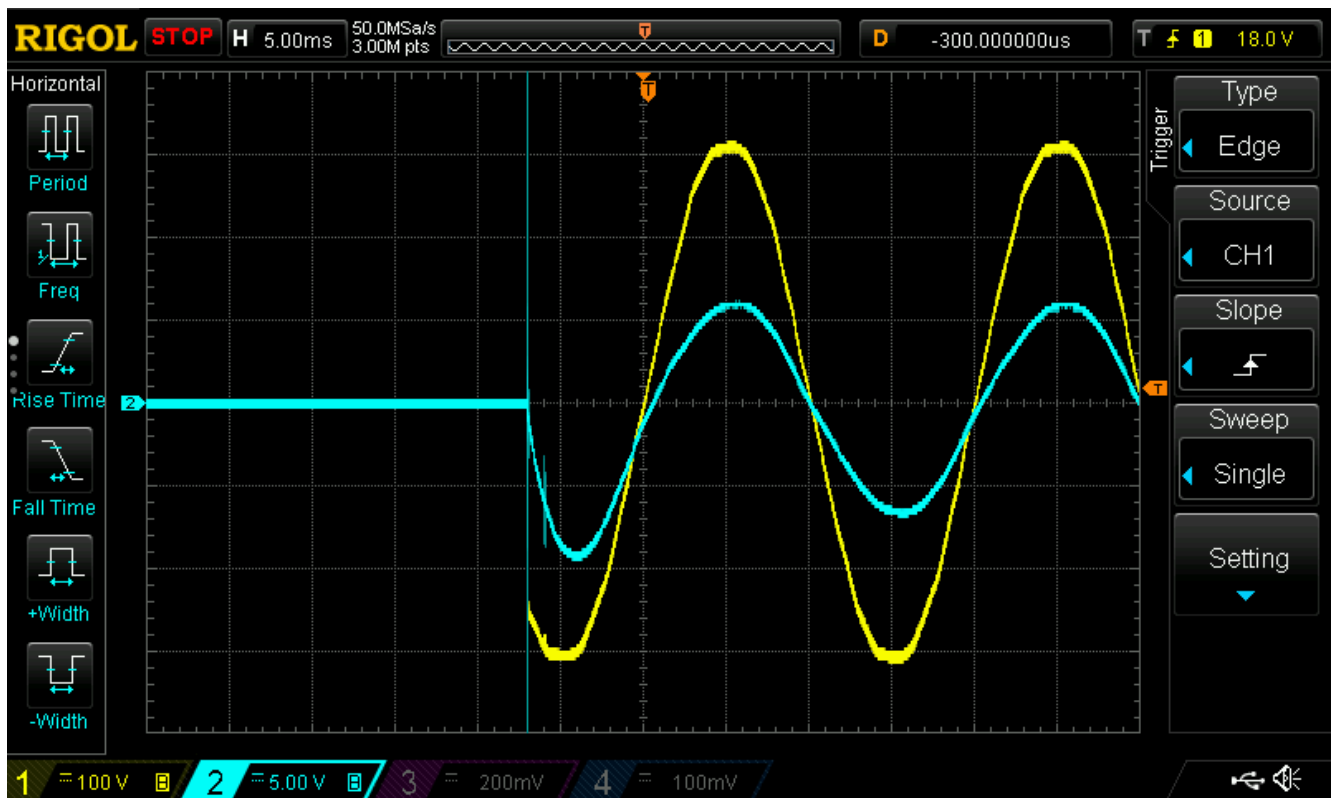


Рисунок 4.9 – Осциллограммы включения электродвигателя 500 Вт
(канал коммутации 1 сверху, канал коммутации 2 снизу)

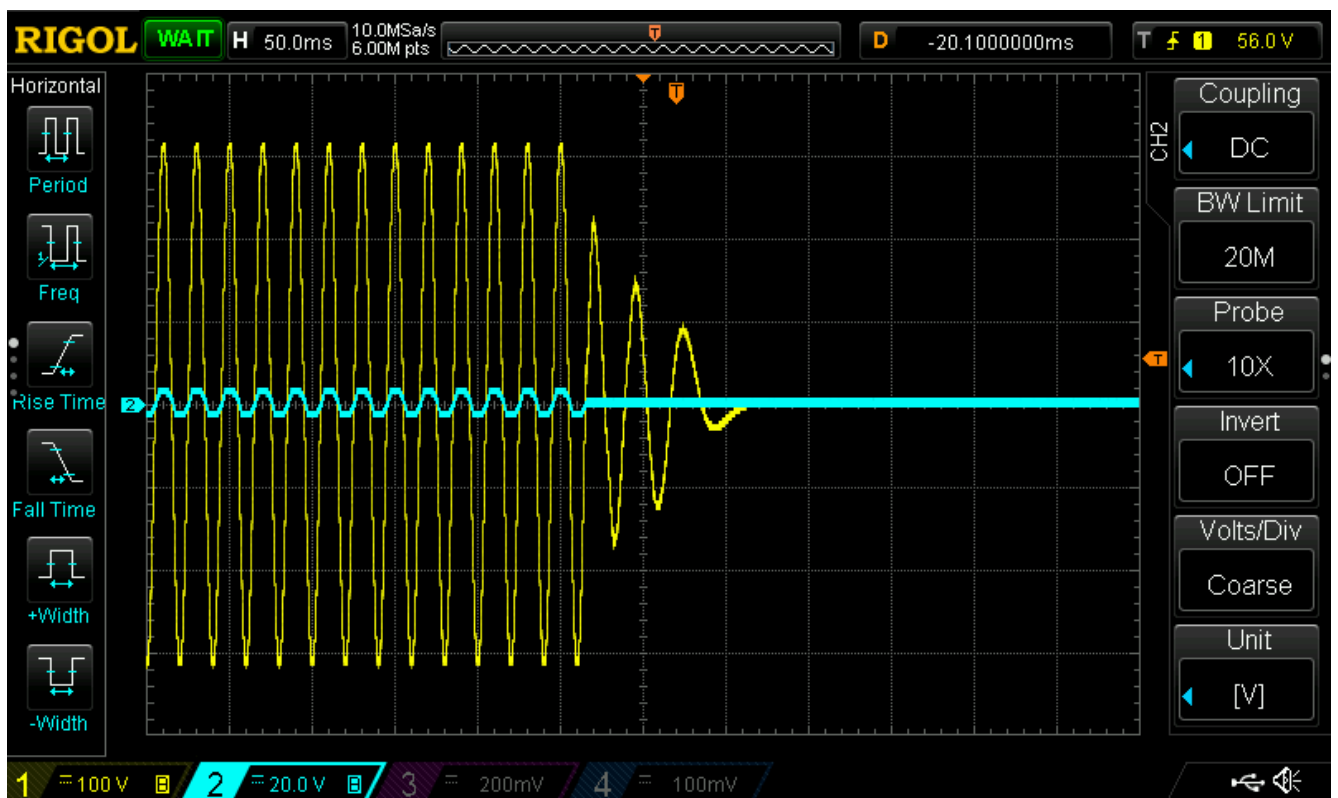
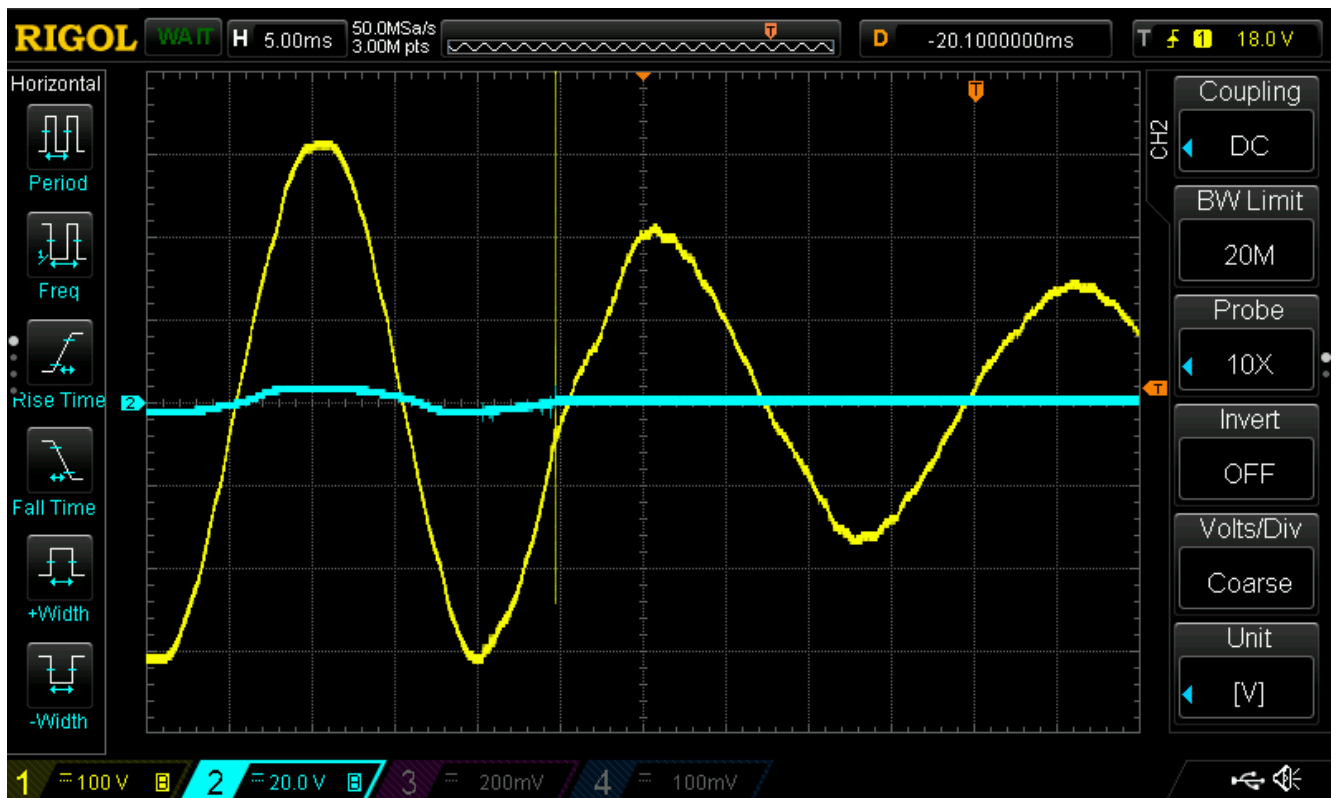


Рисунок 4.10 – Осциллограммы отключения электродвигателя 500 Вт
(канал коммутации 1 сверху, канал коммутации 2 снизу)

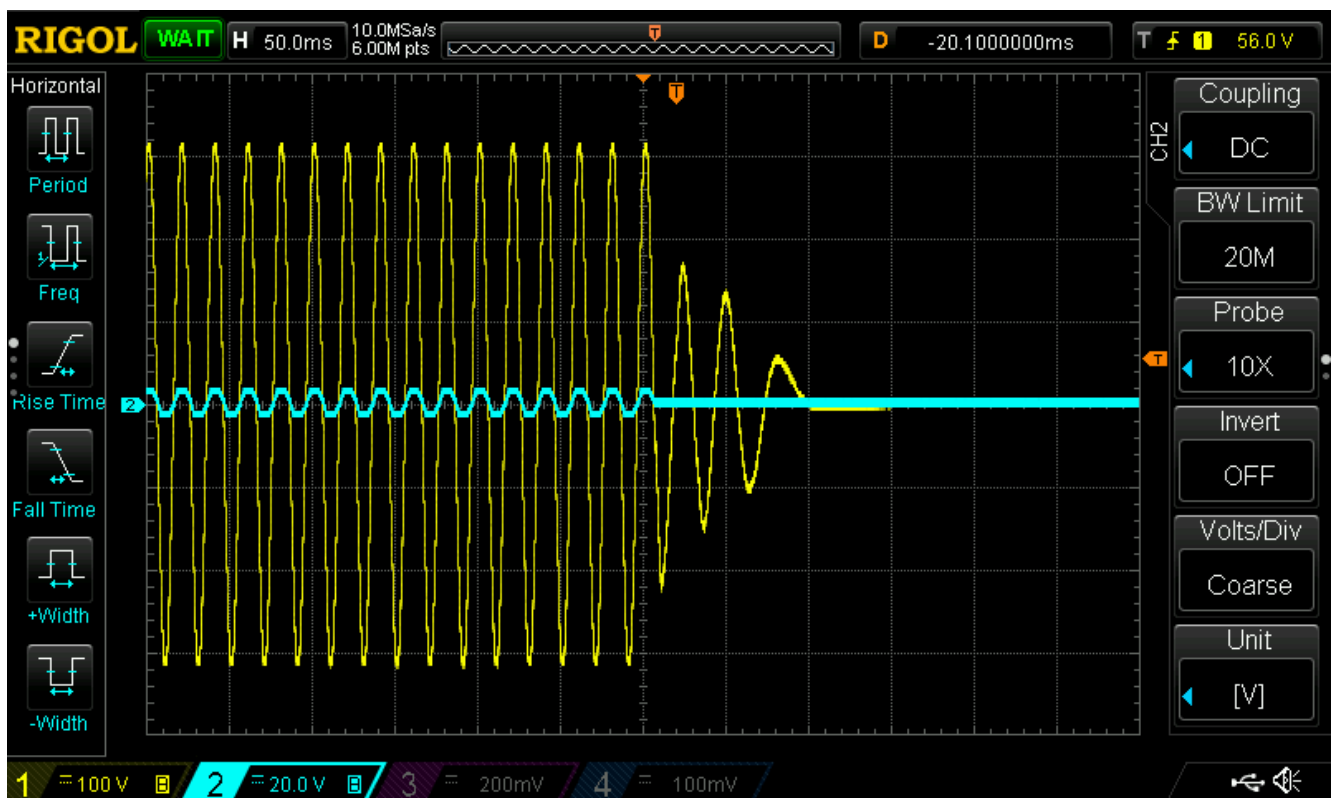
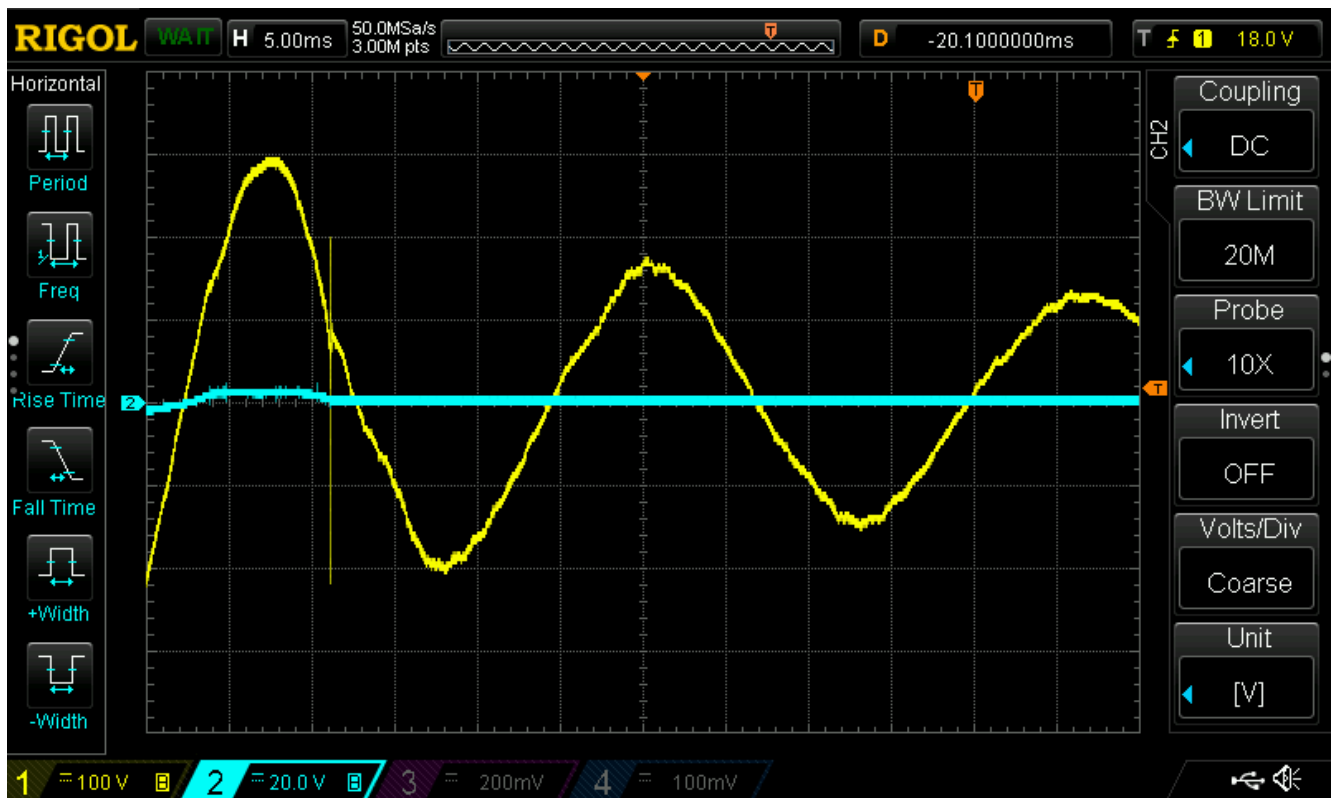


Рисунок 4.11 – Осциллограммы отключения электродвигателя 500 Вт
(канал коммутации 1 сверху, канал коммутации 2 снизу)

Цель испытаний – в результате наработки «на отказ» сравнить рабочий ресурс КЭ ЭР в рамках предложенного способа коммутации (симистор в совокупности с электромеханическим реле) с ресурсом КЭ ЭР в рамках существующего способа коммутации (только ЭР).

Для этого в интерфейсе пользователя управляющей программы ЭИУ (рисунок 4.4) были заданы следующие параметры: «Период вкл/выкл» – 2 с, «Таймаут вкл реле» – 100 мс. Также, был активирован автоматический режим работы, после чего произведен запуск работы ЭИУ.

Основанием для завершения работы соответствующего канала коммутации являлся выход из строя КЭ данного канала коммутации. При этом испытания по функционирующим каналам продолжались. В результате экспериментального исследования наработки «на отказ» были получены данные, которые приведены ниже в таблице 4.1. В качестве нагрузок использовались электродвигатели 500 Вт.

Таблица 4.1 – Данные исследования наработки «на отказ»

Способ коммутации	Канал коммутации	Наработанный ресурс
Стандартный способ (только ЭР)	Канал – 1	120 345
	Канал – 3	131 487
Предложенный способ (ЭР + симистор)	Канал – 2	>258 963
	Канал – 4	>258 964

По результату наработки «на отказ» электромеханические реле каналов 1 и 3 (классический способ коммутации) выработали свой ресурс после 120 000 и 130 000 срабатываний соответственно. При этом реле каналов 2 и 4 (разработанный способ коммутации) продолжили свою работу и после 250 000 срабатываний. Для каналов 2 и 4 экспериментальные исследования были прекращены до отказа КЭ ЭР, поскольку уже на данном этапе можно сделать вывод о двукратном увеличении срока службы КЭ в рамках предложенного способа коммутации.

По завершению работы ЭИУ были изучены контакты реле под микроскопом (рисунок 4.12) и сделан вывод о том, что контакты реле при классическом способе коммутации подверглись значительной эрозии в результате их искрения и воз-

никновения электрической дуги, а контакты реле при разработанном способе коммутации сохранили чистоту поверхности.

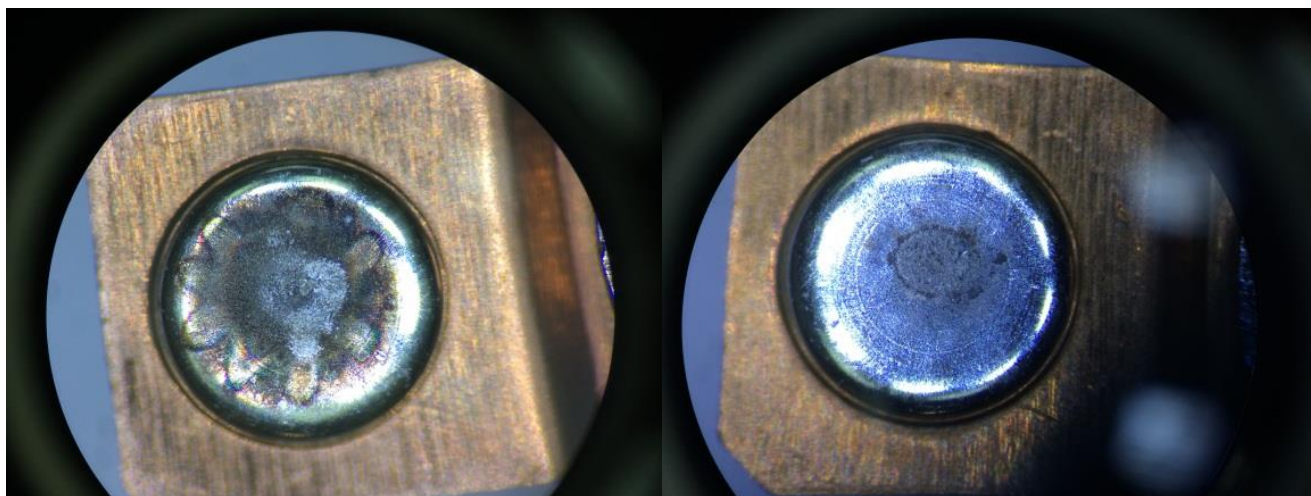


Рисунок 4.12 – Контакты реле при классической схеме включения (слева) и при разработанном способе коммутации (справа)

Как видно из фотографий, представленных на рисунке 4.12, контакты электромеханического реле при работе в рамках разработанного способа коммутации практически не подверглись эрозии, что свидетельствует об отсутствии искрового эффекта и образования электрической дуги. Таким образом, не только увеличивается ресурс работы КЭ, но и снижаются риски выхода из строя подключаемого в качестве нагрузки электрооборудования.

4.2 Работа сети с самоорганизующейся топологией

Для проведения испытаний отказоустойчивости канала управления были изготовлены опытные образцы беспроводных коммутаторов электрической нагрузки в количестве 10 штук (рисунки 4.13, 4.14), а также разработано серверное программное обеспечение, которое наглядно демонстрирует карту топологии беспроводной Wi-Fi MESH-сети и передаваемые в рамках работы системы управления данные (рисунок 4.17).

На рисунке 4.13 показан общий вид изготовленного опытного образца беспроводного коммутатора электрической нагрузки без верхней крышки корпуса. Группа входных и выходных контактов (позиция 1) предназначена для подключения кабелей электрической сети и электрической нагрузки. При этом сами клемм-

ники изготовлены из полиамида PA66 (модификация UL94V-0), температурный режим от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$, краткосрочно – до $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Материал обладает стойкостью к растрескиванию и высоким динамическим нагрузкам. Пружинный зажим надежно фиксирует провод, обеспечивает защиту от вибрации и вырывания. Полупроводниковый симистор (позиция 2) служит для подключения или отключения электрической нагрузки в момент перехода фазы через нулевую отметку или по значению уровня силы тока в нагрузке. Контактное реле (позиция 3) замыкается или размыкается после активации или перед деактивацией симистора, при этом электрический ток проходит через реле, тем самым предотвращается нагрев симистора. Тактовая кнопка (позиция 4) предназначена для выполнения сервисных операций с устройством, а светодиод (позиция 5) служит для индикации текущего режима работы коммутатора. Предохранитель (позиция 6) предназначен для защиты устройств от перегрузок в электрической сети.

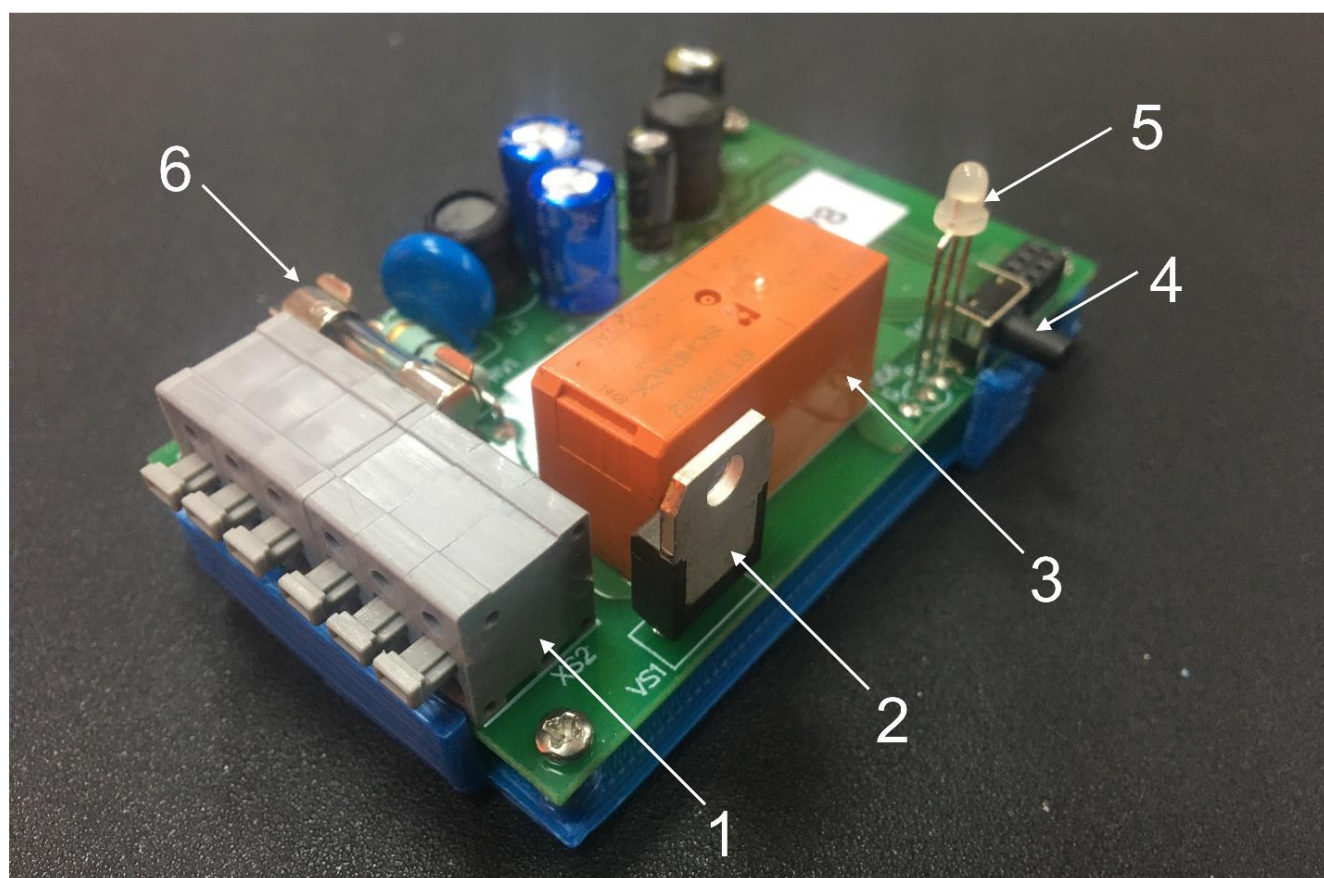


Рисунок 4.13 – Беспроводной коммутатор электрической нагрузки

На обратной стороне печатной платы опытного образца беспроводного коммутатора электрической нагрузки расположен Wi-Fi модуль ESP32-WROOM-

32D (рисунок 4.14), который обеспечивает построение MESH-сети между устройствами. Этот же модуль выполняет и роль управляющего микроконтроллера для всего устройства в целом за счет наличия достаточного объема свободной памяти (управление процессом коммутации электрической нагрузки и обработки электротехнической информации сети – значение напряжения и потребляемой нагрузкой мощности). Wi-Fi-модуль выполнен на базе двухъядерного чипсета ESP32-D0WD, с регулируемой частотой от 80 МГц до 240 МГц, возможностью индивидуального управления и питания. Модуль выполнен в форм-факторе $18\pm 0,2 \times 25,5\pm 0,2 \times 3,1\pm 0,15$ мм и оснащён PCB-антенной. Имеется также возможность отключить процессор и использовать маломощный сопроцессор для постоянного контроля за изменениями или пересечением пороговых значений периферийных устройств. В представленный модуль встроена операционная система freeRTOS с LwIP; TLS 1.2 с аппаратным ускорением и поддерживается безопасный (зашифрованный) эфир (OTA).

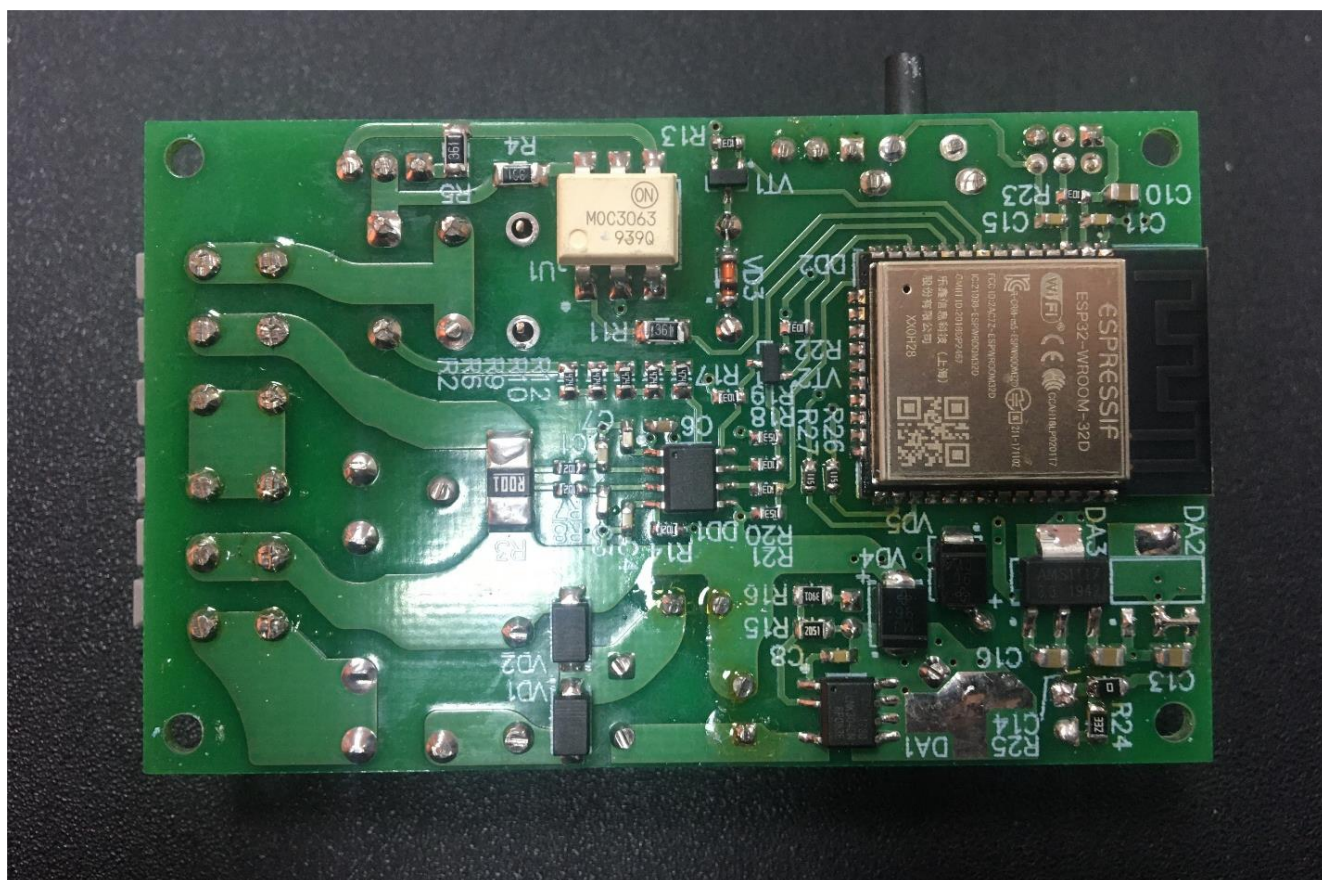


Рисунок 4.14 – Беспроводной коммутатор электрической нагрузки

На рисунке 4.15 представлены прототипы корпусных элементов опытного образца беспроводного коммутатора электрической нагрузки, которые были изготовлены методом 3D-печати. Корпус состоит из двух частей и выполнен из ABS-пластика. На нижнюю часть устанавливается печатная плата коммутатора, а верхняя часть служит как средство защиты от поражения электрическим током. Кроме того, в верхней крышке имеется отверстие под выход светодиода для обеспечения световой индикации режима работы устройства. Элементы корпуса соединяются между собой самонарезающими винтами.

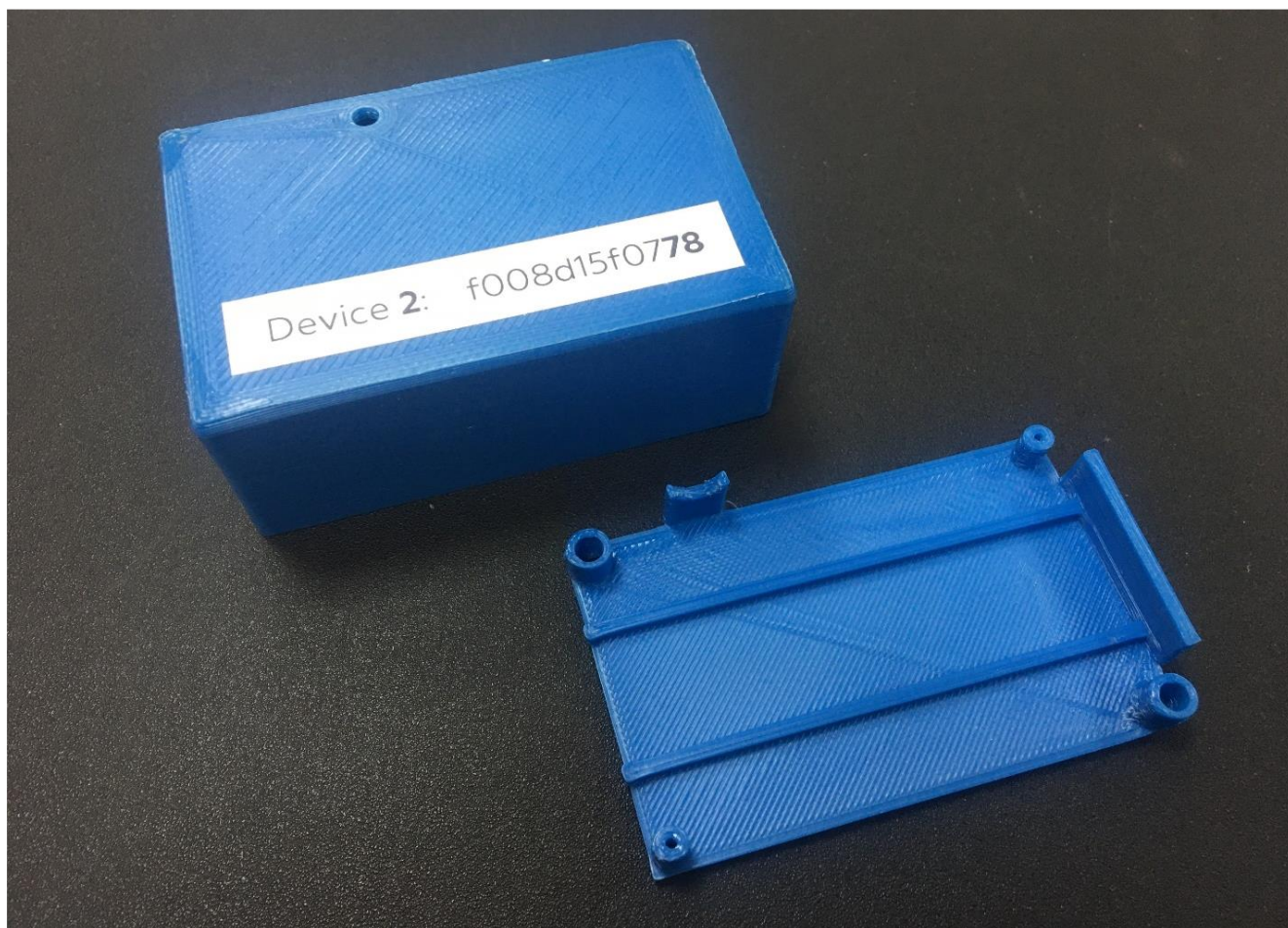


Рисунок 4.15 – Корпусные элементы опытного образца коммутатора

Каждому изготовленному опытному образцу беспроводного коммутатора электрической нагрузки был назначен сетевой адрес устройства. Перечень сетевых адресов устройств приведен в таблице 4.2.

Цель испытаний – определить возможности MESH-сети по увеличению зоны покрытия Wi-Fi сигнала в режиме адаптивной самоорганизующейся тополо-

гии, а также оценка надежности сети в разрезе вероятности отказа в зависимости от числа закрытых транзитов (построение графической зависимости).

Таблица 4.2 – Перечень сетевых адресов устройств

Имя устройства	Сетевой адрес
Device 1	f008d15f078c
Device 2	f008d15f0778
Device 3	f008d15f07b0
Device 4	f008d15f0730
Device 5	f008d15f07a8
Device 6	f008d15f07bc
Device 7	f008d15f07a0
Device 8	f008d15f0758
Device 9	f008d15f074c
Device 10	f008d15f077c

Для проведения экспериментальных исследований опытные образцы беспроводных коммутаторов электрической нагрузки были размещены внутри здания в условиях помещений, разделенных между собой стенами из кирпича. При этом зона покрытия единственного Wi-Fi роутера была существенно меньше, чем территория размещения опытных образцов для проведения исследования. Таким образом, нахождение устройства в зоне покрытия Wi-Fi роутера при проведении эксперимента не гарантировалось. Схема расположения опытных образцов с указанием линейных удалений приведена на рисунке 4.16.

Каждый опытный образец беспроводного коммутатора был подключен к сети питания и электрической нагрузке. При этом каждому опытному образцу были заранее переданы данные о Wi-Fi сети (название сети и пароль для доступа). После запуска управляющего серверного программного обеспечения (рисунок 4.17) отображается «дерево устройств» в виде карты MESH-сети с послойным разделением. Максимальное количество слоев для разработанной MESH-сети равно четырем (с учетом слоя отключенных устройств, которые недоступны управлению).

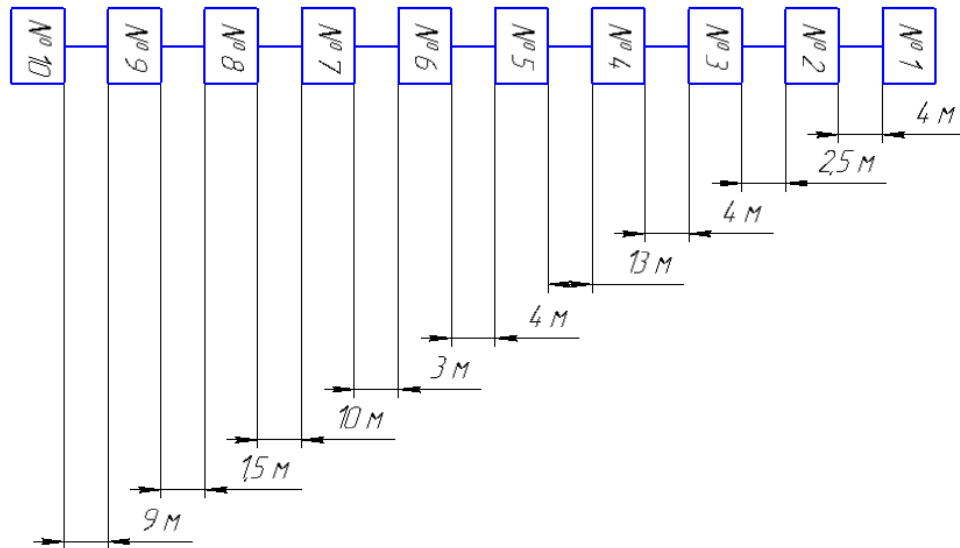


Рисунок 4.16 – Схема расположения опытных образцов



Рисунок 4.17 – Управляющее серверное программное обеспечение

Далее поочередно отключалось электропитание каждого из устройств и топология адаптивной сети адаптивно изменялась. Время самоорганизации MESH-сети (процесс «перевыборов») в среднем составляло 3 с для 10 устройств сети.

В случаях одиночного отключения элемента MESH-сети работа сети всегда восстанавливалась и отказов обнаружено не было. Для определения «живучести» сети установим вероятность отказа при отключении нескольких её элементов.

При отключении в произвольном порядке отдельных элементов MESH-сети производилась имитация нарастающих отказов в канале передачи данных и была построена экспериментальная таблица зависимости вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов (таблица 4.3), по данным которой была построена экспериментальная кривая, представленная на рисунке 4.18.

Таблица 4.3 – Вероятность соединения от числа закрытых транзитов

Закрыто транзитов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вероятность	0,98	0,97	0,96	0,92	0,80	0,58	0,44	0,31	0,22

Из графика, представленного на рисунке 4.18 видно, что при отказе большого количества узлов (элементов MESH-сети) связь будет восстановлена. Интервал времени, необходимый для восстановления процесса обмена данными, зависит от числа отключенных элементов MESH -сети.

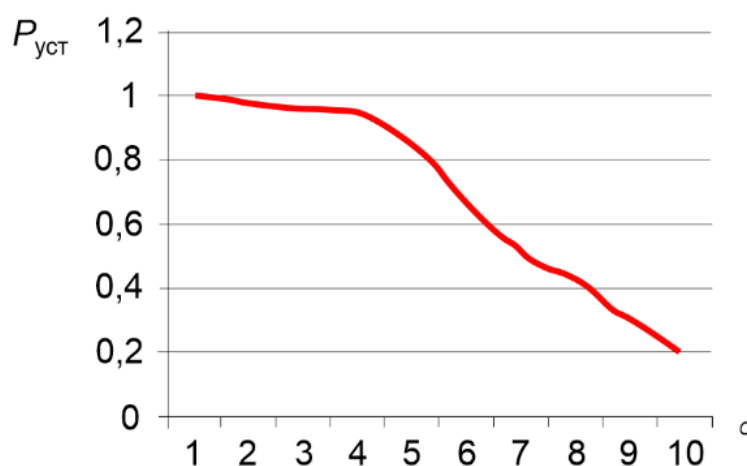


Рисунок 4.18 – Экспериментальная кривая зависимости вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов

При числе закрытых транзитов равном числу устройств MESH-сети (в условиях эксперимента – 10) вероятность установления соединения равна нулю, так как сеть перестает существовать.

По результатам данного экспериментального исследования было установлено, что между Wi-Fi роутером и конечным (самым удаленным) устройством № 10 расстояние составило 52 м. При этом напрямую с Wi-Fi роутером могли соединяться устройства, находящиеся только на расстоянии не более 20 м. Это обусловлено ограниченностью радиуса распространения Wi-Fi сигнала. MESH-сеть позволила обеспечить взаимодействие с устройствами, находящимися за пределами покрытия Wi-Fi сигнала. Таким образом, было определено, что MESH-сеть позволяет увеличивать дальность передачи между устройствами сети более, чем в 2,5 раза. Кроме того, было установлено, что MESH-сеть является децентрализованной сетью и может продолжать функционировать при отключении какого-либо из устройств. При этом изменение топологии MESH-сети происходило в автоматическом режиме без необходимости вмешательства пользователя.

4.3 Основные выводы по Главе 4

В результате проведенных экспериментальных сравнительных испытаний предложенного способа коммутации электрических нагрузок зданий и существующего способа (наиболее распространенного в настоящий момент), было подтверждено повышение надежности работы системы коммутации, а также увеличение ресурса работы контактной группы электромеханического реле при сохранении небольших габаритов конечного устройства коммутации.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено соответствие теоретических положений диссертационной работы в части надежности беспроводного канала связи для реализации алгоритма эффективного управления и передачи электротехнической информации.

Предложенный способ построения беспроводной сети передачи данных для адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания позволяет решить задачи по обеспечению надежности связи благодаря самоорганизации топологии сети, покрытию зон с размерами, превышающими дальность связи традиционных систем «точка-точка», обеспечивая при этом безопасность передачи данных за счет доступных технологий шифрования.

5 ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ

Оценка экономического эффекта от внедрения разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания проводилась в рамках опытной эксплуатации системы на одном из жилых зданий, расположенном в загородном поселке «Западный» Сосновского района Челябинской области (Клубный поселок «Твоя Привилегия»).

Описание объекта внедрения (демонстрационного объекта): жилая квартира типа «Студия + 2 спальни» общей площадью 57 м². Планировочное решение объекта внедрения представлено на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Планировочное решение объекта внедрения

В результате опытной эксплуатации в рамках демонстрационного объекта после внедрения разработанной системы было зафиксировано снижение ежемесячных расходов на оплату электроэнергии в помещении, то есть экономический эффект от внедрения.

Указанный экономический эффект был достигнут за счет более эффективного расходования энергетических ресурсов путем реализации функций удаленного мониторинга и управления, работы по сценариям и снижения влияния человеческого фактора, обеспечиваемых разработанной адаптивной системой управления энергосберегающими процессами здания.

5.1 Оценка экономического эффекта

Для оценки экономического эффекта от внедрения разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания было проведено сравнение ежемесячного расхода энергоресурса в рамках двух идентичных объектов – до внедрения системы и после внедрения. Длительность эксперимента составила 5 месяцев. Полученные данные представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Расходы на оплату электрической энергии

Статус внедрения системы	Тариф, руб. / кВт·ч	Средний расход энергоресурса, кВт·ч в мес.	Стоимость энергоресурса, руб. в мес.
До внедрения	3,47	145,00	503,15
После внедрения		102,00	353,94

Сокращение расходов на оплату электрической энергии после внедрения системы удаленного управления для демонстрационного объекта составило в месяц 149,21 руб. или в относительном выражении – 30 % (таблица 5.1).

Учитывая, что проект клубного поселка «Твоя Привилегия» предполагает строительство 200 000 м² жилья, то путем экстраполяции определим экономический эффект от внедрения в рамках поселка (формулы 5.1...5.2):

$$\Delta VC_{M^2} = \frac{\Delta VC_1}{S_1} = \frac{149,21 \text{ руб.}}{57 \text{ м}^2} = 2,62 \text{ руб./м}^2 \quad (5.1)$$

$$\Delta VC_{\text{ОБЩ}} = \Delta VC_{M^2} \cdot S_{\text{ОБЩ}} = 2,62 \frac{\text{руб.}}{\text{м}^2} \cdot 200\,000 \text{ м}^2 = 524\,000 \text{ руб.} \quad (5.2)$$

где ΔVC_{M^2} – размер экономического эффекта на 1 м² жилой площади, ΔVC_1 – размер экономического эффекта для демонстрационного объекта, S_1 – жилая площадь демонстрационного объекта, $\Delta VC_{\text{ОБЩ}}$ – размер экономического эффекта в рамках поселка, $S_{\text{ОБЩ}}$ – общая жилая площадь в рамках поселка.

Таким образом, размер экономического эффекта от внедрения адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания в рамках поселка приблизительно составит 524 000 руб. в месяц или 6,3 млн. руб. в год.

5.2 Оценка влияния на углеродный след

По данным Агентства защиты окружающей среды (США) 1 кВт·ч можно представить в виде 0,59 кг CO₂. Исходя из этого определим сокращение углеродного следа в месяц в результате внедрения адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания (формулы 5.3...5.5):

$$\Delta E_{M^2} = \frac{\Delta E_1}{S_1} = \frac{(145 - 102) \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{57 \text{ м}^2} = 0,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \quad (5.3)$$

$$\Delta E_{\text{ОБЩ}} = \Delta E_{M^2} \cdot S_{\text{ОБЩ}} = 0,75 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 200\,000 \text{ м}^2 = 150\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (5.4)$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,59 \text{ кг} \cdot \Delta E_{\text{ОБЩ}} = 0,59 \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \cdot 150\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 88\,500 \text{ кг} \quad (5.5)$$

где ΔE_{M^2} – размер энергетического эффекта на 1 м² жилой площади, ΔE_1 – размер энергетического эффекта для демонстрационного объекта, S_1 – жилая площадь демонстрационного объекта, $\Delta E_{\text{ОБЩ}}$ – размер энергетического эффекта в рамках поселка, $S_{\text{ОБЩ}}$ – общая жилая площадь в рамках поселка, V_{CO_2} – масса CO₂ в рамках углеродного следа.

Таким образом, размер эффекта в рамках углеродного следа от внедрения адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания в рамках поселка приблизительно составит 88,5 т CO₂ в месяц или 1 000 т CO₂ в год.

5.3 Оценка влияния ВИЭ на эффективность

В главе 1 был произведен расчет использования ВИЭ, а именно – солнечного модуля PSM4-150 на основе монокристаллического кремния. При этом суммарное значение выработки электроэнергии одним солнечным модулем составило 243 кВт·ч в год, что представляет собой 18 % от средней нагрузки одного жилого помещения в здании с адаптивной системой управления энергосберегающими процессами (1350 кВт·ч в год).

Таким образом, применение ВИЭ позволит дополнительно на 18 % повысить экономический эффект (до 7,4 млн. руб. в год) и сократить влияние на углеродный след (до 1 180 т CO₂ в год).

Использование даже одного модуля PSM4-150 в расчете на жилое помещение здания позволит полностью обеспечить его электрической энергией, необходимой для работы систем светодиодного освещения (58 % вырабатываемой электрической энергии). При этом оставшиеся 42 % генерируемой электрической энергии могут расходоваться на питание бытовых электрических приборов в моменты пиковой нагрузки на центральные сети электроснабжения (интервалы времени с 07:00 до 09:00 и с 17:00 до 20:00).

В таблице 5.2 представлена сравнительная характеристика энергетического, экономического и экологического эффектов от внедрения разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания с использованием ВИЭ в составе системы управления и без ВИЭ.

Таблица 5.2 – Сравнение эффектов от внедрения системы

Состав системы управления (СУ)	Энергетический эффект (в год), 10 ³ кВт·ч	Экономический эффект (в год), млн. руб.	Сокращение выбросов CO ₂ , (в год), т
СУ без ВИЭ	1 810	6,300	1 000
СУ с ВИЭ	2 140	7,400	1 180

Таким образом, применение беспроводных коммутаторов электрической нагрузки позволяет существенно сократить энергетические и финансовые затраты за счет обеспечения возможности удаленного мониторинга, управления, работы по сценариям и, как следствие, снижения человеческого фактора в процессе управления энергосберегающими процессами здания (на 30 %). А применение ВИЭ (в частности, солнечных энергоустановок) в составе разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания позволяет существенно повысить эффективность работы всей системы в целом (дополнительно на 18 %). При этом использование ВИЭ не только сокращает энергетические и, как следствие, финансовые затраты, но и существенно способствует сокращению влияния на углеродный след, так как является экологически чистым источником энергии, что является актуальной задачей настоящего времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационной работы была разработана адаптивная система управления энергосберегающими процессами здания с ВИЭ и сделаны следующие **выводы**:

1 Наиболее эффективным для загородных жилых комплексов на территории Челябинской области будет использование солнечных энергоустановок для питания части электропотребителей в зданиях. Использование модуля PSM4-150 в расчете на жилое помещение здания позволит полностью обеспечить его электрической энергией, необходимой для работы систем светодиодного освещения (58 % вырабатываемой электрической энергии). При этом оставшиеся 42 % генерируемой энергии могут расходоваться на питание бытовых электрических приборов в моменты пиковой нагрузки на центральные сети электроснабжения.

2 Разработан способ коммутации электрических нагрузок, который обладает повышенной надежностью и увеличенным сроком службы коммутирующего элемента при сохранении малых габаритов устройства коммутации. По результатам наработки «на отказ» разработанный способ показал более чем двукратное превышение ресурса коммутирующего элемента по сравнению с широко применяемыми в настоящее время (250 000 срабатываний против 125 000).

3 Разработанные принципы, средства управления и алгоритмы эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий повышают безопасность и эффективность эксплуатации систем. Предложенный способ построения беспроводной сети передачи данных позволяет решить задачи по обеспечению надежности связи благодаря самоорганизации топологии сети, покрытию зон с размерами, превышающими дальность связи традиционных систем «точка-точка», обеспечивая при этом безопасность передачи данных за счет доступных технологий шифрования.

4 Разработанная и изготовленная ЭИУ является уникальной, имеет практическую значимость и служит для проведения в автоматическом режиме испытаний на надежность коммутирующих элементов при работе на нагрузки различных типов. При этом благодаря многоканальности ЭИУ (4 независимых кана-

ла коммутации) возможно проведение наработки «на отказ» в режиме сравнения не только различных способов коммутации электрических нагрузок, но и в рамках одного способа – коммутационных элементов различных производителей.

5 В результате внедрения адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания был оценен экономический эффект. Величина сокращения электроэнергетических и, как следствие, финансовых затрат при эксплуатации жилых объектов составила 30 %, а именно – 6,3 млн. руб. в год. При этом влияние на углеродный след снизилось на 1 000 т выбросов CO₂ в атмосферу в год. Также произведен расчет использования ВИЭ, который показал возможность повышения экономического эффекта от внедрения дополнительно на 18 % (до 7,4 млн. руб. в год) и еще сократить углеродный след (до 1 180 т CO₂ в год).

Новизна решений разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания с возобновляемыми источниками энергии заключается в следующем:

1 Разработана децентрализованная адаптивная беспроводная сеть обмена электротехнической информацией внутри здания с самоорганизующейся топологией на базе технологии локальных сетей Wi-Fi (в отличие от существующих и широко распространенных в настоящее время – Bluetooth и ZigBee, требующих наличия дополнительного центрального шлюза управления).

2 Разработано встроенное программное обеспечение управляющего модуля на базе ESP32, реализующее одновременно измерение и обработку электротехнической информации, функционирование адаптивной беспроводной сети обмена данными с самоорганизующейся топологией, управление процессом коммутации усовершенствованным методом с реализацией временных задержек программными методами (без использования внешних пассивных элементов).

3 Модуль ESP32 с разработанным встроенным программным обеспечением может быть интегрирован в любое электротехническое устройство, расширяя его функциональные возможности в рамках технологии «интернета вещей».

4 Разработана и изготовлена экспериментальная исследовательская установка, позволяющая в автоматическом режиме проводить испытания различ-

ных способов коммутации электрических нагрузок произвольных типов на предмет наработки электромеханического реле «на отказ».

5 Произведена оценка эффективности внедрения в опытную эксплуатацию разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания в рамках расширенной методики по трем составляющим: энергетическая, экономическая и экологическая.

6 Произведена оценка эффективности использования возобновляемых источников энергии (в частности, солнечных энергоустановок) для одного из загородных поселков Челябинской области в рамках расширенной методики по трем составляющим: энергетическая, экономическая и экологическая.

Результаты работы показали необходимость дальнейшей разработки темы исследования в части создания эффективных алгоритмов автоматического управления электрическими нагрузками зданий по внешним параметрам системы.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования:

1 В будущем по теме работы планируется проведение исследования на предмет повышения эффективности адаптивной системы управления за счет разработки универсальных алгоритмов управления на основе искусственной нейронной сети с обучением по обратной связи.

2 Важным этапом в дальнейшей разработке темы исследования может стать усовершенствование методологии построения беспроводных сетей с самоорганизующейся топологией (MESH-сетей) и расширение ее применения на спецификации ZigBee и Bluetooth.

3 Для повышения эффективности работы адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания в условиях ограниченности энергетических ресурсов может быть разработан алгоритм классификации и приоритизации электрических нагрузок.

4 Планируется усовершенствование (оптимизация) конструкции беспроводных коммутаторов электрических нагрузок с целью сокращения габаритных размеров устройства (для размещения в установочных коробках).

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАХ – вольтамперная характеристика.

ВИЭ – возобновляемые источники энергии.

ВЭУ – ветроэнергетическая установка.

КПД – коэффициент полезного действия.

КЭ – коммутирующий элемент.

МК – микроконтроллер.

МПК – международная патентная классификация.

ПЛ – патентный ландшафт.

ПО – программное обеспечение.

РЗМКП – Рязанский завод металлокерамических приборов.

СУ – система управления.

СЭ – солнечный элемент.

ЭДС – электродвижущая сила.

ЭИУ – экспериментальная исследовательская установка.

ЭР – электромеханическое реле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Лосаберидзе, Т.Л. Анализ тенденций развития рынка «Умных домов» в России / Т.Л. Лосаберидзе // Ученые записки ИСГЗ. – 2018. – Том 16, № 1. – С. 332-335.
- 2 Assessing the number of users who are excluded by domestic heating controls. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19397038.2010.491563> (дата обращения 12.12.2019).
- 3 How a high-tech home can make life easier for people with disabilities. URL: <https://www.smh.com.au/technology/how-a-hightech-home-can-make-life-easier-for-people-with-disabilities-20150404-1meh3o.html> (дата обращения 12.12.2019).
- 4 Home Automation: From the Basement to the Cloud. URL: <https://blog.scoutalarm.com/post/139432428791/home-automation-from-the-basement-to-the-cloud> (дата обращения 12.12.2019).
- 5 A Q&A With SmartThings CEO Alex Hawkinson After Selling to Samsung for \$200M. URL: <https://techcrunch.com/2014/08/15/a-qa-with-smarthings-ceo-alex-hawkinson-after-selling-to-samsung-for-200m/> (дата обращения 12.12.2019).
- 6 «Яндекс» начинает продажи умной колонки «Яндекс.Станция». URL: <https://www.vedomosti.ru/technology/articles/2018/07/09/774975-yandeks-nachinaet-prodazhi-umnoi-kolonki> (дата обращения 18.12.2019).
- 7 Обзор умной колонки Яндекс Станция. Яндекс Станция – умная колонка с голосовым помощником Алиса. URL: https://ai-news.ru/2019/11/obzor_umnoj_kolonki_yandeks_stanciyayandeks_stanciya_umnaya_kolonka_.html (дата обращения 18.12.2019).
- 8 Как я собираю умный дом с Алисой за копейки. Впечатления. URL: <https://www iPhones.ru/iNotes/ya-postroil-umnyu-dom-s-alisoy-za-kopeyki-vpечatleniya-06-25-2019> (дата обращения 18.12.2019).
- 9 Умный дом с Алисой – это просто и удобно. Наполните дом умными устройствами и управляйте ими с помощью голоса. URL: <https://yandex.ru/alice/smart-home> (дата обращения 15.12.2022).

10 Обзор умного дома «Яндекса»: скажите Алисе, что делать! URL: <https://3dnews.ru/989292/obzor-umnogo-doma-yandeksa-skagite-alise-chto-delat> (дата обращения 28.06.2019).

11 Лощина, Д.С. Анализ рынка Умных домов России / Д.С. Лощина // Университетская наука региону. Материалы VII ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета преподавателей, студентов и молодых ученых. – 2019. – С. 499-501.

12 WIPO Patent Landscape Reports. URL: http://www.wipo.int/patentscope/en/programs/patent_landscapes (дата обращения 30.06.2020).

13 Suzuki Shin-Ichiro Introduction to Patent Map Analysis [Book]. – [s.l.]: Japan Patent Office Asia-Pacific Industrial Property Center, – 2011. – Vol. III.

14 European Patent Office. URL: <http://www.epo.org/about-us/organisation/member-states.html> (дата обращения 30.06.2020).

15 WIPO Patent Landscape Reports. URL: <http://www.wipo.int/classifications/ipc/ru/> (дата обращения 30.06.2020).

16 Игами, М. Современное состояние сферы нанотехнологий: Анализ патентов / М. Игами, Т. Оказаки. – Форсайт, – 2008. № 4 (8). – С. 22-31.

17 Патент № US7904187B2, 08.03.2011, HOFFBERG STEVEN M; HOFFBERGBORGHESANI LINDA I, Internet appliance system and method.

18 Патент № US7966078B2, 21.06.2011, HOFFBERG STEVEN; HOFFBERGBORGHESANI LINDA, Network media appliance system and method.

19 Патент № US8539567B1, 17.09.2013, NEST LAB INC (US), Multi-tiered authentication methods for facilitating communications amongst smart home devices and cloud-based servers.

20 Патент № US2006200259A1, 07.09.2006, HOFFBERG STEVEN M; HOFFBERGBORGHESANI LINDA I, Network media appliance system and method.

21 Патент № US9960929B2, 01.05.2018, GOOGLE LLC (US), Environmental sensing with a doorbell at a smart-home.

22 Патент № US8594850B1, 26.11.2013, NEST LAB INC (US), Updating control software on a network-connected HVAC controller.

23 Патент № CN103001840A, 27.03.2013, WUXI JINTIANYANG LASTER ELECTRONIC CO LTD, Method and device for internet of things of intelligent home.

24 Патент № WO2014047501A1, 27.03.2014, NEST LAB INC (US), DEVICES, METHODS, AND ASSOCIATED INFORMATION PROCESSING FOR THE SMART-SENSORED HOME.

25 Патент № US9237141B2, 12.01.2016, GOOGLE INC (US), Multi-tiered authentication methods for facilitating communications amongst smart home devices and cloud-based servers.

26 Патент № US10453098B2, 22.10.2019, GOOGLE LLC (US), Privacy-aware personalized content for the smart home.

27 Патент № US8583263B2, 12.11.2013, HOFFBERG STEVEN M (US); HOFFBERGBORGHESANI LINDA I (US), Internet appliance system and method.

28 Патент № US8988232B1, 24.03.2015, GOOGLE INC (US), Smart-home hazard detector providing useful follow up communications to detection events.

29 Патент № US2015097678A1, 09.04.2015, GOOGLE INC (US), SMART-HOME HAZARD DETECTOR PROVIDING USEFUL FOLLOW UP COMMUNICATIONS TO DETECTION EVENTS.

30 Патент № US2011167110A1, 07.07.2011, HOFFBERG STEVEN M; HOFFBERGBORGHESANI LINDA I, INTERNET APPLIANCE SYSTEM AND METHOD.

31 Патент № US9600645B2, 21.03.2017, GOOGLE INC (US), Smart invitation handling at a smart-home.

32 Патент № US2015109104A1, 23.04.2015, GOOGLE INC (US), SMART INVITATION HANDLING AT A SMART-HOME.

33 Патент № US2015156030A1, 04.06.2015, GOOGLE INC (US), HANDLING SPECIFIC VISITOR BEHAVIOR AT AN ENTRYWAY TO A SMART-HOME.

34 Патент № US9652912B2, 16.05.2017, GOOGLE INC (US), Secure handling of unsupervised package drop off at a smart-home.

35 Патент № US9298197B2, 29.03.2016, GOOGLE INC (US); NEST LAB INC (US), Automated adjustment of an HVAC schedule for resource conservation.

36 Патент № US2015145643A1, 28.05.2015, GOOGLE INC (US), SECURE HANDLING OF UNSUPERVISED PACKAGE DROP OFF AT A SMART-HOME.

37 Патент № US2015127712A1, 07.05.2015, GOOGLE INC (US), HANDLING SECURITY SERVICES VISITOR AT A SMART-HOME.

38 Патент № US2014316584A1, 23.10.2014, NEST LAB INC (US), AUTOMATED ADJUSTMENT OF AN HVAC SCHEDULE FOR RESOURCE CONSERVATION.

39 Патент № US9860965B2, 02.01.2018, WIRELESS ENV LLC (US), Cloud connected lighting system.

40 Патент № US2017223807A1, 03.08.2017, WIRELESS ENV LLC (US), CLOUD CONNECTED LIGHTING SYSTEM.

41 Патент № US6895985B2, 24.05.2005, COMPUTERIZED SMART FAUCET LTD (IL), Smart device and system for improved domestic use and saving of water.

42 Патент № US2015112885A1, 23.04.2015, GOOGLE INC (US), LIMITED ACCESS INVITATION HANDLING AT A SMART-HOME.

43 Патент № US10510035B2, 17.12.2019, GOOGLE LLC (US), Limited access invitation handling at a smart-home.

44 Патент № US2016314782A1, 27.10.2016, GOOGLE INC (US), CUSTOMIZING SPEECH-RECOGNITION DICTIONARIES IN A SMART-HOME ENVIRONMENT.

45 Патент № US2015372832A1, 24.12.2015, GOOGLE INC (US), METHODS AND APPARATUS FOR EXPLOITING INTERFACES SMART ENVIRONMENT DEVICE APPLICATION PROGRAM INTERFACES.

46 Патент № US10079012B2, 18.09.2018, GOOGLE LLC (US), Customizing speech-recognition dictionaries in a smart-home environment.

47 Акоев, М.А. Руководство по наукометрии: индикаторы развития науки и технологии / М.А. Акоев. // Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. – 2014. – С. 250.

48 Патент № CN101621854A, 06.01.2010, SHANDONG JIANZHU UNIV, Intelligent dwelling environment integrated system based on wireless sensor network.

49 Патент № CN103596294A, 19.02.2014, JILIN UNIV, Smart home wireless sensor network based on ZigBee.

50 Патент № CN101309297A, 19.11.2008, NANJING UNIV OF POSTS TELECOMMUNICATIONS (CN), Multi-type appliance control method based on multimedia wireless sensor network.

51 Патент № CN101309297B, 11.04.2012, NANJING UNIV OF POSTS TELECOMMUNICATIONS, Multi-type appliance control method based on multimedia wireless sensor network.

52 Патент № CN100556001C, 28.10.2009, UNIV OF SCIENCE TECHNOLOGY BEIJING (CN), Mobile sensor network routing method based on region gradient updating.

53 Патент № CN101784132A, 21.07.2010, BEIJING CLESUN SCIENCE TECHN, Wireless sensor network gateway equipment supporting Zigbee protocol and GPRS communication standard.

54 Патент № CN103760849A, 30.04.2014, DATANG TELECOM TIANJIN TECHNOLOGY SERVICE CO LTD, Home monitoring and controlling system based on wireless sensor network.

55 Патент № CN107168094A, 15.09.2017, WUZHOU JINGERPU TRADE CO LTD, Intelligent home system with energy saving effect.

56 Патент № CN202918322U, 01.05.2013, ZHEJIANG NORMAL UNIV, Smart home monitoring system based on wireless sensor network.

57 Патент № CN204832803U, 02.12.2015, SUZHOU LANGHENG ELECTRONIC CO LTD, Smart home systems based on wireless sensor network.

58 Патент № EP2575324A1, 03.04.2013, DEUTSCHE TELEKOM AG (DE); UNIV BERLIN TECH (DE), A distributed operating system for sensor transparency.

- 59 Патент № CN105045238A, 11.11.2015, UNIV XUCHANG, Intelligent home furnishing sleep system.
- 60 Патент № CN107065809A, 18.08.2017, SHENZHEN ZHONGLI ELECTRIC POWER TECH CO LTD, Smart home system based on wireless sensor network.
- 61 Патент № CN107168093A, 15.09.2017, WUZHOU JINGERPU TRADE CO LTD, Smart home device control system.
- 62 Патент № CN107450344A, 08.12.2017, SHENZHEN XINHUIDA MACHINERY DESIGN CO LTD, Smart home system based on wireless sensor network.
- 63 Патент № CN205670369U, 02.11.2016, UNIV ANHUI SCIENCE TECH, Intelligence house alarm system based on ZigBee wireless sensor network technique.
- 64 Патент № CN206002869U, 08.03.2017, TERMINUS BEIJING TECH CO LTD, Intelligent housing system based on wireless sensor network.
- 65 Патент № CN101801034B, 27.01.2012, NO 61 INST OF HEADQUARTERS OF GENERAL STAFF OF PLA; XIDIAN UNIV, Service-guaranteeing fast switching method of wireless sensor network.
- 66 Патент № CN205193466U, 27.04.2016, XIAN UNIV OF ARCH TECH, Home systems' gateway peripheral circuit and this home systems based on ARM and ZigBee.
- 67 Патент № CN103631238A, 12.03.2014, HAIERSOFT CORP, Novel smart home system.
- 68 Патент № CN106094774A, 09.11.2016, CHENGDU CHUANGNIAN TECH CO LTD, Remote smart home wireless monitoring system.
- 69 Патент № CN107171914A, 15.09.2017, WUZHOU JINGERPU TRADE CO LTD, Intelligent home appliance safe and energy-saving control system.
- 70 Патент № CN107229268A, 03.10.2017, SHENZHEN YIXIN INTELLIGENT TECH CO LTD, Wireless sensor network-based intelligent home system.
- 71 Патент № CN101801034A, 11.09.2010, NO 61 INST OF HEADQUARTERS OF GENERAL STAFF OF PLA; XIDIAN UNIV, Service-guaranteeing fast switching method of wireless sensor network.

72 Патент № CN107450343A, 08.12.2017, SHENZHEN SHENGDA MACHINERY DESIGN CO LTD, Smart home wireless control system.

73 Патент № CN202998494U, 12.06.2013, JIANGSU MARITIME INST, Intelligent-household wireless sensor network node.

74 Патент № CN204759188U, 11.11.2015, UNIV XUCHANG, Intelligence house sleep system.

75 Патент № CN205405107U, 27.07.2016, LI MENGNING, Intelligent housing system based on wireless sensor network.

76 Патент № KR101187874B1, 05.10.2012, KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY (KR), Diagnose and treatment system for home appliances using movable robot.

77 Патент № KR20120076628A, 09.07.2012, KOREA IND TECH INST (KR), Diagnose and treatment system for home appliances using movable robot.

78 Патент № WO2016022017A4, 31.03.2016, BNETWORKS SDN BHD (MY), Universal control platform for wireless sensor networks.

79 Патент № CN106157568A, 23.11.2016, TIANJIN ZHILIAN HONGSHUN SECURITY PROT SCIENCE TECH CO LTD, Novel smart home security wireless alarm system.

80 Патент № CN107065809B, 19.02.2019, SHENZHEN WANJIAAN INTELLIGENT TECHNOLOGY CO LTD (SHENZHEN CITY, CN), A kind of smart home system based on wireless sensor network.

81 Патент № CN107395470A, 24.11.2017, WUZHOU JINGERPU TRADE CO LTD, Smart home management and control system.

82 Патент № CN107395471A, 24.11.2017, WUZHOU JINGERPU TRADE CO LTD, Smart home energy-saving control system.

83 Патент № CN107481473A, 15.12.2017, QUZHOU HAIXI ELECTRONIC TECH CO LTD; UNIV QUZHOU, Design of smart home security system based on wireless sensor network.

84 Патент № CN107770751A, 06.03.2018, SHENZHEN SHENGDA MACHINERY DESIGN CO LTD, Smart home environment monitoring system.

85 Патент № CN203250209U, 23.10.2013, SHENZHEN ZSZ CONSTRUCTION GROUP CO LTD, Intelligent household environment monitoring system for modern buildings.

86 Патент № CN107272434A, 20.10.2017, WUZHOU JINGERPU TRADE CO LTD, Environment-based intelligent home appliance energy-saving control system.

87 Патент № CN107360070A, 17.11.2017, ZHANG QUNHUI, Smart home environment monitoring system based on wireless sensor network.

88 Патент № CN107612797A, 19.01.2018, GONG TUTING, Intelligent home system.

89 Патент № CN107733752A, 23.02.2018, WEI CAIXIA, Smart home system.

90 Патент № CN108255068A, 06.07.2018, CHENGDU GANGSHANGHUA INFORMATION TECH CO LTD, Smart home control system based on cloud computing platform.

91 Патент № CN108427299A, 21.08.2018, SHENZHEN WANZHI LIANHE TECH CO LTD, Intelligent home system based on blockchain technology.

92 Патент № CN108507123A, 07.09.2018, SHENZHEN KAIDATONG OPTOELECTRONICS TECH CO LTD, Smart home system with environment adjusting function.

93 Патент № CN204496764U, 22.07.2015, CHENGDU VOCATIONAL COLLEGE OF AGRICULTURAL SCIENCE TECHNOLOGY, Internet of Things comprehensive practical training platform for vocational colleges.

94 Патент № CN204515972U, 29.07.2015, NANJING UNIV OF POSTS TELECOMMUNICATIONS, Intelligent household security device based on wireless sensor network.

95 Патент № CN205049873U, 24.02.2016, CHONGQING VOCATIONAL INST ENG, Smart home systems based on wireless sensor network.

96 Патент № CN205139590U, 06.04.2016, TIANJIN CHUANGTAI TECH CO LTD, Smart home systems based on wireless internet of things of ZigBee.

- 97 Патент № WO2016022017A1, 11.02.2016, BNETWORKS SDN BHD (MY), Universal control platform for wireless sensor networks.
- 98 Безруких, П.П. Возобновляемая энергетика: вчера, сегодня, завтра / Электрические станции. – 2005. № 2. – С. 35 – 47.
- 99 Саплин, Л.А. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников: учебное пособие / Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина, Ю.П. Ильин // под ред. Л.А. Саплина – ЧГАУ. – 2000. – 194 с.
- 100 Велькин, В.И. Энергоснабжение удаленного объекта на основе оптимизации кластера ВИЭ: монография – Екатеринбург: УрФУ, – 2013. – 100 с.
- 101 Безруких, П.П. Экономика возобновляемой энергетики / Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. № 10. – С. 2–6.
- 102 Кирпичникова, И.М. Системы управления электрическими нагрузками на базе беспроводных сетей с самоорганизующейся топологией / И.М. Кирпичникова, А.Ю. Усков, А.И. Цимбол // Энергобезопасность и энергосбережение. – Вып. 2. – 2020. – С. 10-15.
- 103 Кирпичникова, И.М. Повышение качества регулирования систем электроотопления / И.М. Кирпичникова, Е.Л. Файда, А.Ю. Усков, Т.Ю. Никонова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – Вып. 18. – № 37 (296). – 2012. – С. 87-89.
- 104 Усков, А.Ю. Применение адаптивных алгоритмов управления в системах электрического отопления зданий / А.Ю. Усков, А.И. Цимбол // Научно-технический журнал «Электротехнические комплексы и системы управления» – Выпуск № 3 (39). – 2015. – С. 10-16.
- 105 Lokhov, S.P. An Adaptive Control System of Electric Heating for Residential Premises / S.P. Lokhov, E.L. Faida, V.V. Varganov, A.Y. Uskov // Russian Electrical Engineering – Vol. 85, № 4, – 2014. – P. 198-201.
- 106 Патент № 2733487 РФ, 27.03.2020, Усков А.Ю.; Сироткин Е.А.; Цимбол А.И.; Ускова Н.В., патентообладатель: ООО «Инсмартавтоматика», Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки.

107 Патент № 209794 РФ, 31.03.2021, Усков А.Ю.; Сироткин Е.А.; Ускова Н.В., патентообладатель: ООО «Инсмартавтоматика», Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки высокой мощности.

108 РСТ заявка № РСТ/RU2021/050079, Усков А.Ю.; Сироткин Е.А.; Цимбол А.И.; Ускова Н.В., патентообладатель: ООО «Инсмартавтоматика», Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки.

109 Твердотельное реле против электромеханики: что выбрать? URL: <https://zen.yandex.ru/media/elektrik/tverdotelnoe-rele-protiv-elektromehaniki-cto-vybrat-5b9a801f02e24b00aa69df79> (дата обращения 12.12.2019).

110 Раннев, Г.Г. Мощные электромагнитные реле. Справочник инженера / Г.Г. Раннев, В.А. Суругина, В.И. Калашников // – 2001. – 152 с.

111 Курилин, С.Л. Электротехнические материалы и технология электро-монтажных работ. Учебно-методическое пособие / С.Л. Курилин // – 2009. – 92 с.

112 Kirpichnikova, I.M. Improved Method of Electrical Loads Switching / I.M. Kirpichnikova, A.Yu. Uskov, A.I. Tsimbol // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020 – 2020. – P. 9112087.

113 Чумаков, А.В. Теоретические основы электротехники. Базовый конспект лекций. / А.В. Чумаков, В.С. Илюшин. – Тульский государственный университет, – 2000. – 160 с.

114 Евсеев, Ю.А. Симисторы и их применение в бытовой электроаппаратуре. / Ю.А. Евсеев, С.С. Крылов. – Москва, – 1990. – 120 с.

115 T1610, T1635, T1650, BTA16, BTV16. STMicroelectronics, 2018. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta16.pdf> (дата обращения 30.10.2019).

116 МОС3061М, МОС3062М, МОС3063М, МОС3162М, МОС3163М 6-Pin DIP Zero-Cross Phototriac Driver Optocoupler (600 Volt Peak). Fairchild Semiconductor Corporation, 2010. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1688212.pdf> (дата обращения 30.10.2019).

117 IR Application Notes: Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. AN-944. IGBT High speed Duo Pack: IGBT in

Trench and Field stop technology with soft, fast recovery anti-parallel diode. Infineon, 2014. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea (дата обращения 30.10.2019).

118 Maximizing the Life Span of Your Relays. Keysight Technologies. Application Note. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-6917EN.pdf> (дата обращения 30.10.2019).

119 PCB Relay RT1. General Purpose Relays. PCB Relays. DataSheet. Tyco Electronics Corporation, 2019. URL: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_RT1_0219.pdf%7F9-1393239-8 (дата обращения 30.10.2019).

120 Электрическая дуга в высоковольтных выключателях. Методы ее гашения. Все об электростанциях. URL: http://www.gigavat.com/viklyuchateli_elektricheskaya_duga.php (дата обращения 30.10.2019).

121 Сапожников, В.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта. / В.В. Сапожников, Ю.А. Кравцов, В.В. Сапожников. – ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», – 2008. – 394 с.

122 Кривандин, С. Мощные контакторы Omron для энергетики, промышленности и транспорта / С. Кривандин. – Электронные компоненты, – 2007. – № 11. – С. 36-40.

123 Uskov, A.Yu. An Adaptive Control System of Electric Heating for Residential Premises / A.Yu. Uskov, S.P. Lokhov, E.L. Faida, V.V. Varganov // Russian Electrical Engineering. – Vol. 85, – No 4, –2014. – P 198-201.

124 E. Al-Hassan, H. Shareef, Md. M. Islam, A. Wahyudie and A.A. Abdrabou, «Improved Smart Power Socket for Monitoring and Controlling Electrical Home Appliances», – IEEE Access, – Vol. 6, – P. 49292–49305 (дата обращения 05.09.2018).

125 A. Khalid, N. Javaid, M. Guizani, M. Alhussein, Kh. Aurangzeb et al., «Towards Dynamic Coordination Among Home Appliances Using Multi-Objective Energy Optimization for Demand Side Management in Smart Buildings», – IEEE Access,

– Topic: Energy Management in Buildings, – Vol. 6, – P. 19509–19529 (дата обращения 09.01.2018).

126 В. Hussain, Q. Ul Hasan, N. Javaid, M. Guizani, A. Almogren et al., «An Innovative Heuristic Algorithm for IoT-Enabled Smart Homes for Developing Countries», – IEEE Access, – Topic: Convergence of Sensor Networks, Cloud Computing, and Big Data in Industrial Internet of Thing, – Vol. 6, – P. 15550–15575 (дата обращения 27.02.2018).

127 Н. Kikusato, K. Mori, Sh. Yoshizawa, Yu Fujimoto, H. Asano et al., «Electric Vehicle Charge–Discharge Management for Utilization of Photovoltaic by Coordination Between Home and Grid Energy Management Systems», – IEEE Transactions on Smart Grid, – Vol. 10, – P. 3186–3197 (дата обращения 13.05.2019).

128 Т. Molla, В. Khan, В. Moges, Н. Н. Alhelou, R. Zamani et al., «Integrated optimization of smart home appliances with cost-effective energy management system», – CSEE Journal of Power and Energy Systems, – Vol. 5, – P. 249–258 (дата обращения 20.01.2019).

129 Валявский, Ю.П. Электромонтаж в «Умном доме» / Ю.П. Валявский // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2006. – № 4. – С. 28–37.

130 Kirpichnikova, I.M. Electrical Load Control Systems Based on Wireless Data Networks with Self-Organizing Topology / I.M. Kirpichnikova, A.Yu. Uskov, A.I. Tsimbol // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. – Том 20, № 1. – 2020. – С. 85-93.

131 Дядюнов, А.Н. Определение зон распространения сигнала беспроводной локальной сети / А.Н. Дядюнов, А.Р. Кадырбаева // UNIVERSUM: Технические науки. – 2017. – № 7(40). – С. 18–23.

132 Стандарт IEEE 802.15.4. URL: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> (дата обращения 02.03.2020).

133 Гусс, С.В. Самоорганизующиеся MESH-сети для частного использования / С.В. Гусс // Математические структуры и моделирование – 2016. – № 4(40). – С. 102–115.

- 134 About Z-Wave Technology. URL: https://z-wavealliance.org/about_z-wave_technology/ (дата обращения 02.03.2020).
- 135 Стандарт IEEE 802.15.1. URL: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html> (дата обращения 02.03.2020).
- 136 Григорьев, В.А. Сети и системы радиодоступа / В.А. Григорьев, О.И. Лагутенко, Ю.А. Распаев // – ЭкоТрендз. – 2005. – 384 с.
- 137 Протокол ESP-MESH. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/api-guides/mesh.html> (дата обращения 02.03.2020).
- 138 ZigBee VS Thread: Технологии построения беспроводных MESH-сетей URL: <https://www.compel.ru/lib/92808> (дата обращения 02.03.2020).
- 139 Плата ESP32-DEVKITC. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/hw-reference/get-started-devkitc-v2.html> (дата обращения 02.03.2020).
- 140 Татарникова, Т.М. Аналитико-статистическая модель оценки живучести сетей топологии MESH / Т.М. Татарникова // Информационно-управляющие системы. – 2017. – №1(86). – С. 17–22.
- 141 Патент № RU2298249C2, 14.07.2004, Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством», Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи.
- 142 Патент № RU2282265C2, 25.05.2004, Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт релестроения с опытным производством», Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи.
- 143 Патент № RU175437U1, 22.03.2017, Общество с ограниченной ответственностью «Булат», Управляемый Ethernet коммутатор.
- 144 Патент № RU2712415C1, 16.05.2019, Джус Илья Николаевич, Диодно-тиристорный коммутатор.
- 145 Патент № RU2482565C2, 02.02.2010, Элленбергер Унд Поенсен ГмбХ, Разъединитель для гальванического прерывания постоянного тока.

146 Патент № RU2668986C1, 09.12.2014, Итон Электрикал АйПи ГмбХ Унд Ко. Кг Переключающее устройство для проведения и прерывания электрических токов.

147 Патент № RU2602086C1, 27.10.2015, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Устройство регулирования напряжения и передаваемой мощности электрической сети.

148 Патент № RU2648564C1, 25.05.2017, Общество с ограниченной ответственностью «Новэлект», Способ и система для управления устройствами и контроля устройств.

149 Патент № RU2636749C2, 11.05.2016, Дельта Электроникс, Инк., Силовой преобразователь и способ его работы.

150 Патент № RU2497274C1, 28.02.2012, Горохов-Мирошников Евгений Эдуардович, Формирователь импульсов энергии с использованием металлооксидных варисторов.

151 Патент № RU2712415C1, 16.05.2019, Джус Илья Николаевич, Диодно-тиристорный коммутатор.

152 Патент № RU183511U1, 30.11.2017, Общество с ограниченной ответственностью «Управление сложными системами», Корпус для умной Wi-Fi-розетки.

153 Патент № RU145549U1, 13.05.2014, Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Сибирский Арсенал», Прибор управления и охраны радиоканальный.

154 Патент № RU2638182C2, 16.04.2013, Смартсуич Пти Лтд., Программируемое устройство для управления электрооборудованием.

155 Патент № RU2711587C1, 16.08.2019, Панфилов Дмитрий Иванович; Асташев Михаил Георгиевич; Горчаков Александр Владимирович, Способ управления напряжением трансформатора под нагрузкой и устройство для его реализации.

156 Шведова, В.В. Исследование патентной чистоты объекта. Практическое пособие / В.В. Шведова // – ОАО ИНИЦ «Патент», – 2011. – 6 с.

157 Твердотельное реле против электромеханики: что выбрать? URL: <https://zen.yandex.ru/media/elektrik/tverdotelnoe-rele-protiv-elektromehaniki-chto-vybrat-5b9a801f02e24b00aa69df79> (дата обращения 05.03.2023).

158 Реле постоянного тока G9E от Omron – дугогасящая конструкция для расщепления силовых цепей. URL: <https://www.compel.ru/lib/54169> (дата обращения 05.03.2023).

159 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021610356 Российская Федерация. Встроенное программное обеспечение беспроводного устройства коммутации электрической нагрузки / Усков А.Ю., Сироткин Е.А., Ускова Н.В.; правообладатель: ООО «Инсмартавтоматика». – № 2020667307; заявл. 24.12.2020; опубли. 13.01.2021, Бюл. № 1.

160 Лохов, С.П. Адаптивная система управления электрическим отоплением жилых помещений / С.П. Лохов, Е.Л. Файда, В.В. Варганов, А.Ю. Усков, // Электротехника. – Вып. 4. – 2014. – С. 16-19.

161 Кирпичникова, И.М. Повышение качества регулирования систем электроотопления / И.М. Кирпичникова, Е.Л. Файда, А.Ю. Усков, Т.Ю. Никонова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – Вып. 18. – № 37 (296). – 2012. – С. 87-89.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Исходный код встроенного ПО коммутатора

```
#include "mdf_common.h"
#include "mesh_mqtt_handle.h"
#include "mwifi.h"
#include "nvs_flash.h"
#include "nvs.h"

#define MEMORY_DEBUG
#define LED_PIN 12
#define R_LED_PIN 4
#define G_LED_PIN 16
#define RELAY_PIN 32
#define TRIAC_PIN 33
#define BUTTON_PIN 5
#define HLW_SEL_PIN 27
#define HLW_CF_PIN 26
#define HLW_CF1_PIN 25

#define GPIO_INPUT_PIN_SEL ((1ULL<<BUTTON_PIN) |
(1ULL<<HLW_CF_PIN) | (1ULL<<HLW_CF1_PIN))
#define ESP_INTR_FLAG_DEFAULT 0

#define STORAGE_NAMESPACE "storage"

static const char *TAG = "mqtt_examples";

volatile float power_consumption = 0.0, frequency = 0.0;
int64_t prev_time = 0;
int8_t flag_load_en = 0;
float U = 220, I = 1.0, P = 0.22;

uint8_t tmp = 0, tmp1 = 0;
uint8_t CF_pulse_cnt = 0;
uint8_t CF1_pulse_cnt = 0;
int64_t CF1_prev_time = 0;

int32_t switch_counter = 0;

static xQueueHandle gpio_evt_queue = NULL;

esp_err_t save_switch_inf()
{
    nvs_handle my_handle;
    esp_err_t err;
```

```

err = nvs_open(STORAGE_NAMESPACE, NVS_READWRITE, &my_handle);
if (err != ESP_OK) return err;

err = nvs_get_i32(my_handle, "switch_counter", &switch_counter);
if (err != ESP_OK && err != ESP_ERR_NVS_NOT_FOUND) return err;

switch_counter++;
err = nvs_set_i32(my_handle, "switch_counter", switch_counter);
if (err != ESP_OK) return err;

err = nvs_commit(my_handle);
if (err != ESP_OK) return err;
nvs_close(my_handle);

err = nvs_open(STORAGE_NAMESPACE, NVS_READWRITE, &my_handle);
if (err != ESP_OK) return err;

int8_t tmp;
err = nvs_get_i8(my_handle, "switch_state", &tmp);
if (err != ESP_OK && err != ESP_ERR_NVS_NOT_FOUND) return err;

err = nvs_set_i8(my_handle, "switch_state", flag_load_en);
if (err != ESP_OK) return err;

err = nvs_commit(my_handle);
if (err != ESP_OK) return err;

nvs_close(my_handle);
return ESP_OK;
}

void root_write_task(void *arg)
{
    mdf_err_t ret = MDF_OK;
    char *data = NULL;
    size_t size = MWIFI_PAYLOAD_LEN;
    uint8_t src_addr[MWIFI_ADDR_LEN] = { 0x0 };
    mwifi_data_type_t data_type = { 0x0 };

    MDF_LOGI("Root write task is running");
    while (mwifi_is_connected() && esp_mesh_get_layer() == MESH_ROOT) {
        if (!mesh_mqtt_is_connect()) {
            vTaskDelay(500 / portTICK_RATE_MS);
            continue;
        }
    }
}

```

```

    ret = mwifi_root_read(src_addr, &data_type, &data, &size, portMAX_DELAY);
    MDF_ERROR_GOTO(ret != MDF_OK, MEM_FREE, "<%s> mwifi_root_read",
mdf_err_to_name(ret));

    ret = mesh_mqtt_write(src_addr, data, size, MESH_MQTT_DATA_JSON);

    MDF_ERROR_GOTO(ret != MDF_OK, MEM_FREE, "<%s>
mesh_mqtt_publish", mdf_err_to_name(ret));

MEM_FREE:
    MDF_FREE(data);
}

MDF_LOGW("Root write task is exit");
mesh_mqtt_stop();
vTaskDelete(NULL);
}

void root_read_task(void *arg)
{
    mdf_err_t ret = MDF_OK;

    MDF_LOGI("Root read task is running");

    while (mwifi_is_connected() && esp_mesh_get_layer() == MESH_ROOT) {
        if (!mesh_mqtt_is_connect()) {
            vTaskDelay(500 / portTICK_RATE_MS);
            continue;
        }

        mesh_mqtt_data_t *request = NULL;
        mwifi_data_type_t data_type = { 0x0 };

        ret = mesh_mqtt_read(&request, pdMS_TO_TICKS(500));

        if (ret != MDF_OK) {
            continue;
        }

        ret = mwifi_root_write(request->addrs_list, request->addrs_num, &data_type, re-
quest->data, request->size, true);
        MDF_ERROR_GOTO(ret != MDF_OK, MEM_FREE, "<%s> mwifi_root_write",
mdf_err_to_name(ret));

```

```

MEM_FREE:
    MDF_FREE(request->addrs_list);
    MDF_FREE(request->data);
    MDF_FREE(request);
}
MDF_LOGW("Root read task is exit");
mesh_mqtt_stop();
vTaskDelete(NULL);
}

static void node_read_task(void *arg)
{
    mdf_err_t ret = MDF_OK;
    char *data = MDF_MALLOC(MWIFI_PAYLOAD_LEN);
    size_t size = MWIFI_PAYLOAD_LEN;
    mwifi_data_type_t data_type = { 0x0 };
    uint8_t src_addr[MWIFI_ADDR_LEN] = { 0x0 };

    MDF_LOGI("Node read task is running");

    for (;;) {
        if (!mwifi_is_connected()) {
            vTaskDelay(500 / portTICK_RATE_MS);
            continue;
        }

        size = MWIFI_PAYLOAD_LEN;
        memset(data, 0, MWIFI_PAYLOAD_LEN);
        ret = mwifi_read(src_addr, &data_type, data, &size, portMAX_DELAY);
        MDF_ERROR_CONTINUE(ret != MDF_OK, "<%s> mwifi_read",
mdf_err_to_name(ret));
        MDF_LOGI("Node receive: " MACSTR ", size: %d, data: %s",
MAC2STR(src_addr), size, data);

        if(data[7] == 0x31)
        {
            gpio_set_level(LED_PIN, 1);
            gpio_set_level(R_LED_PIN, 1);
            gpio_set_level(G_LED_PIN, 1);
            gpio_set_level(TRIAC_PIN, 1);
            vTaskDelay(200 / portTICK_RATE_MS);
            gpio_set_level(RELAY_PIN, 1);
            flag_load_en = 1;
            save_switch_inf();
        }
    }
}

```

```

else
{
    gpio_set_level(LED_PIN, 0);
    gpio_set_level(RELAY_PIN, 0);
    vTaskDelay(200 / portTICK_RATE_MS);
    gpio_set_level(TRIAC_PIN, 0);
    flag_load_en = 0;
    save_switch_inf();
}
}

MDF_LOGW("Node read task is exit");
MDF_FREE(data);
vTaskDelete(NULL);
}

static void node_write_task(void *arg)
{
    mdf_err_t ret = MDF_OK;
    size_t size = 0;
    char *data = NULL;
    mwifi_data_type_t data_type = { 0x0 };
    uint8_t sta_mac[MWIFI_ADDR_LEN] = { 0 };
    mesh_addr_t parent_mac = { 0 };

    MDF_LOGI("Node task is running");

    esp_wifi_get_mac(ESP_IF_WIFI_STA, sta_mac);

    for (;;) {
        if (!mwifi_is_connected() || !mwifi_get_root_status()) {
            vTaskDelay(500 / portTICK_RATE_MS);
            continue;
        }

        esp_mesh_get_parent_bssid(&parent_mac);
        if(!flag_load_en)
        {
            power_consumption = I = 0;
            gpio_set_level(R_LED_PIN, 0);
        }
        size = asprintf(&data, "{\"self\": \"%02x%02x%02x%02x%02x%02x\",
        \"parent\": \"%02x%02x%02x%02x%02x%02x\", \"layer\": %d, \"U\": %.3f, \"Freq\": %.3f,
        \"P\": %.3f, \"stat\": %d, \"rssi\": %d}",

```

```
MAC2STR(sta_mac), MAC2STR(parent_mac.addr), esp_mesh_get_layer(), U,  
frequency, power_consumption, flag_load_en, mwifi_get_parent_rssi());
```

```
MDF_LOGD("Node send, size: %d, data: %s , rssi: %d", size, data,  
mwifi_get_parent_rssi());  
ret = mwifi_write(NULL, &data_type, data, size, true);  
MDF_FREE(data);  
MDF_ERROR_CONTINUE(ret != MDF_OK, "<%s> mwifi_write",  
mdf_err_to_name(ret));
```

```
printf("switch_counter = %d\n", switch_counter);
```

```
vTaskDelay(3000 / portTICK_RATE_MS);  
}
```

```
MDF_LOGW("Node task is exit");  
vTaskDelete(NULL);  
}
```

```
static void print_system_info_timercb(void *timer)  
{
```

```
uint8_t primary = 0;  
wifi_second_chan_t second = 0;  
mesh_addr_t parent_bssid = { 0 };  
uint8_t sta_mac[MWIFI_ADDR_LEN] = { 0 };  
mesh_assoc_t mesh_assoc = { 0x0 };  
wifi_sta_list_t wifi_sta_list = { 0x0 };
```

```
esp_wifi_get_mac(ESP_IF_WIFI_STA, sta_mac);  
esp_wifi_ap_get_sta_list(&wifi_sta_list);  
esp_wifi_get_channel(&primary, &second);  
esp_wifi_vnd_mesh_get(&mesh_assoc);  
esp_mesh_get_parent_bssid(&parent_bssid);
```

```
MDF_LOGI("System information, channel: %d, layer: %d, self mac: " MACSTR "  
parent bssid: " MACSTR  
", parent rssi: %d, node num: %d, free heap: %u",  
primary,  
esp_mesh_get_layer(), MAC2STR(sta_mac), MAC2STR(parent_bssid.addr),  
mesh_assoc.rssi, esp_mesh_get_total_node_num(), esp_get_free_heap_size());
```

```
for (int i = 0; i < wifi_sta_list.num; i++) {  
MDF_LOGI("Child mac: " MACSTR, MAC2STR(wifi_sta_list.sta[i].mac));  
}
```

```

#ifdef MEMORY_DEBUG

    if (!heap_caps_check_integrity_all(true)) {
        MDF_LOGE("At least one heap is corrupt");
    }

    mdf_mem_print_record();

#endif
}

static mdf_err_t wifi_init()
{
    mdf_err_t ret = nvs_flash_init();
    wifi_init_config_t cfg = WIFI_INIT_CONFIG_DEFAULT();

    if (ret == ESP_ERR_NVS_NO_FREE_PAGES || ret ==
ESP_ERR_NVS_NEW_VERSION_FOUND) {
        MDF_ERROR_ASSERT(nvs_flash_erase());
        ret = nvs_flash_init();
    }

    MDF_ERROR_ASSERT(ret);

    tcpip_adapter_init();
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_event_loop_init(NULL, NULL));
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_wifi_init(&cfg));
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_wifi_set_storage(WIFI_STORAGE_FLASH));
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_wifi_set_mode(WIFI_MODE_STA));
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_wifi_set_ps(WIFI_PS_NONE));
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_mesh_set_6m_rate(false));
    MDF_ERROR_ASSERT(esp_wifi_start());

    return MDF_OK;
}

static mdf_err_t event_loop_cb(mdf_event_loop_t event, void *ctx)
{
    MDF_LOGI("event_loop_cb, event: %d", event);

    switch (event) {
        case MDF_EVENT_MWIFI_STARTED:
            MDF_LOGI("MESH is started");
            break;
    }
}

```

```

case MDF_EVENT_MWIFI_PARENT_CONNECTED:
    MDF_LOGI("Parent is connected on station interface");
    break;

case MDF_EVENT_MWIFI_PARENT_DISCONNECTED:
    MDF_LOGI("Parent is disconnected on station interface");

    if (esp_mesh_is_root()) {
        mesh_mqtt_stop();
    }

    break;

case MDF_EVENT_MWIFI_ROUTING_TABLE_ADD:
case MDF_EVENT_MWIFI_ROUTING_TABLE_REMOVE:
    MDF_LOGI("MDF_EVENT_MWIFI_ROUTING_TABLE_REMOVE, total_num: %d", esp_mesh_get_total_node_num());

    if (esp_mesh_is_root() && mwifi_get_root_status()) {
        mdf_err_t err = mesh_mqtt_update_topo();

        if (err != MDF_OK) {
            MDF_LOGE("Update topo failed");
        }
    }

    break;

case MDF_EVENT_MWIFI_ROOT_GOT_IP: {
    MDF_LOGI("Root obtains the IP address. It is posted by LwIP stack automatically");

    mesh_mqtt_start(CONFIG_MQTT_URL);

    break;
}

case MDF_EVENT_CUSTOM_MQTT_CONNECT:
    MDF_LOGI("MQTT connect");
    mdf_err_t err = mesh_mqtt_update_topo();

    if (err != MDF_OK) {
        MDF_LOGE("Update topo failed");
    }
}

```



```

err = mesh_mqtt_subscribe();

if (err != MDF_OK) {
    MDF_LOGE("Subscribe failed");
}

mwifi_post_root_status(true);

xTaskCreate(root_write_task, "root_write", 4 * 1024,
            NULL, CONFIG_MDF_TASK_DEFAULT_PRIOTY, NULL);
xTaskCreate(root_read_task, "root_read", 4 * 1024,
            NULL, CONFIG_MDF_TASK_DEFAULT_PRIOTY, NULL);
gpio_set_level(G_LED_PIN, 1);
gpio_set_level(R_LED_PIN, 0);
break;

case MDF_EVENT_CUSTOM_MQTT_DISCONNECT:
    MDF_LOGI("MQTT disconnected");
    mwifi_post_root_status(false);
    gpio_set_level(G_LED_PIN, 0);
    gpio_set_level(R_LED_PIN, 1);
    break;

default:
    break;
}

return MDF_OK;
}

static void IRAM_ATTR gpio_isr_handler(void* arg)
{
    uint32_t gpio_num = (uint32_t) arg;
    if (gpio_num == HLW_CF_PIN)
    {
        if (tmp1)
        {
            gpio_set_level(R_LED_PIN, 1);
            tmp1 = 0;
        }
        else
        {
            gpio_set_level(R_LED_PIN, 0);
            tmp1 = 1;
        }
    }
}

```

```

    }
}
xQueueSendFromISR(gpio_evt_queue, &gpio_num, NULL);
}

static void gpio_task_example(void* arg)
{
    uint32_t io_num;
    for(;;) {
        if(xQueueReceive(gpio_evt_queue, &io_num, portMAX_DELAY)) {
            if (io_num == 5)
            {
                ;
            }

            else if (io_num == HLW_CF_PIN)
            {
                if(CF_pulse_cnt >= 10)
                {
                    CF_pulse_cnt = 0;
                    int64_t time = esp_timer_get_time();
                    frequency = 10000000.0 / (time - prev_time);
                    prev_time = time;
                    power_consumption = frequency * 12.0;
                }
                CF_pulse_cnt++;
            }
            else if (io_num == HLW_CF1_PIN)
            {
                if(CF1_pulse_cnt >= 10)
                {
                    CF1_pulse_cnt = 0;
                    int64_t time = esp_timer_get_time();
                    U = 0.43 * 10000000.0 / (time - CF1_prev_time);
                    CF1_prev_time = time;
                }
                CF1_pulse_cnt++;
            }
        }
    }
}

static void led_gpio_init (void)
{
    gpio_pad_select_gpio(LED_PIN);
}

```

```

    gpio_set_direction(LED_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
    gpio_set_level(LED_PIN, 0);
}

static void all_gpio_init (void)
{
    gpio_pad_select_gpio(R_LED_PIN);
    gpio_set_direction(R_LED_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
    gpio_set_level(R_LED_PIN, 0);

    gpio_pad_select_gpio(G_LED_PIN);
    gpio_set_direction(G_LED_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
    gpio_set_level(G_LED_PIN, 0);

    gpio_pad_select_gpio(RELAY_PIN);
    gpio_set_direction(RELAY_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
    gpio_set_level(RELAY_PIN, 0);

    gpio_pad_select_gpio(TRIAC_PIN);
    gpio_set_direction(TRIAC_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
    gpio_set_level(TRIAC_PIN, 0);

    gpio_pad_select_gpio(HLW_SEL_PIN);
    gpio_set_direction(HLW_SEL_PIN, GPIO_MODE_OUTPUT);
    gpio_set_level(HLW_SEL_PIN, 0);

    gpio_pad_select_gpio(HLW_CF_PIN);
    gpio_set_direction(HLW_CF_PIN, GPIO_MODE_INPUT);
    gpio_pullup_dis(HLW_CF_PIN);
    gpio_pulldown_dis(HLW_CF_PIN);
    gpio_set_intr_type(HLW_CF_PIN, GPIO_INTR_NEGEDGE);

    gpio_pad_select_gpio(HLW_CF1_PIN);
    gpio_set_direction(HLW_CF1_PIN, GPIO_MODE_INPUT);
    gpio_pullup_dis(HLW_CF1_PIN);
    gpio_pulldown_dis(HLW_CF1_PIN);
    gpio_set_intr_type(HLW_CF1_PIN, GPIO_INTR_NEGEDGE);

    gpio_pad_select_gpio(BUTTON_PIN);
    gpio_set_direction(BUTTON_PIN, GPIO_MODE_INPUT);
    gpio_pullup_en(BUTTON_PIN);
    gpio_set_intr_type(BUTTON_PIN, GPIO_INTR_NEGEDGE);

    gpio_evt_queue = xQueueCreate(30, sizeof(uint32_t));
    xTaskCreate(gpio_task_example, "gpio_task_example", 2048, NULL, 2, NULL);
}

```

```

    gpio_install_isr_service(ESP_INTR_FLAG_LEVEL2);
    gpio_isr_handler_add(BUTTON_PIN, gpio_isr_handler, (void*) BUTTON_PIN);
    gpio_isr_handler_add(HLW_CF_PIN, gpio_isr_handler, (void*) HLW_CF_PIN);
    gpio_isr_handler_add(HLW_CF1_PIN, gpio_isr_handler, (void*) HLW_CF1_PIN);
}

esp_err_t read_switch_counter(void)
{
    nvs_handle my_handle;
    esp_err_t err;
    err = nvs_open(STORAGE_NAMESPACE, NVS_READWRITE, &my_handle);
    if (err != ESP_OK) return err;

    err = nvs_get_i32(my_handle, "switch_counter", &switch_counter);
    if (err != ESP_OK && err != ESP_ERR_NVS_NOT_FOUND) return err;
    printf("switch_counter = %d\n", switch_counter);

    err = nvs_get_i8(my_handle, "switch_state", &flag_load_en);
    if (err != ESP_OK && err != ESP_ERR_NVS_NOT_FOUND) return err;
    printf("switch_state = %d\n", flag_load_en);

    nvs_close(my_handle);
    if(flag_load_en)
    {
        gpio_set_level(LED_PIN, 1);
        gpio_set_level(R_LED_PIN, 1);
        gpio_set_level(G_LED_PIN, 0);
        gpio_set_level(TRIAC_PIN, 1);
        vTaskDelay(200 / portTICK_RATE_MS);
        gpio_set_level(RELAY_PIN, 1);
    }
    return ESP_OK;
}

void app_main()
{
    led_gpio_init();
    all_gpio_init();
    gpio_set_level(R_LED_PIN, 1);
    esp_err_t err = nvs_flash_init();
    if (err == ESP_ERR_NVS_NO_FREE_PAGES || err ==
ESP_ERR_NVS_NEW_VERSION_FOUND) {
        ESP_ERROR_CHECK(nvs_flash_erase());
        err = nvs_flash_init();
    }
}

```

```

ESP_ERROR_CHECK( err );
read_switch_counter();

mwifi_init_config_t cfg = MWIFI_INIT_CONFIG_DEFAULT();
mwifi_config_t config = {
    .router_ssid = "AndroidAPFFB2",
    .router_password = "hzmi3949",
    .mesh_id = CONFIG_MESH_ID,
    .mesh_password = CONFIG_MESH_PASSWORD,
};

esp_log_level_set("*", ESP_LOG_INFO);
esp_log_level_set(TAG, ESP_LOG_DEBUG);
esp_log_level_set("mesh_mqtt", ESP_LOG_DEBUG);

MDF_ERROR_ASSERT(mdf_event_loop_init(event_loop_cb));
MDF_ERROR_ASSERT(wifi_init());
MDF_ERROR_ASSERT(mwifi_init(&cfg));
MDF_ERROR_ASSERT(mwifi_set_config(&config));
MDF_ERROR_ASSERT(mwifi_start());

xTaskCreate(node_write_task, "node_write_task", 4 * 1024,
            NULL, CONFIG_MDF_TASK_DEFAULT_PRIOTY, NULL);
xTaskCreate(node_read_task, "node_read_task", 4 * 1024,
            NULL, CONFIG_MDF_TASK_DEFAULT_PRIOTY, NULL);

TimerHandle_t timer = xTimerCreate("print_system_info", 10000 / port-
TICK_RATE_MS,
                                true, NULL, print_system_info_timercb);
xTimerStart(timer, 0);
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Исходный код встроенного ПО для ЭИУ

```
/* Includes -----*/
#include "main.h"
#include "stm32f4xx_hal.h"
#include "usb_device.h"

#include "usbd_cdc_if.h"

/* Private variables -----*/
I2C_HandleTypeDef hi2c1;

I2S_HandleTypeDef hi2s3;

SPI_HandleTypeDef hspi1;

/* Private variables -----*/
uint8_t flag = 0;
uint16_t delay_ms = 0;

/* Private function prototypes -----*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_I2C1_Init(void);
static void MX_I2S3_Init(void);
static void MX_SPI1_Init(void);
int main(void)
{
    /* MCU Configuration-----*/

    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
    HAL_Init();

    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_I2C1_Init();
    MX_I2S3_Init();
    MX_SPI1_Init();
    MX_USB_DEVICE_Init();
}
```

```

/* Infinite loop */
while (1)
{

    if(flag == 1)
    {
        HAL_Delay(1000);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_SET); // вкл. реле
        flag = 0;
    }
    if(flag == 2)
    {
        HAL_Delay(1000);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_RESET); // ВЫКЛ. СИМИ-
стор
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_15, GPIO_PIN_RESET); // ВЫКЛ. СИН.
светодиод
        flag = 0;
    }
    /*
    if(flag == 1)
    {
        HAL_Delay(delay_ms);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_8, GPIO_PIN_SET); // вкл. реле 1
        flag = 0;
    }
    if(flag == 2)
    {
        HAL_Delay(delay_ms);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_RESET); // ВЫКЛ.
оранж. светодиод и симистор 1
        flag = 0;
    }

    if(flag == 3)
    {
        HAL_Delay(delay_ms);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_7, GPIO_PIN_SET); // вкл. реле 2
        flag = 0;
    }
    if(flag == 4)
    {
        HAL_Delay(delay_ms);
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_14, GPIO_PIN_RESET); // ВЫКЛ. кр.
светодиод и симистор 2

```

```

    flag = 0;
}

}

}

void SystemClock_Config(void)
{

RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct;
RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct;
RCC_PeriphCLKInitTypeDef PeriphClkInitStruct;

/**Configure the main internal regulator output voltage */
__HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();

__HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_S
CALE1);

/**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks */
RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 8;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 336;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;
RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 7;
if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK)
{
    __Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

/**Initializes the CPU, AHB and APB busses clocks */
RCC_ClkInitStruct.ClockType =
RCC_CLOCKTYPE_HCLK|RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
        |RCC_CLOCKTYPE_PCLK1|RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV4;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;

if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_5) !=
HAL_OK)

```



```

{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

PeriphClkInitStruct.PeriphClockSelection = RCC_PERIPHCLK_I2S;
PeriphClkInitStruct.PLLI2S.PLLI2SN = 192;
PeriphClkInitStruct.PLLI2S.PLLI2SR = 2;
if (HAL_RCCEx_PeriphCLKConfig(&PeriphClkInitStruct) != HAL_OK)
{
    _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

/**Configure the SysTick interrupt time */
HAL_SYSTICK_Config(HAL_RCC_GetHCLKFreq()/1000);

/**Configure the SysTick */
HAL_SYSTICK_CLKSourceConfig(SYSTICK_CLKSOURCE_HCLK);

/* SysTick_IRQn interrupt configuration */
HAL_NVIC_SetPriority(SysTick_IRQn, 0, 0);
}

/* I2C1 init function */
static void MX_I2C1_Init(void)
{
    hi2c1.Instance = I2C1;
    hi2c1.Init.ClockSpeed = 100000;
    hi2c1.Init.DutyCycle = I2C_DUTYCYCLE_2;
    hi2c1.Init.OwnAddress1 = 0;
    hi2c1.Init.AddressingMode = I2C_ADDRESSINGMODE_7BIT;
    hi2c1.Init.DualAddressMode = I2C_DUALADDRESS_DISABLE;
    hi2c1.Init.OwnAddress2 = 0;
    hi2c1.Init.GeneralCallMode = I2C_GENERALCALL_DISABLE;
    hi2c1.Init.NoStretchMode = I2C_NOSTRETCH_DISABLE;
    if (HAL_I2C_Init(&hi2c1) != HAL_OK)
    {
        _Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
    }
}

/* I2S3 init function */
static void MX_I2S3_Init(void)

```

```

{

hi2s3.Instance = SPI3;
hi2s3.Init.Mode = I2S_MODE_MASTER_TX;
hi2s3.Init.Standard = I2S_STANDARD_PHILIPS;
hi2s3.Init.DataFormat = I2S_DATAFORMAT_16B;
hi2s3.Init.MCLKOutput = I2S_MCLKOUTPUT_ENABLE;
hi2s3.Init.AudioFreq = I2S_AUDIOFREQ_96K;
hi2s3.Init.CPOL = I2S_CPOL_LOW;
hi2s3.Init.ClockSource = I2S_CLOCK_PLL;
hi2s3.Init.FullDuplexMode = I2S_FULLDUPLEXMODE_DISABLE;
if (HAL_I2S_Init(&hi2s3) != HAL_OK)
{
_Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

}

/* SPI1 init function */
static void MX_SPI1_Init(void)
{

/* SPI1 parameter configuration*/
hspi1.Instance = SPI1;
hspi1.Init.Mode = SPI_MODE_MASTER;
hspi1.Init.Direction = SPI_DIRECTION_2LINES;
hspi1.Init.DataSize = SPI_DATASIZE_8BIT;
hspi1.Init.CLKPolarity = SPI_POLARITY_LOW;
hspi1.Init.CLKPhase = SPI_PHASE_1EDGE;
hspi1.Init.NSS = SPI_NSS_SOFT;
hspi1.Init.BaudRatePrescaler = SPI_BAUDRATEPRESCALER_2;
hspi1.Init.FirstBit = SPI_FIRSTBIT_MSB;
hspi1.Init.TIMode = SPI_TIMODE_DISABLE;
hspi1.Init.CRCCalculation = SPI_CRCCALCULATION_DISABLE;
hspi1.Init.CRCPolynomial = 10;
if (HAL_SPI_Init(&hspi1) != HAL_OK)
{
_Error_Handler(__FILE__, __LINE__);
}

}

static void MX_GPIO_Init(void)
{
GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct;

```

```

/* GPIO Ports Clock Enable */
__HAL_RCC_GPIOE_CLK_ENABLE();
__HAL_RCC_GPIOC_CLK_ENABLE();
__HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
__HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
__HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
__HAL_RCC_GPIOD_CLK_ENABLE();

/*Configure GPIO pin Output Level */
HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, CS_I2C_SPI_Pin|GPIO_PIN_7|GPIO_PIN_8,
GPIO_PIN_RESET);

/*Configure GPIO pin Output Level */
HAL_GPIO_WritePin(OTG_FS_PowerSwitchOn_GPIO_Port,
OTG_FS_PowerSwitchOn_Pin, GPIO_PIN_SET);

/*Configure GPIO pin Output Level */
HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, LD4_Pin|LD3_Pin|LD5_Pin|LD6_Pin
|Audio_RST_Pin, GPIO_PIN_RESET);

/*Configure GPIO pins : CS_I2C_SPI_Pin PE7 PE8 */
GPIO_InitStruct.Pin = CS_I2C_SPI_Pin|GPIO_PIN_7|GPIO_PIN_8;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(GPIOE, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : OTG_FS_PowerSwitchOn_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = OTG_FS_PowerSwitchOn_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(OTG_FS_PowerSwitchOn_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : PDM_OUT_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = PDM_OUT_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
GPIO_InitStruct.Alternate = GPIO_AF5_SPI2;
HAL_GPIO_Init(PDM_OUT_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : B1_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = B1_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_EVT_RISING;

```

```

GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(B1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : BOOT1_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = BOOT1_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(BOOT1_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : CLK_IN_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = CLK_IN_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_AF_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
GPIO_InitStruct.Alternate = GPIO_AF5_SPI2;
HAL_GPIO_Init(CLK_IN_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pins : LD4_Pin LD3_Pin LD5_Pin LD6_Pin
Audio_RST_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = LD4_Pin|LD3_Pin|LD5_Pin|LD6_Pin
|Audio_RST_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
HAL_GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : OTG_FS_OverCurrent_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = OTG_FS_OverCurrent_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(OTG_FS_OverCurrent_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);

/*Configure GPIO pin : MEMS_INT2_Pin */
GPIO_InitStruct.Pin = MEMS_INT2_Pin;
GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_EVT_RISING;
GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
HAL_GPIO_Init(MEMS_INT2_GPIO_Port, &GPIO_InitStruct);
}

void _Error_Handler(char *file, int line)
{ while(1) }
#ifdef USE_FULL_ASSERT
void assert_failed(uint8_t* file, uint32_t line)
{ }
#endif

```