

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Усков Алексей Юрьевич

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

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Кирпичникова Ирина Михайловна.

Официальные оппоненты: **Велькин Владимир Иванович,**
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии;

Хакимьянов Марат Ильгизович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий»;

Смоленцев Николай Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики», г. Новосибирск, помощник ректора по научной работе.

Защита диссертации состоится 01 июня 2023 года в 12:00 ч. на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4581>

Автореферат диссертации разослан « _____ » _____ 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков
Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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 электрических 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 сред-

ства 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 выбранные 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 международной базе Scopus, получено 2 патента РФ на изобретение, 1 патент РФ на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 международная РСТ заявка «Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки».

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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимости результатов исследования. Определены методы исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о степени достоверности и апробации результатов диссертационной работы, и публикациях по теме исследования.

В первой главе рассмотрена история развития систем «Умный дом» и их актуальность в настоящий момент. Начиная с 2012 года, наблюдается резкий рост количества патентных документов в этой области исследований, что отражает постоянный не снижающийся интерес компаний к поиску новых подходов к созданию подобных систем. При этом начиная с 2014 года, наблюдается стабильное количество ежегодно подаваемых заявок по исследуемой тематике, что свидетельствует о снижении количества разработок и усовершенствовании отдельных элементов технологий (рис. 1). Видимый спад на графике в 2019-2020 годах вызван тем, что время публикации заявки составляет 18 месяцев и поэтому не все документы были опубликованы ведомствами, в связи с чем сейчас они не находятся в открытом доступе и не отражены на диаграмме. При этом не наблюдается спад патентной активности в последние 5 лет. Это свидетельствует о сохранении высокого интереса к разработке технологий систем «Умный дом» во всем мире.

Странами, в которых проводится наибольшее количество исследований и разработок в исследуемой области, являются Китай, США, Корея, Индия. При этом основными компаниями-правообладателями в области технологии систем «Умный дом», являются компании Google (Alphabet), Samsung, Xiaomi.



Рисунок 1 – Динамика изобретательской активности в мире с 2006 по 2018 годы по теме «Система «Умный дом»

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. Загородные жилые комплексы на территории Челябинской области преимущественно географически относятся к зоне поступления солнечной радиации от 1100 до 1150 кВт·ч/м² в год (рис. 2).

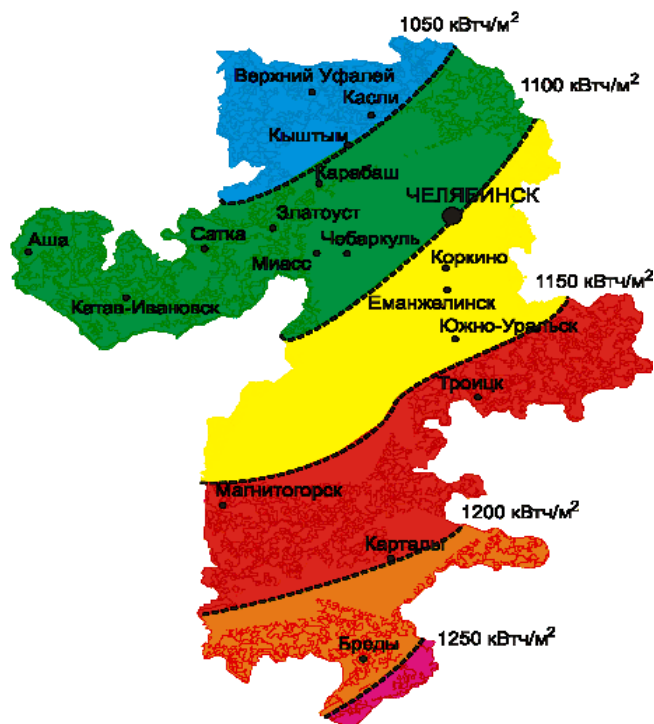


Рисунок 2 – Зонирование территории Челябинской области по годовому количеству солнечной радиации

Суммарное значение выработки электроэнергии одним солнечным модулем PSM4-150 на основе монокристаллического кремния при уровне 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.

Также одним из важнейших элементов системы «Умный дом» является устройство коммутации электрической нагрузки зданий, к которому предъявляется ряд требований. Во-первых, длительный срок службы коммутирующего элемента и надежность коммутации, что обеспечивает безопасность функционирования всей системы в целом. 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.

Во второй главе рассматривается вопрос разработки способа коммутации электрической нагрузки в зданиях, повышающего срок службы коммутирующего элемента (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.

В условиях ограниченного пространства, а также большой коммутируемой мощности находят широкое применение электромеханические реле, которые имеют меньшие габариты, чем симистор в сочетании с радиатором. Но применение электромеханического реле связано с проблемой эрозии контактов в процессе эксплуатации, которая возникает в моменты замыкания и размыкания реле.

Наиболее «неблагоприятным» режимом работы является коммутация емкостной и индуктивной нагрузок. При размыкании реле между контактами образуется электрическая дуга, а при замыкании наблюдается возникновение искрового эффекта, что ведет к эрозии контактов реле и выходу его из строя.

Электрическая дуга при размыкании контактов реле возникает вследствие непрерывности тока. Это объясняется законом Лоренца – в цепи возникает ЭДС, препятствующая изменению тока (1):

$$E_L = -L \frac{d_i}{d_t} \quad (1)$$

Электрическая дуга возникает между контактами реле при напряжении U_3 и угасает при напряжении U_r (рис. 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.

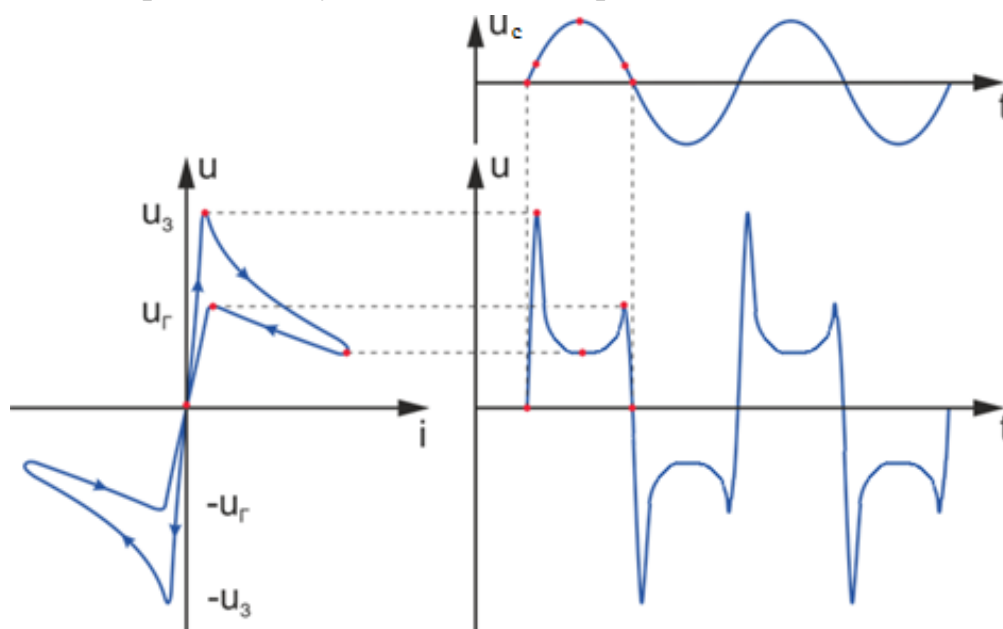


Рисунок 3 – Графики зависимостей напряжения и тока на дуге между контактами реле при переменном токе

В случае емкостной нагрузки разряженная емкость в начальный момент времени является короткозамкнутым участком цепи. При этом значение тока уменьшается по мере заряда емкости (рис. 4).

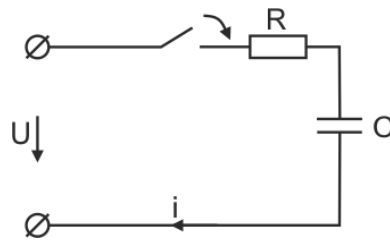


Рисунок 4 – Упрощенная схема коммутации емкостной нагрузки

Переходный процесс при этом может быть описан формулой (2):

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \left[\cos\varphi \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin\varphi \cdot \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (2)$$

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) преобразуется в формулу (3), из которой видно, что максимальный ток будет протекать через контакты реле в случае включения в момент, когда начальная фаза равна $\pi/2$.

$$i(0) = \frac{U_m}{R} \sin(\psi) \quad (3)$$

При этом в момент возникновения переходного процесса происходит всплеск тока и, как следствие, искрообразование на контактах реле (рис. 5). В дальнейшем с течением времени значение тока снижается.

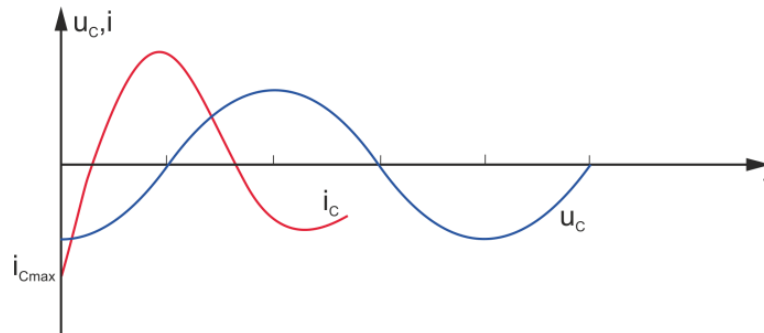


Рисунок 5 – График переходного процесса на контактах реле

Увеличивать ресурс работы электромеханического реле можно путем использования различных способов снижения искрообразования. 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 электромагнитного реле и инерционности самого механизма.

В диссертационной работе предлагается альтернативный способ коммутации электрической нагрузки – объединение преимуществ полупроводниковых элементов и электромеханических реле в одном схмотехническом решении, а именно реализация безопасного переключения контактов путем параллельного включения к контактам электромеханического реле полупроводникового коммутационного элемента, в частности симистора (рис. 6...7).

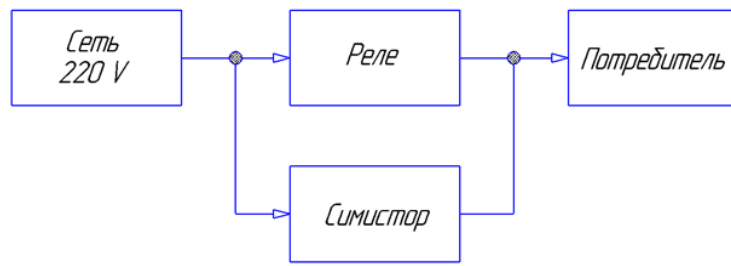


Рисунок 6 – Структурная схема коммутатора электрической нагрузки

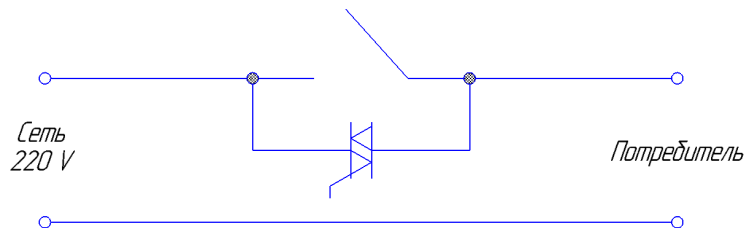


Рисунок 7 – Функциональная схема коммутатора электрической нагрузки

При этом симистор предполагается применять с драйвером управления, обладающим встроенным детектором нулевой фазы, на основе оптопары, что позволит также обеспечить гальваническую развязку цепей управления от силовых цепей коммутации. Катушка реле конструктивно имеет гальваническую развязку от переключающих контактов. Детектор перехода фазы через ноль позволит снизить помехи в сети в моменты коммутации, а также продлит ресурс работы не только электромеханического реле, но и самого симистора (рис. 8).

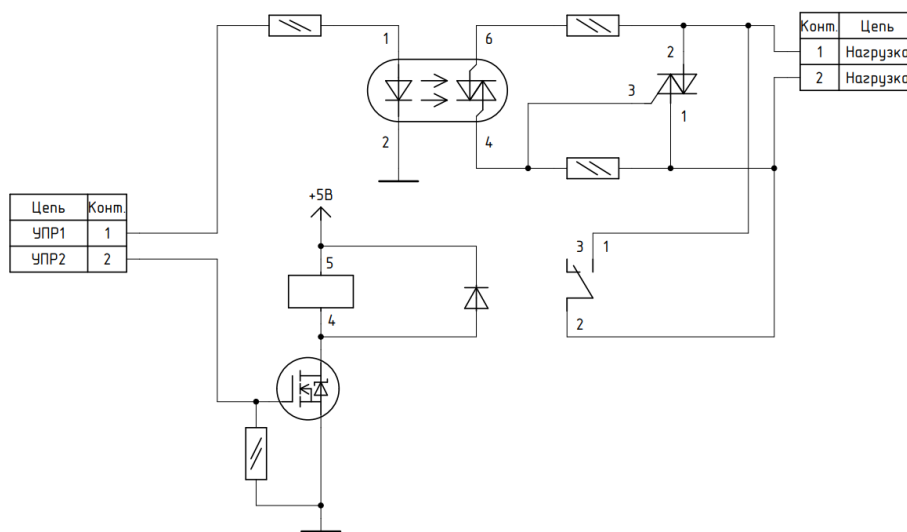


Рисунок 8 – Упрощенная схема электрическая принципиальная коммутатора электрической нагрузки

Управление малогабаритным электромеханическим реле осуществляется при помощи цифрового MOSFET транзистора. Подача логической единицы на оптрон запускает встроенный детектор нуля, в момент перехода фазы через ноль откроется симистор (рис. 8). Управляющий микроконтроллер программными средствами реализует временную задержку в 100 мс для того, чтобы симистор гарантированно открылся. Затем управляющий микроконтроллер подачей логической единицы на второй вход управления включает реле. Контакты реле шунтируют симистор до момента выключения нагрузки, поэтому ток через него не про-

текает и падения напряжения на нем не происходит, что в свою очередь не ведет к его разогреву и необходимость в установке радиатора отсутствует.

Выключение нагрузки происходит в обратном порядке. Сначала управляющий микроконтроллер отключит катушку реле и программными средствами реализует временную задержку в 100 мс, чтобы дождаться следующего спада тока нагрузки в полупериоде ниже тока удержания симистора. Затем управляющим микроконтроллером будет подан сигнал на запираение симистора.

Особо необходимо отметить, что в предложенном схмотехническом решении полностью исключается необходимость в использовании теплоотвода в виде радиатора для полупроводникового элемента. Это позволит существенно сократить габариты изделия для реализации возможности скрытого монтажа коммутирующего устройства в здании.

В третьей главе рассматривается вопрос разработки принципов и средств управления, а также алгоритмов эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки зданий, повышающих безопасность и эффективность эксплуатации систем. 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. Широкое распространение сетей Wi-Fi упрощает автоматизацию зданий с помощью данной технологии. Поэтому в качестве основы для беспроводного канала передачи данных была выбрана технология беспроводной локальной сети Wi-Fi на основе стандарта IEEE 802.11. Но степень ослабления Wi-Fi сигнала в условиях зданий существенно зависит от расстояния между передатчиком и приемником (рис. 9).

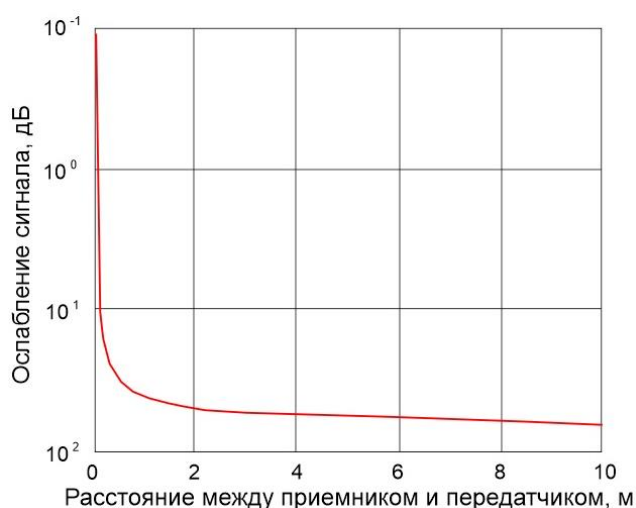


Рисунок 9 – График ослабления Wi-Fi сигнала в зависимости от расстояния между передатчиком и приемником

Способом решения поставленной задачи удаленного управления электрическими нагрузками зданий является протокол MESH-сети. Данная технология об-

ладает такими преимуществами как высокая пропускная способность канала связи, шифрование данных, поддержка IP-подключения, что позволяет без дополнительных устройств (связующий шлюз для доступа в интернет) подключаться к локальной / глобальной IP-сети. Устройства, которые необходимо коммутировать в системах «Умный дом», потребляют объем электрической энергии в единицу времени на порядки превышающий потребление предлагаемых беспроводных систем, которые при этом подключаются к сети ~220 В. В таком случае целесообразно наделять устройство коммутации функцией корневого узла, что в будущем позволит подключить дополнительные элементы сети и расширить зону покрытия (SMART GRID). Таким образом, решается проблема последующей модернизации системы автоматизации зданий. При данной конфигурации сети корневой узел (устройство коммутации электрической нагрузки) подключится к домашней точке доступа Wi-Fi, определит все дочерние узлы и конечные узлы, каждому из устройств будет присвоен свой адрес. Такая организация сети позволяет подключать большое количество устройств, не перегружая роутер (рис. 10).

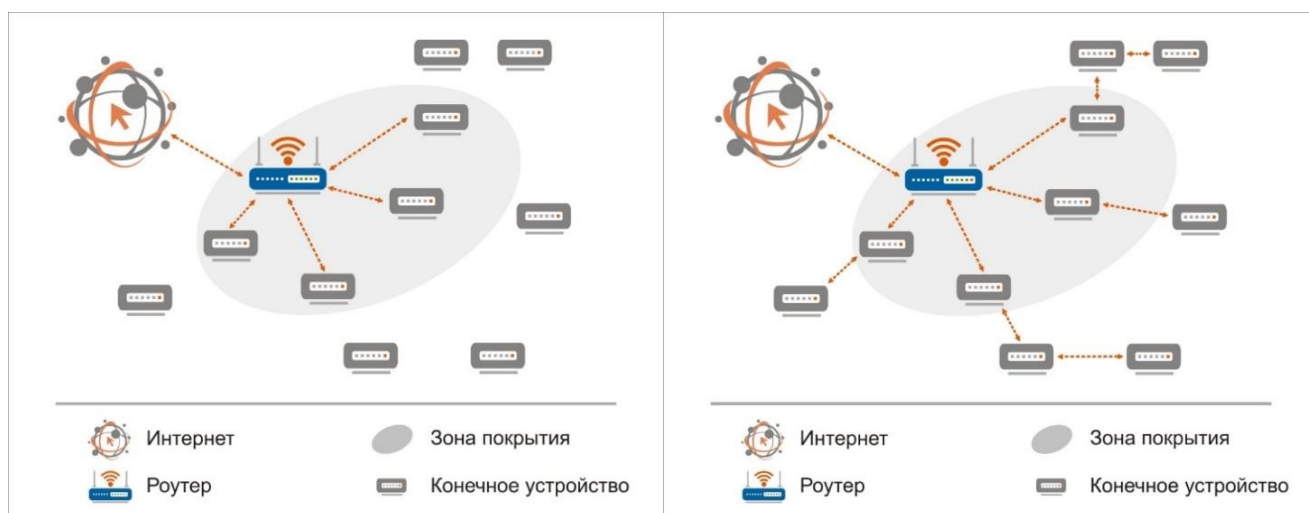


Рисунок 10 – Сравнение топологий классической сети Wi-Fi (слева) и сети, построенной на основе протокола MESH (справа)

Дальнейшее совершенствование системы управления электрическими нагрузками зданий заключается в сокращении габаритов, что достигается путем каскадного объединения коммутирующих устройств 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 (рис. 11).

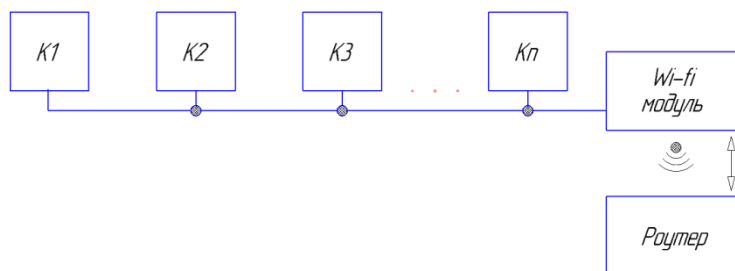


Рисунок 11 – Схема каскадного соединения группы коммутирующих устройств

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 проводные устройства коммутации электрической нагрузки уже не содержат встроенных модулей беспроводной MESH-сети, что позволяет сократить их стоимость и размеры.

Алгоритм эффективного управления устройствами коммутации электрической нагрузки заключается в автоматической реализации в рамках беспроводной Wi-Fi MESH-сети следующих действий (рис. 12):

- 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.

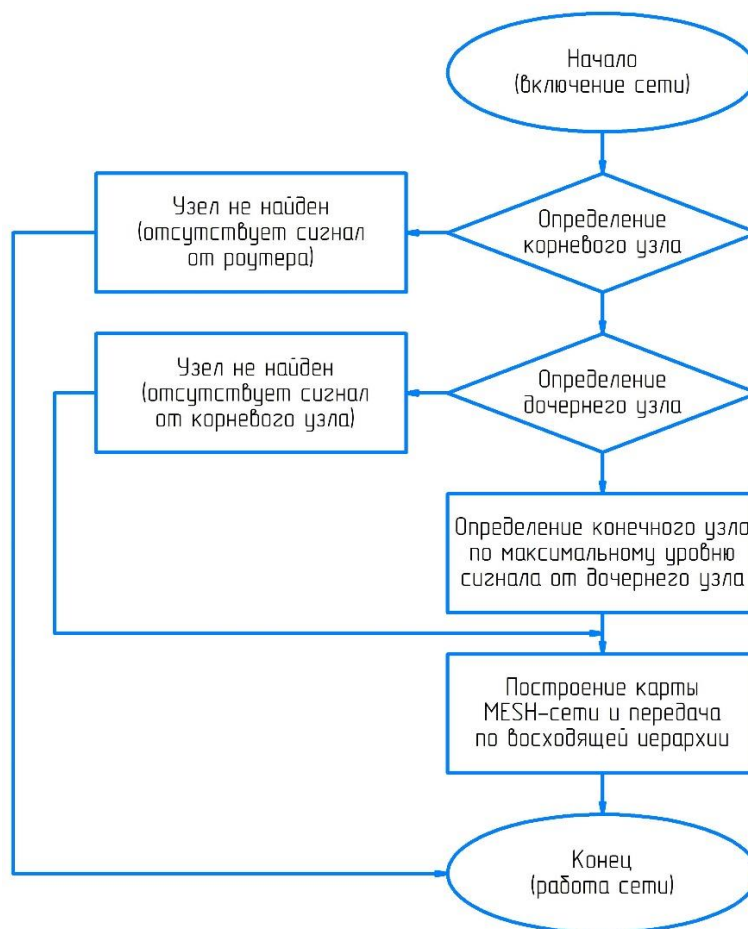


Рисунок 12 – Блок-схема процесса адаптивного построения топологии MESH-сети

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.

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, который поддерживает стеки протоколов Wi-Fi и Bluetooth Low Energy. На его основе были разработаны и изготовлены опытные образцы беспроводного устройства коммутации электрической нагрузки (рис. 13).

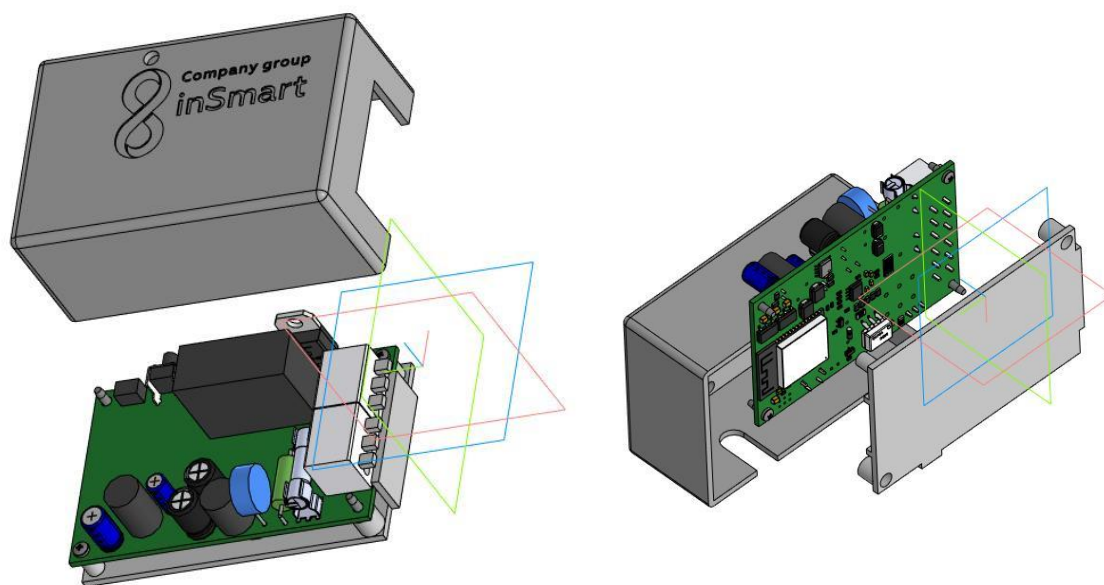


Рисунок 13 – Модель беспроводного устройства коммутации электрической нагрузки

В качестве информации, передаваемой между управляющим сервером и беспроводным устройством коммутации электрической нагрузки в рамках алгоритма эффективного управления, используются команды включения / 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 и серверное.

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».

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.

В четвертой 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 (рис. 14) и управляющее программное обеспечение с графическим интерфейсом пользователя (рис. 15).

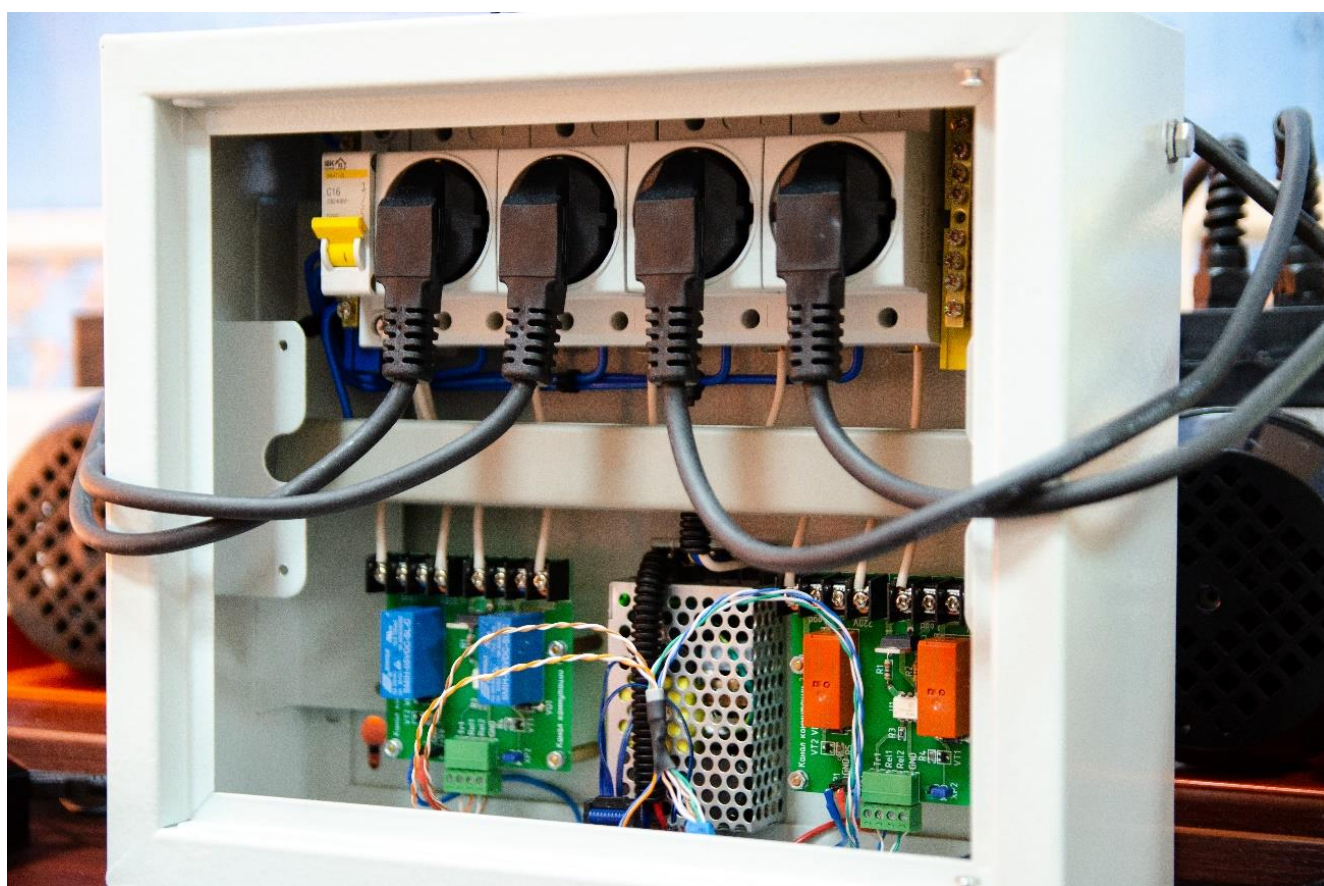


Рисунок 14 – Общий вид ЭИУ с подключенными нагрузками

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). При этом управляющее программное обеспечение (рис. 15) позволяет в автоматическом режиме (по таймеру) осуществлять коммутацию подключенных к ЭИУ электрических нагрузок и вести учет количества срабатываний каждого канала коммутации.

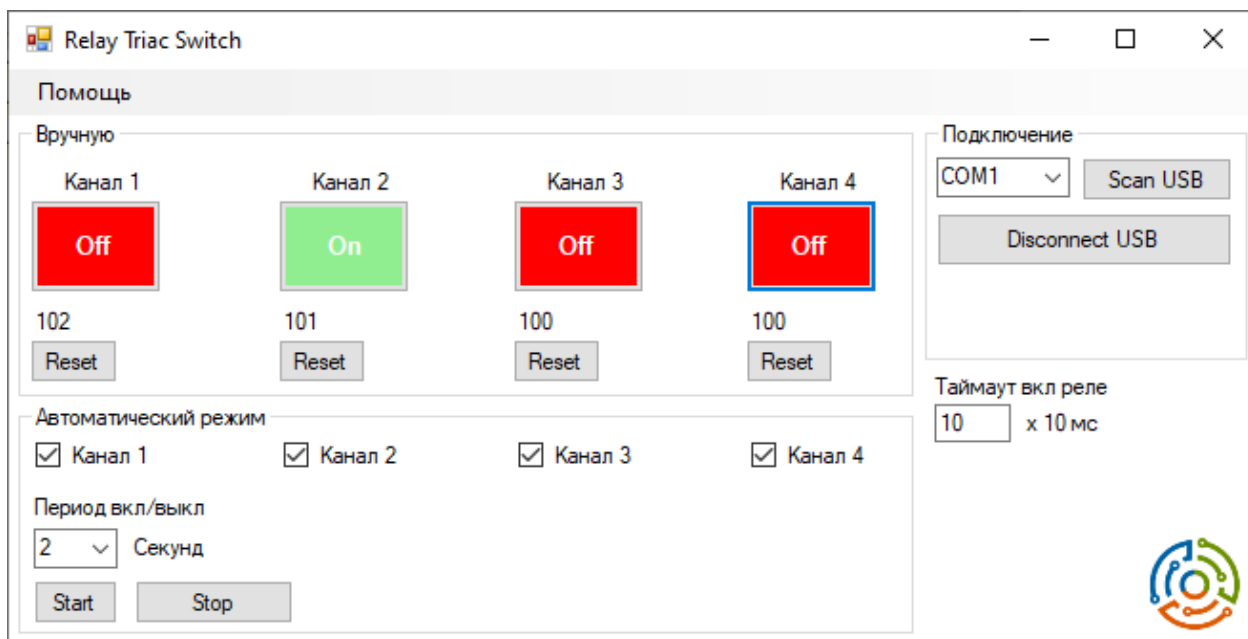


Рисунок 15 – Основное окно управляющей программы ЭИУ

В качестве электрической нагрузки различных типов использовались лампы накаливания мощностью 90 Вт и электрические двигатели мощностью 500 Вт. При этом были сняты осциллограммы моментов включения (рис. 16...17) и отключения (рис. 18) 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 (рис. 16...17 слева) и отсутствие бросков тока при разработанном способе коммутации (рис. 16...17 справа). А также в момент отключения нагрузок при классическом способе коммутации наблюдаются выбросы напряжения (рис. 18 слева), а при разработанном способе коммутации они отсутствуют (рис. 18 справа), что подтверждает теоретические положения диссертационной работы.

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. По завершению работы ЭИУ были изучены контакты реле под микроскопом (рис. 19) и сделан вывод о том, что контакты реле при классическом способе коммутации подверглись значительной эрозии в результате их искрения и возникновения электрической дуги, а контакты реле при разработанном способе коммутации сохранили чистоту поверхности.

В результате проведенных экспериментальных сравнительных испытаний предложенного способа коммутации электрических нагрузок зданий и существующих способов, было подтверждено повышение надежности работы системы коммутации, а также увеличение ресурса работы контактной группы электромеханического реле при сохранении небольших габаритов конечного устройства коммутации.

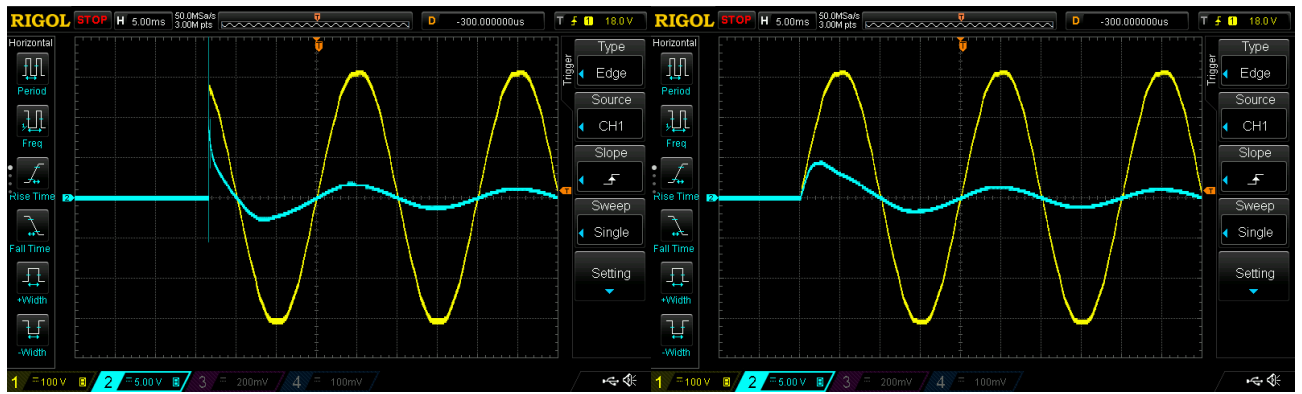


Рисунок 16 – Осциллограммы включения резистивной нагрузки 90 Вт (канал коммутации 1 слева, канал коммутации 2 справа)

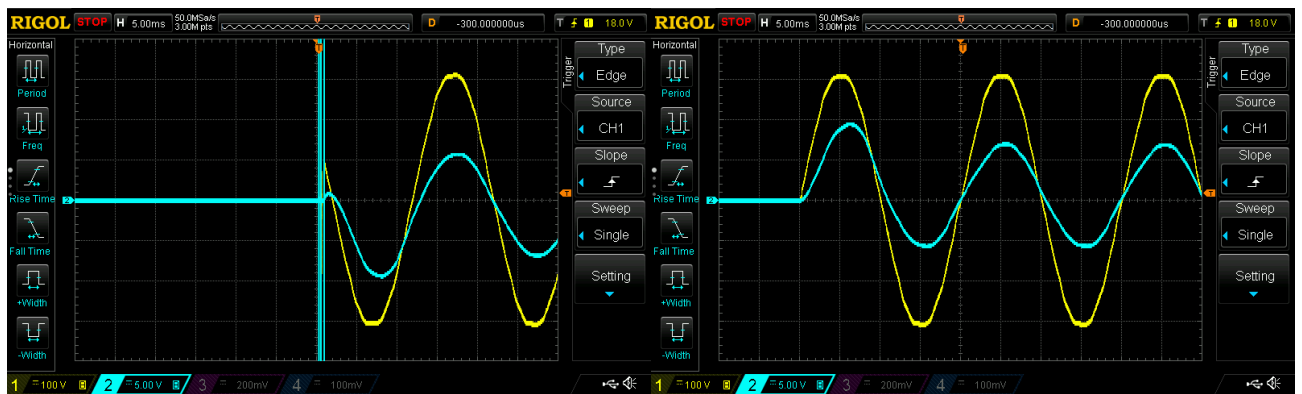


Рисунок 17 – Осциллограммы включения комбинированной нагрузки 500 Вт (канал коммутации 3 слева, канал коммутации 4 справа)

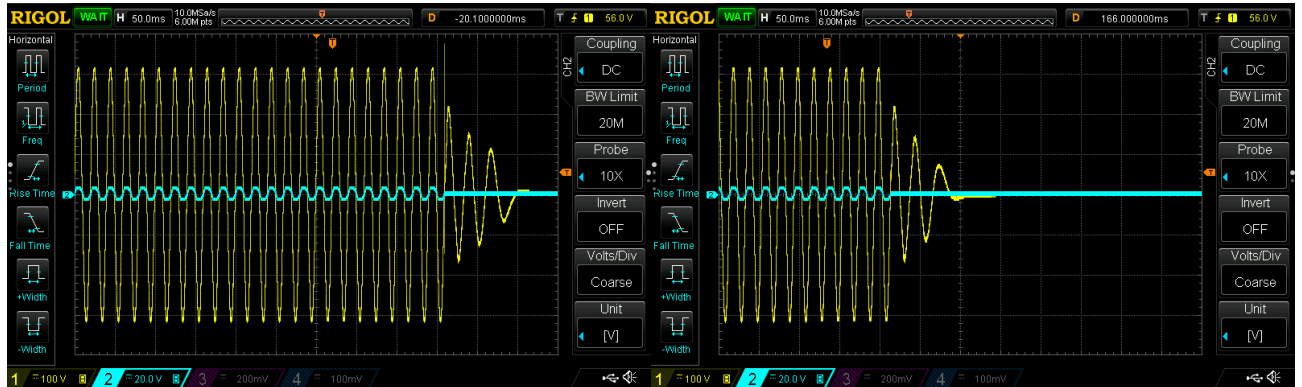


Рисунок 18 – Осциллограммы отключения комбинированной нагрузки 500 Вт (канал коммутации 1 слева, канал коммутации 2 справа)

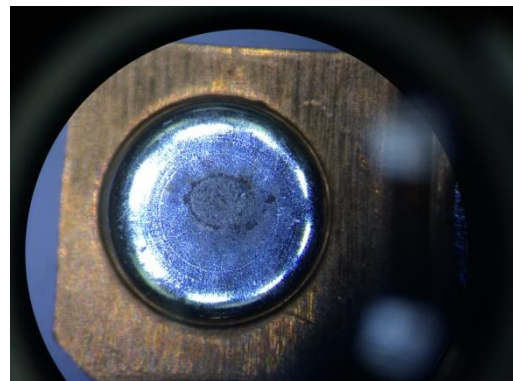
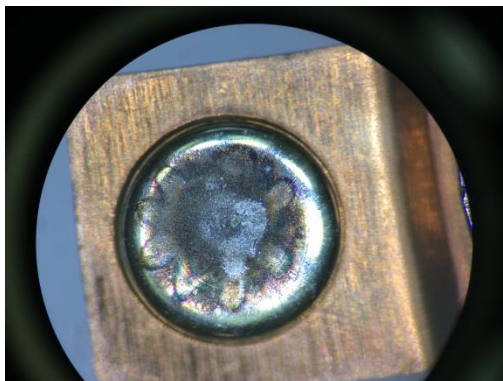


Рисунок 19 – Контакты реле при классической схеме включения (слева) и при разработанном способе коммутации (справа)

Для проведения испытаний отказоустойчивости канала управления было разработано серверное программное обеспечение (рис. 20), которое наглядно демонстрирует карту топологии беспроводной Wi-Fi MESH-сети и передаваемые в рамках работы системы управления данные.

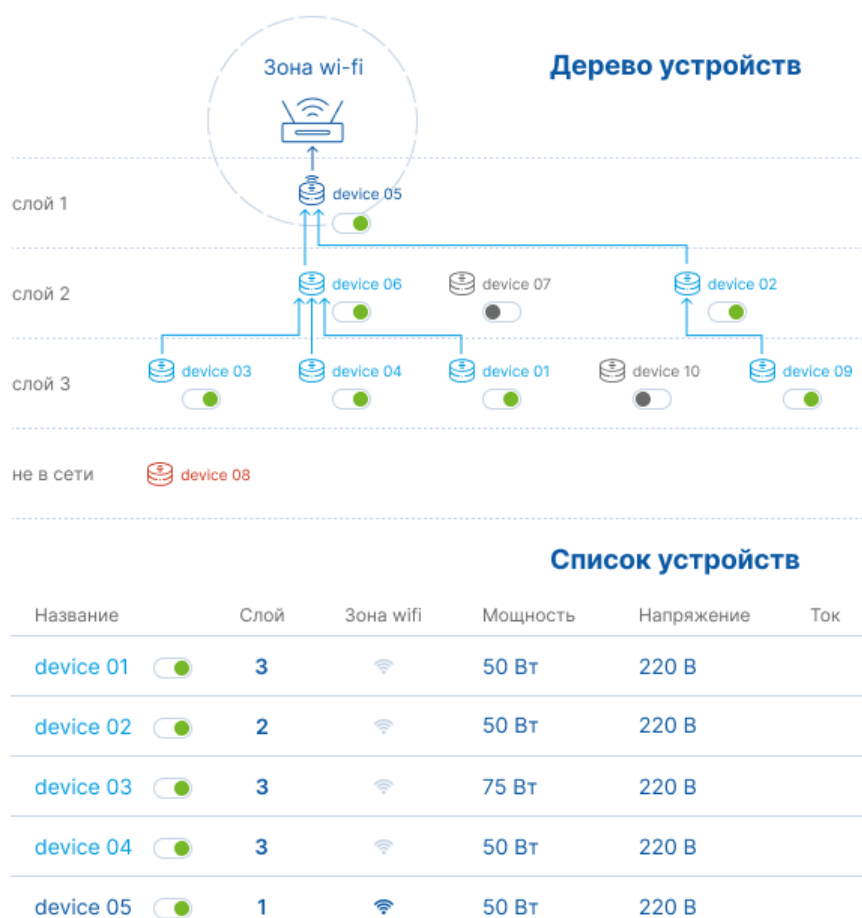


Рисунок 20 – Управляющее серверное программное обеспечение

При отключении в произвольном порядке отдельных элементов сети производилась имитация нарастающих отказов в канале передачи данных и была построена экспериментальная кривая зависимости вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов (рис. 21). Из графика видно, что при отказе большого количества узлов (элементов сети) связь будет восстановлена. Интервал времени, необходимый для восстановления процесса обмена данными, зависит от числа отключенных элементов сети.

В результате проведенного эксперимента 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.

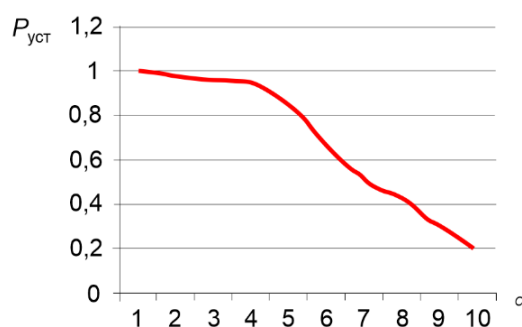


Рисунок 21 – Экспериментальная кривая зависимости вероятности установления соединения от числа закрытых транзитов

В пятой главе проводится оценка экономического эффекта от внедрения разработанной адаптивной системы управления энергосберегающими процессами здания 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. 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 (табл. 1).

Таблица 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 %. Данный эффект достигается за счет более эффективного расходования энергоресурсов путем реализации функций удаленного мониторинга и управления, работы по сценариям и снижения влияния человеческого фактора.

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 4...5):

$$\Delta VC_{M^2} = \frac{\Delta VC_1}{S_1} = \frac{149,21 \text{ руб.}}{57 \text{ м}^2} = 2,62 \text{ руб./м}^2 \quad (4)$$

$$\Delta VC_{\text{Общ}} = \Delta VC_{M^2} \cdot S_{\text{Общ}} = 2,62 \frac{\text{руб.}}{\text{м}^2} \cdot 200\,000 \text{ м}^2 = 524\,000 \text{ руб.} \quad (5)$$

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.

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 6...8):

$$\Delta E_{M^2} = \frac{\Delta E_1}{S_1} = \frac{(145 - 102) \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{57 \text{ м}^2} = 0,75 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \quad (6)$$

$$\Delta E_{\text{ОБЩ}} = \Delta E_{M^2} \cdot S_{\text{ОБЩ}} = 0,75 \frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2} \cdot 200\,000 \text{ м}^2 = 150\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (7)$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,59 \text{ кг} \cdot \Delta E_{\text{ОБЩ}} = 0,59 \frac{\text{кг}}{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \cdot 150\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 88\,500 \text{ кг} \quad (8)$$

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.

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 электропитания (интервалы времени с 07:00 до 09:00 и с 17:00 до 20:00).

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 элек-

трической 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 канала 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).

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

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1 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. (0,38 п.л. / 0,19 п.л.)

2 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. (0,56 п.л. / 0,31 п.л.)

3 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. (0,53 п.л. / 0,33 п.л.) (SCOPUS)

4 **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. (0,44 п.л. / 0,25 п.л.)

5 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. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.)

6 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. (SCOPUS) (0,25 п.л. / 0,13 п.л.)

7 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. (0,19 п.л. / 0,06 п.л.)

Патенты, свидетельства о гос. регистрации программ ЭВМ:

8 Пат. 209794 Российская Федерация, МПК G08C 17/00. Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки высокой мощности / **Усков А.Ю.**, Сироткин Е.А., Ускова Н.В.; патентообладатель: ООО «Инсмартавтоматика». – № 2021108699; заявл. 31.03.2021; опубл. 23.03.2022, Бюл. № 9.

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

10 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; опубл. 13.01.2021, Бюл. № 1.

11 Пат. 2733487 Российская Федерация, МПК G08C 17/00, H01H 9/54. Беспроводное устройство коммутации электрической нагрузки / **Усков А.Ю.**, Сироткин Е.А., Цимбол А.И., Ускова Н.В.; патентообладатель: ООО «Инсмартавтоматика». – № 2020112542; заявл. 27.03.2020; опубл. 01.10.2020, Бюл. № 28.

12 Пат. 2483343 Российская Федерация, МПК G05F 1/00. Стабилизатор переменного напряжения / Файда Л.Ф., Соболев С.А., Файда Е.Л., Варганов В.В., **Усков А.Ю.**, Никонова Т.Ю.; патентообладатель: Файда Л.Ф., Соболев С.А. – № 2012111908/08; заявл. 27.03.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.

Публикации в других изданиях: 9 публикаций в сборниках докладов и трудах российских и зарубежных конференций РИНЦ.

Усков Алексей Юрьевич

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМИ ПРОЦЕССАМИ ЗДАНИЯ
С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 12.04.2023. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 77/150.

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