

**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

Муравьев Дмитрий Игоревич

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ФОТО-ДИЗЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ**

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

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в отделении электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики

**Научный руководитель:**

**Лукутин Борис Владимирович**

доктор технических наук, профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

**Официальные оппоненты:**

**Суслов Константин Витальевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

**Щуров Николай Иванович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехнических комплексов Факультета мехатроники и автоматизации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится «17» марта 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.10 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.10  
кандидат технических наук, доцент



Никитин Дмитрий Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В мире широко практикуется интеграция различных видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с системой накопления электроэнергии (СНЭЭ) в состав автономного электротехнического комплекса электроснабжения на базе дизель-генераторных установках (ДГУ). В настоящее время чаще интегрируются фотоэлектрические станции (ФЭС) благодаря хорошим эксплуатационным характеристикам и стабильно снижающейся стоимости. Получаемые автономные фото-дизельные электроэнергетические системы (ФДЭС) переменного тока обладают набором известных технических, экономических и экологических преимуществ, обосновывающих их использование для электроснабжения объектов, не имеющих доступа к централизованной электроэнергетической системе. Подобными маломощными объектами (единицы-десятки кВт) являются нефтегазовые и горнодобывающие предприятия, малочисленные населённые пункты, вахтовые жилые посёлки, метеорологические станции, базовые вышки сотовой связи, буровые установки и т.п. В качестве главного положительного эффекта от использования ФДЭС является экономия дизельного топлива за счёт замещения части генерируемой электрической энергии ДГУ с помощью фотоэлектрической генерации.

Обычно, электрическим узлом сопряжения ФЭС для взаимодействия на переменном токе с ДГУ является сетевой (гибридный) инвертор. Однако, превышение фотоэлектрической выработки свыше допустимого уровня в определённые временные интервалы ведет к необходимости ограничения выходной мощности ФЭС. Причиной мощностного лимита ФЭС относительно ДГУ является соблюдение условия устойчивой работы сетевого инвертора. Обычно рекомендуемая величина установленной мощности ФЭС, работающей параллельно с ДГУ, не должна превышать 30–40% от суммарной генерации. Для повышения энергоэффективности ФДЭС, вся доступная энергия ФЭС должна потребляться нагрузкой, при балансе генерируемой и потребляемой электроэнергии в автономной системе электроснабжения. Следует отметить, что характерной эксплуатационной особенностью большинства ДГУ не только в России, но и в мире, является значительный уровень морального устаревания и физического износа дизельных двигателей, что снижает их технико-экономические характеристики. Удельный расход условного топлива на полезный отпуск электроэнергии на объектах «малой генерации» в России составляет в среднем 476 г.у.т./кВт·ч. В то же время реальной возможности отказаться от ДГУ без снижения надёжности и критерия гарантированного электроснабжения нет.

Таким образом, для развития общей теории электротехнических комплексов автономного электроснабжения, изучения их системных свойств и связей компонентов с целью улучшения технико-экономических характеристик ФДЭС актуально пересмотреть использование классической топологии переменного тока в таких системах электроснабжения в пользу топологии ФДЭС на постоянном токе.

Комплекс решений рассматриваемой научно-технической задачи должен обосновываться разработкой концепции структурного взаимодействия между компонентами ФДЭС на постоянном токе, разработкой энергоэффективных алгоритмов управления системой на постоянном токе, основывающихся на интеллектуальных подходах принятия решений с целью увеличения вклада ФЭС в общий энергетический баланс в сравнении с системой на переменном токе. Обоснование должно дополняться разработкой методики оптимизации электротехнического комплекса автономного электроснабжения, направленной на минимизацию эксплуатационных издержек ФДЭС на постоянном токе.

**Степень разработанности.** Среди отечественных исследовательских школ по тематике научно-технического обоснования практического применения ВИЭ необходимо отметить работы известных советских и российских учёных Н.И. Воропая, Ж.И. Алфёрова, В.И. Виссарионова, Н.Е. Жуковского и др. Также трудно не оценить весомый вклад работ Е.М. Фатеева в вопросах применения ветроэнергетических установок в составе единой изолированной

энергетической системы. Среди иностранных исследователей необходимо отметить А.Т. Elsayed, А.А. Mohamed, О.А. Mohammed, J.J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, J-W. Jung, M. Habib, L.A. Amine, F. Khoucha и др.

На современном этапе фундаментальный вклад в области учёта особенностей организации электроснабжения автономных систем с ВИЭ, обоснованию методик оптимизации комплектного состава и режимов работы принадлежит профессору Б.В. Лукутину и профессору С.Г. Обухову, рассматривавшим, главным образом, ветро-дизельные и фото-дизельные электротехнические комплексы. Среди зарубежных исследований следует выделить авторов R. Duflo-Lopez, José L. Bernal-Agustín, F. Jurado, охвативших масштабный диапазон вопросов оптимизации состава и режимов работы гибридных электротехнических комплексов с ВИЭ, выбора стратегий управления электрической нагрузкой. Вопросы передачи электроэнергии постоянным током были представлены в работах Н.Г. Лозина, Л.Л. Владимирского, О.В. Сулова, Э.А.-З. Джендубаева и А.-З.Р. Джендубаева, J. Partanen, T. Kaipia, J. Karppanen, A. Narayanan, A. Mattsson и др.

Однако, проработанность темы исследования остаётся неисчерпанной: не полностью изучены вопросы учёта влияния массива разнообразных неконтролируемых внешних воздействий на эффективность генерируемой электрической энергии от ФЭС; почти не затрагиваются аспекты определения оптимальной ёмкости СНЭЭ в составе ФДЭС с целью минимизации суммарных эксплуатационных издержек; не решён ряд вопросов энергоэффективного управления генерирующими источниками и накопителями энергии в составе ФДЭС на постоянном токе; не в полной мере раскрыты аспекты увеличения вклада возобновляемого энергоносителя в общий энергетический баланс автономной системы электроснабжения (АСЭС).

Создание перспективной ФДЭС постоянного тока, способной увеличить долю фотоэлектрической генерации относительно ДГУ по сравнению с аналогичной системой переменного тока, требует разработки оптимальной структуры взаимодействия энергетического оборудования и алгоритмов управления процессами преобразования и распределения энергии в АСЭС, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность рассматриваемого электротехнического комплекса, что определило цель и задачи данной работы.

**Объект исследования** – автономный электротехнический комплекс электроснабжения на постоянном токе с фото-дизельным энергоисточником и системой аккумулирования электроэнергии.

**Предмет исследования** – параметрический синтез и оптимизация автономного фото-дизельного электротехнического комплекса электроснабжения, разработка энергоэффективных алгоритмов управления его рабочими режимами.

**Цель работы** – повышение энергоэффективности автономных фото-дизельных электротехнических комплексов электроснабжения путём оптимизации их состава и режимов работы с использованием интеграции ДГУ и ФЭС на шине постоянного тока.

**Идея работы.** Повышение энергоэффективности автономных фото-дизельных электротехнических комплексов электроснабжения путём оптимизации состава генерирующих источников и накопителей электроэнергии на шине постоянного тока и применением оптимальных алгоритмов управления работой системы.

**Основные задачи исследования:**

1. Проанализировать факторы, влияющие на технико-экономические и экологические показатели работы автономных ДГУ, исследовать распространённые оптимизационные программные комплексы для проектирования гибридных систем электроснабжения с участием ВИЭ, изучить режимы работы гибридных комплексов, определить пути повышения их энергоэффективности.

2. Провести сравнительный анализ современного состояния автономных гибридных энергокомплексов на переменном и постоянном токах, учитывая климатические и географические условия функционирования объекта исследования на территории России,

разработать концепцию структурного взаимодействия ФЭС, СНЭЭ и ДГУ на постоянном токе, учитывая временные масштабы протекающих процессов.

3. Разработать компьютерные модели компонентов и ФДЭС постоянного тока в комплексе, отражающие процессы преобразования и распределения потоков энергии, с целью анализа и оптимизации энергетических характеристик автономного электротехнического комплекса.

4. Разработать энергоэффективные алгоритмы управления рабочими режимами генерирующих и аккумулирующих энергоустановок. Изучить применяемые алгоритмы управления ДГУ и разработать имитационную модель управления подачей топлива ДГУ в связке с накопителем электроэнергии на шине постоянного тока.

5. Провести численные инженерные эксперименты, подтверждающие эффективность методики оптимизации параметров ФДЭС постоянного тока и разработанных алгоритмов управления.

6. Обосновать увеличение энергетического вклада ФЭС в автономную дизель-генераторную сеть постоянного тока по сравнению с сетью переменного тока, а также инвестиционную привлекательность предлагаемого электротехнического комплекса.

#### **Научная новизна:**

1. Разработаны энергоэффективные алгоритмы управления дизель-генераторной установкой, фото-электрической станцией и системой накопления электрической энергии в автономной системе электроснабжения, отличающиеся интеллектуальным подходом к принятию решения по управлению энергетическим балансом фото-дизельных электротехнических систем на постоянном токе с результатом максимизации вклада фото-электрической станции до 50%. Алгоритмы отличаются универсальностью применения на территориях до 66° с.ш., и позволяют учитывать технико-экономические характеристики используемого энергооборудования, а также массивы внешних неконтролируемых воздействий на электротехнический комплекс.

2. Разработана оригинальная математическая и компьютерная модель фото-дизельной электротехнической системы постоянного тока, отличающаяся возможностью проведения оптимизации установленных мощностей генерирующих и аккумулирующих источников электроэнергии, по критерию минимизации эксплуатационных затрат. Отличительной чертой разработки является модельно-ориентированный анализ данных технической спецификации дизель-генераторной установки, позволяющий получать внешне-скоростные и мощностные характеристики агрегата малой мощности для систем постоянного тока. Использование разработанной модели позволило получить экономию дизельного топлива до 15% в год и уменьшение выбросов в атмосферу на 11%.

3. Обоснована концепция взаимодействия между компонентами фото-дизельной электротехнической системы на постоянном токе, позволяющая упростить управление энергетическими установками различной физической природы. Концепция взаимодействия отличается разделением на уровни контроля компонентов автономной системы электроснабжения с топливным и возобновляемым энергоносителем, с учётом временных характеристик исследуемых процессов.

**Теоретическая значимость работы.** Основные положения и выводы диссертационного исследования вносят определённый вклад в дальнейшее развитие теории электротехнических комплексов электроснабжения, в частности автономных ФДЭС постоянного тока. Показаны преимущества автономных ФДЭС с интеграцией энергетического оборудования на шине постоянного тока. Предложены алгоритмы управления эксплуатационными режимами генерирующего и аккумулирующего оборудования, обеспечивающие оптимальные технико-экономические показатели гибридного электротехнического комплекса электроснабжения с ФДЭС постоянного тока.

**Практическая значимость работы.** Разработанные и реализованные в программном комплексе MATLAB оригинальные имитационные компьютерные модели ФЭС, ДГУ и СНЭЭ, а также совокупная модель ФДЭС на постоянном токе актуальны для использования в

организациях, разрабатывающих и производящих оборудование для установок возобновляемой энергетики, а также на предприятиях, занимающихся вопросами энергообеспечения децентрализованных регионов России для оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов электроснабжения с ВИЭ.

Методика технико-экономического анализа характеристик ФДЭС постоянного тока с СНЭЭ, обеспечивающая рациональный выбор и оптимизацию генерирующего оборудования методом покоординатного спуска используются в методических материалах по курсу «Интеллектуальные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии» для магистрантов Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета.

**Методология и методы исследований.** При выполнении исследования использовались методы инженерного анализа и обобщения результатов, метод параметрической оптимизации покоординатного спуска для решения задач с объявленными ограничениями, метод математического и компьютерного моделирования, а также общенаучные методы познания. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием имитационного моделирования в среде Simulink и Stateflow программного комплекса MATLAB, а также программирования на языке внутреннего синтаксиса MATLAB.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Применение разработанных энергоэффективных алгоритмов управления генерацией и накоплением электроэнергии в автономной фото-дизельной системе электроснабжения постоянного тока (до 100 кВт включительно), основанной на интеллектуальном подходе принятия решений, позволит увеличить долю вклада возобновляемого энергоносителя в энергетический баланс автономного электротехнического комплекса до 50% по сравнению с системой на переменном токе (до 40%).

2. Применение универсальной имитационной компьютерной модели фото-дизельной системы электроснабжения на постоянном токе, осуществляющей оптимизацию установленных мощностей источников электроэнергии по критерию минимизации издержек на строительство и эксплуатацию электротехнического комплекса, позволит улучшить технические показатели – КИУМ ФЭС до 22%, экономические показатели – снижение себестоимости вырабатываемой электроэнергии на 8%, уменьшение потребления дизельного топлива до 15% по сравнению с системой на переменном токе и экологические показатели работы автономной энергосистемы с возобновляемым источником энергии – уменьшение вредных выбросов в атмосферу до 11% по сравнению с системой на переменном токе.

3. Улучшение технико-экономических и экологических показателей автономных ФДЭС может быть достигнуто путём изменения топологической структуры взаимодействия генерирующих и накапливающих энергоисточников с переменного на постоянный ток.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** Степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена необходимым объёмом исследований, включающих научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований, а также корректным применением известных теорий электротехники и методов математического и компьютерного моделирования электротехнических комплексов, результатами численных экспериментов с использованием общепризнанных программных комплексов.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (г. Томск, 2019 г.), на Всероссийской молодёжной конференции с международным участием «Системные исследования в энергетике» (г. Иркутск, 2019 г.), на 14-ом Международном форуме по стратегическим технологиям IFOST-2019 (г. Томск, 2019 г.), на Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (г. Севастополь, 2019 г.).

**Личный вклад автора.** Диссертационная работа является результатом самостоятельных исследований автора, где все научные положения и результаты, определяющие научную новизну

и практическую значимость работы, получены соискателем лично. Автором лично разработан программный комплекс для оптимизации состава генерирующих источников и накопителей электроэнергии в составе ФДЭС постоянного тока на основе оптимизационного метода покоординатного спуска. Лично соискателем разработан алгоритм энергоэффективного управления компонентами ФДЭС на постоянном токе, использующий интеллектуальные подходы принятия решений по максимизации вклада ФЭС. Личное участие автора подтверждено публикациями и выступлениями на конференциях. В опубликованных в соавторстве печатных работах, автору принадлежит научное обоснование принятых технических решений, разработка имитационных математических моделей, методик и алгоритмов, анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях в изданиях из Перечня ВАК: рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени кандидата наук, а также в 2 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований. Диссертация изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 8 таблиц

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована его цель и ключевые задачи, отмечена научная новизна, практическая значимость степень разработанности темы диссертации в современной науке, указан объект и предмет исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

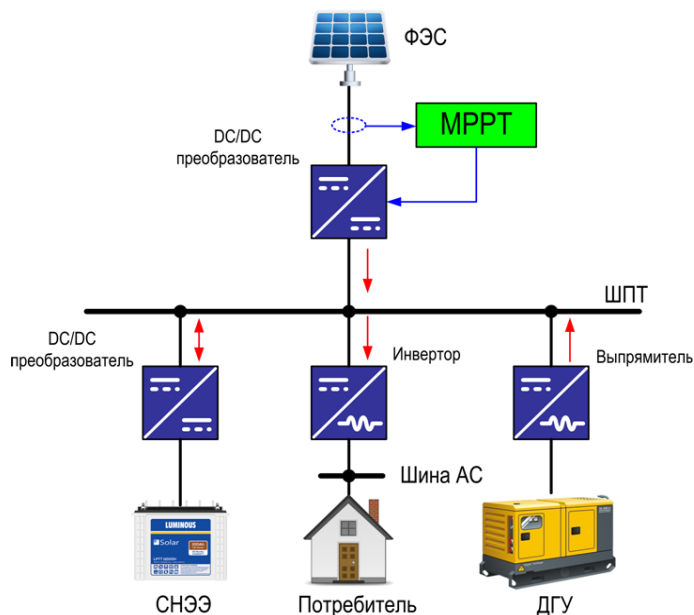
**В первой главе** проведён анализ состояния распределённой генерации с участием установок возобновляемой энергетики в мире, а также возможностей применения постоянного тока для распределённой интеграции возобновляемых энергоисточников в автономные системы электроснабжения в удалённых регионах России. Изучен международный опыт в данной сфере, в том числе таких государств как Канада, США, Германия и Китай. Проведён анализ научной литературы, а также данных официальной статистики в исследуемом тематическом направлении. Рассмотрены достоинства и недостатки гибридных энергетических систем на переменном токе.

Определено, что на современном этапе одним из наиболее актуальных трендов развития децентрализованных потребителей с невысоким и крайне неравномерным уровнем электропотребления, определяющим преимущественное «расщепление» генерирующего состава автономных источников питания установленной мощностью до 100 кВт, является концепция микросети (от англ. microgrids). Сделан вывод о том, что эффективным способом технической модернизации и повышения технико-экономических показателей автономных систем электроснабжения на переменном токе является увеличение вклада возобновляемых энергоносителей в общий энергетический баланс системы с действующими объектами дизельной генерации. Аргументирована необходимость поиска и исследования возможностей увеличения вклада возобновляемых источников энергии (в частности, фотоэлектрической энергии) путём использования в автономных системах распределительных сетей постоянного тока.

Автором рассмотрены способы интеграции фотоэлектрических и дизельных электрических станций на постоянном токе. Выделены локальные факторы, от которых зависят конфигурации взаимодействия компонентов ФДЭС на постоянном токе для электроснабжения децентрализованных потребителей, среди которых: географическое месторасположение объекта, территориальные особенности (площадь размещения), климатические условия температурного режима, суточные и сезонные изменения инсоляции, облачности и др. Представлена концепция гибридного автономного энергетического комплекса постоянного тока на базе ДГУ с силовым

преобразователем, ФЭС, СНЭЭ, потребителя, питающегося стандартным переменным током через автономный инвертор, других силовых преобразовательных устройств для согласования параметров электроэнергии (см. Рисунок 1).

Предполагается, что ФДЭС удовлетворяет потребности в нагрузке в течение дня таким образом, что во время возможного полного отключения опорного источника (ДГУ), ожидается снабжение от ФЭС и СНЭЭ или компенсация части энергии во время пикового потребления.



**Рисунок 1.** Концепция взаимодействия фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе

Конструктивно, ФЭС подключена к шине постоянного тока (ШПТ) с помощью однонаправленного DC/DC преобразователя с отслеживанием точки максимальной мощности (англ. Maximum Power Point Tracking – MPPT) (см. Рисунок 1). При этом СНЭЭ с использованием, например, литий-ионных аккумуляторных батарей, подключается к ШПТ через двунаправленный DC/DC преобразователь. Таким образом, движение потока энергии для СНЭЭ возможно в обоих направлениях. Коммунальная нагрузка и ДГУ напрямую подключены к ШПТ через свои силовые преобразовательные устройства: сетевой инвертор и выпрямитель – соответственно.

Автором определены и систематизированы положения к исследованию процессов энергопреобразования и распределения

потоков мощности в электротехническом комплексе на постоянном токе в рамках концепции:

1. Проведено исследование статических рабочих режимов разнотипных гибридных комплексов на длительных временных промежутках.
2. Для исследования баланса мощностей в децентрализованной энергетической системе обоснована необходимость разработки математических и компьютерных моделей, основанных на математических соотношениях, связывающих их входные параметры с выходными энергетическими характеристиками, а также разработка алгоритма энергоэффективного управления электротехнического комплекса с интеллектуальными подходами принятия решений.
3. Пояснено, что данная концепция предусматривает электрическое сопряжение генерирующих и аккумулирующих установок на ШПТ с возможностью увеличения вклада возобновляемого энергоресурса в энергетический баланс ФДЭС.

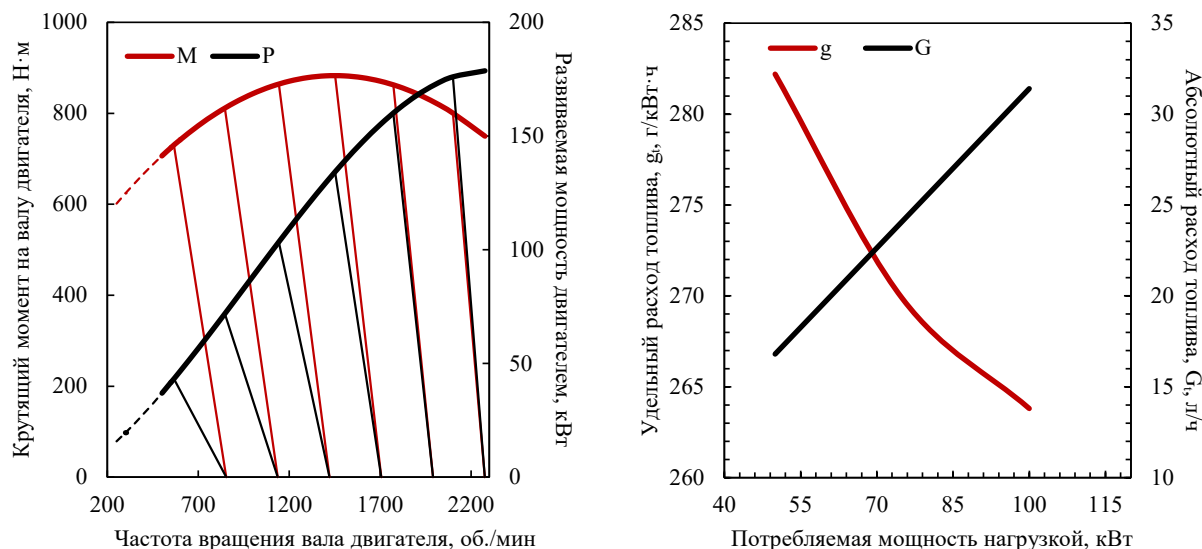
Для решения задач рационального выбора основного энергетического оборудования, проведения технико-экономического анализа, разработки энергоэффективных алгоритмов управления режимами автор использовал методики целочисленного линейного программирования, оптимизационные методы покоординатного спуска.

**Во второй главе** рассмотрены современные подходы к решению оптимизационных задач в автономных системах электроснабжения; представлен сравнительный анализ различных программных комплексов, используемых в моделировании и оптимизации систем электроснабжения с ВИЭ. Обосновано, что для целей исследования, целесообразно использование пакета высокого уровня MATLAB/Simulink. Разработаны энергетические модели компонентов электротехнического комплекса, основанные на математических зависимостях,



связывающих их входные параметры с выходными энергетическими характеристиками в программном комплексе MATLAB/Simulink.

В результате проделанной работы, сформулированы математические модели автономной ФДЭС на постоянном токе с СНЭЭ. Примеры моделирования энергетических характеристик дизельного двигателя ЯМЗ-238М2 с помощью пакета MATLAB/Simulink, представлены на Рисунке 2.



**Рисунок 2.** Внешняя скоростная характеристика двигателя (левый график), нагрузочная характеристика дизель-генераторной установки (правый график) в MATLAB/Simulink

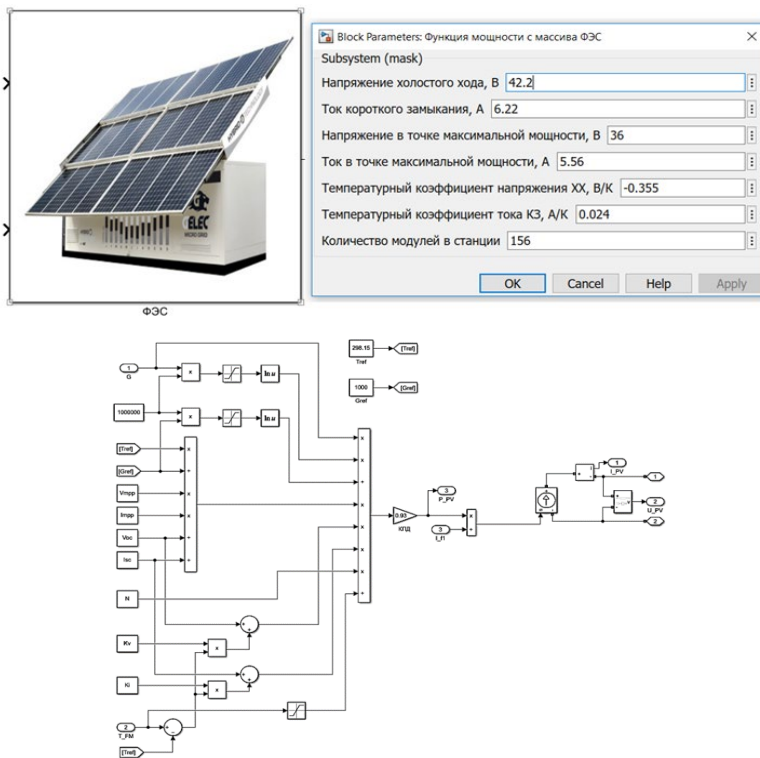
Полученные графические зависимости были определены при помощи численных методов решения аналитической системы уравнений, описывающих процессы энергопреобразования в ДГУ. Оригинальным решением, отличающим от других математических интерпретаций дизельных двигателей, является отсутствие дифференциальных уравнений. Это позволило получить компьютерную модель ДГУ, позволяющую провести исследования её рабочих статических режимов в составе электротехнического комплекса автономного электроснабжения только на основании данных технической спецификации агрегата.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_{дд}^{внеш.} = P_{дд\_max} \cdot \left[ a \cdot \frac{n_{дд}}{n_{дд\_P}} + b \cdot \left( \frac{n_{дд}}{n_{дд\_P}} \right)^2 + c \cdot \left( \frac{n_{дд}}{n_{дд\_P}} \right)^3 \right] \\
 M_{дд}^{внеш.} = M_{дд\_P} \cdot \left[ a + b \cdot \left( \frac{n_{дд}}{n_{дд\_P}} \right) + c \cdot \left( \frac{n_{дд}}{n_{дд\_P}} \right)^2 \right] \\
 M_{дд}^{рег.} = k_p \cdot (n_{дд\_max} - n_{дд}) \\
 n_{дд\_част\_max}^{xx} = n_{дд\_min} + h \cdot (n_{дд\_max} - n_{дд\_min}) \\
 M_{дд\_h\_max}^{внеш.} = M_{дд\_P} \cdot \left[ a + b \cdot \left( \frac{n_{дд\_част\_max}^{xx}}{n_{дд\_P}} \right) + c \cdot \left( \frac{n_{дд\_част\_max}^{xx}}{n_{дд\_P}} \right)^2 \right], \quad (1) \\
 M_{дд}^{рег.} = k_p \cdot (n_{дд\_част\_max}^{рег.} - n_{дд}) \\
 n_{дд\_част\_max}^{рег.} = -\frac{B}{2 \cdot A} - \sqrt{\frac{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}{4 \cdot A^2}} \\
 G_{абс.} = 0,2921 \cdot P_{дд} + 2,1885 \\
 g_{уд.} = 0,005 \cdot P_{дд}^2 - 1,12 \cdot P_{дд} + 325,67 \\
 W_{э.} = \frac{g_{э.} \cdot G_m}{1000}
 \end{array} \right.$$

где  $P_{дд}^{внеш.}$  – развиваемая мощность дизельного двигателя для внешней ветви;  $P_{дд\_max}$  – максимальная мощность дизельного двигателя на холостом ходу;  $n_{дд}$  – частота вращения вала дизельного двигателя;  $a, b, c$  – сборные коэффициенты С.Р. Лейдермана;  $n_{дд\_P}$  – частота вращения вала дизельного двигателя при максимальной мощности;  $M_{дд}^{внеш.}$  – вращающий момент дизельного двигателя для внешней ветви;  $M_{дд\_P}$  – вращающий момент дизельного двигателя при номинальной мощности;  $M_{дд}^{рег.}$  – вращающий момент дизельного двигателя для регуляторной ветви;  $k_p$  – коэффициент наклона;  $n_{дд\_max}$  – максимальная частота вращения вала дизельного двигателя на холостом ходу;  $n_{дд\_част\_max}^{xx}$  – частота вращения дизельного

двигателя в режиме холостого хода, при заданном положении рычага подачи топлива  $h$ ;  $n_{ДД\_min}$  – минимально устойчивая частота вращения вала дизельного двигателя;  $n_{ДД\_част.\_max}^{рег.}$  – частота вращения вала дизельного двигателя на регуляторной частичной ветви (скорость перехода);  $A, B, C$  – коэффициенты для определения скорости перехода (с внешней на регуляторную), учитывая, что искомое значение принадлежит одновременно и внешней, и регуляторной частичным характеристикам. Значения выше не зависят от нагрузки, они постоянны для конкретной модели дизельного двигателя с его параметрами.  $G_{абс.}$  – абсолютный расход дизельного топлива;  $g_{yo.}$  – удельный расход дизельного топлива;  $W_{э_i}$  – валовый выброс  $i$ -го вещества за год, стационарной ДГУ;  $g_{э_i}$  – удельный массовый выброс  $i$ -го вещества, приходящегося на 1 кг дизельного топлива;  $G_m$  – расход топлива ДГУ за год.

Модель ДГУ в MATLAB/Simulink исследует последовательность статических режимов автономной системы электроснабжения на постоянном токе в течение суток: с временным масштабом моделирования – 24 секунды, обеспечивая возможность исследования суточных изменений энергетических характеристик системы с шагом дискретизации 1 секунда, что соответствует 1 часу реального времени. Максимальная ошибка модели по расходу топлива не превышала 12,9% и наблюдалась при неустойчивых режимах работы дизельного двигателя.



**Рисунок 3.** Внешний вид фотоэлектрической станции и подсистема фотоэлектрического модуля в MATLAB/Simulink

Для построения модели ФЭС использовались результаты исследований А.Д. Jones и С.Р. Underwood. Субсистема программируемой ФЭС, а также её схематическая интерпретация, предложенная автором для моделирования вольт-амперных (ВАХ) и энергетических характеристик имитируемого фотоэлектрического модуля, отображена на Рисунке 3.

Максимальную выходную мощность ФЭС можно определить по выражению:

$$P_{ФЭС} = \frac{C_F \cdot N \cdot G \cdot \eta_{преоб.} \cdot \ln(10^6 \cdot G)}{T_{ФЭС}}, \quad (2)$$

где  $N$  – количество фотоэлектрических панелей в массиве;  $C_F$  – постоянный коэффициент;  $G$  – уровень солнечной радиации в данный момент;  $T_{ФЭС}$  – текущая температура

фотоэлектрического модуля;  $\eta_{преоб.}$  – эффективность преобразователя с контроллером МРРТ.

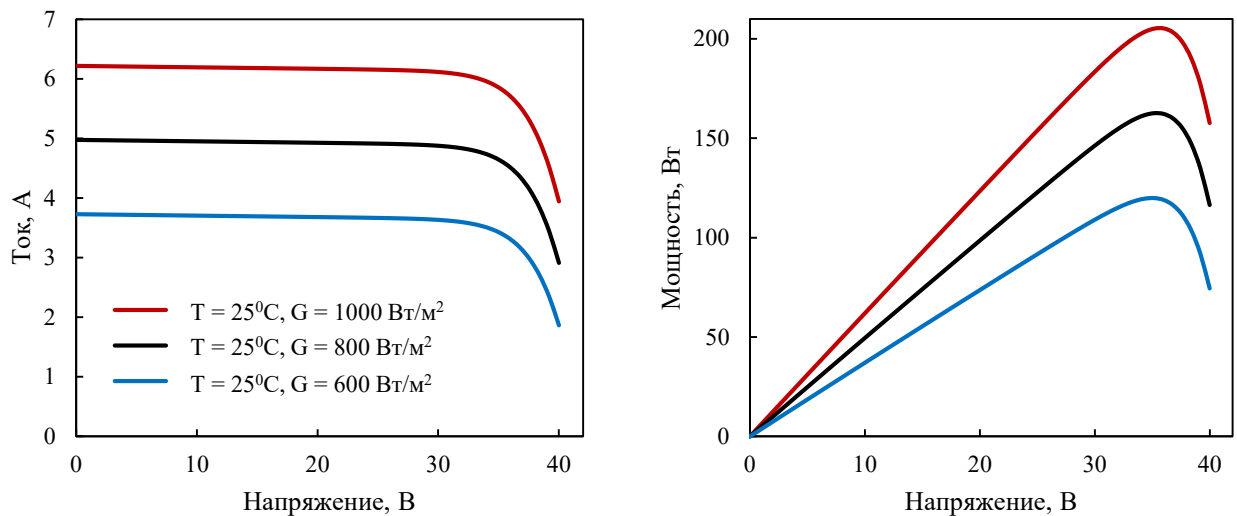
Для определения величины коэффициента  $C_F$  использовалось более точное выражение:

$$C_F = \frac{FF \cdot T_{ref} \cdot [I_{SC} + k_i \cdot (T_{ФЭС} - T_{ref})] \cdot [V_{OC} + k_v \cdot (T_{ФЭС} - T_{ref})]}{G_{ref} \cdot \ln(10^6 \cdot G_{ref})}, \quad (3) \quad \text{где } FF \text{ – коэффициент заполнения ВАХ; } G_{ref}, T_{ref} \text{ – значения инсоляции и температуры фотоэлектрического модуля при стандартных условиях испытания (T}$$

инсоляции и температуры фотоэлектрического модуля при стандартных условиях испытания (T

$= 25^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 1000 \text{ Вт/м}^2$ );  $k_i, k_v$  – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода фотоэлектрического модуля.

Технические характеристики фотоэлектрического модуля TSM-200, полученные с использованием математической модели, также представлены на Рисунке 4.



**Рисунок 4.** Вольт-амперная характеристика фотоэлектрического модуля TSM-200 (слева) и мощностная характеристика (справа) при различной инсоляции в MATLAB/Simulink

На Рисунке 4 отображены смоделированные ключевые технические показатели реального фотоэлектрического модуля в MATLAB/Simulink, предназначенные для корректной имитации работы ФЭС в области значений точки МРРТ.

Отличительной особенностью модели ФЭС является учёт коэффициента заполнения ВАХ ( $FF$ ), который рассчитывается из паспортных показателей принятого к моделированию фотоэлектрического модуля. Его расчёт производится по выражению:

$$FF = \frac{I_{MPPT} \cdot V_{MPPT}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}, \quad (4) \quad \text{где } I_{MPPT}, V_{MPPT} \text{ – паспортные показатели тока и напряжения фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности при стандартных условиях испытания; } I_{SC}, V_{OC} \text{ – паспортные значения}$$

тока короткого замыкания и напряжения холостого хода фотоэлектрического модуля при стандартных условиях испытания.

Результаты моделирования показали, что разработанная модель имитирует текущие характеристики ФЭС с удовлетворительной точностью в окрестностях точки МРРТ. Максимальная погрешность расчетных значений выходной мощности во всём диапазоне возможных изменений температуры и инсоляции не превышает 4%.

**В третьей главе** рассмотрены возможности применения приложения Stateflow в MATLAB/Simulink в вопросах проектирования стратегий энергоменеджмента для автономной энергетической системы на основе ДГУ, ФЭС и СНЭЭ на постоянном токе. Раскрыты требования к энергоэффективным режимам работы гибридного энергокомплекса на постоянном токе. При этом особое внимание уделено анализу рабочих режимов дизельной системы электроснабжения, приведено обоснование методов повышения её энергоэффективности. Работу АСЭС рационально реализовывать с помощью различных уровней управления, которые систематизированы и представлены автором диссертации в виде отдельной иерархической структуры.

Согласно Рисунку 5, автором было выделено три ключевых уровня контроля ФДЭС: первый уровень, является низшим уровнем, отвечает за получение результатов измерений показателей тока, напряжения, скорости вращения вала дизельного двигателя и др. в режиме реального времени. Отличительной особенностью при низшим управлении является контроль мгновенных значений электрических величин, требующие малой выборки по времени: десятки

мили или микросекунд, что осуществляется с помощью специальных датчиков. При этом третий (высший) уровень используется для обеспечения оптимальной работы АСЭС на долгосрочную перспективу. Фундаментальная роль высшего уровня заключается в управлении потоком электрической энергии между генерирующими установками, системой накопления, а также запросом от потребителя в рамках распределительной сети. Типичное время выборки может составлять минуты или часы. Второй уровень и соответствующий ему контроль являются промежуточным звеном между первым и третьим.

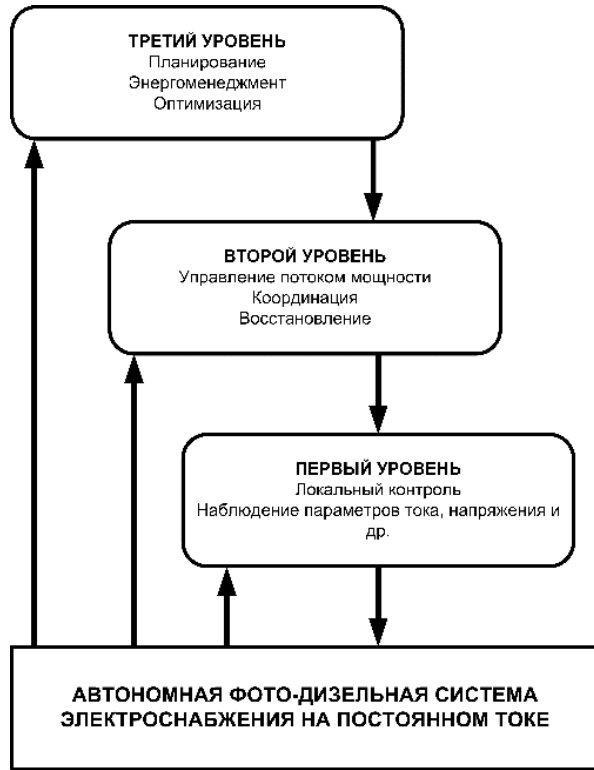


Рисунок 5. Уровни контроля автономной системы электроснабжения

автором было принято решение о целесообразности использования надстройки Stateflow в MATLAB/Simulink. На Рисунке 6 показана диаграмма Stateflow для работы ФДЭС. Рисунок 6 является «картой» состояний со своей иерархической структурой с командами-переходами между ними с помощью логических операций *И* и *ИЛИ*. Имена состояний предполагают работу разных режимов. Моделирование осуществляется, начиная с тёмного времени суток с шагом принятия решения  $t + 1$  и воспринимается как нормальный (по умолчанию) режим работы ФДЭС, при котором электрическая сеть, как ожидается, удовлетворит всю потребность в нагрузке. Так, состояние *Start\_point* представляет собой начало работы системы в целом, в теле которого с помощью команды *entry* происходит одномоментное определение включения/отключения ДГУ, либо СНЭЭ. Если на момент начала работы параметр  $SOC_c$  ниже предела допустимости разряда СНЭЭ  $SOC_{lb}$ , то СНЭЭ не разряжается, работает только ДГУ.

Далее, с точки зрения приоритетности идёт проверка выполнения одного из условий перехода в состояние *DG\_and\_ESS*. Происходит проверка:  $SOC_c < SOC_{lb}$  *ИЛИ* наличие логической команды из массива прогнозных данных  $array\_logic\_DG==1$  на включение ДГУ. Состояние *DG\_and\_ESS* представляет собой режим работы ФДЭС, при котором ДГУ и СНЭЭ работают параллельно. С помощью команды *entry* происходит одномоментное выполнение команд на отключение выработки от ФЭС ( $PV=0$ ), получение массива прогнозных данных по наличию избытка электроэнергии для накопления в СНЭЭ ( $ESS\_disch=extraDisch$ ), включение ДГУ ( $DG=1$ ), отключение режима заряда СНЭЭ ( $ESS\_ch=0$ ). Логической операцией данного

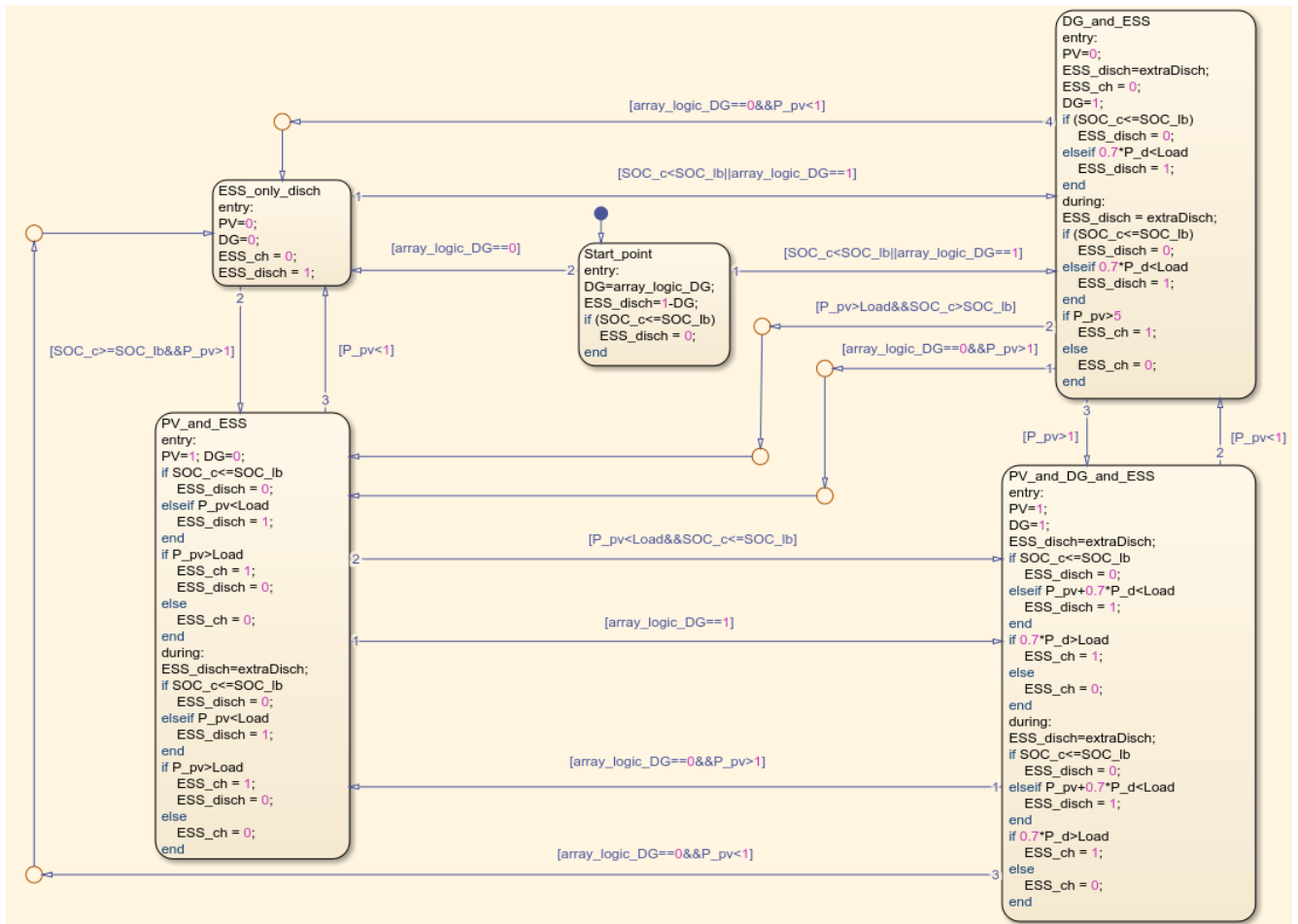
Логику работы ФДЭС-модели на постоянном токе, при высшем уровне контроля, рационально «отстроить», основываясь на реализации баланса мощности, добываясь минимальное использование ДГУ и приоритетный вклад ФЭС. В таком случае, алгоритмы управления с возможностью интеллектуального принятия решений должны быть нацелены на правильную координацию прогнозируемых потоков электрической энергии и восстановление напряжения на ШПТ до номинального значения –  $540 \pm 10$  В. Если  $P_{наг.}(t)$  – почасовая потребность системы в нагрузке с шагом  $t + 1$ , то, аналитически, данную формулировку можно представить следующим образом для соблюдения мощностного баланса системы:

$$P_{наг.}(t) = P_{ДГУ}(t) + P_{ФЭС}(t) \pm P_{СНЭЭ}(t), \quad (5)$$

где  $P_{ДГУ}(t)$ ,  $P_{ФЭС}(t)$ ,  $P_{СНЭЭ}(t)$  – почасовая выходная мощность, генерируемая в автономную сеть от ДГУ, ФЭС, СНЭЭ, соответственно.

Для наглядной демонстрации управляющей логики ФДЭС на постоянном токе,

режима служит проверка по состоянию  $SOC_c$  и нагрузке ДГУ: если  $SOC_c < SOC_{lb}$ , тогда СНЭЭ не разряжается на данном шаге ( $ESS\_disch=0$ ); если ДГУ нагружена менее 70% от текущего значения нагрузки ( $0,7 \cdot P_d < Load$ ), тогда СНЭЭ разряжается ( $ESS\_disch=1$ ). Данный режим может продолжаться в течение продолжительного промежутка времени до момента изменения входных прогнозных данных, поэтому с помощью команды *during* происходит дублирование описанных операций с добавлением условия: если происходит отличная от нуля генерация электроэнергии от ФЭС ( $P_{pv} > 5$ ), то тогда генерируемая энергия идёт на заряд СНЭЭ ( $ESS\_ch=1$ ).



**Рисунок 6.** Режимы работы и алгоритм взаимодействия разнотипных установок в фотодизельной системе электроснабжения на постоянном токе в Stateflow MATLAB/Simulink

Был сделан вывод о том, что изменяющийся характер мощности нагрузки и уровня инсоляции обуславливает для эффективной работы системы, имеющей в своем составе СНЭЭ, оптимизационные подходы к определению корректного комплектного состава последних. Понятие «статический режим» для СНЭЭ основывается на квазистатическом представлении их предшествующего состояния заряда. Выполнение обозначенных условий обеспечит максимальное замещение энергии, вырабатываемой ДГУ, энергией связки ФЭС-СНЭЭ, а следовательно, и максимальную экономию дорогостоящего дизельного топлива. Выполнение данных условий достигается рациональным выбором установленных мощностей ФЭС и СНЭЭ с учётом имеющегося потенциала ВИЭ и характера нагрузки.



```

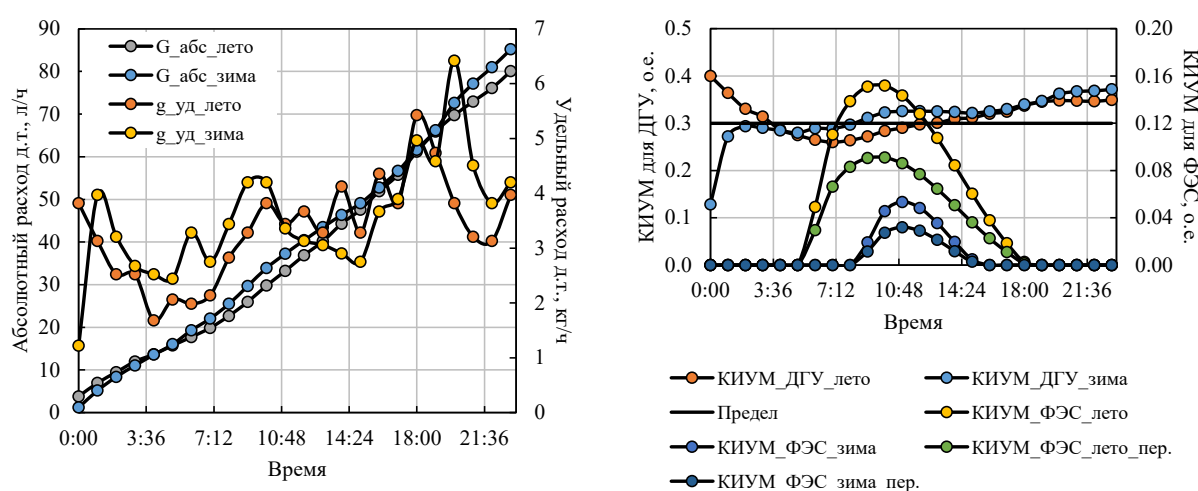
case 1
    plan_model = 'plan_kim_leto'; % (1)
    DG_power = 25000;
    rules(1:3) = false;
case 2
    plan_model = 'plan_kim_zima'; % (2)
    DG_power = 25000;
    rules(4) = false;
case 3
    plan_model = 'plan_mag_leto'; % (3)
    DG_power = 30000;
    rules(1:3) = false;
case 4
    plan_model = 'plan_mag_zima'; % (4)
    DG_power = 30000;
    rules(4) = false;
end
%===== расчет =====
%запуск модели для планирования
plan = sim(plan_model);
%исходные данные для планирования
P_pv = plan.PV;
Load = plan.Load;
%сумма за сутки (24 часа)
sum_PV = sum(P_pv);
sum_Load = sum(Load);
%почасовая нагрузка за вычетом энергии ФЭС
extraLoad = Load - P_pv;
%разница между суммарной нагрузкой и суммарной выработкой от ФЭС
diff_Load_PV = sum_Load - sum_PV;
%верхняя граница загрузки ДГУ
DG_ub = DG_power * 0.7;
%нижняя граница загрузки ДГУ
DG_lb = DG_power * 0.3;
%массив-заготовка для передачи данных в модель Simulink
zeros_day = zeros(24,2);
zeros_day(:,1)=plan.tout;
%определяем часы, когда для поддержания суточного энергетического баланса
%принудительно вкл. ДГУ. Это происходит в часы вблизи максимума потребления
%на необходимое кол-во часов
%кол-ва часов на которые нужно включать ДГУ в режиме не более 30% мощности
number_hours = min(floor(diff_Load_PV/DG_lb),24);
%средняя нагрузка ДГУ
DG_avg_power = diff_Load_PV/number_hours;
%определяем номер часа максимума (Load-P_pv)
[max_value,max_hour] = max(extraLoad);
%определяем массив логических значений принудительного включения
%DГУ на предварительно определённое кол-во часов работы
%с серединой периода в максимуме потребления
stop_hour = min(max_hour+floor(number_hours/2),24);
start_hour = stop_hour-number_hours+1;
array_logic_DG = zeros_day;
for i = start_hour:stop_hour
    array_logic_DG(i,2)=1;
end

```

**В четвертой главе** диссертации реализована комплексная оценка энергетических характеристик автономных систем электроснабжения с применением СНЭЭ; произведено экспериментальное исследование ФДЭС на постоянном токе; разработана и апробирована методика оценки технико-экономической эффективности применения ФДЭС на постоянном

токе; представлены общие результаты теоретико-методологических и экспериментальных исследований.

Был проведён анализ графика энергопотребления децентрализованного потребителя (см. Рисунок 8). Полученные зависимости наглядно демонстрируют, что летом и зимой в течение 9 часов ДГУ эксплуатируется с низким КИУМ: от 26 до 29% (КИУМ\_ДГУ\_лето). Зимой показатель варьируется в диапазоне от 12 до 29% (КИУМ\_ДГУ\_зима). В течение средних суток показатель КИУМ для ДГУ летом имеет значение 35%, а зимой – 37%. Введение в состав автономной системы электроснабжения ФЭС и перевод системы на постоянный ток может улучшить её энергетические характеристики. Так, увеличение установленной мощности (или вклада) ФЭС должно привести к снижению абсолютного расхода дизельного топлива  $G$  и сокращению часов работы дизель-генератора на малую нагрузку с высоким удельным расходом  $g$ , а также приближению КИУМ к желаемому значению в 30%. В варианте переменного тока КИУМ ФЭС для средних летних суток составляет 5,4%, а зимой – 1,5% (КИУМ\_ФЭС\_лето\_пер. КИУМ\_ФЭС\_зима\_пер.).



**Рисунок 8.** Энергетические характеристики установок в п. Кимоваара, Республика Карелия

Из Рисунок 8 можно заключить, что летом в течение 13 часов ДГУ эксплуатируется с низким КИУМ: от 20 до 29% (КИУМ\_ДГУ\_лето). Зимой, в течение 2 часов, показатель составляет 29% (КИУМ\_ДГУ\_зима). В течение средних суток показатель КИУМ для ДГУ летом имеет значение 28%, а зимой – 41%. Даже учитывая привлекательный показатель КИУМ зимой, абсолютный расход дизельного топлива в таком случае пропорционален величине выработки кВт·ч, что экономически и экологически нецелесообразно. Как один из возможных вариантов развития энергетической эффективности данной системы, можно рассмотреть управление топливной подачей дизельного двигателя через работу на частичных скоростных характеристиках. В варианте переменного тока КИУМ ФЭС для средних летних суток составляет 3,3%, а зимой – 0,85% (КИУМ\_ФЭС\_лето\_пер., КИУМ\_ФЭС\_зима\_пер.).

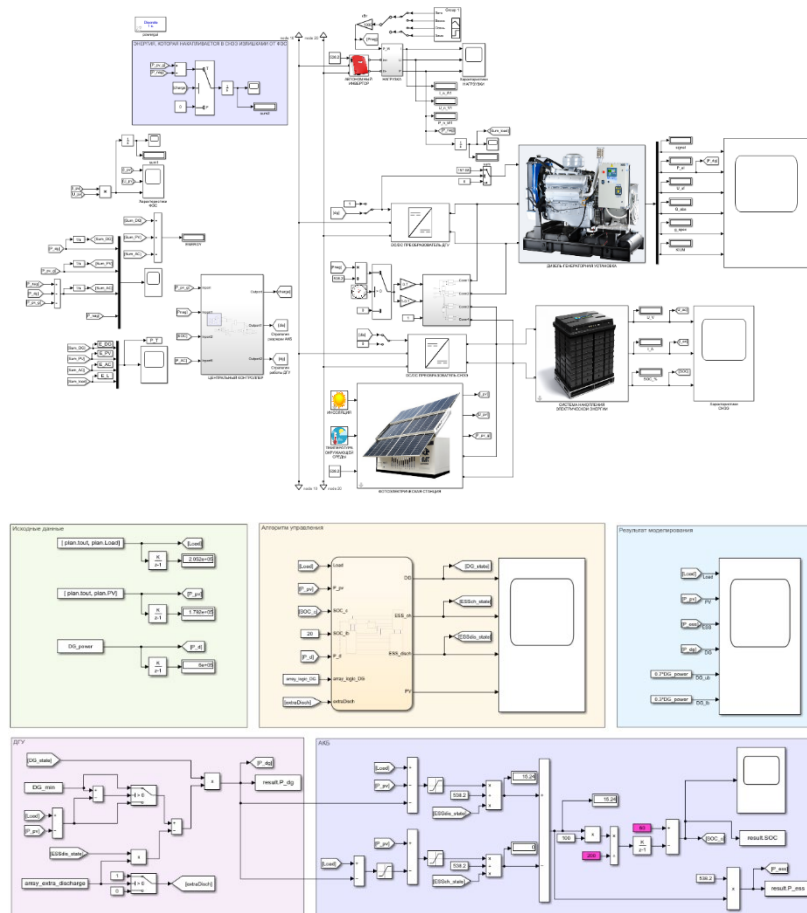
Для ФЭС на переменном и постоянном токе показатель КИУМ значительно отличается. Параллельная работа ВИЭ и ДГУ гибридной электростанции предусматривает использование ДГУ в качестве опорного энергоисточника. В случае переменного тока ФЭС (КИУМ\_ФЭС\_лето\_пер., КИУМ\_ФЭС\_зима\_пер.) с сетевым инвертором, безусловно, позволяет экономить дизельное топливо, замещая часть электроэнергии ДЭС. Однако, текущая мощность ФЭС относительно ДГУ, по условию устойчивости сетевого инвертора, не должна превышать 40% от суммарной генерации, то есть текущей нагрузки. Превышение же возможной выработки электроэнергии ФЭС в топологии переменного тока при текущем уровне нагрузки автономной системы электроснабжения, в определенные временные интервалы ведет к необходимости ограничения мощности сетевого инвертора. В идеальном случае вся доступная энергия гибридной электростанции с сетевым инвертором должна потребляться нагрузкой, при этом суммарная энергия генерирующих источников будет дублировать график нагрузки.



Для проведения исследований рассматривались природно-климатические показатели, в том числе: средняя температура (по месяцам года), облачность, время восхода и заката солнца по сезонам и др. Также учитывались экономические показатели, влияющие на доступность и целесообразность использования предлагаемой разработки, в том числе, такие как размер тарифа на электроэнергию, стоимость доставки дизельного топлива, цена дизельного топлива в регионе и др.

На основании данной части исследования, был сделан вывод о том, что улучшение энергетических характеристик ФДЭС на постоянном токе достигается за счёт рационального выбора установленных мощностей генерирующих и аккумулирующих источников. Так, исследовались технико-экономические показатели эксплуатации самих аккумуляторных батарей (панцирного подкласса (OPzS), а также литий-железно-фосфатных аккумуляторов), в том числе: срок службы, стоимость, ёмкость, напряжение, мощность, массо-габаритные критерии и т.д. Отдельно были изучены технико-экономические показатели фотоэлектрического модуля (массо-габаритные характеристики (площадь модуля), стоимость, оптимальное рабочее напряжение, КПД, температурный диапазон, фактор деградации, срок службы), а также показатели DC/DC преобразователя.

Исходными данными для моделирования являлись такие показатели как: широта местности, индекс прозрачности атмосферы, альbedo земной поверхности, номер дня года, азимутальный и вертикальный углы установки фотопанелей, среднесуточная температура воздуха, технические характеристики ФЭС, а также характеристики СНЭЭ и ДГУ. Влияние внешних неконтролируемых параметров солнечной активности в месте размещения электростанции и характера электрической нагрузки потребителя, решается с помощью энергоэффективного управления потоками энергии в замкнутой энергетической системе,

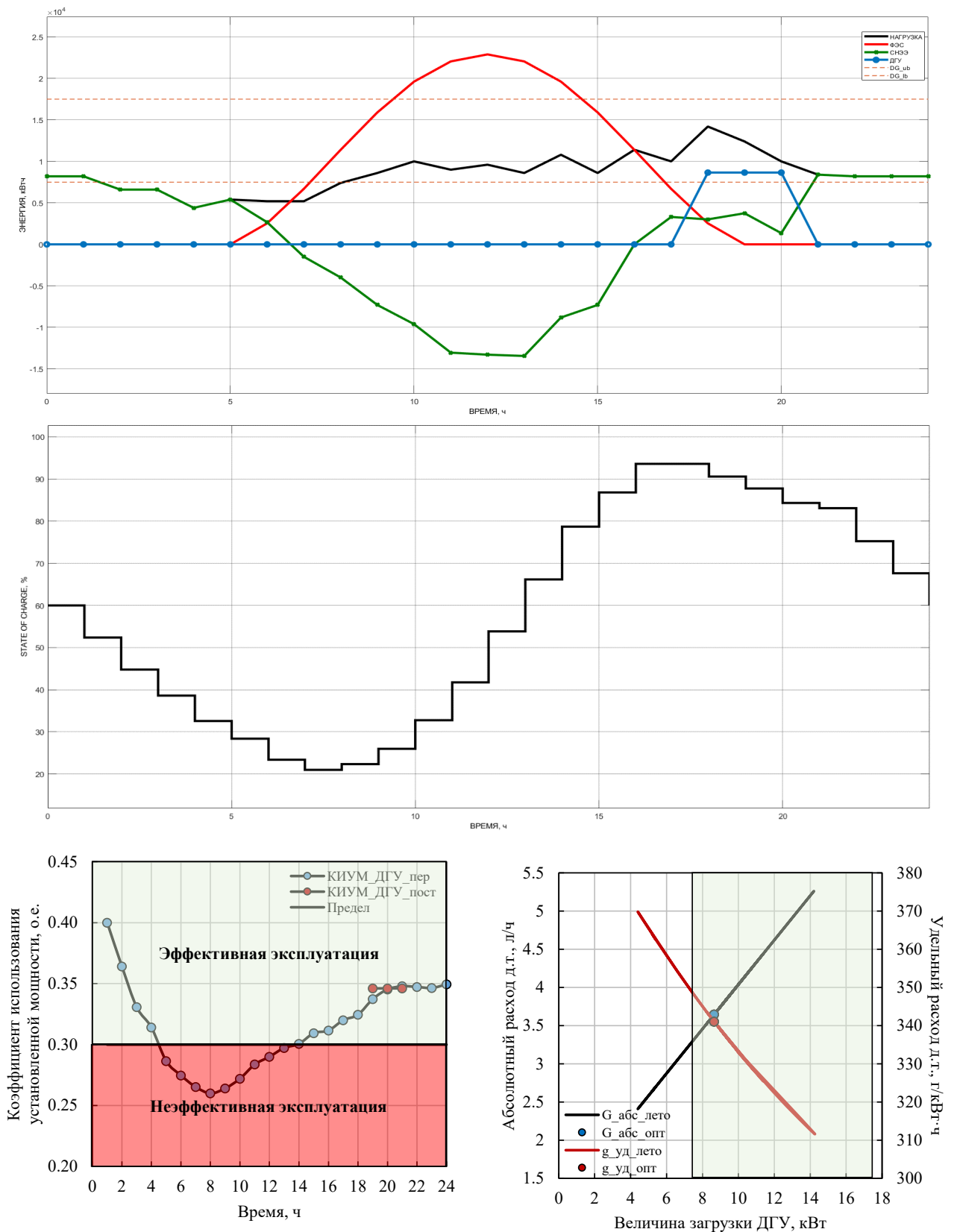


**Рисунок 9.** Модель фотодизельной системы электроснабжения на постоянном токе в MATLAB/Simulink/Stateflow

которое обеспечивается через единую систему управления рабочими режимами. В рамках разработанной имитационной модели ФДЭС на постоянном токе в MATLAB/Simulink/Stateflow доказано, что предлагаемая система управления комплексом способна обеспечить необходимый баланс мощностей в изолированной энергетической системе. Модель применена и апробирована в целях рационального выбора и оптимизации параметров основных компонентов автономного энергетического комплекса.

На основе управляющих команд с соблюдением энергетического баланса, центральный контроллер из библиотеки Stateflow управляет режимами работы DC/DC преобразователей ДГУ, СНЭЭ, а также их совместной работой, при изменении условий уровня солнечного излучения, температуры окружающей среды, нагрузки. В период времени с 07:00 до 16:00 ФЭС вырабатывает

больше энергии, чем требуется для нагрузки. Эта избыточная энергия идёт на заряд СНЭЭ. Напряжение на ШПТ равно  $540 \pm 10$  (В), что является допустимым.



**Рисунок 10.** Диаграмма энергетического баланса в условиях летней нагрузки для п. Кимоваара

Расчётная зависимость контролируемого параметра в системе – SOC, при набросе электрической нагрузки показана на Рисунке 10, который следует за изменениями мощности

ФЭС для поддержания необходимой мощности на ШПТ. При отсутствии энергии ФЭС, обменная энергия разряда СНЭЭ следует за изменением уровня электропотребления. Когда выработка электроэнергии от ФЭС начинает увеличиваться, СНЭЭ начинает работать совместно с ФЭС, что видно в 06:00 и с 16:00 до 18:00. Остаточная ёмкость СНЭЭ на начало суток принята равной 60% для моделирования недостаточного количества инсоляции с точки зрения предыдущего дня. За время моделирования уровень заряда СНЭЭ уменьшается до 20%. Во время заряда СНЭЭ остаточная ёмкость увеличивается с 20 до 94%, максимальный ток заряда не превышает 22 А, что меньше допустимого тока в 30 А для массива моноблоков. За время работы в зонах разряда уровень SOC СНЭЭ уменьшается до 60%, что соответствует первоначально заданному, и свидетельствует о том, что энергия, затраченная СНЭЭ на питание нагрузок потребителя, успевает полностью восполниться за сутки.

Анализируя Рисунок 10, необходимо подчеркнуть, что в часы нехватки запасенной энергии и энергии ФЭС запускается ДГУ с 18:00 до 20:00. ДГУ находится в зоне «эффективной эксплуатации», не преодолевая нижнюю границу оптимальной загрузки (Предел, Рисунок 10). Абсолютный и удельный расходы дизельного топлива определены в точках –  $G_{\text{абс\_опт}}$ ,  $g_{\text{уд\_опт}}$  на Рисунке 10. В течение трёх часов работы КИУМ ДГУ в составе ФДЭС постоянного тока составляет 34,6%, экономия дизельного топлива составляет 34 л/сут. Энергия ФЭС варьируется в зависимости от количества поступающего солнечного излучения. Учитывая данный факт, необходимо провести проверку на адекватность схождения энергетического баланса, где критериями оценки будут следующие параметры: схождение по энергетическому балансу ФДЭС-системы на постоянном токе; сумма энергии заряда/разряда СНЭЭ за сутки должна быть приблизительно равна нулю; изменение суточного заряда СНЭЭ должно быть приблизительно равняться нулю. Результаты моделирования средних летних суток для п. Кимоваара следующие:  $0,0091 \cdot 10^{-10}$  кВт·ч – величина обменной энергии в ФДЭС-системе на конец моделируемых суток;  $-0,2547 \cdot 10^{-10}$  кВт·ч – величина обменной энергии СНЭЭ на конец моделируемых суток;  $0,0004 \cdot 10^{-10}$  % – величина параметра SOC на конец моделируемых суток.

Численное моделирование в пакете MS Excel показало снижение тарифа в варианте переменного тока с 50,7 до 45,7 руб./кВт·ч, тогда как система на постоянном токе достигла результата 42,3 руб./кВт·ч. Проект более чувствителен к объёму инвестиций и крайне чувствителен к действующему тарифу на электрическую энергию. Исходя из предложенного перечня оборудования, наибольший вклад в обращение ЧПС в отрицательную сторону вносят аккумуляторы «лифтеры»: при стоимости необходимого массива СНЭЭ в 2 100 000 руб. проект окупается через 32 года. Таким образом, эффективной технологией накопления электрической энергии с точки зрения технико-экономических показателей для ФДЭС на постоянном токе является панцирная технология СНЭЭ

Результаты моделирования подтверждают, что разработанная система обеспечивает бесперебойное электроснабжение нагрузки, режим управления ФДЭС на постоянном токе работает корректно. Анализируя графики следует сделать вывод, что все компоненты системы работают правильно, а именно: график нагрузок полностью обеспечен энергией, блок СНЭЭ по мере разряда/заряда переключаются в соответствии с разработанной логикой работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в рамках которой предлагаются и обосновываются новые подходы и решения актуальной научно-технической задачи – повышения технико-экономических характеристик автономных фото-дизельных систем электроснабжения. В рамках исследования выполнен следующий объём работ:

1. Проведен анализ современного состояния автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии. Определено, что на современном этапе одним из наиболее актуальных трендов развития децентрализованных потребителей с невысоким (установленные мощности до 100 кВт) и крайне неравномерным уровнем электропотребления

является концепция микросетевой топологии с интеграцией в дизельные системы электроснабжения энергоустановок возобновляемой энергетики.

2. Обосновано, что эффективным способом технической модернизации и повышения экономических показателей автономных систем электроснабжения является увеличение вклада возобновляемых энергоисточников, прежде всего фото-электростанций, в общий энергетический баланс системы с действующими объектами дизельной генерации.

3. Проанализированы подходы к решению оптимизационных задач в автономных системах электроснабжения, предложена и показана концепция построения фото-дизельных электротехнических комплексов с использованием топологии постоянного тока, что позволяет увеличить вклад фотоэлектрической генерации в энергетический баланс автономной системы электроснабжения до 50% по сравнению с аналогичной системой на переменном токе. Предложенная концепция обладает следующими преимуществами: эффективное использование энергетического потенциала возобновляемого энергоносителя, а также интеллектуальное взаимодействие между ДГУ и СНЭЭ, обеспечивающее оптимизацию их технико-экономических характеристик.

4. Выделены и проанализированы локальные факторы, от которых зависят топологические конфигурации ФДЭС на постоянном токе для электроснабжения децентрализованных потребителей, в том числе такие как: месторасположение, особенности территории, широта местности, климатические условия, суточные и сезонные изменения инсоляции, температуры и др.

5. Разработаны математические модели компонентов электротехнического комплекса, основанные на математических зависимостях, связывающих их входные параметры с выходными энергетическими характеристиками, отличающиеся использованием данных технической спецификации. В частности, модель ДГУ позволяет упростить получение внешне-скоростных и мощностных характеристик дизель-генератора в рассматриваемом диапазоне мощностей.

6. Сформулированы алгоритмы обеспечения энергоэффективной работы фото-дизельной системы электроснабжения на постоянном токе, позволяющие в реальном времени оптимально управлять энергетическим балансом электротехнического комплекса. При настройке систем управления ФДЭС постоянного тока применялись интеллектуальные подходы к принятию решения, учитывающие внешние неконтролируемые прогнозные факторы.

7. Проведена оценка энергетических характеристик автономных систем электроснабжения с применением системы накопления электрической энергии, основанных на общепринятых технических индикаторах: коэффициент использования установленной мощности, удельный расхода топлива на 1 кВт·ч вырабатываемой электроэнергии, а также зависимостях заряда/разряда СНЭЭ от величин перетоков мощности.

8. Разработана и реализована в ПО MATLAB/Simulink/Stateflow имитационная модель фото-дизельной системы электроснабжения с энергоэффективными алгоритмами управления, основанными на интеллектуальных подходах принятия решений. Модель отличается разделением на уровни контроля генерирующих установок АСЭС с традиционным топливным и возобновляемым энергоносителем с учётом временной выборки исследуемых процессов и технико-экономических характеристик используемого энергооборудования, а также массива внешних неконтролируемых воздействий на электротехнический комплекс.

9. Предложена методика оценки технико-экономической эффективности применения фото-дизельной системы электроснабжения на постоянном токе, отличающаяся оригинальным подходом к рассмотрению ЧПС, где индикатор нужно применять в обратном порядке – установить ЧПС проекта на нуль, а затем найти снижение цены на электроэнергию. Эта цена представляет собой выгоду от интеграции ФЭС (снижение затрат на топливо, косвенных и прямых затрат). Так, численное моделирование в пакете MS Excel показало снижение тарифа в варианте переменного тока на 9,8%, тогда как система на постоянном токе достигла результата снижения на 16,6%.

10. Доказано, что разработанные алгоритмы энергоэффективного управления в модели электротехнического комплекса ФДЭС постоянного тока в MATLAB/Simulink/Stateflow обеспечивают повышение эффективности автономной энергетической системы за счёт снижения себестоимости вырабатываемой электрической энергии до 20% в сравнении с системой на переменном токе; экономия до 15% дизельного топлива в сравнении с системой на переменном токе; снижение вредных выбросов в атмосферу до 11 %.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Лукутин, Б.В. Оптимизация состава и режимов работы фотодизельной системы электроснабжения постоянного тока / Б.В. Лукутин, Д.И. Муравьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 4(153). – С. 795-809. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-4-795-809.
2. Лукутин, Б.В. Имитационная модель фотодизельной системы электроснабжения с интеллектуальным управлением в matlab/simulink / Б.В. Лукутин, Д.И. Муравьев // Омский научный вестник. – 2021. – № 4(178). – С. 52-62. – DOI 10.25206/1813-8225-2021-178-52-62.

### *Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. Lukutin B.V., Muravyev D.I. Prospects for decentralized DC systems with distributed solar generation [Перспективы децентрализованных систем электроснабжения постоянного тока с распределённой солнечной генерацией] (2020) Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 331 (6), pp. 184-196. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2688
4. Lukutin B.V., Muravyev D.I. Optimization of operational control of autonomous photo-diesel power supply system with DC bus [Оптимизация оперативного управления автономной фотодизельной системой электроснабжения с шиной постоянного тока] (2022) Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 333 (4), pp. 224-235. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3619

### *Публикации в сборниках трудов конференций:*

5. Muravyev, D.I., Lukutin, B.V., Daminova, E.S. Stand-alone power supply DC system with distributed photo-diesel source / D.I. Muravyev, B.V. Lukutin, E.S. Daminova // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2135. – № 020040.
6. Lukutin, B.V., Muravyev D.I. Stand-alone power supply system with DC photo-diesel source / B.V. Lukutin, D.I. Muravyev // E3S Web Conf. – 2019. – V. 114. – № 05003.
7. Lukutin, B.V., Muravyev, D.I., Ryzhkova, A.V. The efficiency of combined electrothermal and electrochemical accumulation of electricity of a photovoltaic power plant / B.V. Lukutin, D.I. Muravyev, A.V. Ryzhkova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), Tomsk, Russian Federation. – 2019. – V. 1019. – № 012053.
8. Муравьев, Д. И. Применение распределенной фото-дизельной системы электроснабжения постоянного тока в вопросах обеспечения энергетической безопасности / Д. И. Муравьев, Б. В. Лукутин // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 23–26 сентября 2019 года / Под редакцией Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2019. – С. 1116-1120.