

На правах рукописи



ЛОСЕВ ОСТАП ГЕННАДЬЕВИЧ

**СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ, ОБЪЕДИНЁННЫХ В ЭЛЕКТРОСЕТЬ**

Специальность 2.4.2.

Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Курчатовском комплексе реабилитации и нераспространения федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Научный руководитель: **Григорьев Александр Сергеевич**
кандидат технических наук, начальник отдела Курчатовского комплекса реабилитации и нераспространения ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт».

Официальные
оппоненты: **Шевлюгин Максим Валерьевич**
доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта».

Лачугин Владимир Фёдорович
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Департамента НТС и научно-технической информации АО «Россети Научно-технический центр».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Защита состоится **11 февраля 2025 года** в **11 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета 24.2.327.11, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, корп. 57, ауд. 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182443.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.11,
кандидат технических наук, доцент



Д.С. Дежин

Общая характеристика работы

Предлагаемые в работе результаты исследований получены при разработке методик построения саморегулируемых распределенных электросетей на постоянном токе различного масштаба, создании имитационных математических моделей ключевых элементов и в целом распределенной сети. Результаты классифицированы и объединены в формате новой концепции облика перспективных энергосистем, использующих методы прямого преобразования химической энергии углеводородного топлива в электрическую и тепловую энергию с низким углеродным следом.

Предлагаемая концепция, математический аппарат, технические решения, и их практическая реализация преследует цель - устранять локальные дефициты электрической мощности для потребителей, снизить потери электроэнергии, связанные с ее передачей на большие расстояния, обеспечить высокую надежность энергоснабжения, в том числе, за счет структурной надежности, живучести и отказоустойчивости перспективных объектов энергоснабжения.

В целом результаты данного исследования способствуют повышению качества и эффективности перспективных разработок, по критериям безопасности и экологической приемлемости жизненного цикла электротехнических комплексов и систем, включая создание, эксплуатацию источников генерации и сетей передачи энергии и ликвидацию негативных последствий процессе их использования.

Актуальность темы исследования

Данная работа решает важную задачу национального уровня значимости по бездефицитному энергосбережению потребителей и повышению энергетической и экономической эффективности, надёжности и отказоустойчивости объектов электротехнических комплексов и систем распределённой энергетики РФ. Решение этой задачи способствует будущей разработке новых и важных для энергетической безопасности РФ проектов электротехнических комплексов, систем и их компонентов высокого качества, а также, способствует развитию локальных и интегрируемых в Единую энергетическую систему России распределенных источников энергоснабжения, формируемых посредством предлагаемых решений для оригинальных локальных интеллектуальных энергетических систем.

Для текущего периода - задача эффективного сочетания интеллектуализации энергетических систем, использования систем централизованного электроснабжения с распределенной генерацией электрической энергии, а также с использованием местных ресурсов, в том числе возобновляемых источников энергии, является важной для региональной, и в целом национальной энергетической безопасности. Актуальность и современная необходимость решения данных задач определена в ряде директивных документах, в т. ч. Указом Президента РФ от 13 мая 2019 г. N 216 "Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации".

Степень разработанности

Согласно поиску в базах данных РИНЦ, а также в базах Scopus и Web of Science и библиотеках с опубликованными работами кандидатских диссертаций, по ключевым словам, «распределённая энергетика» и «distributed energy» были найдены 3593 и 3145 для Scopus и Web of Science соответственно, 346 научных

публикаций в национальной библиографической базе данных научного цитирования на базе eLibrary.ru и 22 кандидатских диссертации за последние 5 лет. Из них, порядка 208 научных работ, попадают под область интересов данного исследования. Среди отечественных исследователей вклад в создание и развитие новых знаний в области распределённой энергетики внесли множество исследователей, среди них: Воропай Н. И., Соснина Е. Н., Куликов А. Л., Илюшин П. В., Обоскалов В. П., Арзамасцев Д. А., Третьяков Е. А., Андреев М. В., Фёдоров В. К., Армеев Д. В., Булатов Ю. Н., Глазырин Г. В., Дехтерев А. И., Турунтаева Д. В., Фролов М. Ю., Фурсанов М. И., Чершова В. О. и др.

В истории электротехники выделяются две выдающиеся фигуры - Никола Тесла и Томас Эдисон, чьи имена стали символами двух различных подходов к передаче электричества и разработке электротехнических систем. Вначале, электроснабжение обеспечивалось по постоянному току, и связано было с рядом проблем, а именно, передача электроэнергии на большие расстояния, и последующая реализация её конечным потребителям. Так как для передачи необходимо было большое напряжение, а именно 5000В в том исполнении, а для потребления 110В, при этом технологии преобразования не были достаточно проработанные, и предложено было только одно средство - умформер. Это мотор, в данном случае на 5000В, и соединенный с ним генератор на 110В. И мощность этого умформера должна быть не меньше, чем суммарная мощность всех моторов, которые хочет подключить потребитель. То есть - электростанция "в миниатюре". Система обладала рядом недостатков: шум, периодическое техобслуживание, ремонт и низкий КПД механического преобразователя.

При использовании переменного тока вопрос преобразования величины напряжения в любую сторону решался просто, дешево и удобно, с помощью трансформаторов. Трансформаторы не имеют движущихся деталей, не требуют для изготовления оборудования высокой точности, что и определило дальнейший вектор развития электроснабжения.

Но новая элементная база, разработанная на сегодняшний день, позволяет снова использовать постоянный ток. Были сконструированы электронные компоненты, которые позволили коммутировать постоянные токи значительной величины при столь же значительных напряжениях. Это MOSFET-ы, IGBT транзисторы, диоды Шоттки и т. п. Причем, предел коммутируемых мощностей на сегодня еще не достигнут и потолок постоянно повышается.

По сути, с разработки опорных достаточно мощных источников, чьи свойства позволяют получать постоянный ток в качестве первичного продукта преобразования, позволяет выводить электроснабжение по постоянному току на новый уровень. Солнечные батареи, термоэлектрические генераторы, топливные элементы становятся коммерчески выгодными. Появляется реальная возможность строить электростанции, не требующие мощных капитальных вложений. Подобные электростанции можно строить в любых местах, где требуется электроснабжение, от дачных участков до производственных предприятий. Все эти технические достижения дают возможность создать сеть распределенных источников электроэнергии, не отказываясь при этом от существующих электростанций.

Основная идея данной работы заключается в том, что использование сетей постоянного тока обеспечит поддержание заданного диапазона опорного сетевого напряжения в общей сети при переменной во времени и территориальном

пространстве распределённой генерации, аккумулировании и переменном распределённом потреблении электроэнергии, а надёжная отказоустойчивая структура формирования данных сетей, обеспечивает бесперебойное электропитание региона в непростых условиях эксплуатации, а также, при необходимости, транзит энергии с существенно более низкими потерями нежели через переменный ток.

При этом открываются новые задачи построения отказоустойчивых, надёжных электростанций, разработанных на новых методиках управления, которые позволяют реализовать электросистема на постоянном токе.

Цели диссертационной работы

- Разработка модели, обеспечивающей синтез схемы распределенной энергетической сети с третьей степенью связности, на базе которой строится объединение источников и потребителей энергии.

- Создание математических моделей ключевых элементов / устройств распределенной сети с переходом к модели всей распределённой сети, результатом которой является параметры генерирующих и аккумулирующих элементов входящих в сеть объектов распределенной энергетики.

- Разработка принципов построения саморегулируемых распределенных сетей на постоянном токе различного масштаба: топологического / географического, мощностного, и с учетом климатических и местных территориальных факторов.

- Разработка концепции и формирование облика перспективных энергосистем, использующих методы прямого преобразования химической энергии углеводородного топлива в электрическую и тепловую энергию с низким углеродным следом.

- Разработка новых научно обоснованных технических решений, обеспечивающих возможность быстрого заряда электрического транспорта в условиях отсутствия электросетей большой мощности.

Для достижения цели диссертационной работы решены следующие задачи:

1. Проведен анализ состояния разработок различных систем генерации и накопления электроэнергии;
2. Выполнена разработка математического аппарата для расчета распределенных энергетических систем и прогноза их эксплуатационных характеристик;
3. Проведен комплекс вычислительных экспериментов для оптимизации параметров распределенной энергетической системы;
4. Создан проект экспериментальной модели базового/основного сегмента распределённой энергетической сети постоянного тока
5. Проведен комплекс натурных экспериментов на экспериментальной модели распределённой энергетической сети;
6. Выполнена верификация математического аппарата / математических моделей для расчета распределенных энергетических систем
7. Выполнено сопоставление анализа научно-информационных источников и полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Объект исследования: распределённые электрические сети на постоянном токе, объединяющие в себе пользователей с собственной системой генерации и накопления энергии, их параллельная работа с центральной сетью, а также с базовым генератором и накопителем общего пользования.

Предмет исследования: средства, способы и алгоритмы автоматического проектирования структурных схем распределенной сети, управления режимами автономной и параллельной работы пользователей с объединяющей их сетью, а также с генератором и накопителем общего пользования, математический аппарат обеспечивающий прогноз параметров энергоустановки, и технические решения, обеспечивающие совместную работу элементов системы.

Научная новизна диссертации:

1. Разработана новая методика построения электросети, отличающаяся тем, что подключение дополнительных элементов генерации обеспечивается по постоянному току с использованием стабилизаторов, выполненных на основе DC/DC конвертеров с ограничением максимального тока.
2. Разработана модель построения структурных схем распределенных энергетических систем с третьей степенью связности, отличающаяся тем, что результирующая схема может быть произвольной формы, что является необходимым при проектировании сети распределения энергии с привязкой к конкретной местности.
3. Проведены вычислительные и экспериментальные исследования, апробированные на собственно физической модели базового сегмента распределенной энергетической сети.
4. Реализован, контролируемый естественным образом, транзит энергии между элементами системы без директивно адресного управления, обеспечивающий безопасное энергообеспечение при подключении нагрузок, превышающих текущую генерацию.

Теоретическая и практическая значимость работы. Решена научно-техническая задача по минимализации рисков разбалансировки электрической сети, возникающих при подключении к ней новых объектов генерации и/или потребления энергии с различным номиналом.

Запатентована схема интеграции разрабатываемой системы распределенного энергоснабжения на постоянном токе с распределенными сетями газоснабжения, а также с инфраструктурой транспортных средств, обеспечивающей заряд электрического транспорта.

Запатентована схема надежной отказоустойчивой сети электроснабжения со множеством пользователей с собственными источниками генерациями и накопления энергии.

Предложено применять разработанные методики для обеспечения требуемого уровня энергетической безопасности потребителей распределенной энергетической сети.

На основе разработанных методик расчета и полученных результатов, разработан ряд автономных энергетических установок, обеспечивающих круглогодичное энергоснабжение в полностью автономных условиях эксплуатации. Данные энергоустановки на сегодняшний день успешно используются в регионах, удаленных от центрального энергоснабжения.

Методология и методы исследования. При выполнении работы автором применялись методы и методология исследования электротехнических систем, в основе которых лежат математическая логика, закономерности токораспределения и теория надежности. Были созданы собственный вычислительный инструментальный для математического и физического моделирования, а именно моделирующие-

имитационные программы, предназначенные для получения текущих электрических параметров распределенной энергетической системы, мониторинга текущего состояния элементов РЭС, изучения поведения ключевых элементов, испытаний различных режимов работы, построения управляющих воздействий, поиска оптимальных характеристик. Разработан программно-измерительный комплекс, позволяющий снимать текущие параметры модели распределённой энергетической системы. Алгоритмы позволяющие вести учёт и управления распределённой энергетической системой в автоматической режиме.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ синтеза структурных схем распределённых электросетей позволяет эффективно объединять объекты генерации и потребления в единую систему на основе критерия третьей степени связности.
2. Созданный математический аппарат позволяет точно рассчитывать вероятность наличия пути между объектами генерации и потребления с учётом вероятности отказа линий связи и коэффициента их загрузки.
3. Разработанное техническое решение обеспечивает возможность быстрого заряда электрического транспорта в условиях отсутствия электросетей большой мощности..
4. Предложенный способ подключения дополнительных элементов генерации по постоянному току с использованием стабилизаторов на основе DC/DC конвертеров, с возможностью ограничения максимального выходного тока, позволяет увеличить общую генерирующую мощность системы и повысить её устойчивость к нагрузкам.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных новых результатов подтверждена экспериментальными физическими моделями, использованием созданных в процессе выполнения данной работы программ для имитационного моделирования, выполнением физического моделирования энергосистем и испытаниями разработанных принципов управления на экспериментальных моделях.

Результаты исследования, полученные в ходе работы автором, позитивно апробированы на различных научных форумах, докладывались и обсуждались на:

1. Десятой конференции с международным участием и Седьмой школы молодых ученых, Черноголовка, 18–21 сентября 2023 года / Научный редактор С. И. Бредихин. – Черноголовка: Черноголовка, 2023
2. Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Объединенный институт высоких температур РАН. 2018. С.
3. II Международной научно-практической конференции. С. 201–202. Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Воронеж, 16–18 сентября 2020 года
4. VI Международной научно-практической конференции: в 3 ч. Воронеж, 2021. С. 278–285. Комплексные проблемы техносферной безопасности.
5. Пятой Всероссийской конференции с международным участием топливные элементы и энергоустановки на их основе. 17-21 июня 2018 Суздаль ИФТТ РАН
6. Шестой Всероссийской конференции с международным участием топливные элементы и энергоустановки на их основе. 23–27 июня 2019 года Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д.2 ИФТТ РАН
7. IV Международного конгресса REENCON-XXI. Возобновляемая энергетика XXI век 2018.

8. II "International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy". Conference proceedings. Voronezh, 2021. С. 12021.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования опубликованы в 35 основных научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) - 4, работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 5, получено 11 патентов на изобретение РФ, 6 патентов на полезную модель РФ, зарегистрировано 9 программ для ЭВМ. Также получен 1 акт, подтверждающий внедрение результатов исследования. Индекс Хирша автора – 2.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе представлены связанные с работой мировые тренды развития различных компонентов распределённой энергетики. Анализа состояния разработок различных систем генерации и накопления электроэнергии. Анализ популярных баз данных, таких как РИНЦ, а также Scopus и Web of Science, показавший значительный интерес исследователей со всего мира к проблемам развития распределённой энергетики.

В главе приводится анализ отечественной литературы, анализ показывает заинтересованность исследователей в повышении доступности, надежности, экологической и экономической эффективности энергоснабжения, на основании чего делается вывод о целесообразности внедрения технологий распределённой энергетики в единую электросеть России. Отдельно рассмотрены компоненты распределённой энергетики и, в частности, такие как ВИЭ, системы накопления. Проведен анализ энергетического потенциала России с упором на использования технологий и компонентов распределённой энергетики.

Естественным образом получается, что Россия не самая благоприятная с точки зрения солнечной энергетики, но есть достаточно большой ресурс энергии ветра, особенно на берегах океанов. В целом, несмотря на географические особенности, использование энергии солнца, и иных возобновляемых источников энергии, в местах, где затруднено использование иных видов преобразования, может быть достаточно эффективным.

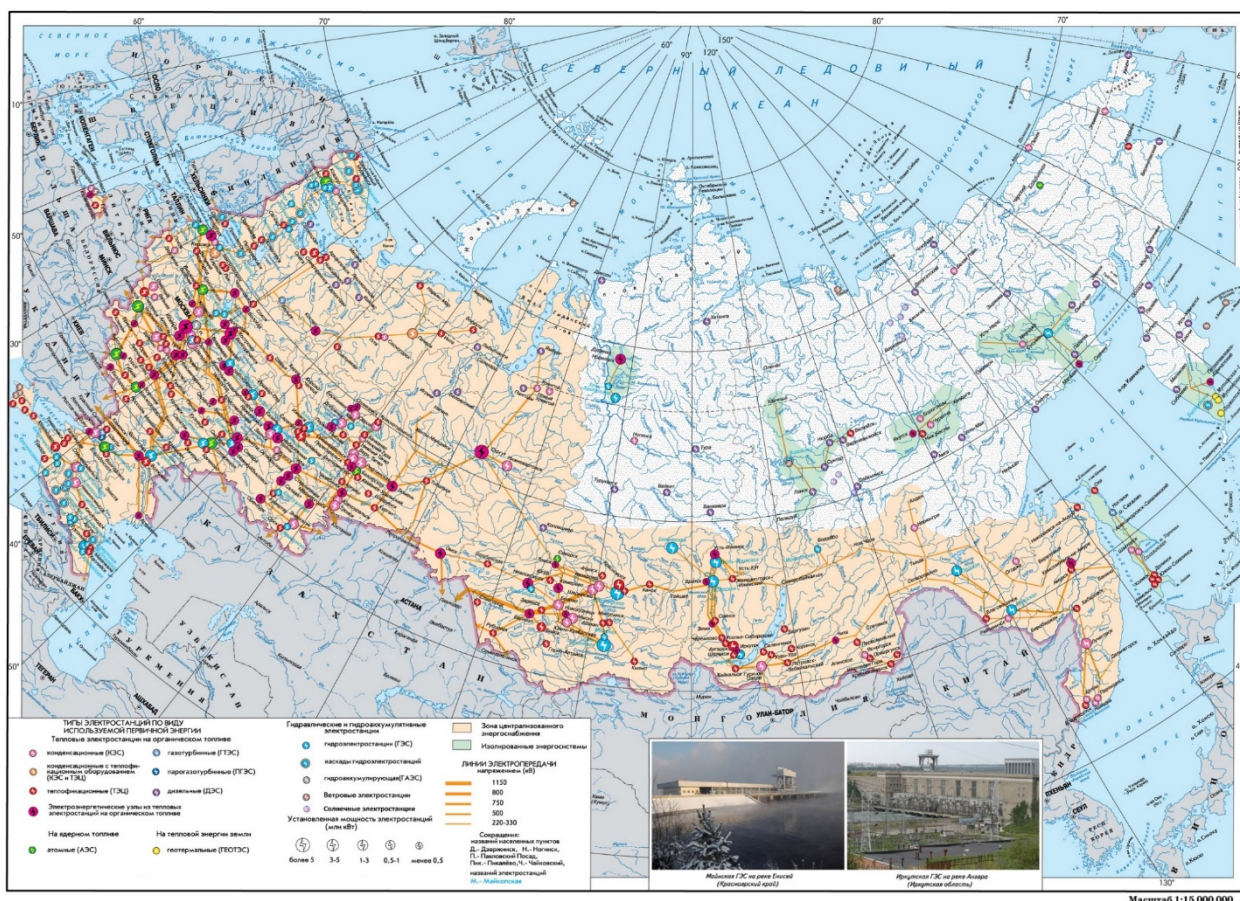


Рисунок 1 – Карта объектов энергетики России.

Проведен разбор преимуществ разрабатываемой «природоподобной» архитектуры систем распределения постоянного тока, предлагаемого в работе. Систему распределения можно рассматривать как магистраль постоянного тока, к которой подключены как источники, так и потребители электроэнергии. Все источники могут иметь различные производительные параметры, но благодаря подгону под один номинал по напряжению, могут быть объединены в общую систему. В случае переменного тока у источников должно совпадать не только напряжение, но и частота, фаза вырабатываемого напряжения. В случае постоянного тока из всех возможных параметров остается только один – напряжение, поддержание которого на должном уровне является одной из задач, решаемых в данной работе.

Проведен обзор систем преобразования, которые используются в классических сетях переменного тока, а также систем, которые необходимы для реализации распределённой электросети постоянного тока. Неотъемлемой частью распределённых сетей являются приборы управления сетью и учета электроэнергии. В отличие от традиционной централизованной сети, в узлах распределённой сети направление передачи энергетических потоков может меняться. В пиках потребления электроэнергия берется из магистральной сети, а в то время, когда вырабатываемая местными генераторами энергия превышает потребную, она может быть отдана в магистраль. На основании показаний приборов учета аппарата управления формирует соответствующие команды и производит перераспределение потоков в нужном направлении.

Общий вывод первой главы заключается в том, что при достаточно детальной проработанности практически всех компонентов распределённой энергетики, создания надёжной и отказоустойчивой схемы взаимодействия всех элементов в единой системе, предлагаемой в данной работе, также активно прорабатывается ведущими корпорациями в области энергоснабжения.

Во второй главе представлена расчётно-теоретическая часть. Определены основные факторы, определяющие результаты расчетов, поддающиеся измерению или оценке. Это позволяет легко моделировать желаемую конфигурацию системы в целом. Что касается исходных данных, относящихся к массе, габаритам или иные физические параметры устройств, узлов или систем, то источником их как правило для первого приближения служат паспортные, справочные или измеренные значения физических параметров.

Разработана математическая модель «Модель гибридной интеллектуальной энергетической сети». В основе математической модели энергетического комплекса лежат уравнения баланса потребляемой и производимой энергии. Для моделирования работы энергетического комплекса горизонт расчета разбивается на часовые интервалы, в пределах которых нагрузки потребителей и режим работы энергетических установок динамически меняются в зависимости от характера используемого источника, которые в свою очередь рассчитываются отдельно.

$$P_{Tj}^i = P_{Gj}^i - P_{Nj}^i$$

Где P_{Tj}^i – баланс энергий i -того пользователя на j -том временном участке, P_{Gj}^i – мощность собственных источников генерации i -того пользователя на j -том временном участке, P_{Nj}^i – мощность собственной нагрузки i -того пользователя на j -том временном участке.

$$P_G(t) = E_{AKB} + W_{SOL}(t) \times S_P \times \eta + P_{WG}(t) + P_{GEN}(t) - (P_N(t) + P_E(t));$$

$$t_n = t + 1;$$

$$I_G = T_{GEN} \times G;$$

$$T_{GEN} = \sum_{t=1}^{t_n} T_{GEN}, \text{ если } P_{GEN}(t) > 0;$$

Где: T_{GEN} – время работы резервного генератора, ч; I_G – затраченное топливо, л; G – расход, л/ч, W_{SOL} – модель расчета мощности солнечного излучения, Вт; P_{WG} – модель расчета мощности мощность ветроэнергетической установки, Вт; P_{GEN} – модель расчета мощности мощность резервного источника, Вт; P_E – модель расчета мощности иные нагрузки, Вт.

P_{Nj}^i в свою очередь отражает мощность собственной нагрузки пользователей и раскрывается как:

$$P_{Nj}^i = P_N \times k + P_E$$

Где: P_N – модель нагрузки пользователя, Вт; k – коэффициент, обеспечивающий сезонную неравномерность нагрузки; P_E – экспортируемая мощность пользователя, Вт.

Разработана «Программа для расчета генерирующих и аккумулирующих мощностей автономной энергетической установки «Zemlya_12» предназначенная для расчёта установленной мощности солнечных батарей, а также установленной ёмкости аккумулирующего оборудования в зависимости от питаемой нагрузки для

её работы в течение года или нескольких лет. При этом входными параметрами является мощность солнечного излучения, падающего на один квадратный метр на площадь с заданным углом наклона. Программа позволяет получать широкий спектр параметров элементов системы, такие как напряжение аккумуляторных батарей, токи заряда, разряда, текущая ёмкость, а также менять номинал напряжения нагрузки, которое может отличаться от напряжения на системе аккумулирования. Так же в модели учитываются коэффициенты мощности заряда аккумуляторной батареи и температурный коэффициент емкости, определяющий текущую емкость аккумуляторной батареи в зависимости от температуры. Для примера произведён расчёт энергетической установки с постоянной нагрузкой 100 Вт. Первичными источниками служат энергия солнца и энергия ветра взятых по координатам расположения экспериментального образца энергоустановки в Мурманской области.

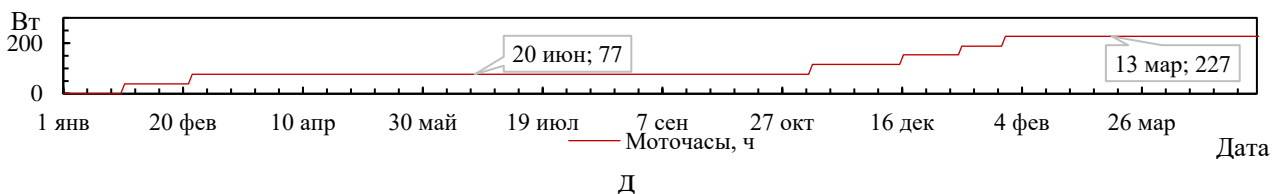
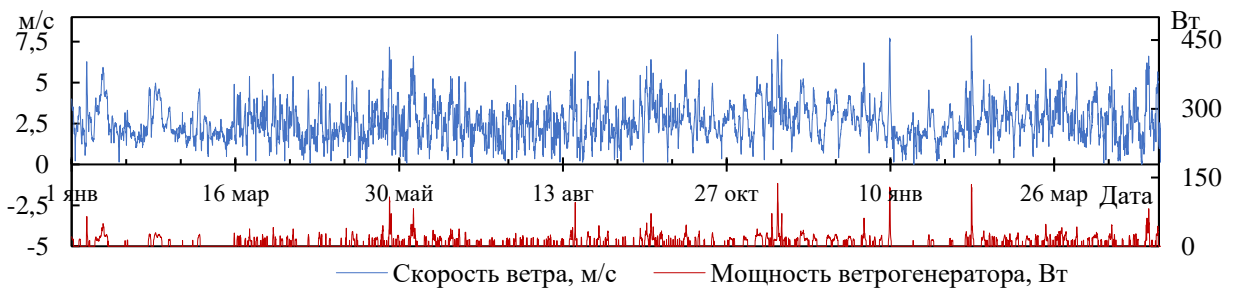
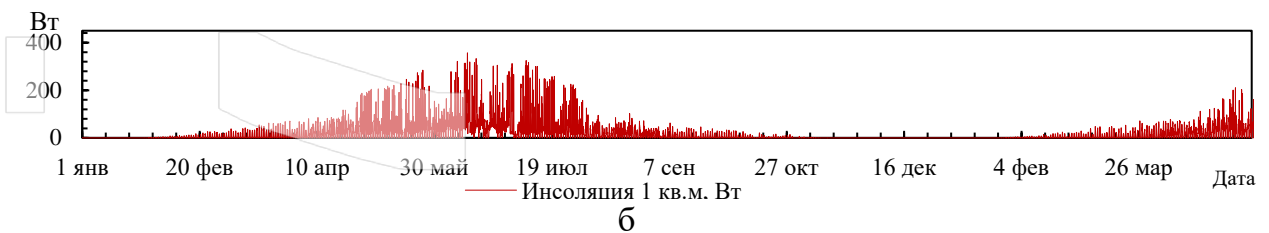


Рисунок 2 – Параметры потребителя с собственными источниками генерации.

Состав обеспечивающий текущий результат:

Площадь покрытия солнечными батареями – 4 м²;

Номинальная мощность ветрогенератора – 2500 Вт;

Номинальная мощность резервного генератора – 300 Вт;

Номинальная энергоемкость накопителя – 10 кВт·ч.

Каждая из моделей представляет самостоятельную ценность и может работать автономно, их связь производится по входным и выходным параметрам. Сформированный математический аппарат включает себя цепь взаимовложенных, по функционалу, но при этом самостоятельных подпрограмм, каждая из которых рассчитывает исходные данные для последующей. Распределение данных, с одной стороны, дает необходимую информацию для разработчика; с другой стороны, является источником исходных данных для расчетных кодов других параметров. Далее выходные данные вспомогательных программ являются исходными для модулей, определяющих вольт амперные характеристики отдельных компонентов и объединяющей их сети. В итоге получают результирующие значения выходных электрических параметров при работе генераторов с потребителями. Данные математический подход находится в центре внимания многих в том числе зарубежных исследователей.

Разработаны имитационные модели отдельных элементов микро сетевых модулей, такие как адаптивные под динамическую нагрузку повышающие и понижающие DC/DC преобразователи.

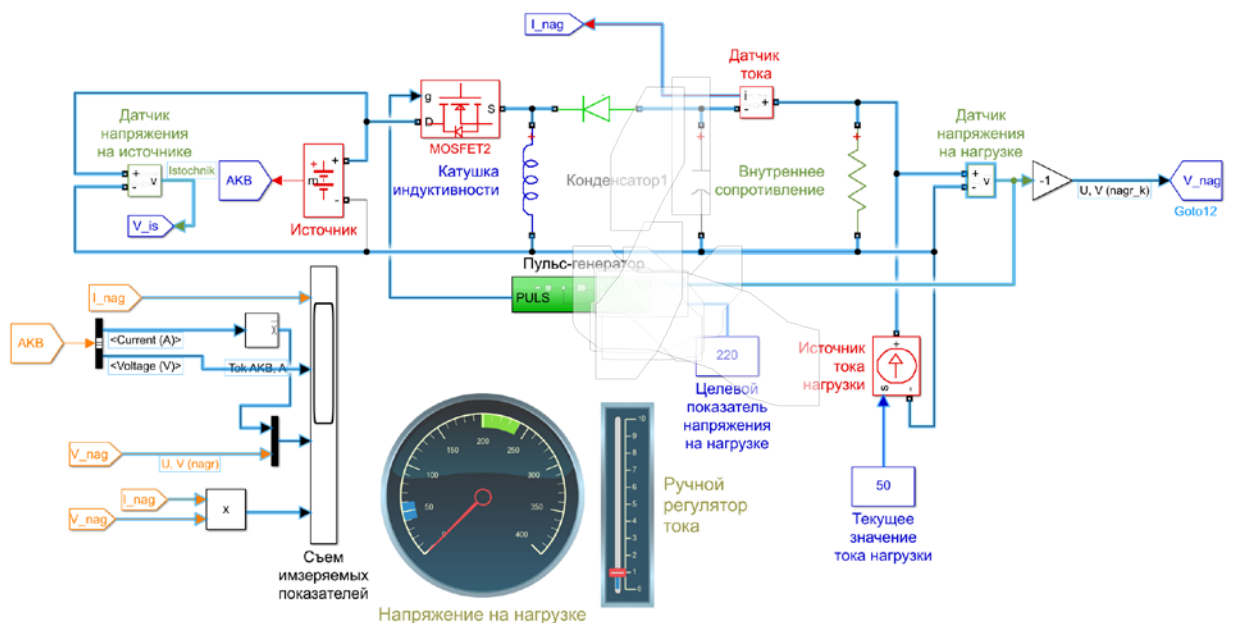


Рисунок 3 – Модель адаптивного повышающего DC/DC преобразователя 48В/220В

Выходное напряжение на нагрузке (рис.4) остается на уровне целевого показателя, даже при динамически меняющемся токе нагрузки и изменении напряжения источника (АКВ), что говорит об адекватности имитационной модели.

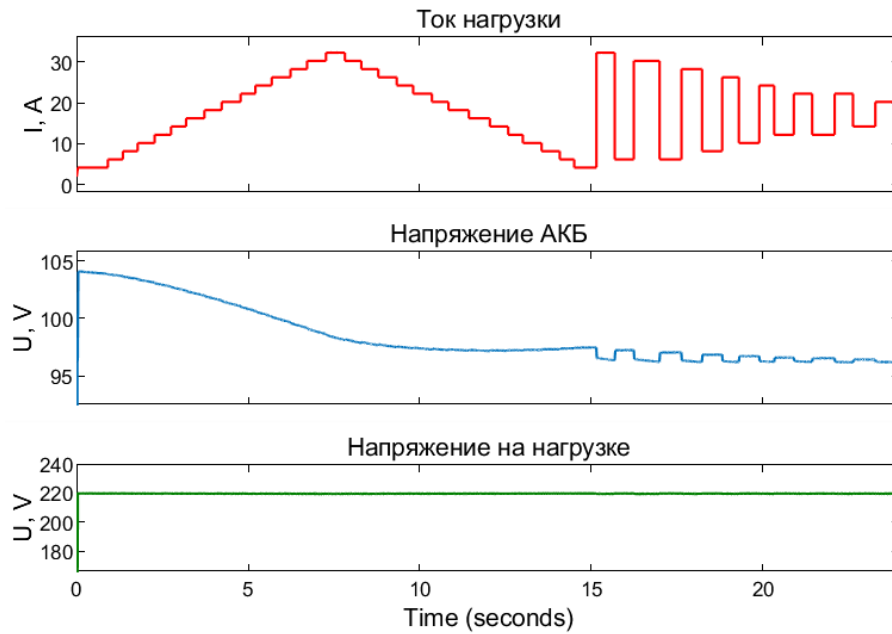


Рисунок 4 – Рабочие параметры DC/DC преобразователя 96В/220В

Разработана Программа для имитационного динамического математического моделирования перспективных распределенных энергосистем. Которая представляет собой электротехническую модель базового сегмента распределённой энергетической сети, состоящая из двух потребителей с собственными источниками генерации и накопления различных номиналов, объединённых в сеть с общей нагрузкой и общей системой генерации, позволяющая проводить вычислительные эксперименты и получать электрические параметры при взаимодействии источников и нагрузок различных номиналов, объединенных по постоянному току с напряжением 220В.

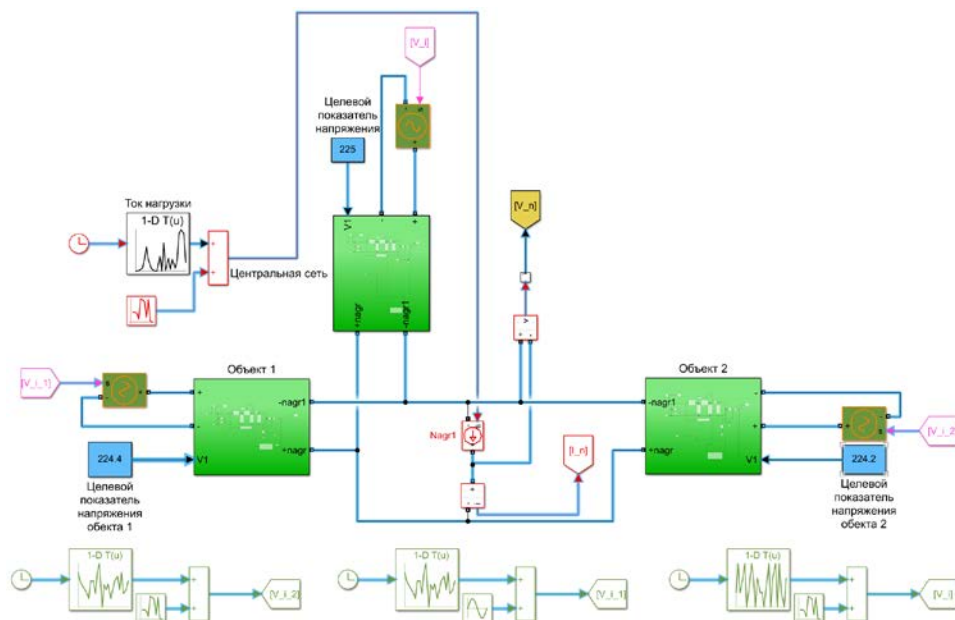


Рисунок 5 – Имитационная модель базового сегмента распределённой энергетической сети 220В постоянного тока

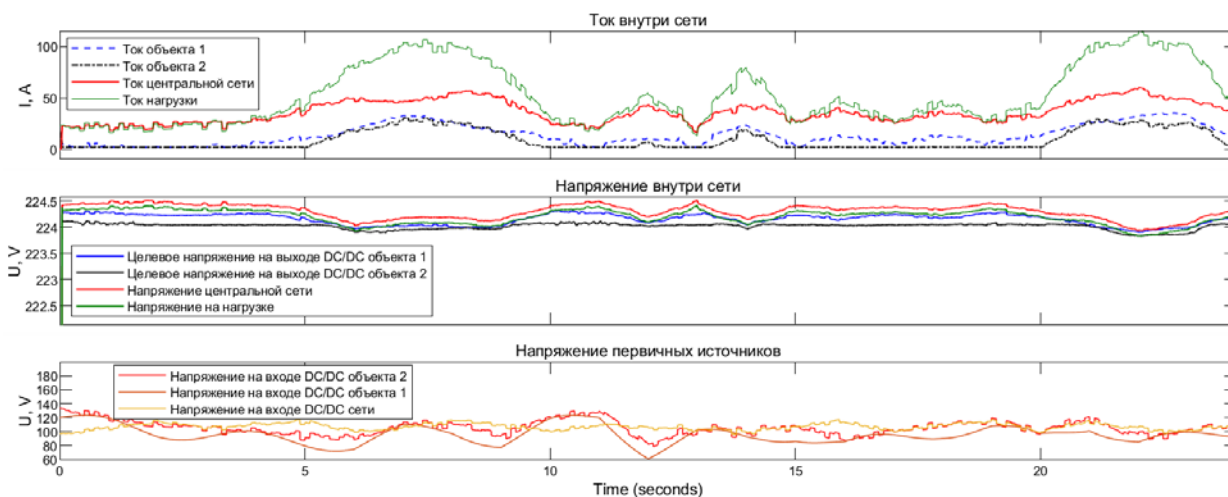
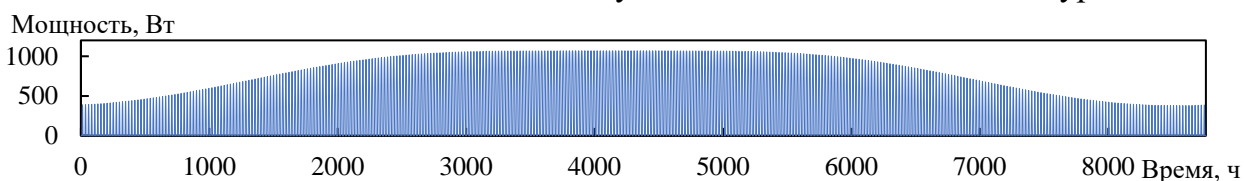


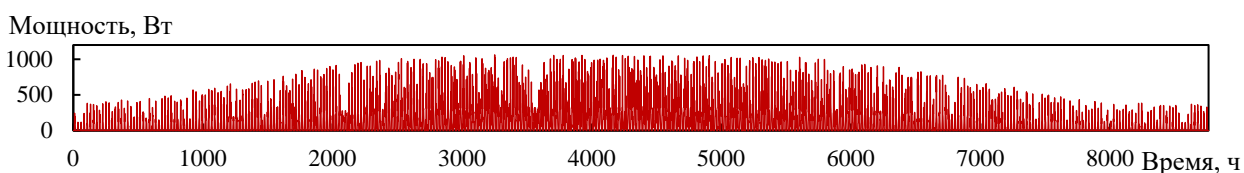
Рисунок 6 – Вычислительный эксперимент.

Вычислительный эксперимент доказал сразу три тезиса о саморегуляции сети постоянного тока: 1. Нагрузка равномерно распределяется по всем источникам, когда их напряжение стабилизировано на одинаковом значении; 2. В случае отказа одного из источников, нагрузка держится на том, который находится в данный момент в работе, при этом отказ или подключение какого-либо из источников в сети постоянного тока не производит значительных возмущаемых воздействий на систему; 3. Для увеличения уровня эмиссии электроэнергии в сеть источнику достаточно скорректировать выходное напряжение. Напряжение на входе источников при этом может меняться, в зависимости от текущей выработки первичных источников энергии ветра или солнца.

Также разработана «Программа для расчёта инсоляции «SOLNCE_poisk_2.2» предназначенная для расчёта мощности солнечного излучения, падающего на 1 квадратный метр поверхности Земли в зависимости от широты местности и угла наклона расчетной поверхности. Программа позволяет получать почасовые данные мощности солнечного излучения с возможностью имитации погодных условий, при котором меняется интенсивность мощности солнечного излучения. На основе имеющихся данных модель расчёта солнечной инсоляции обеспечивает данными, с имитацией изменения интенсивности излучения в зависимости от пасмурных дней.



а



б

Рисунок 7 – Графики, отражающие рассчитанную абсолютную (а) и рассчитанную условно реальную инсоляцию (б)

Разработана модель, учитывающая внутреннее тепловыделение в результате работы резервного генератора и аппаратуры, а также позволяющая получать расчётные значения температуры внутри энергоустановки блок-контейнерного типа

в результате теплообмена со средой с учетом температуры внешней среды и мощности солнечного излучения. Необходимость учёта температуры внутри аппаратного отсека в электротехническом отношении обусловлена прямой зависимостью текущей энергоёмкости аккумуляторных батарей от температуры среды, и, как следствие, для расчёта адекватного долгосрочного прогноза работы энергетической установки.

В качестве примера предлагается решение, для контейнера габаритами 2x2x3 метра со следующими входными данными:

$T_0 = -11$ (C°) – начальная температура внутри контейнера, $k = 0.035$ (Вт/м×К) – коэффициент теплопроводности материала теплоизоляции, $S = 6$ (м²), внешняя площадь поверхности контейнера попадающая под действия прямых солнечных лучей, T_{out} – массив данных с шагом 1 час для Мурманской области $C_p = 1005$ (Дж/(кг×К)) – теплоемкость воздуха, $\rho = 1.2$ (кг/м³) – плотность воздуха, $V = 8$ (м³) – объем рассчитываемого воздуха.

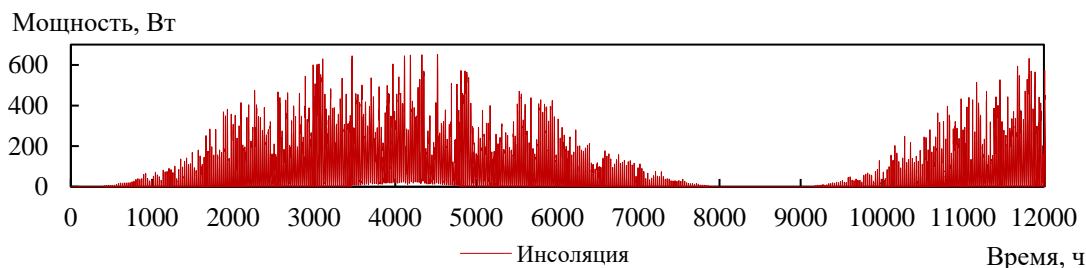
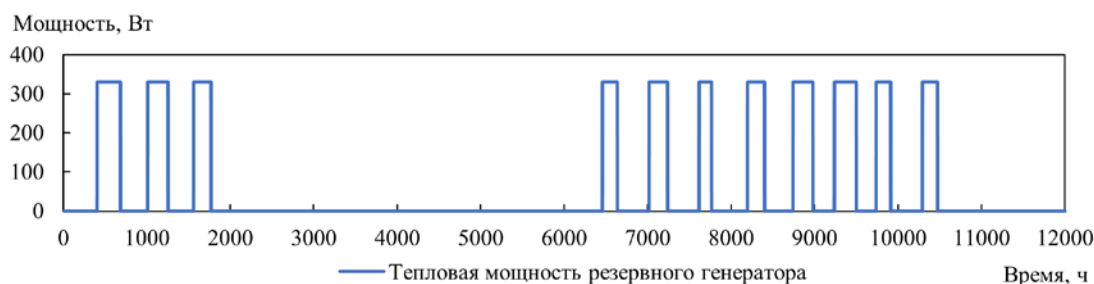
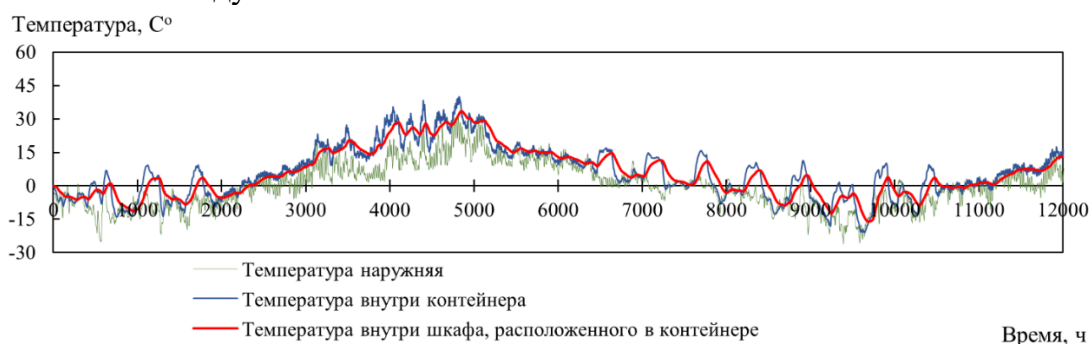


Рисунок 8 – Теплофизические параметры энергетической установки

Для валидации были взяты измеренные данные температуры с энергоустановки, которая установлена на полигоне заказчика на севере Камчатского края.

Данные представляют собой записанный штатной системой измерения массив значений с шагом в 1 час в течение с 14.12.22 по 27.01.23. Для более полной картины отображения причинно-следственной связи возникающих возмущающих

воздействий на графике, дополнительно к измеренным данным по температуре на график были нанесены данные по инсоляции, взятые из базы данных НАСА для координат расположения энергетической установки.

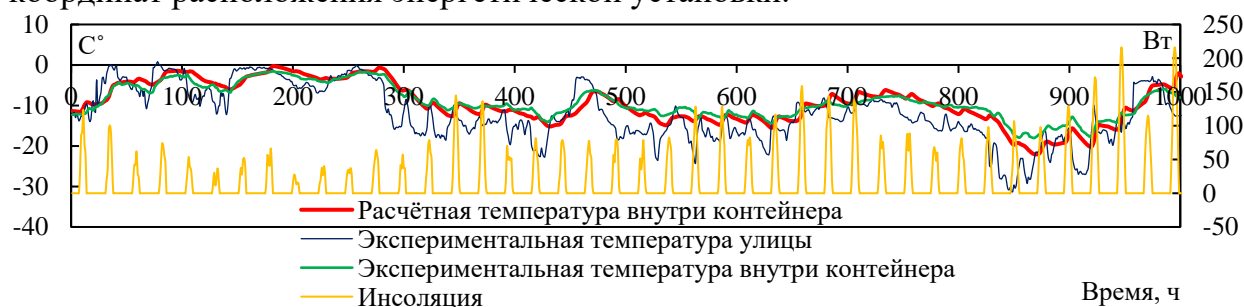


Рисунок 9 – Расчётные и экспериментальные данные

На графике экспериментальных значений заметна зависимость внутренней температуры от внешней, также видны скачки температуры, которые сложно было бы объяснить, если бы не было данных по инсоляции. Потому как энергоустановка контейнерного типа установлена на земле и возвышается на 2,5 м она нагревается солнечным излучением даже в зимнее время. Таким образом можно объяснить возрастание температуры внутри контейнера при условии, что текущая температура внешней среды ниже, чем внутренняя.

Для проведения сравнительного анализа экспериментальных измеренных значений со значениями температуры, полученными расчётным путём, в качестве входных данных в модель, подставим температуру внешней среды и инсоляцию. Таким образом в результате расчёта будет получена температура внутри полости, теплофизические свойства которой будут соответствовать тем, которые характерны для материалов реальной энергетической установки.

Расчётные значения показали достаточно высокую сходимость с экспериментальными данными со среднеквадратичным отклонением $СКО = 1.23 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результатом второй главы является разработка вычислительного инструментария для расчётов элементов малой и распределенной энергетики, а также создание собственного взаимосвязанного математического аппарата для расчёта энергетических параметров распределенной энергетической сети.

На основе разрабатываемого математического аппарата проводились вычислительные эксперименты, которые позволили создать необслуживаемый автономный энергетический комплекс, обеспечивающий электропитание взаимосвязанной измерительной системы, распределённой по площади 100 км^2 и обеспечивающей работу нагрузки в течение года на основе возобновляемых источников энергии и аккумуляторных батарей на севере Камчатского края (рис.10).



Рисунок 10 – Автономная энергетическая установка на основе ВИЭ

Разработана программа структурного синтеза позволяющая от базового элемента, состоящего из 4 компонентов и 6 линий связи, наращивать компоненты по четным значениям, и на каждую пару добавленных компонентов, добавлять по 3 линии связи, таким образом, если V это компоненты, а E это линия связи, А, В, С ..n - последовательно расширяемые комбинации, то при условии, что комбинация А ($V=4, E=6$), то $B=(V_{AV+2}, E_{AV+3})$. Таким образом, руководствуясь данным алгоритмом, В ($V=6, E=9$); С ($V=8, E=12$); D ($V=8, E=12$); E ($V=10, E=15$) и т. д.

Для того, чтобы автоматизировать синтез структур РЭС для нахождения количества компонентов и линий связи между ними можно использовать следующую формулу:

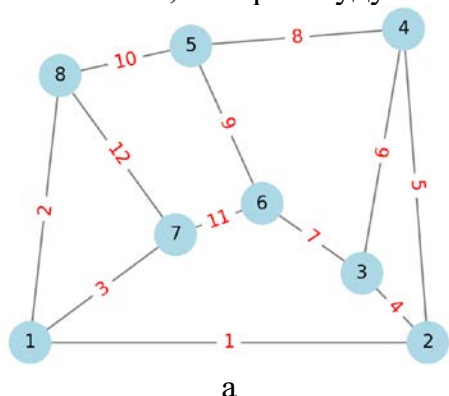
$$E_N = \frac{3}{2} \times V_N; \quad (1)$$

Где: E_N – количество линий связи определённого графа; V_N – четное число определяющее количество компонентов определённого графа; N – порядковое обозначение графа (А, В, С и т. д.)

Таблица 1. Расчёт состава замкнутых троированных структур РЭС.

	А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	І	Ј	К	Л	М	Н
Вершины	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Связи	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45

Для расчета вероятности наличия путей в графе возьмем граф из 8 компонентов и 12 линий связи, которые будут входить в одну систему связности.



	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	0	0	0	0	1	1
2	1	0	1	1	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	1	0	0
4	0	1	1	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	1
6	0	0	1	0	1	0	1	0
7	1	0	0	0	0	1	0	1
8	1	0	0	0	1	0	1	0

Рисунок 11 – Расширенная до 8 компонентов структура РЭС (С) обеспечивающая троированную связь между компонентами (а), матрица смежности структуры (б)

Модель позволяет находить вероятности наличия пути между двумя вершинами в графе с учетом вероятностей отказов для каждого пути.

Для каждого пути между i и j , учитывая вероятность отказов:

$$n(i, j) = 1 - \prod(1 - P_{En}); \quad (2)$$

Где произведение берется по всем ребрам пути.

Здесь P_{En} - вероятность отказа для каждого ребра на пути между i и j .

Таким образом, расчет позволяет выразить вероятность наличия пути между произвольно взятой парой вершин в графе с учетом вероятностей отказа для каждого пути.

В расчёт производится путём путем последовательного обхода путей соединяющих вершины, вероятность отказа для каждого пути между вершинами задается, а вероятность наличия соединяющего две произвольные вершины и

вычисляет, в результате получается вероятность наличия пути между заданными вершинами i и j в графе.

Таблица 2. Различные комбинации вероятностей отказа линий связи.

линия	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
пути	1-8	1-5	1-3	8-4	8-6	3-5	3-2	5-4	2-6	2-7	4-7	6-7
Различные комбинации вероятностей отказа для линий связи (P_{En})												
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
β	1	1	0.01	1	0.01	0.01	0.01	1	0.01	0.01	0.01	0.01
γ	1	1	0.01	1	0.01	0.01	0.01	1	0.01	0.01	0.01	1
δ	1	1	0.01	1	0.01	0.01	0.01	1	0.01	1	0.01	1

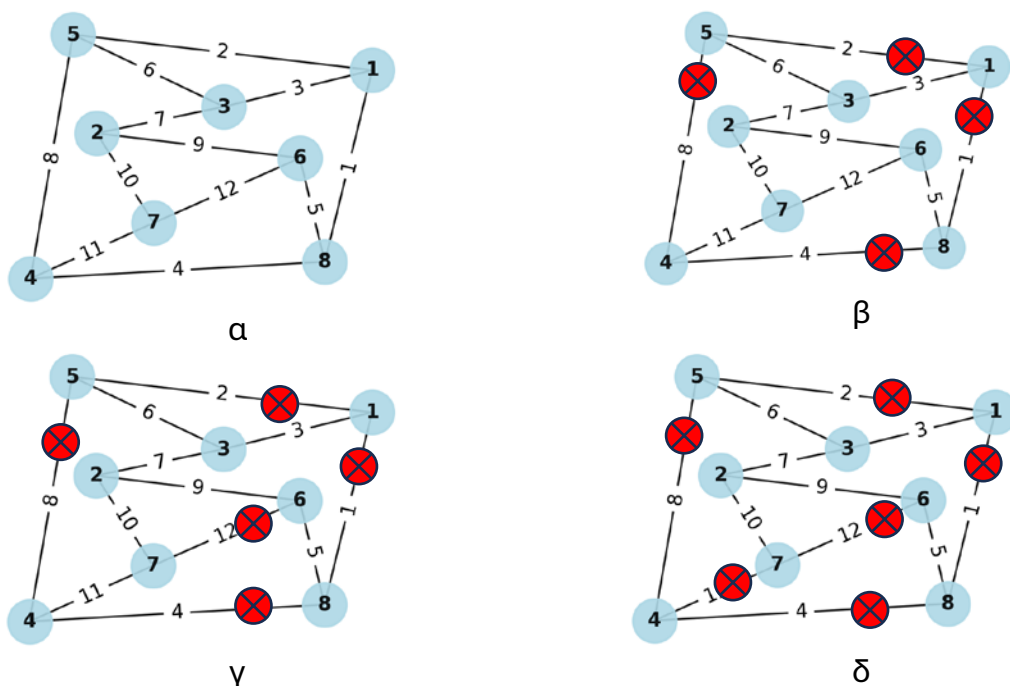


Рисунок 12 – Различные комбинации отказов линии связи между компонентами РЭС

В данном случае вероятность наличия пути между компонентами будет рассчитываться для произвольно взятых компонентов. В данном случае производится расчёт для 4 комбинаций, во время которых рассчитывается вероятность наличия пути при 0, 4, 5, 6 отказах внутри одной структуры РЭС.

Таблица 3. Результаты расчёта вероятности безотказной работы всей схемы РЭС при различных комбинациях отказов линий связи.

Пути	1-4	5-8	1-7	2-8	3-4	8-3
α	~1	~1	~1	~1	~1	~1
β	~1	~1	~1	~1	~1	~1
γ	0.9605	0.9605	0.9702	0.9801	0.9702	0.9702
δ	0	0.9605	0	0.9801	0	0.9702

Результаты вычислительного эксперимента показали, что событие, при котором на выбранной структуре РЭС происходит отказ, то есть отсутствует связь, между как минимум одной произвольно взятой парой компонентов, происходит при

выходе из строя 6 из 12 линий связи. При этом, при выходе из строя 5 из 12 линий связи, связность компонентов сохраняется с вероятностью отказа не более 0.035.

Для сравнения можно привести структуру РЭС 2 степени, при которой каждый из компонентов имеет по 2 связи.

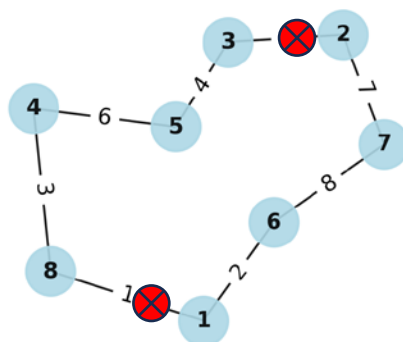


Рисунок 13 – 8-ми компонентная двухсвязная структура РЭС

Событие, при котором на выбранной структуре РЭС происходит отказ, то есть отсутствует связь, между как минимум одной произвольно взятой парой компонентов, происходит при выходе из строя 2 из 8 линий связи.

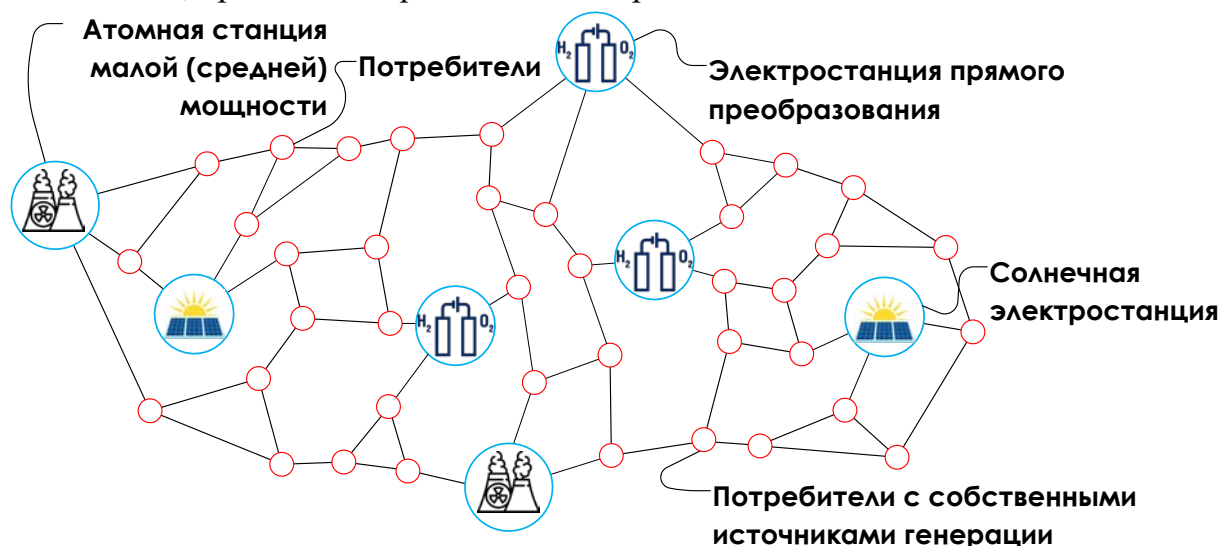


Рисунок 14 – Облик перспективной РЭС, синтез которой обеспечен разработанной методикой

В третьей главе представлена экспериментальная модель, с помощью которой можно физически имитировать генерацию, накопление и транзит энергии между пользователями распределённой энергетической сети при различных возмущающих воздействиях в сети. Для проведения испытаний на данной экспериментальной модели была создана программа и методика проведения испытаний, которая отражает ключевые сценарии, которые могут, происходит в отдельных сегментах распределённой энергетической сети.

В ходе работы было разработано техническое решение – контроллер распределения энергии, который позволяет осуществлять коммутацию необходимого количества накопителей электроэнергии в последовательную цепь для достижения необходимых параметров напряжения для потребителя, и осуществлять коммутации накопителей электроэнергии в параллельную цепь для зарядки накопителей электроэнергии, при этом соблюдается условие, при котором

энергия с источника электроэнергии может попадать на любой из накопителей электроэнергии, но без перетекания электроэнергии с одного накопителя на другой.

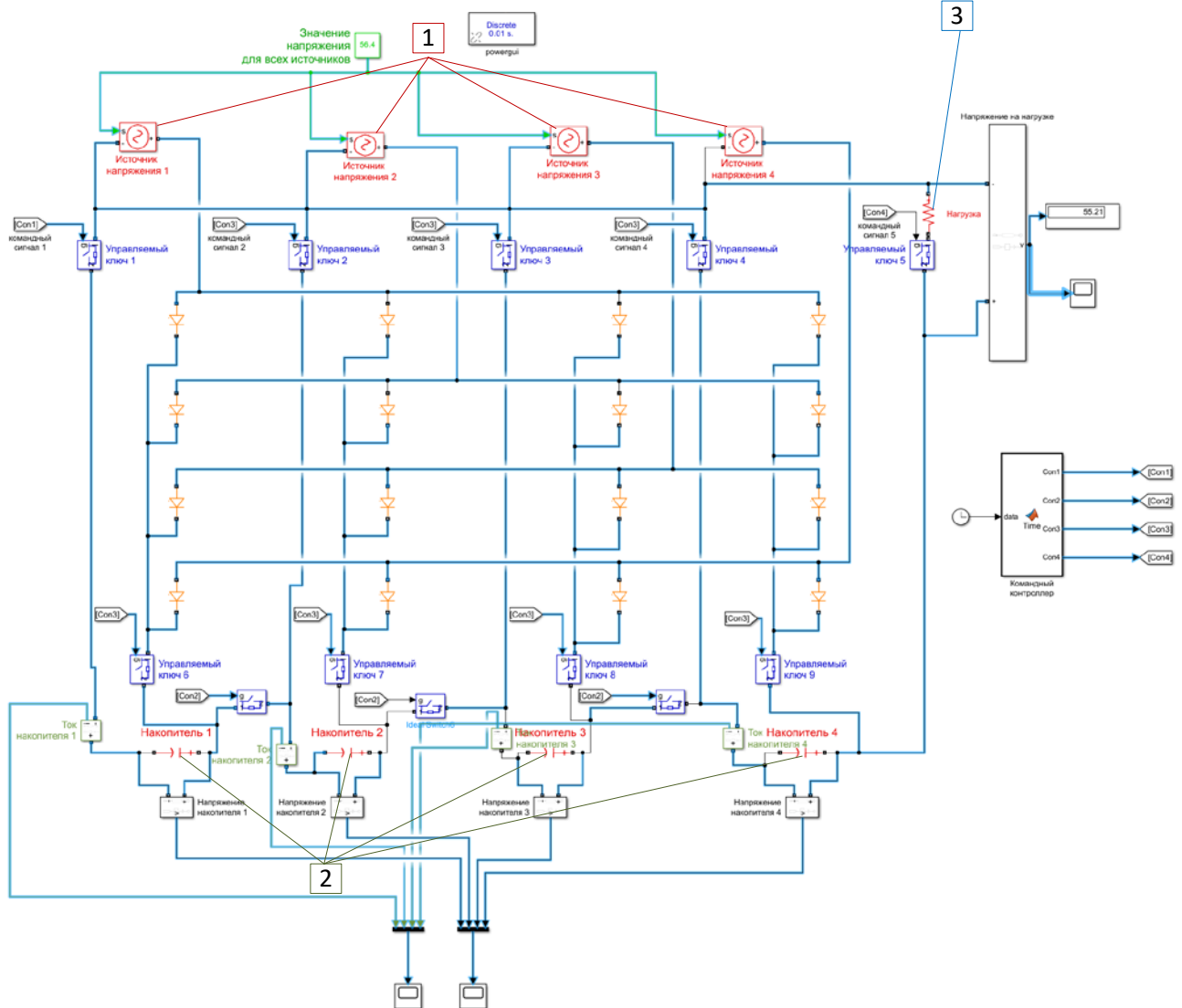


Рисунок 15 – Имитационная модель контроллера распределения энергии: 1 – источники энергии номиналом 48В, 2 – накопители энергии номиналом 48В, 3 – нагрузка номиналом 192В

Контроллер распределения энергии был внедрён в аккумуляторную батарею с номинальным напряжением 48В. Аккумуляторная батарея состоит из 12 параллельно соединенных аккумуляторов емкостью 100 А*ч и номинальным напряжением 48В, что позволяет при последовательном соединении обеспечить номинальные 576В и 48А, которые необходимы для обеспечения быстрого заряда электромобиля по протоколу ChaDeMo, и, при параллельном соединении, обеспечивать возможность заряда АКБ от стандартных солнечных контроллеров заряда номинальным напряжением 48В.

Характеристики экспериментальной модели зарядной станции

- максимальная электрическая мощность, реализуемая в течение 0.5 ч: 24 кВт;
- максимальный ток полезной нагрузки: постоянный, 50 А;
- выходное напряжение постоянного тока: 672–480 В.

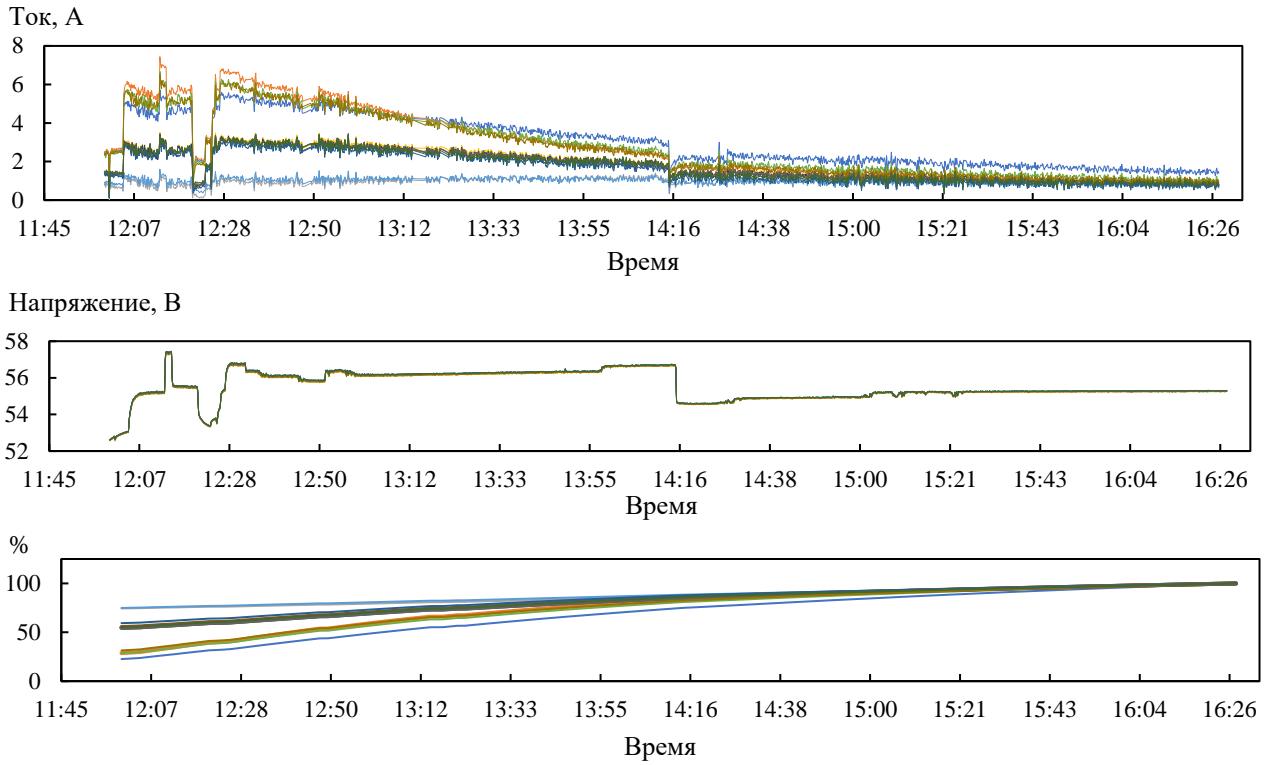


Рисунок 16 – Зарядные кривые, при параллельной коммутации и заряде 12 групп АКБ

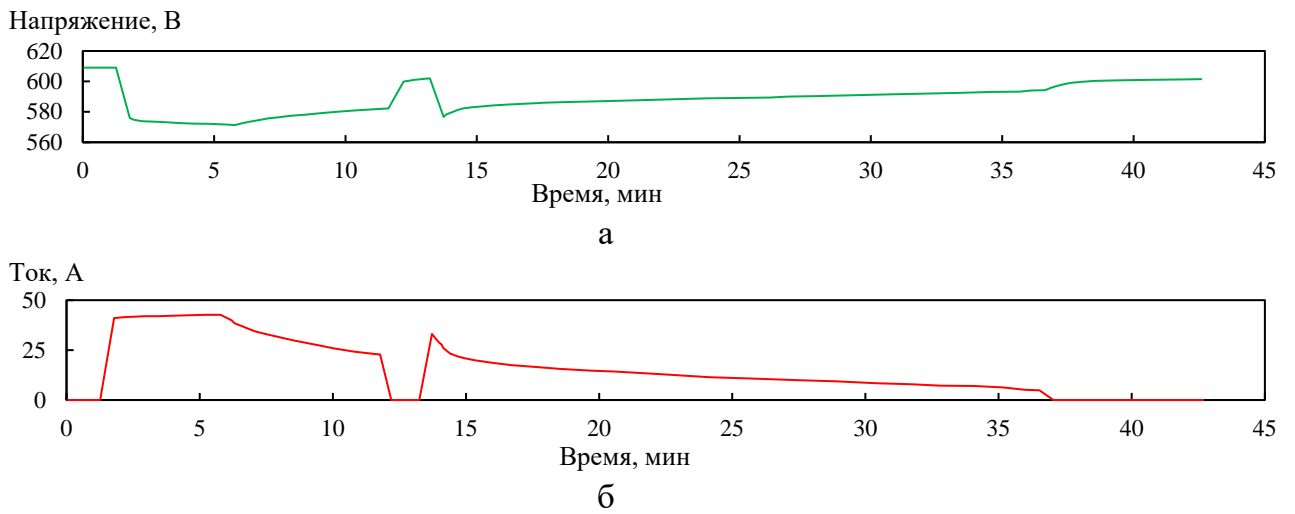


Рисунок 17 – Показатели параметров заряда электромобиля Mitsubishi i-MIEV



Рисунок 18 – Процесс заряда Mitsubishi i-MIEV.

В главе приведены результаты экспериментальных исследований на обобщенных узлах и элементах РЭС на постоянном токе, с целью определения их электротехнических характеристик и подтверждения соответствия указанным в технической документации параметрам. Для проведения этих исследований разработано два энергетических комплекса объединенных в сеть, состоящих из возобновляемых источников энергии, аккумуляторных батарей, резервных источников, основанных на дизельном генераторе и метанольном топливном элементе. Комплексы питают, как собственную нагрузку, так и нагрузку соседнего пользователя. В составе имеется общая нагрузка, находящаяся на общей цепи. Полученные данные проанализированы и сопоставлены с расчетными прогнозами, что позволяет получать объективные результаты и оценивать эффективность работы узлов и элементов РЭС на постоянном токе и подтвердить выдвигаемую гипотезу о возможности саморегулирования в сетях постоянного тока без аппаратного управления и производимое естественным «природоподобным» образом без использования директивно адресной автоматики.

Осуществлена комплексная проверка работоспособности объекта РЭС на постоянном токе. В процессе эксперимента проведены сравнительные тесты и измерения, а также проведена моделирование работы системы при различных условиях. С помощью современных DC/DC преобразователей и контрольно-измерительных приборов, получены данные о работе объекта РЭС на постоянном токе и проведена оценка её эффективности и надежности. Результаты комплексных экспериментальных исследований позволили воплотить способ синхронизации одной локальной распределённой энергетической сети постоянного тока с другой такой же аналогичной не требующий их синфазности, прямое подключение и объединение энергетических систем по напряжению.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработан принцип построения новых отказоустойчивых распределенных энергетических сетей, отличающийся тем, что основной акцент делается на создании модульной структуры, способной адаптироваться к различным условиям эксплуатации и вариативности потребления энергии. Использование как собственной инфраструктуры, так и элементов централизованного электроснабжения, позволяет создать гибкую и отзывчивую систему. Это обеспечивает не только увеличение эффективности передачи энергии, но и повышение ее надежности за счет возможности быстрого переключения и резервирования маршрутов транзита энергии в случае возникновения аварийных или плановых отключений. Новые схемы представляют собой инновационные решения в сфере энергетики, направленное на повышение надежности и эффективности распределения энергетических ресурсов.

2. Апробирована в практической реализации новая методика управления элементами распределенной энергетики, отличающийся тем, что метод предполагает автоматизированное регулирование потоков энергии с использованием силовых DC/DC конвертеров, который не требует предварительного анализа и прогнозирования параметров сети. Такая методика позволяет не только оптимизировать расход энергии, уменьшая потери в сети, но и обеспечивает повышенный уровень устойчивости сети к внешним и внутренним

воздействиям, таким как изменение потребления или технологические сбои, благодаря адаптивному реагированию на изменяющиеся условия в реальном времени. Принципиально новый подход к управлению элементами распределенной энергетической сети доказал свою эффективность в практическом применении.

3. Результаты экспериментального и вычислительного исследования подтвердили эффективность создаваемых электротехнических сетей. Благодаря внедрению модульной структуры, был достигнут положительный результат в динамике распределения энергии в условиях возрастающей нагрузки на сеть, что в свою очередь обеспечивает повышение стабильности и надежности поставки энергии конечным потребителям.

4. Синтезированные с помощью разработанной программы структуры распределенных энергетических систем обладают уникальной способностью интегрироваться с существующими элементами энергетической инфраструктуры, а также адаптироваться под географические особенности местности, что делает их использование особенно важным для переходного периода модернизации энергетических сетей и расширении сетей на ранее не электрифицированной территории. Такой подход способствует не только сокращению затрат на строительство новых энергетических мощностей, но и значительно ускоряет процесс трансформации энергетической инфраструктуры к более открытой и гибкой системе, что увеличивает общую отказоустойчивость и дополняет возможности по обеспечению бесперебойного энергоснабжения в условиях высокой вариативности и непредсказуемости нагрузок.

5. Разработан математический аппарат, позволяющий рассчитывать взаимодействие узлов генерации, хранения, потребления, связанных в единую сеть с помощью DC/DC конвертеров.

6. Создан экспериментальный сегмент распределенной энергетической сети, способный в режиме самостабилизации обеспечивать генерацию, потребление и транзит электроэнергии другим сегментам сети.

7. Методом вычислительных экспериментов были рассчитаны параметры генерирующих и аккумулирующих мощностей автономной гибридной энергоустановки контейнерного исполнения предназначенной для круглогодичного электропитания аппаратуры заказчика на морском побережье Арктической зоны Российской Федерации.

8. Создан контроллер распределения энергии, который, используя аккумуляторные батареи одного номинала без использования DC/DC преобразователей, позволяет конфигурировать АКБ в необходимый номинал, в данном случае для заряда электрического транспорта в режиме «быстрой зарядки».

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях (Перечень ВАК РФ):

1. Разработка математической модели для проведения энергетических и тепловых расчетов для долгосрочного прогноза работы автономных энергоустановок в арктическом регионе / О. Г. Лосев, Д. А. Мельник, А. С. Григорьев // Новое в российской электроэнергетике. – 2024. – № 3. – С. 17–27.

2. Структурный синтез распределенных энергетических систем / О. Г. Лосев, Д. А. Мельник, А. С. Григорьев // Новое в российской электроэнергетике. – 2024. – № 8. – С. 52–59.

3. Энергоустановки на основе возобновляемых источников и электрохимических устройств хранения и генерации энергии для децентрализованного автономного электроснабжения / А. С. Григорьев, В.В. Скорлыгин, С. А. Григорьев, Д.А. Мельник, О. Г. Лосев / Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 33–37.

4. Исследование рабочих характеристик никель-кадмиевых аккумуляторов / О. Г. Лосев, Д. А. Мельник, А. С. Григорьев // Новое в российской электроэнергетике. – 2023. – № 10. – С. 6–17.

Патенты на изобретение, полезные модели и программы для ЭВМ Российской Федерации:

1. Способ распределения и передачи электроэнергии для удаленных нагрузок и система его осуществления / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г. / Патент на изобретение 2756847 С1, 06.10.2021. Заявка № 2020134593 от 21.10.2020.

2. Распределённая энергетическая сеть / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г. / Патент на изобретение 2749864 С1, 17.06.2021. Заявка № 2020131285 от 23.09.2020.

3. Система наблюдения затопленных радиоактивных объектов и способ ее осуществления / Лосев О. Г., Королев А. В., Григорьев А. С. / Патент на изобретение 2770154 С1, 14.04.2022. Заявка № 2021130538 от 20.10.2021.

4. Зарядная система для электрического транспорта / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г. / Патент на изобретение 2722894 С1, 04.06.2020. Заявка № 2019136502 от 14.11.2019.

5. Зарядная станция для электрического транспорта / Григорьев А. С., Григорьев С. А., Мельник Д.А., Филимонов М. Н., Лосев О. Г. / Патент на изобретение RU 2691386 С1, 13.06.2019. Заявка № 2018129986 от 17.08.2018.

6. Контроллер распределения электроэнергии автономной энергетической установки Григорьев / А.С., Григорьев С. А., Мельник Д.А., Филимонов М. Н., Лосев О. Г., Печак В.В. / Патент на полезную модель RU 179979 U1, 30.05.2018. Заявка № 2017146856 от 29.12.2017.

7. Автономный источник электроснабжения на основе ветросиловой установки / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Мельник А.Д., Лосев О. Г. / Патент на изобретение 2741856 С1, 29.01.2021. Заявка № 2020125515 от 31.07.2020.

8. Автономная система энергоснабжения с кинетическим накопителем энергии / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г., Мельник А.Д. / Патент на изобретение 2749148 С1, 07.06.2021. Заявка № 2020129028 от 17.03.2020. Получен технологический ваучер № 00007 (дает право владельцу воспользоваться пакетом услуг агентства по продвижению технологии на российском рынке)

9. Программа для имитационного динамического математического моделирования перспективных распределенных энергосистем / Григорьев А. С., Лосев О. Г., Мельник Д.А. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021617637, 18.05.2021. Заявка № 2021614192 от 29.03.2021.

10. Модель адаптивного повышающего dc/dc преобразователя / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666771, 20.10.2021. Заявка № 2021665849 от 11.10.2021.

11. Модель контроллера распределения энергии гибридной энергетической установки / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г. / Свидетельство о

регистрации программы для ЭВМ 2021666772, 20.10.2021. Заявка № 2021665850 от 11.10.2021.

12. Модель гибридной интеллектуальной энергетической сети / Григорьев А. С., Мельник Д.А., Лосев О. Г. / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666774, 20.10.2021. Заявка № 2021665851 от 11.10.2021.

13. "Модель повышающего dc/dc конвектора трансформаторного типа для динамической нагрузки "dc/dc_transfor_2" Григорьев Александр Сергеевич, Мельник Дмитрий Александрович, Лосев Остап Геннадьевич Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669785, 25.10.2022. Заявка № 2022669256 от 18.10.2022.

14. "Программа для расчёта инсоляции "solnce_poisk_2.2" / Григорьев Александр Сергеевич, Мельник Дмитрий Александрович, Лосев Остап Геннадьевич / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022669863, 26.10.2022. Заявка № 2022669269 от 18.10.2022.

15. "Программа для расчета генерирующих и аккумулирующих мощностей автономной энергетической установки "zemlya_12" / Григорьев Александр Сергеевич, Мельник Дмитрий Александрович, Лосев Остап Геннадьевич / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022680077, 27.10.2022. Заявка № 2022669271 от 18.10.2022.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и/или Web of Science:

1. Charging Station for Electric Transport Based on Renewable Power Sources / O. G. Losev, A. S. Grigor'ev, D. A. Mel'nik, S. A. Grigor'ev // Russian Journal of Electrochemistry. – 2020. – Vol. 56, No. 2. – P. 163-169. – DOI 10.1134/S1023193520020093.

2. Small Autonomous kW-Level Power Generation Based on Radioisotope and Renewable Energy Sources for the Arctic Zone and the Far East / A. S. Grigoriev, O. G. Losev, A. V. Korolev [et al.] // Atomic Energy. – 2019. – Vol. 125, No. 4. – P. 231-238. – DOI 10.1007/s10512-019-00472-x.

3. Hybrid Stand-alone Power Supply Systems for the Arctic Polar Stations / A. V. Frolov, A. S. Grigoriev, O. G. Losev [et al.] // Russian Meteorology and Hydrology. – 2019. – Vol. 44, No. 4. – P. 305-310. – DOI 10.3103/S1068373919040113.

4. Optimization of a Hybrid Power Plant on the Basis of the Modeling of Thermal Processes in it / A. S. Grigor'ev, V. V. Skorlygin, O. G. Losev [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, No. 3. – P. 562-573. – DOI 10.1007/s10891-019-01964-0.

5. Power Plants Based on Renewables and Electrochemical Energy Storage and Generation Systems for Decentralized Autonomous Power Supply / A. S. Grigoriev, V. V. Skorlygin, O. G. Losev [et al.] // Russian Electrical Engineering. – 2019. – Vol. 90, No. 7. – P. 505-508. – DOI 10.3103/S106837121907006X.