

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Емельянов Евгений Александрович



ГИБРИДНЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС С ДИЗЕЛЬ-
И ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКАМИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСЕЛЕНИЯ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Бельский А.А.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ИЗОЛИРОВАННЫХ И ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ.....	10
1.1 Децентрализованное электроснабжение в России и в мире	10
1.2 Возобновляемая энергетика в России и в мире.....	15
1.3 Гибридные электротехнические комплексы	23
1.3.1 ВЭУ в составе гибридного ЭТК	23
1.3.2 ДГУ в составе гибридного ЭТК.....	26
1.3.3 СНЭ в составе гибридного ЭТК	28
1.4 Оптимизация параметров гибридного ЭТК	32
1.5 Критерии оптимизации параметров гибридного ЭТК	35
1.6 Оценка показателей надежности гибридного ЭТК.....	41
1.7 Выводы к главе 1	45
ГЛАВА 2 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА	46
2.1 Общая характеристика географического расположения объекта	46
2.2 График электрической нагрузки поселения на ИТТ	47
2.3 Схемы распределительного устройства гибридного ЭТК.....	50
2.4 Алгоритм имитационного моделирования гибридного ЭТК	54
2.5 Моделирование отказов оборудования гибридного ЭТК.....	58
2.6 Математическая модель ДГУ.....	61
2.7 Математическая модель ВЭУ	65
2.8 Математическая модель СНЭ	67
2.9 Выводы к главе 2	70
ГЛАВА 3 ВЫБОР СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ГИБРИДНОГО ЭТК	71
3.1 Глобальная оценка чувствительности показателей гибридного ЭТК	71
3.2 Выбор количества и номинальной мощности ДГУ	79

3.3 Распределение потребителей поселения по категориям надежности электроснабжения	83
3.4 Выбор и обоснование схемы распределительного устройства гибридного ЭТК	86
3.5 Выводы к главе 3	90
ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ	92
4.1 Резервный режим работы СНЭ	92
4.2 Режим замещения генерации ДГУ	97
4.3 Адаптивный алгоритм управления минимальным уровнем заряда СНЭ	103
4.4 Эффективность адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ	107
4.5 Выводы к главе 4	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611997	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618725	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Значительная часть территории России находится вне зоны централизованного электроснабжения и относится к изолированным и труднодоступным территориям (ИТТ). Для ИТТ характерны большие расстояния между объектами электроснабжения, низкая плотность электрических нагрузок и рассредоточенность поселений.

Электроснабжение поселений на ИТТ традиционно осуществляется автономными электротехническими комплексами (ЭТК) на основе дизель-генераторных установок (ДГУ), эксплуатация которых характеризуется значительными затратами на обслуживание и низкой энергоэффективностью. Степень износа автономных ДГУ превышает 75% и приводит к повышенному расходу топлива, затраты на которое составляют до 60% от стоимости электроэнергии. Высокая себестоимость электроэнергии существующих автономных ЭТК обуславливает актуальность задачи замещения генерации ДГУ. Одним из направлений решения данной задачи является совместное применение ДГУ, ветроэлектрических установок (ВЭУ) и системы накопления энергии (СНЭ) в составе гибридных ЭТК.

Потребители электроэнергии классифицируются по категориям надежности электроснабжения, что определяет различные требования к обеспечению резервирования. Распределение потребителей по категориям надежности, особенности функционирования оборудования в аварийных режимах и специфика режимов работы генерирующего оборудования влияют на эффективность оптимизации параметров гибридных ЭТК, применяемых для автономного электроснабжения потребителей поселений на ИТТ.

Необходимость решения вышеуказанной задачи подтверждает актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности темы исследования

Проблема автономного электроснабжения объектов на ИТТ гибридными ЭТК рассматривалась в работах многих отечественных и зарубежных

исследователей. Вопросы децентрализованного энергоснабжения, структуры и состава гибридных ЭТК изучались В.В. Елистратовым, Б.В. Лукутиным, В.Г. Николаевым, С.Г. Обуховым, С.А. Chang. Методы оптимизации состава и параметров гибридных ЭТК представлены в трудах Б.Н. Абрамовича, П.П. Безруких, А.А. Бельского, В.И. Велькина, Д.С. Стребкова, К.В. Суслова, И.С. Токарева, М.Г. Тягунова, R. Dufo-Lopez и многих других. Исследованием режимов работы оборудования занимались А.Г. Васьков, S. Daneshvard, A. Rathore. Моделированием отказов оборудования и оценкой влияния вероятностных процессов на надежность комплексов занимались П.В. Илюшин, Т.В. Кривенко, А.Н. Назарычев, И.В. Наумов, М.М. Султанов, В.А. Тремясов, T. Adefarati, J. Lin.

Вместе с тем недостаточно изучены вопросы влияния режимов работы и отказов оборудования на выбор оптимальных параметров гибридного ЭТК, а также зависимости показателей комплекса от схемы распределительного устройства (РУ) и категории надежности электроснабжения потребителей поселения.

Объект исследования – гибридный электротехнический комплекс, включающий дизель-генераторные и ветроэлектрические установки с системой накопления энергии, для автономного электроснабжения поселения на изолированных и труднодоступных территориях.

Предмет исследования – параметры и режимы работы гибридного ЭТК.

Цель работы – повышение энергоэффективности гибридного ЭТК с ДГУ, ВЭУ и СНЭ, применяемого для автономного электроснабжения поселения на ИТТ.

Идея заключается в повышении энергоэффективности гибридного ЭТК за счет выбора рациональной схемы распределительного устройства, оптимизации параметров оборудования и внедрения адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ с учетом категорий надежности электроснабжения потребителей и показателей надежности оборудования гибридного ЭТК.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ современного состояния проблемы автономного электроснабжения поселений на ИТТ, методов и критериев оптимизации гибридных ЭТК.
2. Построить годовой график часовых нагрузок для поселения на ИТТ на основе измерений фактической загрузки ДГУ. Определить математическую зависимость удельного расхода топлива от номинальной мощности ДГУ с учетом уровня загрузки установок.
3. Разработать имитационную компьютерную модель для расчета показателей гибридного ЭТК, учитывающую схемы РУ, категории надежности электроснабжения потребителей и показатели надежности оборудования.
4. Оценить чувствительность показателей гибридного ЭТК к изменениям параметров оборудования и выявить параметры с наибольшим влиянием.
5. Выполнить имитационное моделирование работы гибридного ЭТК в различных режимах, выбрать и обосновать схему РУ.
6. Выполнить оценку влияния интеграции ВЭУ и СНЭ на показатели гибридного ЭТК.
7. Определить математические зависимости показателей гибридного ЭТК от параметров и режимов работы СНЭ.
8. Разработать адаптивный алгоритм управления минимальным уровнем заряда СНЭ для повышения энергоэффективности и снижения вероятностей потери электроснабжения и нагрузки гибридного ЭТК.

Научная новизна работы:

1. Определены зависимости нормированной стоимости электроэнергии, вероятности потери электроснабжения и нагрузки гибридного ЭТК от допустимых максимальных токов разряда и заряда, емкости и минимального уровня заряда СНЭ.
2. Разработан адаптивный алгоритм управления минимальным уровнем заряда СНЭ в составе гибридного ЭТК, обеспечивающий снижение нормированной стоимости электроэнергии и вероятностей потери электроснабжения и нагрузки.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам:

п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

п. 3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Результаты работы могут применяться в качестве методических рекомендаций по выбору параметров электротехнических комплексов с ветроэлектрическими установками, а также при проведении технико-экономического обоснования внедрения систем с возобновляемыми источниками энергии и систем накопления энергии для автономного электроснабжения.

Результаты диссертации внедрены в инженерно-проектировочную деятельность ООО «Балтэнерготех» в виде: технических предложений и рекомендаций по выбору схем распределительного устройства и номинальных параметров гибридного электротехнического комплекса с дизель- и/или ветроэлектрической установками (акт внедрения результатов диссертации от 10.04.2025 г., Приложение А).

Методология и методы исследования. В работе использовались методы анализа и обобщения данных, методы имитационного моделирования, метод Монте-Карло для учета стохастического характера отказов оборудования и глобальная оценка чувствительности показателей гибридного ЭТК к изменению параметров комплекса по методу Соболя. Для разработки имитационных моделей и анализа данных применялись языки программирования Python и Java.

Положения, выносимые на защиту:

1. В гибридном электротехническом комплексе следует применять двойную систему шин в качестве схемы низковольтного распределительного устройства, которая в отличие от одиночной секционированной шины обеспечивает снижение вероятностей потери электроснабжения на 5–32% и нагрузки на 3–17% при минимуме нормированной стоимости электроэнергии.

2. Снижение нормированной стоимости электроэнергии, вероятностей потери электроснабжения и нагрузки гибридного электротехнического комплекса достигается путем адаптивного изменения минимального уровня заряда системы накопления энергии на основе разработанного алгоритма управления, позволяющего исключить работу дизель-генераторных установок в неэкономичных режимах.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена применением общеизвестных методов и подходов в научно-технических исследованиях гибридных ЭТК, общепринятых методов имитационного моделирования, использованием статистических методов, включая метод Монте-Карло и метод глобальной оценки чувствительности Соболя, а также проверкой согласованности полученных зависимостей и результатов с теоретическими положениями.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: VIII Международная научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (06-08 декабря 2024 года, г. Кемерово); V Международная научно-практическая конференция «Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты» (15 мая 2025 года, г. Казань); Научно-практическая технологическая конференция «Energynet.Unicon 2025» (16 июня 2025 года, г. Казань); XI Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки 2025» (25 ноября 2025года, г. Пенза).

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и задач диссертационной работы, выборе методов и методологии исследования. Проведен анализ современного состояния проблемы автономного электроснабжения потребителей на ИТТ. Разработан программный комплекс для имитационного моделирования гибридного ЭТК учитывающий схемы РУ, категории надежности электроснабжения потребителей и показатели надежности оборудования ЭТК. Получен годовой график часовых нагрузок поселения на ИТТ. Определена математическая зависимость удельного расхода топлива от номинальной мощности ДГУ с учетом уровня загрузки установок. Произведен выбор параметров основного оборудования гибридного ЭТК. Разработан алгоритм адаптивного управления минимальным уровнем заряда СНЭ. Проведен анализ результатов, на основе которых сформулированы защищаемые положения работы.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 7 печатных работах (пункты списка литератур № 6-9, 13-15), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункты списка литературы № 28, 29, Приложения Б и В).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 166 наименований, и 3 приложений. Диссертация изложена на 141 странице машинописного текста, содержит 54 рисунка и 21 таблицу.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность кандидату технических наук, доценту Бельскому Алексею Анатольевичу за научное руководство и предложенную идею диссертационной работы.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ИЗОЛИРОВАННЫХ И ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

1.1 Децентрализованное электроснабжение в России и в мире

Единая энергетическая система России является крупнейшей в мире, она включает в себя 75 региональных энергосистем, которые образуют 7 объединённых энергосистем [33]. Тем не менее две трети территории нашей страны не имеют централизованного электроснабжения, так как из-за низкой плотности населения и сложных климатических и географических условий строительство линий электропередач экономически нецелесообразно [30].

На рисунке 1.1 изображена карта России, с выделенными районами централизованного и автономного электроснабжения, а также с неэлектрофицированными участками, на которой указаны установленные мощности дизельных электростанций.



Рисунок 1.1 – Зона децентрализованного электроснабжения России [12]

Такие территории принято называть изолированными и труднодоступными территориями (ИТТ), поскольку они удалены от единой энергосистемы, имеют слаборазвитую транспортную инфраструктуру, суровые климатические условия и

а) Запасы, млрд т
 0,05-1 1-2 2-5 >5

б) Запасы, млрд куб.м
 <1000 1000-5000 5000-10000 >10000

в) Запасы, тонн
 <100 100-500 500-1000 >1000

г) Запасы, тыс. т
 <0,5 0,5-3 >3

ау) Запасы, тыс. т
 <0,5 0,5-3 >3

аg) Запасы, тыс. т
 <0,5 0,5-3 >3

Основным источником энергии в децентрализованных районах являются автономные ЭТК на базе ДГУ [12, 19, 95, 154], применение которых обусловлено следующими причинами:

- простота эксплуатации – легкость в управлении с точки зрения изменения мощности генерации, согласования нескольких установок, а также ввода резерва и проведения ремонтных работ;

– универсальность – возможность использования ДГУ в любых климатических условиях, а также при полном отсутствии энергетической инфраструктуры;

– масштабируемость – при росте потребляемой мощности количество ДГУ может быть легко увеличено;

– низкие капитальные затраты – внедрение ДГУ для электроснабжения удаленных потребителей требует значительно меньших вложений, по сравнению с затратами на строительство линий электропередачи.

На рисунке 1.3 представлена карта России с указанием средневзвешенного удельного расхода условного топлива на 1 кВт·ч полезного отпуска электроэнергии на генерирующих объектах, расположенных в ИТТ.



Рисунок 1.3 – Удельный расход условного топлива на ИТТ [25]

Всего в ИТТ функционируют свыше 900 электростанций, а выработка превышает 2,5 млрд кВт·ч/год [12]. Наибольшее количество ДГУ и объём установленной мощности отмечены в четырёх регионах: Республике Саха (Якутия), Красноярском крае, Камчатском крае и Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) [25].

Несмотря на преимущества, использование ДГУ сопряжено с проблемами, связанными с эффективностью и надежностью электроснабжения, высоким уровнем воздействия на окружающую среду и значительными эксплуатационными затратами. Значительная часть ДГУ находится на стадии морального устаревания, выработавшие свой ресурс установки имеют низкий КПД, что приводит к увеличению расхода топлива [12], а также к увеличению выбросов продуктов сгорания топлива в атмосферу [19]. По оценкам исследователей износ ДГУ в ИТТ превышает 75%, что приводит к увеличению частоты отказов оборудования и перебоев электроснабжения [21]. Схожие значения приводятся в перечне проектов модернизации объектов локальной генерации на территории Дальневосточного федерального округа, например, для республики Саха среднее значение износа составляет 59,7% [23].

Как правило, ИТТ удалены от топливных баз и характеризуются слабой или отсутствующей транспортной инфраструктурой, что обуславливает трудоёмкий и затратный процесс завоза топлива и обслуживания энергетического оборудования [19]. До 60% совокупных затрат на производство электроэнергии в изолированных энергосистемах приходится на топливо, стоимость которого в отдельных регионах может превышать 150 тыс. руб./тонна [22, 25]. При этом затраты на транспортировку топлива до объектов генерации составляют 50–60% стоимости топлива [11]. Повышенный расход топлива морально устаревших ДГУ в сочетании с высокой стоимостью его доставки обуславливают крайне высокую себестоимость производства электроэнергии в ИТТ.

В указанных условиях для обеспечения доступности электроснабжения государство вынуждено субсидировать деятельность генерирующих организаций, компенсируя разницу между фактическими затратами на генерацию и экономически обоснованным уровнем тарифов. Существует перекрестное субсидирование, когда тарифы для населения децентрализованных регионов снижаются за счет повышения тарифов прочих групп потребителей [5].

На рисунке 1.4 представлен график удельных фактических расходов на производство электроэнергии и размер субсидий на компенсацию выпадающих доходов (на 2020 год).

Схожие проблемы электроснабжения наблюдаются в различных странах мира. Несмотря на рост глобального производства энергии и развитие инфраструктуры, значительное число удалённых, малонаселённых или изолированных территорий остается вне пределов централизованных энергосетей. Проблема охвата распределённой генерацией особенно актуальна для стран с большой территорией и/или сложными природно-климатическими условиями.

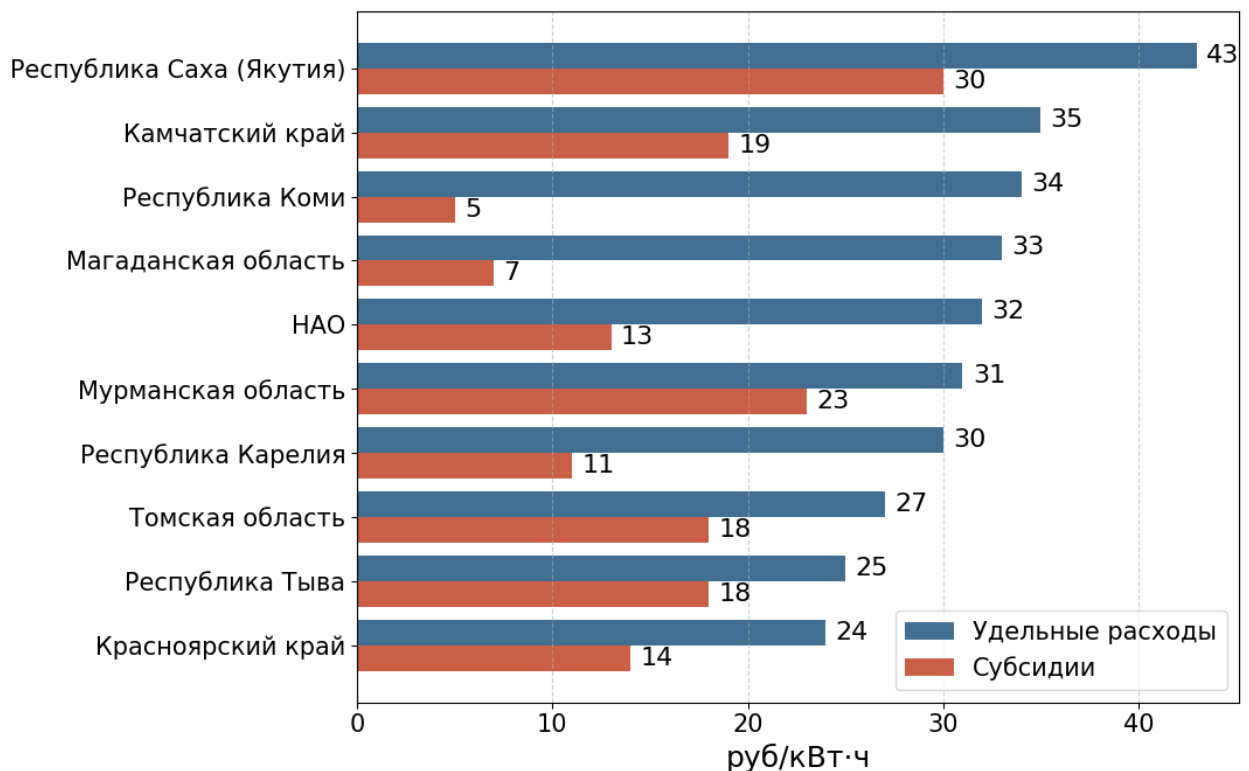


Рисунок 1.4 – Удельные фактические расходы на производство электроэнергии и размер субсидий на компенсацию выпадающих доходов [25]

В Канаде и на Аляске более 170 удалённых и преимущественно коренных общин полностью зависят от дизельной генерации и сталкиваются с перебоями электроэнергии [108]. Интегрированные системы возобновляемой энергетики (ВИЭ), сочетающие фотоэлектрические установки (ФЭУ), ВЭУ, генераторы на биомассе и накопители энергии, эффективно обеспечивают электроэнергией отдалённые населённые пункты Канады [133] и Аляски [62].

В отдалённых районах ОАЭ, где отсутствует доступ к электросети, предлагается обеспечивать потребителей за счет автономного гибридного ЭТК с ДГУ, ФЭУ и водородным накопителем, оптимизированным под местный профиль нагрузки бытовых приборов [140].

В работе [72] указывается, что совместное использование ВИЭ с существующими ДГУ может эффективно обеспечивать электроэнергией отдалённые изолированные системы Бразилии.

Проблемы электроснабжения наблюдаются на островах США, где ФЭУ и ВЭУ с накопителями энергии рассматриваются как ключевые компоненты интегрированных энергетических систем [85].

Энергетические сообщества в Греции применяют ФЭУ, повышая устойчивость и снижая расходы фермеров, а в Дании и Испании проекты ветровой и гибридной энергетики обеспечивают энергией население и создают средства для финансирования местных социальных и инфраструктурных нужд [147].

В отдалённых районах Индии, где традиционное электроснабжение невозможно, применяется гибридная энергетическая система. Система объединяет ФЭУ, ДГУ и накопители энергии, что позволяет обеспечить стабильную подачу электроэнергии при минимальных выбросах [112].

Таким образом, проблема децентрализованного электроснабжения носит глобальный характер, затрагивая как развитые, так и развивающиеся страны, и требует комплексного подхода с учётом локальных особенностей. Для повышения балансовой надёжности, экономической эффективности и снижения экологического воздействия целесообразно развивать автономные ЭТК с ВИЭ.

1.2 Возобновляемая энергетика в России и в мире

Согласно энергетической стратегии России до 2050 года повышение эффективности электроснабжения децентрализованных удаленных потребителей является задачей энергетики, основанной на ВИЭ [24].

Возобновляемая энергетика развивается с большой скоростью, реализуются крупные проекты по внедрению ВИЭ практически во всех регионах мира [17]. Согласно отчетам Ассоциации развития возобновляемой энергетики [4], на

01.06.2025 г. совокупная установленная мощность ВИЭ (без учета ГЭС) в России составляет 6,64 ГВт, на ветроэлектрические станции (ВЭС) и солнечные электростанции (СЭС) приходится 2,57 и 2,55 ГВт соответственно. При этом динамика роста совокупной установленной мощности объектов ВИЭ сохраняется (рисунок 1.5).

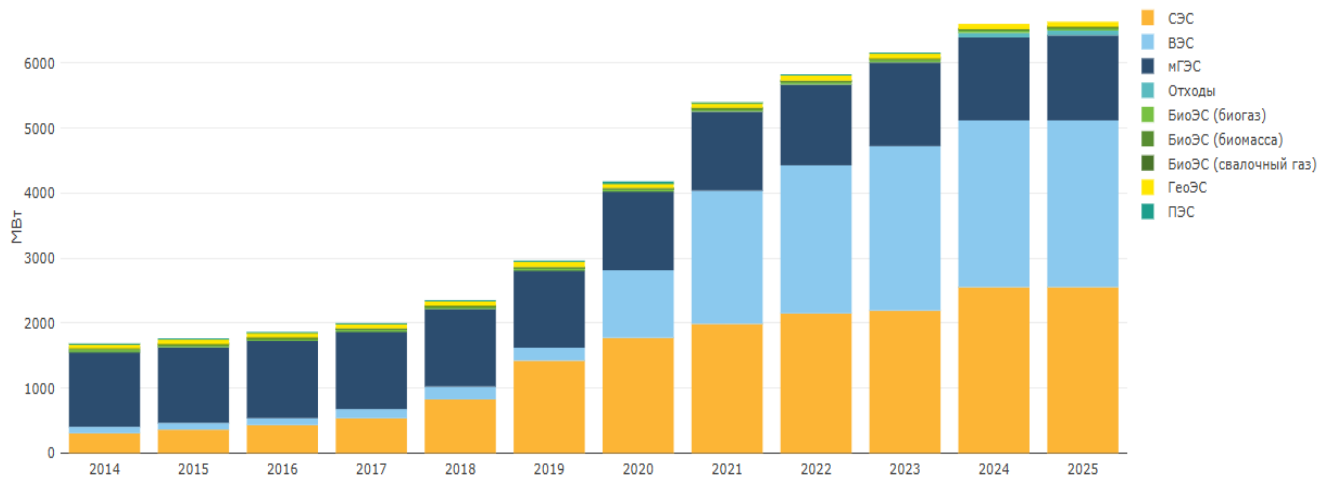


Рисунок 1.5 – Динамика совокупной установленной мощности объектов ВИЭ в России [4]

Развитие ВИЭ связано в том числе и с необходимостью снижения негативного влияния на экологию. 192 страны, включая Россию, в 2015 году подписали парижское соглашение об обязательстве внедрения мер по снижению выбросов CO_2 в атмосферу.

Для ряда стран, в основном европейских, мотивацией развития ВИЭ является отсутствие собственных запасов ископаемого топлива, из-за чего они вынуждены закупать его извне по высоким ценам. Россия, ввиду своего территориального расположения, не имеет такой необходимости, вследствие чего доля ВИЭ мала и составляет порядка 20%. Причем большая часть ВИЭ приходится на ГЭС, что видно из рисунка 1.6, на котором изображена структура установленной мощности электростанций России.

Одной из проблем использования ВИЭ в России является их низкая конкурентоспособность с точки зрения капитальных затрат. К тому же модернизация существующих источников генерации и строительства новых на

ИТТ тормозит низкая инвестиционная привлекательность проектов, а также отсутствие системных мер государственной поддержки [27].

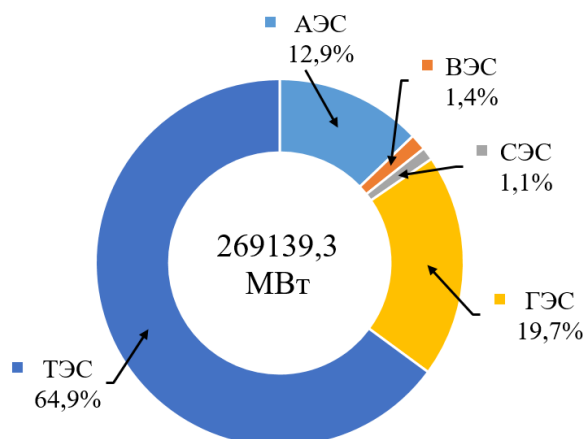


Рисунок 1.6 – Структура установленной мощности электростанций России на 01.01.2025 [33]

В последнее десятилетие наблюдается устойчивая тенденция к снижению стоимости ВЭС и СЭС за счет технологического прогресса. Высокая стоимость традиционного топлива в условиях ограниченной транспортной инфраструктуры делает ВИЭ перспективным инструментом решения как экономических, так и экологических задач обеспечения удалённых потребителей на ИТТ.

Современные исследования посвящены оценке эффективности электроснабжения за счет ВИЭ различных потребителей от больниц [123, 134] и жилых домов до объектов минерально-сырьевого комплекса [2, 148], в том числе в арктической зоне [96, 151]. Авторы рассматривают комплексы, включающие ВЭУ, ФЭУ, ДГУ, аккумуляторы и водородные технологии, для обеспечения надёжного электроснабжения изолированных населённых пунктов [22]. На данный момент уже реализовано значительное количество проектов интеграции ВИЭ для электроснабжения объектов на ИТТ [77, 92]. В таблице 1.1 указаны реализованные проекты, использующие ВИЭ для электроснабжения поселений и промышленных объектов.

Стремительное развитие ВИЭ обусловлено совокупностью экономических, технологических и экологических факторов. Ключевым преимуществом ВИЭ являются их низкие эксплуатационные затраты, связанные с отсутствием потребности в постоянном обеспечении топливом, что особенно актуально для

ИТТ. Интеграция таких систем позволяет существенно снизить расход дизельного топлива и связанные с этим транспортные издержки, уменьшить выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов, а также повысить надежность энергоснабжения за счет диверсификации генерации и сокращения зависимости от одного типа источника энергии [1, 36, 67].

Выбор конкретного типа ВИЭ определяется локальными метеорологическими условиями. Для северных и арктических территорий с децентрализованным энергоснабжением, включая ЯНАО, наибольшую эффективность, как правило, демонстрируют ВЭУ, что обусловлено хорошими метеорологическими показателями.

На рисунке 1.7 представлена карта России с указанием ветроэнергетического потенциала на высоте 100 м различных регионов, включая территории с высоким ресурсом, характерным для северных и арктических зон.

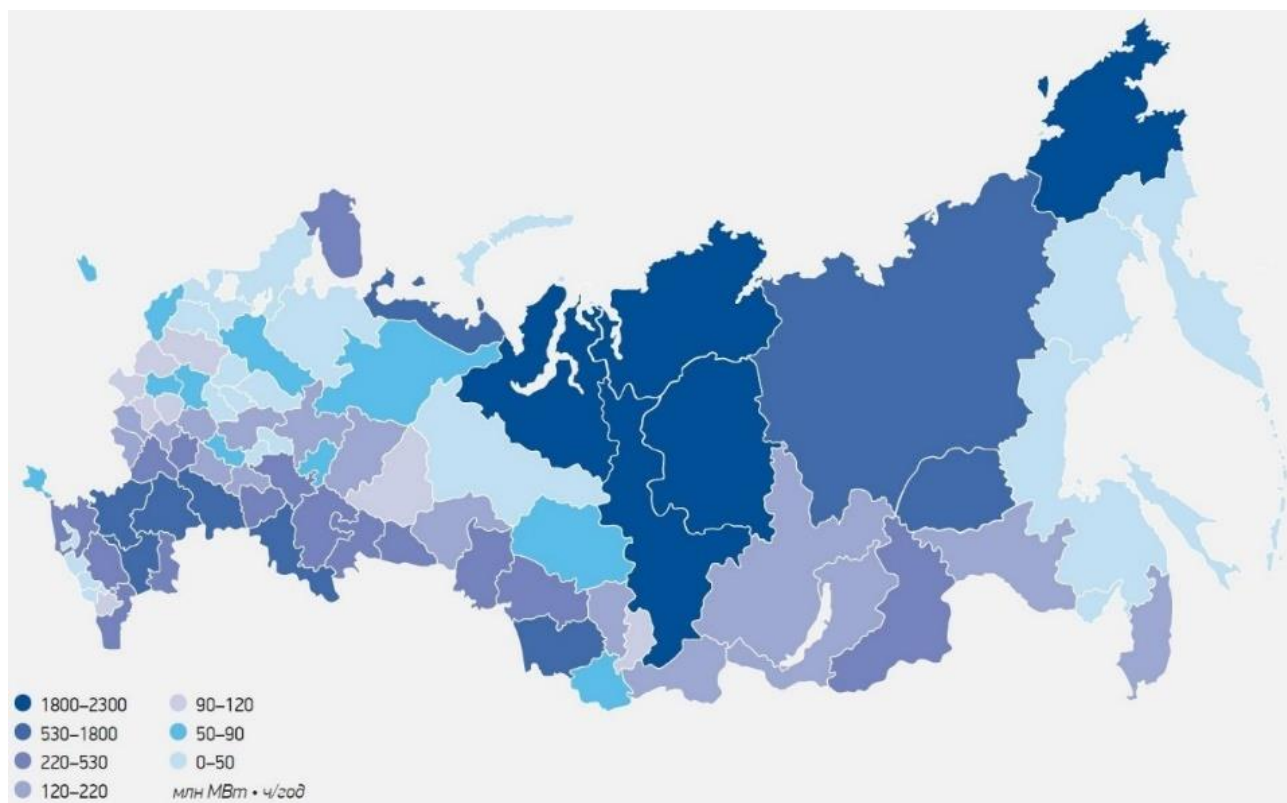


Рисунок 1.7 – Ветроэнергетический потенциал России [26]

Таблица 1.1 – Применение ВИЭ для электроснабжения поселений и объектов промышленности (составлено автором)

Страна, регион	Объект	Состав ЭТК	Установленная мощность, МВт / емкость, МВт·ч	Основное назначение	Автономность
Поселения					
Россия, Якутия	п. Тикси	ДГУ	3,0	Электроснабжение поселения	+
		ВЭУ	0,9		
Россия, Камчатский край	п. Усть- Камчатск	ДГУ	8,0		+
		ВЭУ	1,17		
Россия, Камчатский край	п. Никольское	ДГУ	2,0		+
		ВЭУ	0,55		
Россия, Сахалинская область	с. Новиково	ДГУ	4,8		+
		ВЭУ	0,45		
США, Аляска	п. Wales	ДГУ	н.д.		+
		ВЭУ	0,1		
Австралия, WA	Papulankutja / Blackstone	ДГУ	0,4		+
		ФЭУ	0,8		
		СНЭ	2,7		
Американское Самоа	о. Та‘ū	ДГУ	0,875	Электроснабжение острова	+
		ФЭУ	1,4		
		СНЭ	6		
Объекты промышленности					
Канада	Алмазный рудник Diavik	ДГУ	н.д.	Электроснабжение рудника	+
		ВЭУ	9,2		
Австралия, WA	Agnew Gold Mine	Газовая генерация	16	Электроснабжение рудника	+
		ФЭУ	4		
		ВЭУ	18		
		СНЭ	4		
		ВЭУ	9,2		

Продолжение таблицы 1.1

Страна, регион	Объект	Состав ЭТК	Установленная мощность, МВт / емкость, МВт·ч	Основное назначение	Автономность
Объекты промышленности					
Австралия, WA	Kathleen Valley Lithium Mine	ГТУ и ДГУ	31,4	Электроснабжение литиевого рудника	+
		ФЭУ	17,1		
		ВЭУ	30		
		СНЭ	20		
Россия, Хабаровский край	Морская база «Унчи»	ДГУ	н.д.	Энергоснабжение перевалочного пункта золоторудного месторождения «Светлое»	—
		ВЭУ	0,1		
Прочие объекты					
Россия, Чеченская Республика	Карбоновый полигон	ФЭУ	≈0,05	Электроснабжение кампуса	+
		ВЭУ	≈0,005		
Канада, гора Граус	«Око ветра»	ВЭУ	1,5	Частичное электроснабжение курорта	—
Непал	Электростанция «Чисапани»	ВЭУ	0,035	Электроснабжение сельских домохозяйств	+
США, остров Росса	Станция Мак- Мердо и ветропарк Ross Island Wind Energy	ВЭУ	0,99	Электроснабжение научных станций	+
		ДГУ	7		

Оценка ветропотенциала является важным этапом при проектировании комплексов с ВЭУ. В современных исследованиях произведена оценка ветропотенциала большого количества регионов мира [39, 61, 83]. Для моделирования генерации ВЭУ авторы используют различные метеорологические данные, которые можно разделить на статистические значения, реальные измеренные данные, данные, полученные математическим моделированием и данные реанализа. Характеристики указанных источников данные представлены в таблице 1.2.

Усреднённые данные ветра пригодны только для первичной оценки потенциала ВЭУ. Реальные измерения точнее, но ограничены по географии, длительности архивов и полноте данных. Применение авторских моделей для создания рядов скоростей ветра применимо для конкретных задач, как правило, в масштабе минут. Ввиду ограниченности реальных данных зачастую используют данные реанализов, обеспечивающие непрерывные пространственные и временные ряды. В большинстве работ по моделированию гибридных комплексов с ВИЭ используются часовые интервалы, возможность использования которых доказана исследованиями [102].

Таблица 1.2 – Источники метеорологических данных (составлено автором)

Тип данных	Характеристика	Преимущества	Недостатки	Область применения
Усредненные данные [61, 128, 128]	Среднегодовые или многолетние значения скорости ветра, полученные из атласов ветров или данных метеостанций	Простота получения и использования; возможность предварительной оценки ветрового потенциала	Низкая временная детализация; невозможность учета кратковременной изменчивости скорости ветра; пригодны только для укрупненных расчетов	Предварительная оценка целесообразности применения ВЭУ; выбор района размещения
Реальные измеренные данные [164]	Данные метеостанций и сервисов наблюдений: «Расписание погоды», «Погода России», «Погода и климат», Meteonorm, Windy и др.	Наиболее объективно отражают фактические ветровые условия в точке измерения	Ограниченный объем данных; возможные пропуски; низкая частота измерений; снижение репрезентативности при удалении от метеостанции	Расчет генерации ВЭУ при наличии близко расположенной метеостанции; верификация расчетных моделей
Данные реанализа [137, 164]	ERA5, ERA-Interim, JRA-55, NASA MERRA-2, NCEP/NCAR R1 и др.	Пространственная и временная непрерывность; значительный объем данных; возможность получения информации для территорий без метеостанций	Точность зависит от территории, высоты, рельефа и используемой модели реанализа; требуется сопоставление с измеренными данными	Расчет ветрового потенциала для удаленных территорий; формирование временных рядов скорости ветра для моделирования ЭТК
Данные моделирования [54, 57, 83, 97, 131]	Временные ряды, полученные на основе готовых или авторских моделей: SARIMA, ANN, SSA, MOICA и др.	Возможность формирования длительных рядов скорости ветра; удобство для статистического анализа, оптимизации параметров и исследования режимов работы	Наличие допущений; чувствительность результатов к выбранной модели и способу определения ее параметров	Имитационное моделирование, оптимизация состава оборудования, анализ алгоритмов управления

1.3 Гибридные электротехнические комплексы

Полный отказ от традиционных источников энергии не всегда экономически целесообразен. С учётом ограничений как ДГУ, так и ВИЭ, перспективным направлением является их совместное использование в составе гибридных ЭТК. Существует четыре варианта построения гибридных ЭТК:

- на основе нескольких ВИЭ без традиционных источников энергии – в таких ЭТК зачастую сочетаются ВЭУ и ФЭУ, а также рассматриваются различные виды СНЭ [35];

- на основе ВИЭ с резервирующим традиционным источником энергии – как правило, применяются ДГУ, которые используются в часы дефицита энергии от ВИЭ [134];

- на основе традиционных источников энергии с использованием ВИЭ – в таких ЭТК ВИЭ работает параллельно с ДГУ и используются для снижения расхода топлива [109];

- на основе ВИЭ, работающих параллельно с сетью [79].

Наиболее распространённым является вариант гибридного ветродизельного комплекса, где ВЭУ и ДГУ работают параллельно [84, 114]. В России уже функционирует ряд таких комплексов в Якутии, на Чукотке и Сахалине.

1.3.1 ВЭУ в составе гибридного ЭТК

Применение ВЭУ для автономного электроснабжения потребителей на ИТТ позволяет снизить расход дорогостоящего дизельного топлива, уменьшить эксплуатационные затраты и повысить энергоэффективность гибридного ЭТК. Однако эффективность от внедрения ВЭУ определяется не только ветроэнергетическим потенциалом рассматриваемого региона, но и режимными ограничениями системы электроснабжения. В ряде работ отмечается, что применение ВЭУ может улучшить параметры сети и снизить потери мощности, но эффект зависит от уровня проникновения, а также места подключения ВЭУ [40, 98]. Под уровнем проникновения ВЭУ (или степенью проникновения) обычно понимают отношение установленной мощности ВЭУ к мощности гибридного ЭТК, либо долю энергии, сгенерированной ВЭУ, в общем энергобалансе ЭТК.

ВЭУ, в отличие от ДГУ, не является гарантированным источником энергии ввиду стохастического характера ветрового ресурса. Мощность ДГУ может изменяться в широком диапазоне исходя из потребностей нагрузки. Мощность ВЭУ определяется текущими метеорологическими условиями и не может быть увеличена по необходимости.

Как правило, в гибридных ЭТК, используемых для автономного электроснабжения, функцию формирования сети выполняют ДГУ. Современные преобразователи частоты для ВЭУ могут работать в grid-forming режиме и задавать параметры сети (напряжение и частоту), однако для этого требуется более дорогостоящее оборудование и сложные алгоритмы управления [120].

По этой причине увеличение установленной мощности ВЭУ не приводит к пропорциональному уменьшению расхода топлива, так как замещение генерации ДГУ определяется совпадением графиков нагрузки и генерации ВЭУ. В периоды высокой выработки ВЭУ и низкой нагрузки часть потенциальной ветровой энергии может оказаться невостребованной. В этом случае выполняется ограничение мощности ВЭУ, например, за счет изменения угла атаки лопастей или ориентации ротора относительно направления ветра.

Многие исследования посвящены увеличению доли ветровой генерации и снижению расхода топлива [84], однако вопросы определения рациональной установленной мощности ВЭУ в системах автономного электроснабжения остаются недостаточно проработанными. Чрезмерное увеличение доли ВЭУ может приводить к ухудшению качества электроэнергии, возникновению проблем с регулированием частоты и напряжения, а также снижению надежности ЭТК [111, 125]. Уровень проникновения ВЭУ порядка 20–30% от доли генерации рассматривается как допустимый без значительного ухудшения устойчивости гибридного ЭТК и усложнения системы управления. Дальнейшее увеличение доли ветровой генерации требует дополнительных мероприятий по обеспечению надежности электроснабжения, включая увеличение вращающегося резерва ДГУ, применение СНЭ и совершенствование алгоритмов управления гибридным ЭТК [14, 55].

Может, гибридный ЭТК также классифицируют по уровню проникновения ветровой энергии: низкому, среднему и высокому. Их характеристика приведена в таблице 1.3 [150].

Таблица 1.3 – Характеристика степени проникновения ВЭУ (составлено автором)

Степень проникновения	Низкий уровень	Средний уровень	Высокий уровень
Доля ВЭУ по установленной мощности	Менее 50%	50–100%	100–400%
Доля ВЭУ в энергобалансе	Менее 20%	20–50%	50–150%
Режим работы ДГУ	ДГУ работают постоянно	ДГУ работают постоянно, часть ДГУ может отключаться	Возможна остановка всех ДГУ
Использование энергии ВЭУ	Уменьшение расхода топлива	Покрытие части нагрузки, возможен избыток энергии	Полное покрытие нагрузки в периоды высокой скорости ветра
Требования к резервированию	Резерв обеспечивается работающими ДГУ	Требуется вращающийся резерв ДГУ	Требуется СНЭ, быстродействующий резерв, grid-forming источник
Требования к управлению и оборудованию	Специальная система управления обычно не требуется	Автоматическое управление, балластное сопротивление, контроль частоты и напряжения	Интеллектуальная система управления, СНЭ, балластное сопротивление, регулирование частоты и напряжения

Таким образом увеличение степени проникновения ВЭУ сопровождается не только снижением расхода топлива и износа ДГУ, но и усложнением системы управления и состава гибридного ЭТК. По мере увеличения установленной мощности ВЭУ возрастают требования к резервированию мощности, быстродействию системы управления, а также к качеству регулирования частоты и напряжения. Следовательно, выбор установленной мощности ВЭУ должен осуществляться совместно с выбором состава ДГУ, параметров СНЭ и стратегии управления гибридным ЭТК.

В связи с тем, что генерация ВЭУ пропорциональна скорости ветра в кубе [87], постоянные колебания скорости ветра приводят к скачкам выходной мощности. По этой причине важной задачей является выбор параметров генерирующего оборудования гибридного ЭТК на стадии проектирования.

Поскольку даже при схожих метеорологических параметрах (средняя скорость ветра, преобладающее направление ветра) характер повторяемости и изменчивости скорости ветра может отличаться, нет одной универсальной конфигурации состава и параметров для нескольких географических точек.

1.3.2 ДГУ в составе гибридного ЭТК

С учетом непостоянства и непредсказуемости генерации ВЭУ для гарантированного электроснабжения потребителей необходим источник, способный подстраиваться под изменяющуюся нагрузку и ветровую мощность, а также формировать напряжение и частоту сети. В большинстве гибридных ЭТК, применяемых для автономного электроснабжения, такую функцию выполняют ДГУ, которые компенсируют дефицит ветровой генерации и обеспечивают резерв мощности [62, 93].

Несмотря на то, что ДГУ являются простыми в управлении, у них есть ряд эксплуатационных ограничений, в основном связанных с допустимым уровнем загрузки. Мощность ДГУ указывается в двух вариантах с обозначениями ESP – Emergency Standby Power и PRP – Prime Rated Power (рисунок 1.8). Исходя из режима работы ДГУ мощность агрегатов и допустимое количество часов работы в год будет отличаться. ESP характеризует мощность резервных ДГУ, работающих в аварийных режимах. Их годовая наработка ограничивается 500 часами в год, а перегрузка недопустима. PRP используется для ДГУ, используемых как основной источник, их годовая наработка не ограничена. Допустима 10% перегрузка на 1 час каждые 12 часов работы, но средняя мощность за 24 часа не должна превышать 70% PRP.

Одним из основных является ограничение по минимальной загрузке. При длительной работе ДГУ на низкую загрузку, которая по разным оценкам составляет 20–40% [93, 150], ухудшается процесс сгорания топлива, увеличивается удельный расход, возрастает образование нагара на цилиндрах и поршнях, что приводит к ускоренному износу установки.

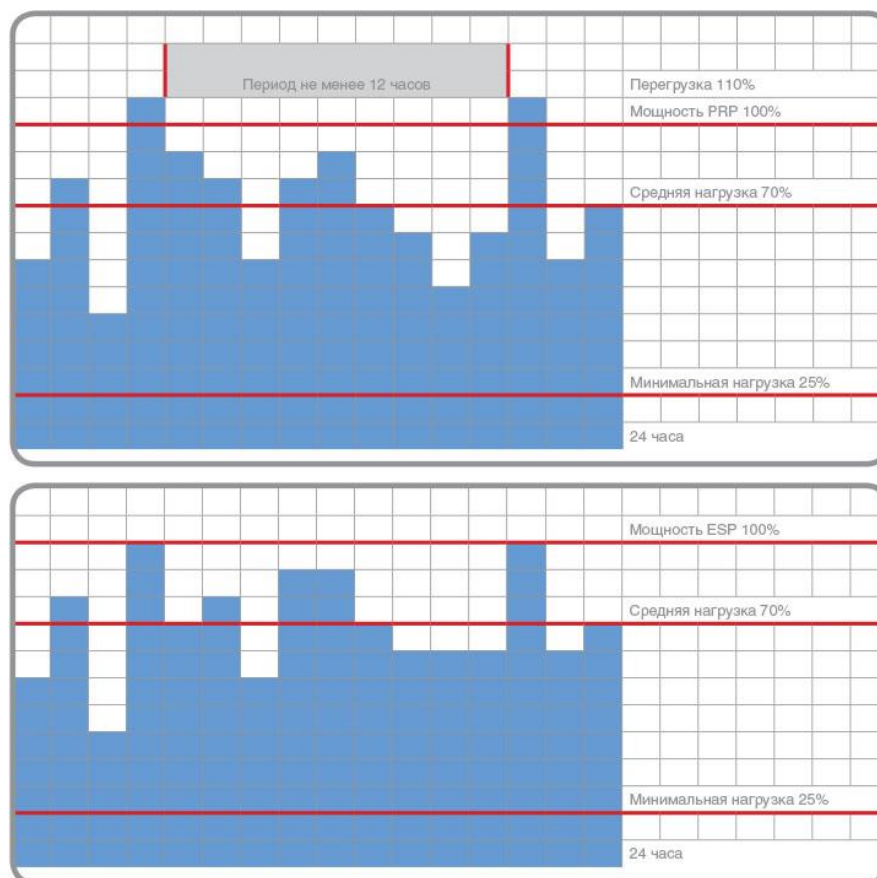


Рисунок 1.8 – Режимы номинальной мощности ДГУ [32]

В научных работах при профиците генерации ВЭУ авторы говорят о том, что ДГУ либо отключены, либо работают на холостом ходу, однако длительная работа ДГУ на холостом ходу аналогична работе на низкую загрузку и не рекомендуется. ДГУ, работающую с некоторой периодичностью на низкую загрузку или холостом ходу, требуется «прожигать». Прожигом называется режим, при котором установка выводится на более высокий уровень мощности (30–70%) для восстановления нормального температурного режима и снижения отложений несгоревших продуктов топлива.

В условиях высокой выработки ВЭУ и низкой нагрузки возможны два основных режима работы ДГУ: работа на минимально допустимой нагрузке либо полный останов установок. Первый вариант повышает готовность комплекса к внезапному снижению ветровой генерации, но приводит к дополнительному расходу топлива.

Чтобы отреагировать на внезапное снижение мощности ветра, важно поддерживать работу ДГУ на уровне более 30% от их номинальной мощности при

определённом уровне проникновения энергии ветра [81, 86]. При полном отключении ДГУ ее готовность к пуску может снижаться из-за охлаждения двигателя, вспомогательных систем и топлива. Поэтому при проектировании гибридных ЭТК необходимо учитывать не только установленную мощность ДГУ, но и время пуска, условия эксплуатации, наличие системы предпускового подогрева и возможность автоматического ввода агрегата в работу.

Второй вариант позволяет снизить расход топлива, однако увеличивает требования к быстродействию системы управления и к резервированию, поскольку при резком падении мощности ВЭУ или росте нагрузки требуется источник, способный поддерживать напряжение и частоту, а также обеспечивать быстрый запуск остановленных агрегатов [114].

Недостаток резервной мощности возникает, когда в системе не хватает генераторов, способных быстро увеличить выработку. В результате часть нагрузки остаётся не покрытой и происходит недоотпуск электроэнергии [124, 160]. Отдельной задачей является обеспечение требуемой мощности при аварийном отключении одной из ДГУ. Такой отказ сопровождается нарушением баланса мощности. Решением указанной задачи является работа ДГУ с нагруженным (вращающимся) резервом, когда дополнительно используется еще одна установка, что соответствует критерию $N-1$ и позволяет системе выдержать отказ одной установки [55], но приводит к повышенному расходу топлива и большей наработке установок.

1.3.3 СНЭ в составе гибридного ЭТК

СНЭ, как правило, входит в состав автономного гибридного ЭТК и позволяет обеспечивать потребителя в часы дефицита энергии [87, 122], сглаживать колебания мощности ВЭУ и формировать параметры сети [16, 104]. Основным недостатком применения накопителей является их высокая стоимость при относительно небольшой длительности жизненного цикла. При этом нет однозначного мнения о необходимости внедрения СНЭ и об оптимальной стратегии управления зарядом. Выбор и обоснование СНЭ должен выполняться с

учетом конфигурации гибридного ЭТК, требуемой мощности, энергоемкости, стоимости, режима эксплуатации и ограничений системы управления [65, 66].

Во многих работах, посвященных гибридным ЭТК, СНЭ рассматривается преимущественно как источник замещения дизельной генерации, при этом разряд накопителя осуществляется вплоть до минимально допустимого уровня заряда [8]. Такой подход позволяет снизить расход топлива и долю выработки ДГУ, однако в реальных условиях эксплуатации глубокий разряд СНЭ не всегда является рациональным. Постоянное использование СНЭ в режиме глубокого разряда приводит к ускорению деградации аккумуляторных батарей, сокращению доступного резерва мощности для обеспечения нагрузки в аварийных режимах, а также повышает вероятность пуска дополнительных ДГУ при кратковременном ухудшении ветровых условий или росте нагрузки.

Характеристики основных электрохимических аккумуляторов, применяемых в гибридных ЭТК приведены в таблице 1.4. Представленные типы накопителей различаются по КПД, ресурсу и стоимости. Наибольшим ресурсом обладают ванадиевые проточные (VRFB) и литий-титанатные (LTO) аккумуляторы, литий-ионные аккумуляторы типов LFP и NMC отличаются высоким КПД и высокой удельной энергоёмкостью. Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют более низкую стоимость, однако уступают современным технологиям по ресурсу и допустимой глубине разряда.

Анализ российского и зарубежного опыта показывает, что наиболее распространенной технологией СНЭ в современных гибридных ЭТК с ВИЭ являются литий-ионные аккумуляторные батареи, что обусловлено сочетанием высокого КПД, быстродействия и возможности модульного наращивания мощности и энергоемкости [16, 70]. В обзорных научных работах отмечается превосходство LiFePO_4 накопителей, которое заключается в большем ресурсе циклов заряда/разряда, устойчивости к высоким токам заряда/разряда [48, 70] и меньшей требуемой установленной емкости за счет чего достаются меньшие затраты на СНЭ [52, 136].

Таблица 1.4 – Характеристики электрохимических аккумуляторов (составлено автором)

Тип АКБ	КПД, %	Ресурс циклов	Стоимость, \$/кВт·ч	Преимущества	Недостатки
Свинцово-кислотные открытого типа [38]	70–85	300–1200	150–400	Низкая стоимость, доступность, простота конструкции	Малый ресурс при глубоких разрядах, большая масса, необходимость обслуживания, чувствительность к глубине разряда
Свинцово-кислотные VRLA AGM [53]	75–88	500–1500	200–500	Отсутствие необходимости долива электролита, сниженное газовыделение, простота эксплуатации	Ограниченный ресурс, чувствительность к температуре, чувствительность к глубокому разряду, ограниченная допустимая глубина разряда
Свинцово-кислотные VRLA GEL [52]	75–88	700–1800	250–600	Устойчивость к глубоким разрядам, отсутствие необходимости обслуживания, низкое газовыделение	Ограниченные токи заряда, чувствительность к перегреву, повышенные требования к режиму заряда, снижение ресурса при частых циклах заряда-разряда.
Свинцово-углеродные Lead-carbon [56]	80–90	2000–5000	200–600	Устойчивость к работе в режиме частичного заряда, повышенный ресурс, сниженный износ пластин,	Большая масса, невысокая удельная энергоемкость, ограниченная распространенность, необходимость контроля режима заряда
Никель-кадмиевые Ni-Cd [73]	65–80	2000–3500	400–2400	Устойчивость к низким температурам, высокая надежность, переносимость глубокого разряда, широкий диапазон рабочих условий	Токсичность кадмия, экологические ограничения, эффект памяти, высокая стоимость, необходимость специальной утилизации
Натрий-серные NaS [45]	75–85	2500–4500	300–800	Высокая энергоемкость, пригодность для длительных разрядов, возможность применения в крупных стационарных системах, высокий ресурс	Высокая рабочая температура, требования к безопасности, необходимость теплоизоляции, тепловые потери, сложность эксплуатации

Продолжение таблицы 1.4

Тип АКБ	КПД, %	Ресурс циклов	Стоимость, \$/кВт·ч	Преимущества	Недостатки
Ванадиевые проточные VRFB [75]	70–85	10 000–20 000	300–1000	Большой ресурс, возможность глубокого разряда, низкая деградация электролита, независимое масштабирование мощности и емкости	Низкая удельная энергоемкость, наличие насосов и баков, сложность гидравлической системы, высокие габариты
Цинк-бромные проточные Zn-Br [156]	65–80	2000–10 000	150–700	Возможность глубокого разряда, пригодность для длительного хранения энергии, использование сравнительно доступных материалов, негорючий электролит	Низкий или умеренный КПД, наличие насосов и электролита, эксплуатационная сложность, необходимость контроля состояния электролита
Натрий-ионные Sodium-ion [48]	80–90	2000–6000	100–400	Доступность сырья, высокая безопасность, потенциально низкая стоимость, работоспособность при низких температурах	Низкая удельная энергоемкость, ограниченная коммерческая зрелость, ограниченная статистика длительной эксплуатации
Литий-ионные LFP [76]	90–96	2000–10 000	150–500	Высокая безопасность, высокий КПД, большой ресурс, хорошая цикличность, модульность, высокая термическая стабильность	Необходимость блока управления, необходимость термоконтроля, чувствительность к нарушению режимов заряда и разряда, снижение характеристик при низких температурах
Литий-ионные NMC [129]	90–95	1000–4000	150–600	Высокая удельная энергоемкость, высокая мощность, широкая распространенность, компактность	Повышенные требования к безопасности, необходимость блока управления, необходимость термоконтроля, риск теплового разгона при аварийных режимах
Литий-ионные LTO [106]	90–96	10 000–20 000	500–1200	Большой ресурс, высокая мощность, быстрый заряд, высокая безопасность, работоспособность при низких температурах	Высокая стоимость, низкая удельная энергоемкость, повышенные массогабаритные показатели, ограниченная распространенность

1.4 Оптимизация параметров гибридного ЭТК

Одной из основных проблем применения гибридных ЭТК для автономного электроснабжения является сложность их проектирования и технической реализации. Параметрическая оптимизация гибридного ЭТК направлена на определение параметров ВЭУ, ДГУ и СНЭ, удовлетворяющих заданным целевым функциям или пороговым значениям. Среди целевых функций основными являются минимизация экономических затрат, повышение доли ВИЭ и ресурса ДГУ, снижение расхода топлива и выбросов CO_2 .

На основе литературного анализа выделены методы оптимизации, характеристика которых представлена в таблице 1.5. Существующие методы выбора и оптимизации параметров гибридных ЭТК отличаются по степени детализации расчетной модели, требованиям к исходным данным и вычислительной сложности. Несмотря на различия между методами, общей проблемой параметрической оптимизации является неопределенность исходных параметров и сложность учета реальной логики работы оборудования гибридного ЭТК.

Аналитические методы не позволяют произвести оптимизацию и дают примерную оценку эффективности или балансовой надежности. Существующие программные комплексы сильно ограничивают возможности реализации собственной логики работы гибридного ЭТК. Для комплексной оптимизации параметров гибридного ЭТК наибольшей эффективностью обладают комбинированные методы, основанные на численном и имитационном моделировании с применением методов поиска оптимальных решений. Имитационное моделирование позволяет учесть логику работы и изменений состояний оборудования гибридного ЭТК в хронологическом порядке. Оценить степень влияния различных параметров на показатели гибридного ЭТК можно с помощью анализа чувствительности.

Таблица 1.5 – Методы оптимизации параметров гибридных ЭТК (составлено автором)

Группа методов	Описание метода	Преимущества	Недостатки	Область применения
Аналитические методы [44, 54, 80, 83, 153]	Основаны на упрощенных расчетных зависимостях и статистической обработке исходных данных.	1. Простота реализации. 2. Малые требования к вычислительным ресурсам. 3. Применение при ограниченных исходных данных.	1. Не учитывают режимы работы оборудования. 2. Дают приблизительную оценку.	Предварительная оценка ветропотенциала, выбор площадки размещения ВЭУ, первичная оценка целесообразности внедрения ВЭУ, оценка ожидаемого недоотпуска электроэнергии
Численные и имитационные методы [47, 119]	Основаны на моделировании состояний оборудования и поитерационного расчета баланса энергии/мощности.	1. Могут учитывать стохастический характер нагрузки и скорости ветра. 2. Учитывают хронологию изменения состояний нагрузки и генерации. 3. Позволяют рассчитывать большое количество показателей.	1. Требуют большого числа расчетов. 2. Результат зависит от выбранных параметров, допущений и исходных данных. 3. Точность расчетов ограничивается достоверностью модели.	Оценка режимов работы гибридного ЭТК и логики работы оборудования. Настройка и отладка алгоритмов управления оборудованием гибридного ЭТК
Программные комплексы [58, 89, 145, 149, 162]	Используются готовые расчетно-оптимизационные среды, в которых задаются исходные данные, (HOMER, iHOGA, RETScreen, Hybrid2, TRNSYS, INSEL).	1. Наличие готовых моделей оборудования. 2. Быстрый расчет большого числа вариантов. 3. Удобство предварительного технико-экономического анализа.	1. Закрытость или ограниченная прозрачность расчетных алгоритмов. 2. Отсутствует возможность изменять или дополнять логику расчетов.	Технико-экономическое сравнение конфигураций гибридного ЭТК.

Продолжение таблицы 1.5

Группа методов	Описание метода	Преимущества	Недостатки	Область применения
Эвристические методы [34, 71, 89, 131, 152]	Основаны на направленном поиске рационального решения в большом пространстве параметров без полного перебора всех возможных вариантов (генетические алгоритмы, метод роя частиц, муравьиный алгоритм, Big Bang–Big Crunch, Social Spider Optimizer, Grey Wolf Optimizer и другие).	1. Эффективны при большом числе переменных и параметров. 2. Подходят для нелинейных, дискретных и многокритериальных задач.	1. Не гарантируют нахождение глобального оптимума. 2. Результаты зависят от настроек алгоритма, размера популяции, числа итераций и начальных условий.	Оптимизация сложных гибридных ЭТК с большим числом параметров и ограничений, когда полный перебор вариантов невозможен или вычислительно нецелесообразен.
Комбинированные методы [82, 103, 113]	Сочетают несколько подходов в одной методике.	1. Позволяют объединить преимущества разных подходов. 2. Наиболее полно учитывают параметры и режимы работы оборудования гибридного ЭТК.	1. Наиболее сложны в реализации. 2. Требуют большого объема исходных данных и вычислительных ресурсов. 3. Результат может зависеть от последовательности применения методов и выбранных критериев.	Комплексная параметрическая оптимизация гибридного ЭТК.

Анализ чувствительности выходных показателей гибридного ЭТК к вариации входных параметров моделирования оборудования позволяет определить наиболее значимые параметры и режимы работы. Локальные методы оценивают чувствительность при изменении одного параметра в некотором диапазоне при фиксированных значениях других параметров, но не позволяют учитывать их взаимодействие. Глобальные методы рассматривают взаимное влияние вариации параметров, что важно в случае нелинейных моделей гибридных ЭТК [132].

Наиболее распространенными методами глобальной оценки чувствительности являются метод Морриса, корреляционные и регрессионные методы, дисперсионные методы Соболя и eFAST, производные методы DGSM, а также методы, основанные на сравнении распределений выходной величины, например, PAWN [78, 159].

1.5 Критерии оптимизации параметров гибридного ЭТК

Для оценки эффективности оптимизации параметров гибридного ЭТК применяются критерии, которые можно разделить на пять групп [42, 163]:

- экономические критерии, которые характеризуют затраты на создание, эксплуатацию, замену оборудования, а также себестоимость производства электроэнергии;
- технические критерии, отражающие эффективность режимов работы оборудования автономного гибридного ЭТК, расход топлива, долю ВИЭ и т.д.;
- критерии надежности, характеризующие способность автономного гибридного ЭТК обеспечивать потребителей электроэнергией;
- экологические критерии, отражающие степень влияния автономного гибридного ЭТК на окружающую среду;
- социальные критерии, характеризующие влияние автономного комплекса на развитие ИТТ, создание рабочих мест и повышение качества жизни потребителей.

Оптимизация параметров гибридного ЭТК может быть однокритериальной или многокритериальной. При однокритериальной оптимизации выбирается один критерий, например, минимум LCOE, а остальные могут использоваться в виде

ограничений. При этом незначительное улучшение выбранного критерия может сопровождаться существенно большим ухудшением других показателей.

При многокритериальной оптимизации одновременно рассматриваются несколько критериев. В этом случае результатом является набор компромиссных вариантов, из которых выбирается наиболее рациональная конфигурация гибридного ЭТК.

В таблице 1.6 приведены используемые в современных исследованиях показатели гибридных ЭТК, по которым проводится выбор и оптимизация параметров и режимов работы оборудования. Анализ вышеуказанных показателей показывает, что эффективность от внедрения гибридного ЭТК не может быть оценена на основе одного критерия. Ряд приведённых показателей имеет схожий физический смысл, поэтому их одновременное применение нецелесообразно.

По итогу литературного анализа определён минимальный набор показателей, позволяющий провести оптимизацию параметров гибридного ЭТК. Нормированная стоимость электроэнергии (LCOE) не только учитывает капитальные и эксплуатационные затраты, но и объем отпущенной потребителю энергии, при этом показатель является более наглядным относительно других экономических показателей, так как характеризует затраты вне зависимости от размеров разрабатываемого гибридного ЭТК.

Вероятность потери электроснабжения (LPSP) является более удобным показателем для сопоставления различных комплексов, отличающихся суммарной нагрузкой, чем абсолютная величина недоотпуска электроэнергии (ENS), поскольку учитывает соотношение дефицита электроэнергии и общей потребности нагрузки. Также необходимо определять время, в течение которого наблюдался недоотпуск, которое лучше всего характеризуется относительной величиной – вероятностью потери нагрузки (LOLP).

Таблица 1.6 – Основные показатели гибридных ЭТК (составлено автором)

Группа	Обозначение	Название	Физический смысл
Экономические показатели	NPC [60, 136]	Net Present Cost Чистая приведенная стоимость затрат	Суммарные дисконтированные затраты за срок службы гибридного ЭТК
	NPV [139]	Net Present Value Чистая приведенная стоимость	Дисконтированная разница между доходами/экономическим эффектом и затратами за срок службы проекта
	TC [42]	Total Cost Общая стоимость	Совокупные затраты на создание и эксплуатацию гибридного ЭТК за расчетный период
	LCC [122]	Life Cycle Cost Стоимость жизненного цикла	Суммарные затраты на приобретение, монтаж, эксплуатацию, обслуживание, замену и утилизацию оборудования за срок службы
	LCOE / COE / LCE [118, 130]	Levelized Cost of Energy Приведенная стоимость электроэнергии	Средняя стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной или отпущенной потребителю за жизненный цикл системы
	LCOS [65]	Levelized Cost of Storage Приведенная стоимость хранения энергии	Средняя стоимость 1 кВт·ч энергии, прошедшей через накопитель с учетом затрат на СНЭ
	LCOST [36]	Levelized Cost of Storage Technology Приведенная стоимость технологии хранения	Удельные затраты на использование конкретной технологии СНЭ
	TAC [42]	Total Annual Cost Общая годовая стоимость	Годовые приведенные затраты, включающие капитальные, эксплуатационные, ремонтные затраты и затраты на замену оборудования
	CAPEX [130]	Capital Expenditures Капитальные затраты	Затраты на приобретение, доставку, монтаж и ввод в эксплуатацию оборудования
	OPEX [130]	Operating Expenditures Эксплуатационные затраты	Затраты на обслуживание, ремонт, персонал, эксплуатацию, расходные материалы и текущие работы
	C _{fuel} [49]	Fuel Cost Затраты на топливо	Годовые или дисконтированные затраты на дизельное топливо
	Technology cost [139]	Technology Cost Стоимость технологии	Стоимость выбранной технологической конфигурации гибридного ЭТК

Продолжение таблицы 1.6

Группа	Обозначение	Название	Физический смысл
Экономические показатели	PP / PBP [130]	Payback Period Срок окупаемости	Время, за которое экономический эффект покрывает первоначальные инвестиции
	ROI [41]	Return on Investment Рентабельность инвестиций	Отношение полученного экономического эффекта к вложенным средствам
	IRR [130]	Internal Rate of Return Внутренняя норма доходности	Ставка дисконтирования, при которой чистая приведенная стоимость проекта равна нулю
Показатели надежности	LOLP [99]	Loss of Load Probability Вероятность потери нагрузки	Вероятность того, что доступная мощность генерации и СНЭ меньше мощности нагрузки
	LOLE [58]	Loss of Load Expectation Ожидаемая продолжительность потери нагрузки	Ожидаемое число часов или суток за расчетный период, когда нагрузка не обеспечивается
	LPSP [60, 163]	Loss of Power Supply Probability Вероятность потери электроснабжения	Доля времени или энергии, когда потребность нагрузки не покрывается генерирующим оборудованием и СНЭ
	LLP [42]	Loss of Load Probability Вероятность потери нагрузки	Отношение дефицита энергии к суммарной требуемой энергии нагрузки за расчетный период
	LOLD [99]	Loss of Load Duration Продолжительность потери нагрузки	Суммарная продолжительность интервалов, в течение которых нагрузка не обеспечивается
	UL [42]	Unmet Load Необслуженная нагрузка	Разница между требуемой нагрузкой и суммарной доступной мощностью генерации и СНЭ
	TED [42]	Total Energy Deficit Общий дефицит энергии	Отношение или величина неотпущенной потребителю энергии за расчетный период
	ENS [99]	Energy Not Supplied Недоотпуск энергии	Фактическая энергия, не отпущенная потребителям за расчетный период
	EENS [99]	Expected Energy Not Supplied Ожидаемый недоотпуск энергии	Математическое ожидание недоотпуска энергии за расчетный период
	AENS [37]	Average Energy Not Supplied Средний недоотпуск энергии	Средний недоотпуск энергии на одного потребителя или на одну точку нагрузки
	RI [139]	Reliability Index Индекс надежности	Интегральный показатель способности автономного гибридного ЭТК обеспечивать нагрузку с учетом выбранных критериев надежности

Продолжение таблицы 1.6

Группа	Обозначение	Название	Физический смысл
Показатели надежности	SAIDI [37]	System Average Interruption Duration Index Средняя продолжительность отключений	Средняя длительность отключений электроснабжения на одного потребителя за год
	SAIFI [37]	System Average Interruption Frequency Index Средняя частота отключений	Среднее число отключений на одного потребителя за год
	CAIDI [37]	Customer Average Interruption Duration Index Средняя длительность одного отключения	Среднее время восстановления электроснабжения после одного отключения
	ASAI [127]	Average Service Availability Index Коэффициент доступности электроснабжения	Доля времени, в течение которого потребитель обеспечен электроэнергией
	ASUI [127]	Average Service Unavailability Index Коэффициент недоступности электроснабжения	Доля времени, в течение которого электроснабжение отсутствует
Технические показатели	RF [42]	Renewable Fraction Доля ВИЭ	Доля энергии, произведенной ВИЭ, в общем энергобалансе комплекса
	REP / RE penetration [55]	Renewable Energy Penetration Проникновение ВИЭ	Отношение энергии или мощности ВИЭ к суммарной нагрузке или общей генерации комплекса
	Fuel consumption [150]	Расход топлива	Количество дизельного топлива, потребленного ДГУ за расчетный период
	WRE [122]	Wasted Renewable Energy Потерянная возобновляемая энергия	Энергия, произведенная ВИЭ, которая не может быть использована или сохранена в СНЭ
	Curtailment [63]	Ограничение генерации ВИЭ	Часть потенциальной выработки ВИЭ, которая была принудительно снижена из-за ограничений нагрузки, СНЭ или режима сети
	η_{sys} [166]	System efficiency КПД системы	Отношение полезно отпущенной энергии к суммарной произведенной или затраченной энергии

Продолжение таблицы 1.6

Группа	Обозначение	Название	Физический смысл
Экологические показатели	CO ₂ [122]	Выбросы CO ₂	Масса выбросов углекислого газа от ДГУ
	GHG [46]	Greenhouse Gas Emissions Выбросы парниковых газов	Совокупные выбросы CO ₂ , CH ₄ , NO _x и других загрязняющих веществ
	E [42]	Emission Общее количество выбросов	Общее количество загрязняющих выбросов, производимых автономным гибридным ЭТК за расчетный период
	CO ₂ reduction [142]	Снижение выбросов CO ₂	Разница выбросов между базовой дизельной системой и гибридным ЭТК
	LCA [42]	Life Cycle Assessment Оценка жизненного цикла	Оценка экологического воздействия комплекса на всех стадиях жизненного цикла
	Environmental impact [139]	Экологическое воздействие	Интегральная оценка воздействия выбранной конфигурации автономного гибридного ЭТК на окружающую среду
Социальные показатели	HDI [139]	Human Development Index Индекс человеческого развития	Показатель социального развития территории, связанный с уровнем жизни, продолжительностью жизни, образованием и доходами
	JC [139]	Job Creation Создание рабочих мест	Количество рабочих мест, создаваемых при производстве, доставке, строительстве и эксплуатации автономного гибридного ЭТК
	Societal impact [139]	Социальное воздействие	Влияние выбранной конфигурации автономного гибридного ЭТК на общество, качество жизни, развитие территории и доступность энергии
	Local wealth creation [139]	Создание локального экономического эффекта	Влияние гибридного ЭТК на развитие местной экономики, занятость и локальные производственные или сервисные цепочки
	Outage cost [115]	Ущерб от отключений	Экономический ущерб потребителей от недоотпуска электроэнергии

Среди технических показателей наиболее важным, характеризующим энергоэффективность, является расход топлива, который учитывается при расчете LCOE. Снижение расхода топлива не только влияет на LCOE, но и приводит к снижению количества выбросов, таким образом, применение отдельного экологического показателя не требуется. Социальный критерий отдельно не рассматривается, поскольку развитие гибридных ЭТК, обеспечивающее снижение нормированной стоимости электроэнергии и повышение ее доступности, оказывает очевидное положительное влияние на условия жизни населения.

1.6 Оценка показателей надежности гибридного ЭТК

Надежность автономного электроснабжения определяется возможностью гибридного ЭТК обеспечивать потребителей в условиях стохастического изменения генерации ВЭУ, а также возникновения вероятностных отказов оборудования. Как правило, при оптимизации параметров гибридных ЭТК используют экономические критерии, а показатели надежности учитываются через упрощенные ограничения [88]. Надежность гибридных ЭТК оценивают с помощью разных подходов и методов:

- аналитические методы, как правило, оценивают способность ВЭУ обеспечивать потребителей с учётом изменяемой нагрузки и генерации [105, 157];
- Марковские модели позволяют учитывать отказы и восстановления оборудования [69], но при увеличении числа элементов и состояний их размерность быстро возрастает.
- дерево отказов используется для анализа логики возникновения аварийных ситуаций и недоотпуска энергии. Метод дает статическое представление комбинаций отказов и действий, приводящих к критическому событию [94, 121], но не позволяет учитывать изменчивость скорости ветра и состояний оборудования;
- имитационное моделирование является наиболее универсальным подходом, поскольку оно позволяет учитывать временную изменчивость ВЭУ, нагрузки и технического состояния оборудования [116, 161]. Точность расчетов

зависит от детализации разработанной имитационной модели, которая позволяет дополнительно учитывать необходимые для исследования аспекты.

При реализации имитационного моделирования основным является метод Монте-Карло [59, 105, 138], который заключается в многократном моделировании с использованием псевдослучайных чисел с последующей статистической обработкой полученных результатов. Перечень основных показателей надежности оборудования, применяемых при моделировании отказов, приведен в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Показатели надежности оборудования гибридного ЭТК (составлено автором)

Обозначение	Название показателя	Физический смысл
λ [158]	Failure rate Интенсивность отказов	Среднее число отказов элемента в единицу времени
μ [158]	Repair rate Интенсивность восстановления	Среднее число восстановлений элемента в единицу времени после отказа
p [158]	Вероятность работоспособного состояния	Вероятность нахождения элемента или системы в работоспособном состоянии в рассматриваемый момент времени
q [158]	Вероятность отказового состояния	Вероятность нахождения элемента или системы в состоянии отказа в рассматриваемый момент времени
MTTF T_o [138]	Mean Time to Failure Средняя наработка до отказа	Среднее время работы элемента до первого отказа; применяется преимущественно для невосстанавливаемых элементов
MTTR T_v [138]	Mean Time to Repair Среднее время восстановления	Средняя продолжительность восстановления элемента после отказа
$P(t)$ [121]	Reliability function Вероятность безотказной работы	Вероятность того, что элемент или система сохранит работоспособность в течение заданного интервала времени t
$Q(t)$ [165]	Failure probability Вероятность отказа за время t	Вероятность того, что отказ элемента или системы произойдет в течение заданного интервала времени t
A K_r [50]	Availability Коэффициент готовности	Вероятность того, что элемент или система находятся в работоспособном состоянии в рассматриваемый момент времени
U $K_{нг}$ [101]	Unavailability Коэффициент неготовности	Вероятность того, что элемент или система находятся в неработоспособном состоянии в рассматриваемый момент времени
FOR [101]	Forced Outage Rate Коэффициент вынужденного простоя	Доля времени, в течение которого оборудование недоступно из-за вынужденного отказа

Продолжение таблицы 1.7

Обозначение	Название показателя	Физический смысл
EFOR [91]	Equivalent Forced Outage Rate Эквивалентный коэффициент вынужденного простоя	Показатель недоступности генерирующего оборудования с учетом полных и частичных вынужденных простоев

Для ВЭУ и СНЭ в работах приведено большое количество значений показателей надежности, которые хорошо согласуются между собой. Для ДГУ данные показателей надежности встречаются реже и характеризуются значительным разбросом. Так, в работе [43] приведены значения интенсивности отказов ДГУ на уровне 0,25 отказов/год при среднем времени восстановления 8 часов. В работе [134] указывается значение 0,5 отказов/год при времени восстановления 72 часа. В источнике [146] авторы дифференцируют интенсивность отказов ДГУ по видам: отказ запуска, отказ работы и отказы, связанные с проведением ТО. В работе [64] представлены данные об интенсивности отказов резервных ДГУ, составляющей 0,175 отказов/год. Согласно [107], аварийные ДГУ способны обеспечить электроснабжение при двухнедельном отключении сети только с вероятностью 80%. При этом авторы отдельно рассматривают вероятность отказа при попытке пуска, которая составляет около 1%. Для хорошо обслуживаемых ДГУ MTTF достигает 1662 часов при MTTR 37 часов. В работах [31, 90, 116] MTTF для ДГУ принят равным 950 часов, а MTTR – 50 часов. В большинстве источников FOR для ДГУ принимается равным 5%, для ВЭУ – 4%, для СНЭ – 3% [31, 67].

Разброс представленных в литературе значений показателей надежности оборудования объясняется различием методических подходов. В одних источниках интенсивность отказов нормируется по календарному времени эксплуатации, в других – по времени фактической работы под нагрузкой.

С целью формирования репрезентативной модели, пригодной для оценки балансовой надежности гибридного ЭТК, в настоящем исследовании определены диапазоны изменения показателей надежности оборудования, используемые в расчетных и имитационных исследованиях. Поскольку в работах используются различные показатели надежности оборудования их значения приведены к единым

показателям (интенсивность отказов – λ и восстановления – μ). Собранные на основе литературного анализа значения показателей надежности основных компонентов гибридного ЭТК указаны в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Показатели надежности основного оборудования гибридного ЭТК (составлено автором)

Компонент	Диапазон λ , год ⁻¹	Диапазон μ , год ⁻¹	Источники
Шина 0,4кВ	0,005–0,03	625,7–1251,4	[51, 64, 146]
Автоматический выключатель	0,01–0,292	584–5152,9	[51, 134, 146]
ДГУ	0,5–9,2	121,7–236,76	[31, 90, 107, 134]
ВЭУ	0,346–4,6	109,5–438	[31, 37, 59, 158]
AC/DC преобразователь	0,132–0,78	120,5–219	[37, 165]
DC/AC преобразователь	0,037–0,35	140,2–194,67	[37, 134]
DC/DC преобразователь	0,0657–0,876	140,2–175,2	[37, 134]
Аккумуляторная батарея	0,03–0,125	175,2–194,7	[31, 37, 59, 134]
Контроль заряда	0,01–0,29	168,5–876	[37, 165]

Как видно из таблицы 1.8, диапазоны изменения показателей надежности оборудования гибридного ЭТК являются достаточно широкими. Поскольку выбор конкретных значений показателей надежности оборудования непосредственно влияет на результаты оценки балансовой надежности и оптимизации параметров гибридного ЭТК, использование одного фиксированного набора значений может привести к ошибке проектирования комплекса. По этой причине необходимо проводить оценку влияния выбранных значений показателей надежности оборудования на выходные показатели гибридного ЭТК.

При этом в своих исследованиях авторы не учитывают категорию надежности электроснабжения потребителей и схемы распределительного устройства (РУ) [9]. В одних исследования приводится схема с одной шиной [105, 161], в других – комбинация шин постоянного и переменного тока [37, 100]. В некоторых работах авторы не указывают количество шин/схему РУ [59, 138]. Подобные схемы с присоединением потребителей к одной шине не соответствуют требованиям, предъявляемым к электроснабжению потребителей I и II категорий надежности электроснабжения, согласно ПУЭ п.1.2.10 и 1.2.20.

1.7 Выводы к главе 1

1. Основным источником генерации на ИТТ являются ДГУ, применение которых сопровождается рядом технических и экономических ограничений. Повышение энергоэффективности автономного электроснабжения возможно за счёт внедрения гибридных ЭТК.

2. Проведён анализ современного уровня развития ВИЭ, выявлены преимущества и недостатки использования ВИЭ для автономного электроснабжения объектов на ИТТ. Проанализирован мировой опыт применения гибридных ЭТК для автономного электроснабжения объектов на ИТТ.

3. Проанализированы основные подходы к выбору и оптимизации параметров генерирующего оборудования и показателей гибридных ЭТК, применяемых для автономного электроснабжения.

4. Обоснована необходимость оценки балансовой надёжности автономного электроснабжения, выполнен обзор существующих методов анализа и расчёта надёжности гибридных ЭТК. Анализ показал, что в своих исследованиях авторы не учитывают влияние схем РУ и категории надёжности электроснабжения при оценке показателей надёжности гибридных ЭТК.

5. Определены диапазоны значений показателей надёжности оборудования (интенсивностей отказов и восстановлений) гибридного ЭТК, используемые при имитационном моделировании работы комплекса с учетом вероятностных отказов оборудования.

ГЛАВА 2 ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Общая характеристика географического расположения объекта

Моделирование и последующий анализ результатов производится на примере с. Гыда Тазовского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Население села превышает 3 000 человек. В его инфраструктуру входят средняя общеобразовательная школа-интернат, детский сад, библиотека, лыжная база и медицинское учреждение.

Село имеет воздушное сообщение с районным центром и сезонное морское сообщение с Салехардом в период летней навигации (июль-сентябрь). Зимой осуществляется временное транспортное сообщение по зимникам с ближайшими населёнными пунктами для завоза товаров.

Согласно реестру объектов генерации, в ИТТ [23], в период с 2016 по 2018 годы наблюдался устойчивый рост удельного расхода условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии: с 375,27 до 393,85 г.у.т./кВт·ч, что эквивалентно среднегодовому приросту примерно на 2,5%. Одновременно с этим существенно возросли расходы на обслуживание и ремонт оборудования: если в 2016 году они составляли 1,08 млн. руб., то в 2017 – уже 2,35 млн. руб., а в 2018 году достигли 7,24 млн. руб., что подтверждает нарастание эксплуатационных проблем и затрат.

Усредненный показатель скорости ветра в течение года в с. Гыда составляет 6,1 м/с [3], среднемесячные скорости ветра за 20 лет (2001–2021 гг.) представлены на рисунке 2.1. Данные значения свидетельствуют о достаточном ветропотенциале для применения ВЭУ на указанной территории, что позволит снизить потребление дизельного топлива, доставка которого в ИТТ связана со значительными затратами, тем самым повысить энергоэффективность автономного электроснабжения поселения и снизить стоимость производства электроэнергии.

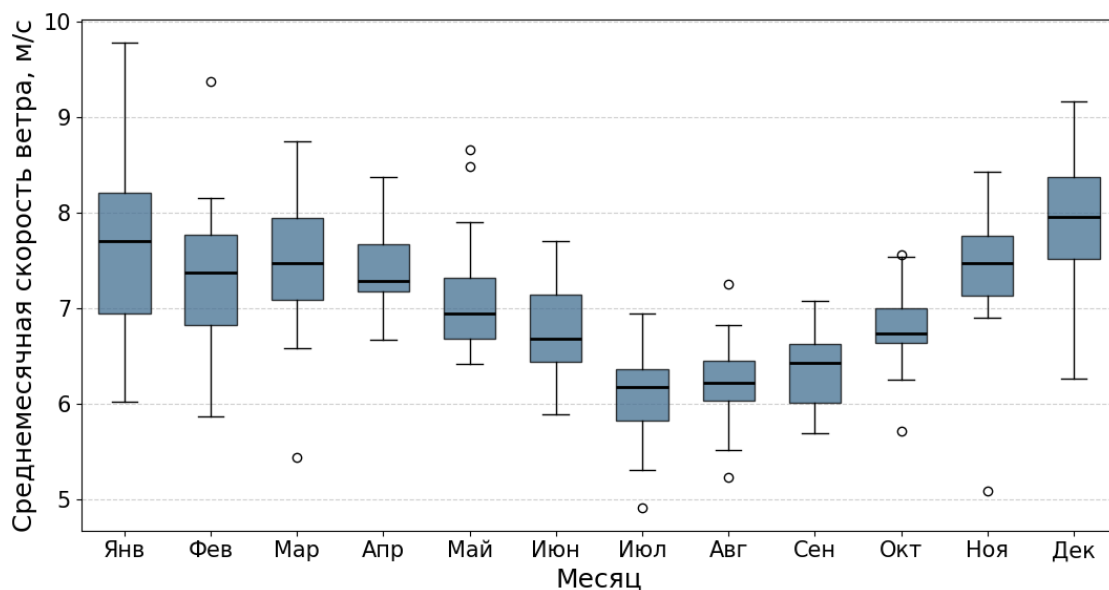


Рисунок 2.1 – График среднемесячных скоростей ветра с. Гыда за 20 лет
(составлено автором)

2.2 График электрической нагрузки поселения на ИТТ

На рисунке 2.2 представлен график электрической нагрузки, построенный на основе неполных измеренных данных загрузки ДГУ для 3-х суток каждого месяца с интервалом 2 часа с. Гыда за 2021 год.

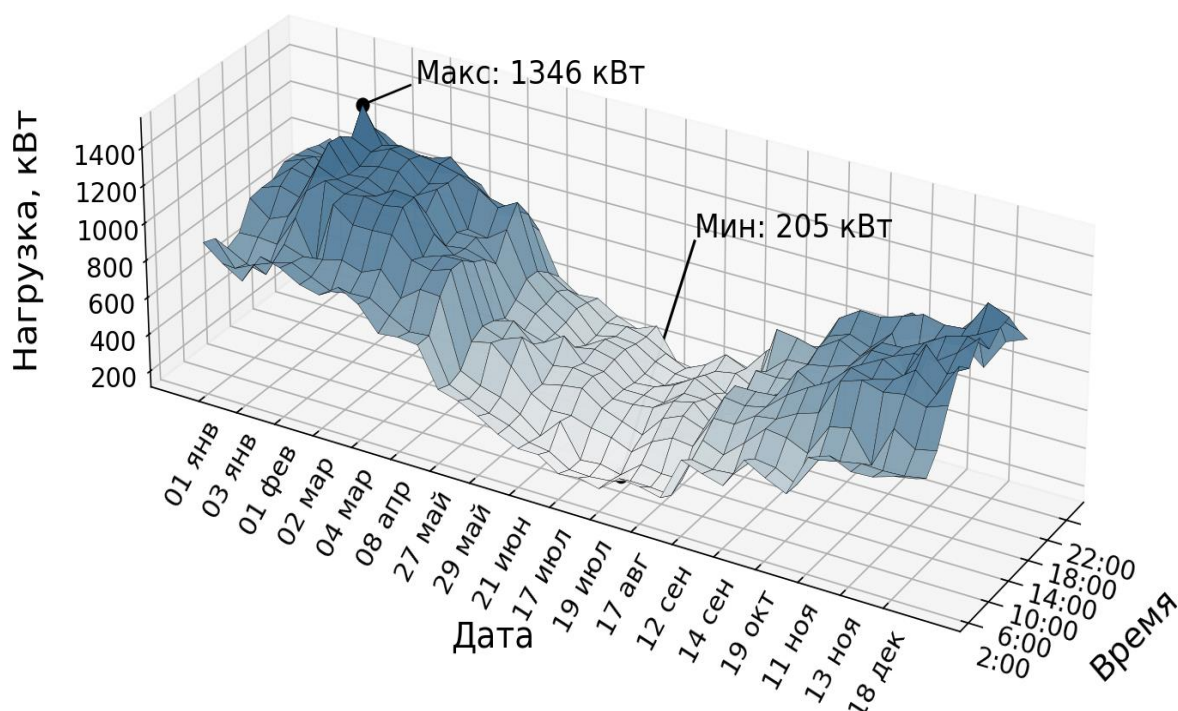


Рисунок 2.2 – График из записей журнала загрузки ДГУ с. Гыда
(составлено автором)

Максимальная нагрузка (1346 кВт) наблюдается 31 января в 20:00, минимальная (205 кВт) зафиксирована 19 июля в 6:00. Максимальная нагрузка принята за расчетную мощность.

Для формирования полного годового графика нагрузки была применена линейная интерполяция между усреднёнными значениями, полученными по трёхсуточным наборам данных [13]. Преобразование значений с двухчасовым интервалом в почасовые осуществляется по формуле (2.1):

$$P_i = \left(\frac{P_{\text{кон}} - P_{\text{нач}}}{2} \right) + P_{\text{нач}}, \quad (2.1)$$

где P_i – значение нагрузки в i час, кВт;

$P_{\text{кон}}$ – значение нагрузки в конце двухчасового интервала, кВт;

$P_{\text{нач}}$ – значения нагрузки в начале двухчасового интервала, кВт.

Значения между двумя известными трёхдневными интервалами рассчитываются по формуле (2.2):

$$P_i = \left(\frac{\overline{P_{\text{кон}}} - \overline{P_{\text{нач}}}}{N_{\text{кон}} - N_{\text{нач}}} \right) \cdot (N_i - N_{\text{нач}}) + \overline{P_{\text{нач}}}, \quad (2.2)$$

где P_i – значение нагрузки в i сутки, кВт;

$\overline{P_{\text{нач}}}$ и $\overline{P_{\text{кон}}}$ – средние значения нагрузки по трёхдневным интервалам, кВт;

$N_{\text{нач}}$, $N_{\text{кон}}$ и N_i – порядковые номера начального, конечного и текущего дней соответственно.

Для оценки адекватности интерполированного графика выполнено сравнение ключевых статистических показателей: минимальной, максимальной, среднеарифметической, медианной и среднеквадратической нагрузок, стандартного отклонения, а также коэффициентов формы, максимума и заполнения.

Линейная интерполяция сохраняет значения крайних точек и слабо влияет на усреднённые характеристики и коэффициенты формы графика, при этом несколько снижает дисперсию за счёт сглаживания флуктуаций. Это свидетельствует об адекватности использованного метода при построении годового профиля нагрузки.

На рисунке 2.3 приведены характерные суточные графики нагрузки для четырёх сезонов, иллюстрирующие диапазон сезонных колебаний.

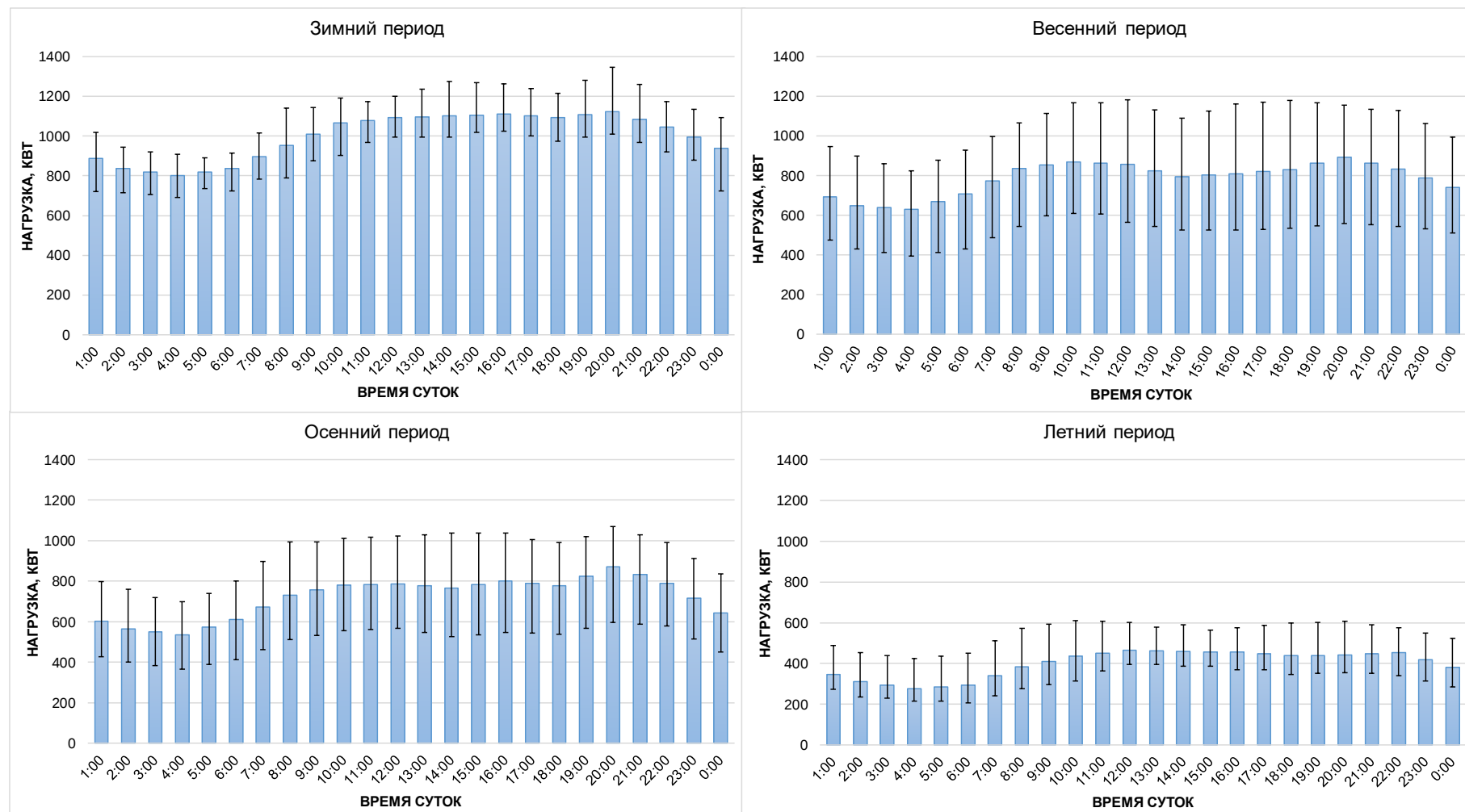


Рисунок 2.3 – Суточные графики нагрузки по сезонам (составлено автором)

Результаты анализа приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сравнение параметров графиков нагрузки (по данным автора)

Данные	$P_{\min}$, кВт	$P_{\max}$, кВт	$P_{\text{мед}}$, кВт	$P_{\text{ср}}$, кВт	$P_{\text{ср.кв}}$, кВт	σ , кВт	$K_{\text{ф}}$	$K_{\text{м}}$	$K_{\text{з.г}}$
Фактические (журнал загрузки)	205	1346	760	739	788,7	276	1,067	1,821	0,549
Интерполированные (расчетные)	205	1346	762,4	742,6	786,2	258,2	1,059	1,813	0,552

Полученный годовой график нагрузки далее используется как входной для всего периода моделирования продолжительностью 20 лет.

2.3 Схемы распределительного устройства гибридного ЭТК

Выбор схемы РУ определяет способность гибридного ЭТК к обеспечению резервирования, проведению ремонтных операций и локализации аварийных ситуаций. В работе рассмотрены три схемы РУ, представленные на рисунке 2.4.

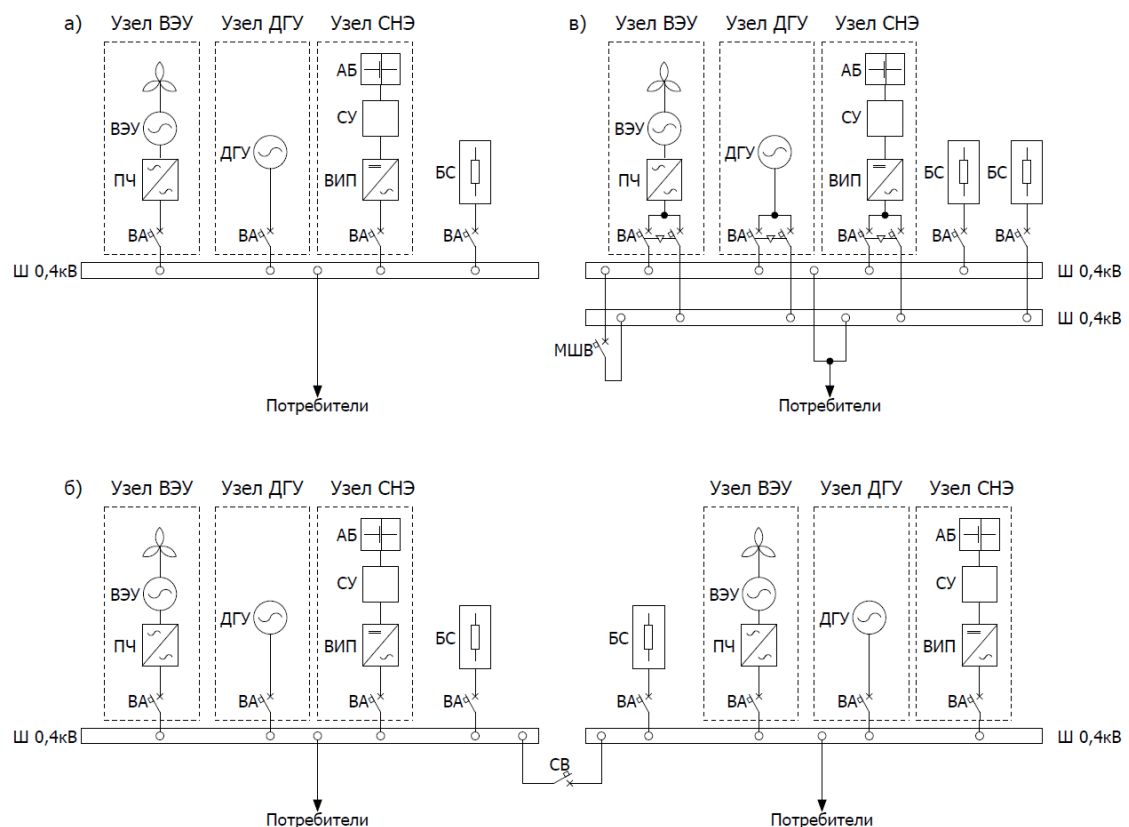


Рисунок 2.4 – Схемы РУ: а – одиночная несекционированная система шин;

б – одиночная секционированная система шин;

в – двойная система шин (составлено автором)

Генерация электроэнергии осуществляется за счет ДГУ, подключаемых к шинам (Ш) 0,4 кВ через автоматический выключатель (ВА), и ВЭУ, подключаемых

через преобразователь частоты (ПЧ) и ВА. СНЭ, реализованная на основе аккумуляторных батарей (АБ), подключается к шинам посредством ВА, выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП) и системы управления зарядом/разрядом (СУ). Соединение шин между собой осуществляется секционным (СВ) или межшинным (МШВ) выключателями. Для компенсации избыточной выработки электроэнергии, возникающей при профиците генерации ВЭУ, к шинам дополнительно подключено балластное сопротивление (БС).

На рисунке 2.5 показаны основные аварийные сценарии для одиночной несекционированной системы шин. Данная схема является наиболее распространённой в исследованиях, посвященных гибридным ЭТК из-за своей простоты. Отказ шины приводит к 100% недоотпуску энергии. Отсутствие сетеформирующего источника, которым могут быть ДГУ или СНЭ, приравнивается к отказу шины. В случае возникновения дефицита на шине производится автоматическая частотная разгрузка с шагом 10% от текущей нагрузки. Одиночная несекционированная система шин не отвечает требованиям, предъявляемым к электроснабжению потребителей I и II категории, согласно ПУЭ п.1.2.10 и 1.2.20.

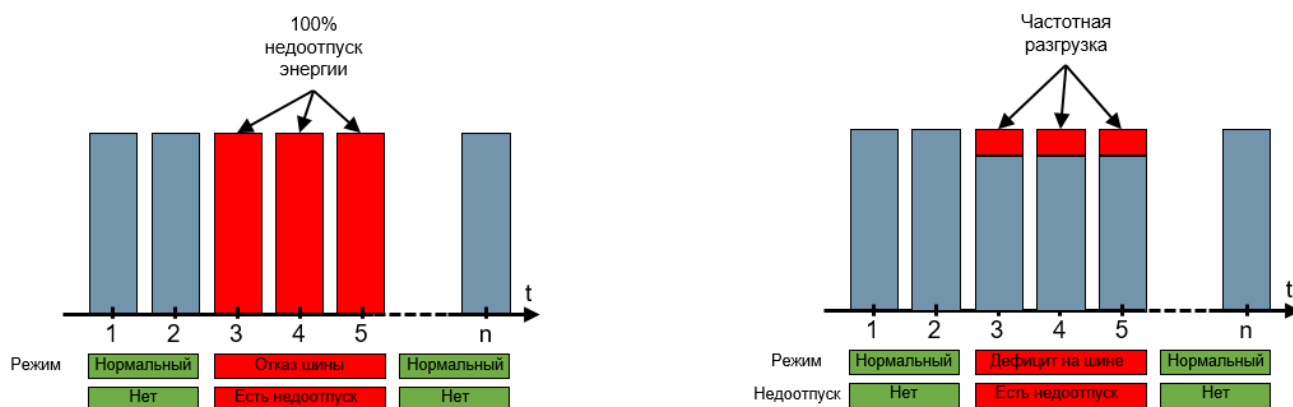


Рисунок 2.5 – Основные сценарии аварийных ситуаций для одиночной несекционированной системы шин (составлено автором)

На рисунке 2.6 представлены основные сценарии аварийных режимов для секционированной и двойной системы шин. Показаны сценарии отказа шин/секций и возникновения дефицита при различных состояниях СВ и МШВ.

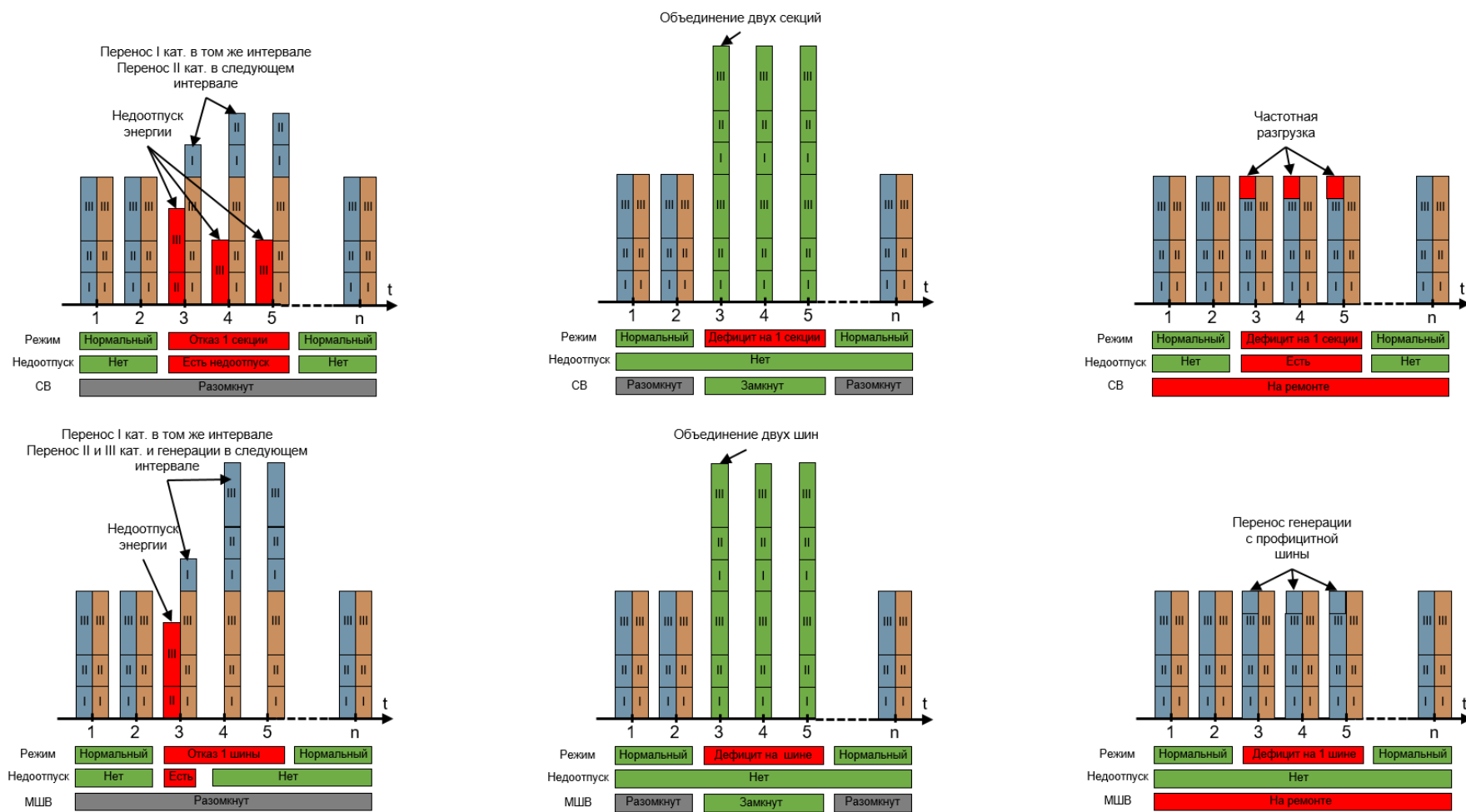


Рисунок 2.6 – Основные сценарии аварийных ситуаций для одиночной секционированной и двойной систем шин
(составлено автором)

Секционированная и двойная системы шин позволяют реализовывать требования ПУЭ в части электроснабжения потребителей I и II категории. Алгоритм учитывает распределение потребителей по категориям надежности электроснабжения, структура нагрузки считается неизменной, доли потребителей I, II и III категорий надежности электроснабжения сохраняются в каждый интервал моделирования. Если используется две секции/шины, то при отсутствии оперативных переключений потребителей, нагрузка между ними распределяется равномерно.

Потребители I категории подключаются к двум секциям/шинам через устройство автоматического ввода резерва (АВР). Потребители II категории подключаются к двум секциям/шинам фидерами с возможностью оперативного переключения на резервное питание на стороне потребителя.

В одиночной секционированной системе шин при отказе одной секции потребители I категории переключаются на рабочую секцию за счет АВР моментально. Потребители II категории будут переведены на рабочую секцию в следующем часовом интервале. Потребители III категории отключаются до восстановления секции. При нехватке генерации на одной секции и профиците на другой происходит замыкание СВ, система вырождается в одиночную несекционированную систему шин. Если СВ отказал, то производится частотная загрузка с шагом 10% от текущей нагрузки.

В двойной системе шин генерирующее оборудование и потребители подключаются к шинам через присоединения с двумя автоматическими выключателями с механической блокировкой, что позволяет переводить всех потребителей в случае отказа на рабочую шину.

При отказе одной шины логика переключений потребителей I и II категории надежности электроснабжения аналогична секционированной системе, потребители III категории и генерирующее оборудование также переключаются на рабочую шину в следующем часовом интервале. При нехватке генерации на одной шине и профиците на другой происходит замыкание МШВ аналогично секционированной системе шин. При отказе МШВ производится проверка

возможности перевода генерирующего оборудования с профицитной шины на дефицитную. В противном случае выполняется перевод нагрузки на профицитную шину с шагом 10% от текущей нагрузки начиная с потребителей III категории.

2.4 Алгоритм имитационного моделирования гибридного ЭТК

Расчет показателей гибридного ЭТК производится методом имитационного моделирования. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2.7.

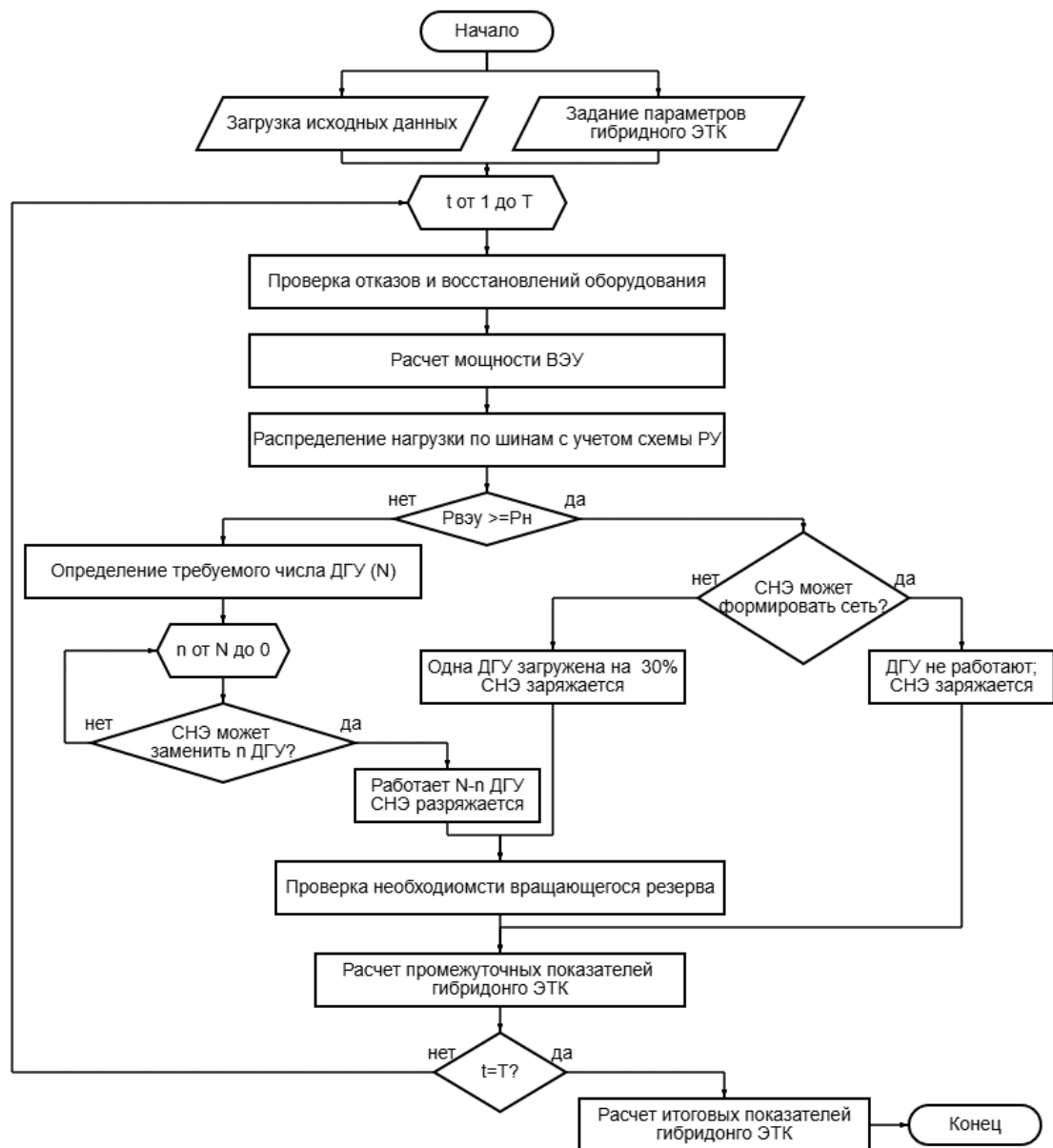


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма расчета показателей гибридного ЭТК

(составлено автором)

Моделирование осуществляется по дискретной временной сетке, в рамках которой каждый часовой интервал рассматривается как квазистационарное

состояние. Предполагается, что в течение часового интервала моделирования все параметры (значения нагрузки, скорости ветра, а также режимы работы и состояния генерирующего и аккумуляторного оборудования) остаются неизменными.

На основе представленного алгоритма разработана программа для ЭВМ, реализованная на языке Java. Моделирование начинается с загрузки параметров оборудования гибридного ЭТК и часовых данных скорости ветра и нагрузки. Затем в каждом интервале все оборудование проходит проверку на отказ и восстановление. Исходя из состояния оборудования определяется нагрузка на сборные шины в зависимости от схемы РУ.

Затем нагрузка распределяется между ВЭУ, ДГУ и СНЭ в зависимости от доступных мощностей. Логика работы генерирующего оборудования гибридного ЭТК основана на уравнении баланса мощности (2.3):

$$P_n = (P_{дгу} + P_{вэу} + P_{снэ}) - P_{сб} + P_{деф}, \quad (2.3)$$

где P_n , $P_{дгу}$, $P_{вэу}$, $P_{снэ}$, $P_{сб}$ и $P_{деф}$ мощность нагрузки, ДГУ, ВЭУ, СНЭ, «сброса» на балластную нагрузку и дефицит мощности соответственно, кВт.

Дефицит мощности возможен в трёх случаях: при отказе секции/шины, при отсутствии сетеформирующего источника, и при недостаточности доступной генерирующей мощности. В первых двух случаях величина дефицита определяется как мощность нагрузки, питание которой невозможно обеспечить с учётом предусмотренного резервирования и допустимых переключений в зависимости от схемы РУ. В случае недостаточности генерации дефицит определяется как разность между текущей нагрузкой и суммарной доступной мощностью исправного оборудования.

Формирование параметров сети заключается в поддержании требуемых значений напряжения и частоты, необходимых для корректной работы гибридного ЭТК. В рассматриваемой модели сетеформирующим источником может выступать ДГУ и СНЭ, работающая через преобразователь с функцией формирования сети (grid-forming). ВЭУ не рассматривается как сетеформирующий источник, поскольку её выходная мощность зависит от текущей скорости ветра и имеет

стохастический характер. ВЭУ не может гарантированно обеспечивать баланс мощности и поддержание параметров сети во всех режимах работы гибридного ЭТК.

В часы профицита мощности от ВЭУ избыточная энергия направляется на заряд СНЭ, а при достижении максимального уровня заряда сбрасывается на балластное сопротивление. Формирование параметров сети производится либо за счет ДГУ, работающей с минимальной загрузкой 30% при ограничении мощности ВЭУ, либо СНЭ, если её мощности и запаса энергии достаточно для обеспечения нагрузки на время пуска резервной ДГУ.

В часы дефицита мощности от ВЭУ производится расчет требуемого количества ДГУ, а затем проверяется возможность замещения части ДГУ за счет СНЭ. После чего производится проверка необходимости запуска дополнительной ДГУ для работы с нагруженным резервом и выполнения критерия $N-1$. При дефиците мощности, если ВЭУ и ДГУ не могут обеспечить нагрузку, то СНЭ разряжается до минимального уровня.

После распределения генерации выполняется расчет промежуточных (часовых) значений оцениваемых показателей, на основе которых при завершении всех итераций рассчитываются итоговые показатели гибридного ЭТК. Основные показатели гибридного ЭТК рассчитываются по формулам (2.4–2.6):

– нормированная стоимость электроэнергии [131], руб./кВт·ч (LCOE – Levelized Cost of Energy):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{y=1}^Y \frac{OPEX_y}{(1+r)^y}}{\sum_{y=1}^Y \frac{E_y}{(1+r)^y}}, \quad (2.4)$$

где $LCOE$ – нормированная стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч;

$CAPEX$ – капитальные затраты на ВЭУ, ДГУ, СНЭ и РУ, руб.;

$OPEX_y$ – эксплуатационные затраты в год y , руб.;

Y – расчетный период, лет;

E_y – отпущенная потребителю электроэнергия в году y , кВт·ч;

r – ставка дисконтирования.

– вероятность потери электроснабжения [103] (LPSP – Loss of Power Supply Probability):

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{деф},t}}{\sum_{t=1}^T P_{\text{н},t}}, \quad (2.5)$$

где $LPSP$ – вероятность потери электроснабжения;

T – суммарное количество интервалов моделирования;

$P_{\text{н}}$ – мощность нагрузки, кВт;

$P_{\text{деф}}$ – дефицит мощности, кВт.

– вероятность потери нагрузки [99] (LOLP – Loss of Load Probability).

$$LOLP = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T 1(P_{\text{деф},t} > 0), \quad (2.6)$$

где $LOLP$ – вероятность потери нагрузки.

Моделирование работы гибридного ЭТК производится на протяжении 20 лет (175 320 часовых интервалов). Длительность периода моделирования определяется сроком эксплуатации ВЭУ, который является наибольшим среди всех элементов генерирующего оборудования. К тому же скорость ветра имеет вероятностный характер, ввиду чего использование годового периода моделирования является недостаточным [143].

Для учета стохастического характера отказов оборудования для оценки показателей гибридного ЭТК применяется метод Монте-Карло, позволяющий многократно моделировать работу системы с различными случайными сценариями отказов и их последствий. Итоговые значения показателей гибридного ЭТК определяются как среднеарифметические значения по всем итерациям Монте-Карло.

Для достижения заданной относительной погрешности ε , принятой 10% от среднеарифметического значения показателей гибридного ЭТК необходимый объем выборки вычисляется по выражению (2.7):

$$N \geq \left(\frac{t \cdot \sigma}{\varepsilon \cdot \bar{x}} \right)^2, \quad (2.7)$$

где N – необходимый объем выборки;

t – коэффициент Стьюдента;

σ – среднеквадратическое отклонение показателя гибридного ЭТК;

ε – относительная погрешность;

$\bar{x}$ – среднеарифметическое значение показателя гибридного ЭТК.

Таким образом, моделирование и последующая обработка результатов выполняются до тех пор, пока фактический объём выборки не превысит рассчитанное минимально необходимое значение N .

2.5 Моделирование отказов оборудования гибридного ЭТК

Проверка технического состояния оборудования на предмет возникновения отказов и восстановления проводится для: шин, ВЭУ, ДГУ, СНЭ и межсекционного/межшинного выключателя (при наличии).

Для каждого экземпляра оборудования гибридного ЭТК вводятся счетчики, которые отвечают за изменение состояния оборудования:

- наработка времени с момента последнего отказа ($T_{\text{раб}}$);
- наработка времени с момента последнего технического обслуживания (ТО), применяется для ДГУ ($T_{\text{то}}$);
- длительность нахождения в ремонте/обслуживании ($T_{\text{рем}}$).

На рисунке 2.8 представлен алгоритм проверки отказов оборудования гибридного ЭТК. Если $T_{\text{рем}}$ больше 0, значит, оборудование находится в состоянии восстановления и считается недоступным в текущей итерации. В этом случае фактическое время ремонта/обслуживания уменьшается на 1 час.

При отсутствии активных отказов и обслуживания производится сравнение накопленной наработки $T_{\text{раб}}$ с пороговым значением наработки до отказа T_0 . При достижении данного значения фиксируется отказ, после чего оборудование становится недоступным на период, равный длительности восстановления $T_{\text{в}}$. Если отказ не зафиксирован, для ДГУ дополнительно осуществляется проверка на достижение предельной наработки до обслуживания $T_{\text{то}}$. При её наступлении ДГУ выводится в обслуживание на установленный срок $T_{\text{обслуж}}$.

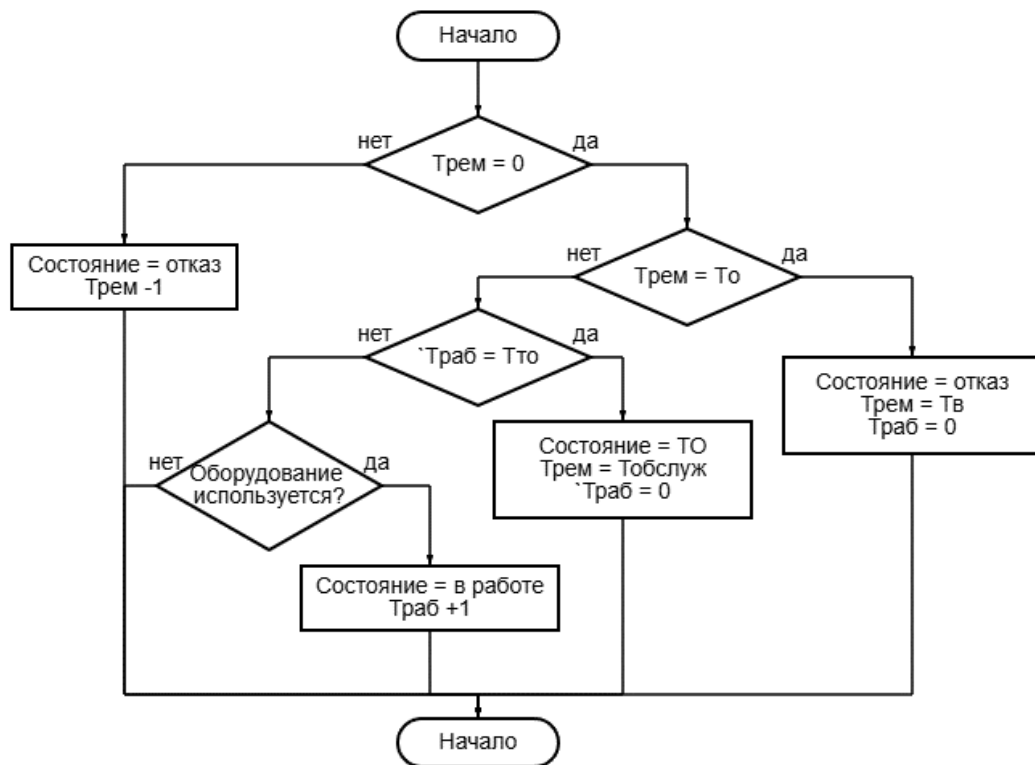


Рисунок 2.8 – Алгоритм проверки оборудования гибридного ЭТК на отказ
(составлено автором)

Если ни отказ, ни необходимость в ТО не выявлены, оборудование является работоспособным, при его использовании наработка увеличивается. В работе не учитываются плановые отключения шины для проведения регламентных работ. Предполагается, что техническое обслуживание ВЭУ выполняется в периоды с низкой скоростью ветра, поскольку проведение работ при сильном ветре невозможно по условиям безопасности и технологическим ограничениям. Таким образом, исключение обслуживания ВЭУ из расчётов не оказывает существенного влияния на результаты моделирования генерации.

Для формирования случайного значения наработки на отказ оборудования гибридного ЭТК предполагается, что отказы происходят по пуассоновскому процессу с постоянной интенсивностью отказов λ . В этом случае время безотказной работы подчиняется экспоненциальному закону распределения [107, 116] и определяется выражением (2.8) [121]:

$$F(T_0) = 1 - e^{-\lambda \cdot T_{\text{отк}}}, \quad (2.8)$$

где $F(T_0)$ – вероятность того, что оборудование откажет за время T_0 ;

λ – интенсивность отказов, год^{-1} .

Генерация случайного значения наработки на отказ T_o и времени восстановления T_v осуществляется методом обратной функции распределения. Поскольку интенсивности отказов и восстановлений задаются в год^{-1} , а моделирование производится по часовым интервалам, расчет показателей оборудования производится по формулам (2.9–2.10) [74]:

$$T_o = \left\lceil \frac{-\ln(U) \cdot 8760}{\lambda} \right\rceil, \quad (2.9)$$

$$T_v = \left\lceil \frac{-\ln(U) \cdot 8760}{\mu} \right\rceil, \quad (2.10)$$

где λ – интенсивность отказов оборудования, год^{-1} ;

μ – интенсивность восстановления, год^{-1} ;

U – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[0;1)$.

На основе данных, полученных в результате литературного анализа показателей надежности оборудования, для узлов системы были определены эквивалентные значения интенсивности отказов и восстановления по формулам (2.11–2.12):

$$\lambda_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (2.11)$$

$$\mu_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}, \quad (2.12)$$

где n – количество последовательных элементов.

Итоговые значения показателей для узлов генерирующего оборудования гибридного ЭТК приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Эквивалентные показатели надёжности оборудования (по данным автора)

Обозначение	$\lambda, \text{год}^{-1}$	$\mu, \text{год}^{-1}$
Узел ДГУ (ДГУ, ВА)	4,75	178,78
Узел ВЭУ (ВЭУ, ПЧ, ВА)	1,94	194,67
Узел СНЭ (АБ, СУ, ВИП, ВА)	0,325	243,3
Шина 0,4 кВ	0,016	730
СВ/МШВ	0,05	876

Для каждого типа оборудования (ДГУ, ВЭУ, СНЭ и др.) используется отдельный генератор случайных чисел, что позволяет сохранять корректное распределение значений внутри каждого вида оборудования и исключить

нежелательную корреляцию между компонентами. Такой подход позволяет обеспечить стабильность статистических характеристик, включая равномерность и плотность распределения, внутри каждого вида оборудования, что особенно важно при моделировании большого числа итераций.

В проанализированных источниках [116] способ генерации случайных величин не указывается. Применяемый в данной работе подход, в отличие от генерации случайного значения вероятности отказа на каждой итерации, обеспечивает большую точность моделирования. Это объясняется тем, что частые вызовы генератора случайных чисел могут влиять на статистические свойства сгенерированных значений, тогда как использование экспоненциального распределения позволяет сразу получать корректное время до отказа и лучше сохраняет соответствие заданной интенсивности отказов.

2.6 Математическая модель ДГУ

ДГУ в рамках имитационной модели в каждой итерации может находиться в одном из пяти дискретных эксплуатационных состояний (таблица 2.3), определяющих её доступность, режим функционирования и влияние на энергетический баланс системы.

Таблица 2.3 – Дискретные состояния ДГУ (по данным автора)

Состояния ДГУ	Загрузка	Примечание
Недоступность	0%	В ремонте/техническом обслуживании, ДГУ исключается из расчётов
Простой	0%	ДГУ доступен, но не включён; нет расход топлива и износа
Малая загрузка	<30%	Работы ниже рекомендованной загрузки
Прожиг	30%	Каждые 4 часа работы на малую загрузку
Нормальное	30–100%	Работа в длительно допустимом диапазоне загрузки

В каждом интервале моделирования определяется количество доступных ДГУ. По текущему балансу нагрузки и генерации ВЭУ рассчитывается требуемое для обеспечения нагрузки количество ДГУ по выражению (2.13):

$$N_{\text{дгу.раб}} = \min \left(N_{\text{дгу}}, \left\lceil \frac{P_{\text{н}} - P_{\text{вэу}}}{P_{\text{дгу.ном.}}} \right\rceil \right), \quad (2.13)$$

где $N_{\text{дгу}}$ – общее количество доступных ДГУ;

P_n , $P_{вэу}$, $P_{дгу.ном.}$ – мощность нагрузки, ВЭУ и номинальная мощность ДГУ, кВт.

Перед выбором установок, которые будут работать, производится сортировка списка доступных ДГУ:

- в первую очередь используются ДГУ, работавшие в предыдущей итерации, что позволяет снизить количество включений и сократить общее время работы ДГУ;

- при выборе среди оставшихся установок приоритет отдаётся ДГУ с меньшей наработкой моточасов, что способствует более равномерному распределению износа оборудования.

При нагрузке менее 30% номинальной мощности ДГУ работают с низкой загрузкой и повышенным удельным расходом топлива [86]. ДГУ не могут работать на низкую загрузку более 4 часов подряд, далее выполняется прожиг, при котором установка загружается до 30% номинальной мощности независимо от текущей потребности в генерации [155]. Избыточная генерация запасается в СНЭ или «сбрасывается» на балластное сопротивление.

Нормальный режим работы соответствует загрузке 30–100% относительно номинальной мощности ДГУ. Пуск простаивающей ДГУ длится 5 минут. На время пуска нагрузку временно компенсируют другие ДГУ или СНЭ.

Все ДГУ должны обеспечивать возможность взаимной синхронизации, работу в параллельном режиме с автоматическим распределением нагрузки и поддержанием равенства загрузки между агрегатами. Степень автоматизации должна быть не ниже второго уровня. Все дизель-генераторные установки выбираются одной номинальной мощности $P_{дгу}$ [110]. Это упрощает эксплуатацию, управление, техническое обслуживание и позволяет сократить номенклатуру запасных частей.

Оценка износа ДГУ и их последующих ТО и замен производится исходя из количества моточасов. За каждый шаг моделирования, в котором ДГУ работала, ее количество моточасов увеличивается. Для каждой ДГУ необходимо проводить ТО каждые 250 часов работы, длительность выполнения которых принята равной

4 часам. Помимо самих часов работы ДГУ на ее износ влияют циклы пуска-останова. Таким образом, частые включения/отключения ДГУ приводят к быстрому износу оборудования и частым заменам. В данном исследовании цикл пуска-останова приравнивается 5 моточасам.

В диссертационном исследовании предложена модель оценки расхода топлива на основе аппроксимации паспортных параметров с учётом номинальной мощности ДГУ [7]. Модель построена на данных ДГУ с двигателями ЯМЗ мощностью 80–400 кВт с восемью и более цилиндрами V-образного расположения (таблица 2.4). Выбор производителя обусловлен сертификацией в РФ, широким применением и оптимальным соотношением цены и качества.

Таблица 2.4 – Расход топлива ДГУ [10]

Модель ДГУ	Номинальная мощность, кВт	Расход топлива при загрузке, л/ч		
		50% мощности	75% мощности	100% мощности
АД-80 (ЯМЗ)	80	14,1	20,0	26,0
АД-100 (ЯМЗ-238М2)	100	16,8	24,1	31,4
АД-150 (ЯМЗ-238ДИ)	150	23,0	33,4	44,1
АД-160 (ЯМЗ-238ДИ)	160	24,3	35,5	46,9
АД-180 (ЯМЗ)	180	27,1	39,6	52,3
АД-200 (ЯМЗ-7514.10)	200	29,3	42,6	56,1
АД-220 (ЯМЗ)	220	31,9	46,5	61,4
АД-240 (ЯМЗ)	240	34,8	50,7	66,9
АД-250 (ЯМЗ)	250	35,9	52,4	69,0
АД-275 (ЯМЗ)	275	40,0	58,1	76,4
АД-300 (ЯМЗ)	300	43,2	63,0	82,9
АД-315 (ЯМЗ)	315	45,2	65,9	86,9
АД-320 (ЯМЗ)	320	45,9	66,9	88,2
АД-350 (ЯМЗ)	350	49,5	72,4	95,7
АД-360 (ЯМЗ)	360	50,8	74,3	98,3
АД-400 (ЯМЗ)	400	55,6	81,6	108,1

На рисунке 2.9 показаны графики зависимости удельного расхода дизельного топлива для каждой модели ДГУ из таблицы 2.4. Черной пунктирной линией изображена кривая, полученная линейной аппроксимацией, что является типовым подходом во многих научных работах по теме диссертации [15, 152].

Значения при загрузке меньше 50% получены квадратичной аппроксимацией методом наименьших квадратов. Квадратичная аппроксимация позволяет

уменьшить среднюю ошибку аппроксимации. Предлагаемая модель представляет удельный расход топлива в виде (2.14):

$$F_{уд,t} = k_1 \cdot l_t^2 + k_2 \cdot l_t + k_3, \quad (2.14)$$

где $F_{уд}$ – удельный расход топлива на 1 кВт·ч;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, полученные при аппроксимации методом наименьших квадратов;

l_t – текущая нагрузка ДГУ относительно номинальной мощности от 0 до 1.

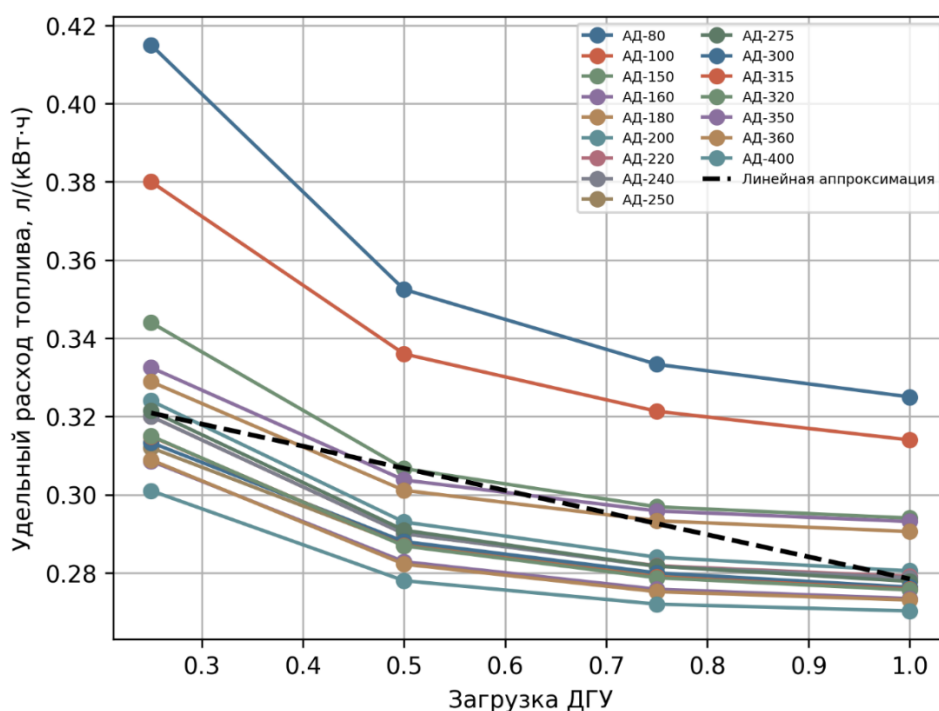


Рисунок 2.9 – График удельного расхода ДТ (составлено автором)

На следующем этапе коэффициенты, полученные для каждой модели, аппроксимируются по номинальной мощности. Наименьшая средняя ошибка соответствует гиперболической аппроксимации.

Коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются формулами (2.15–2.17):

$$k_1 = k_{11} + \frac{k_{12}}{P_{дгу.ном.}}, \quad (2.15)$$

$$k_2 = k_{21} + \frac{k_{22}}{P_{дгу.ном.}}, \quad (2.16)$$

$$k_3 = k_{31} + \frac{k_{32}}{P_{дгу.ном.}}, \quad (2.17)$$

где k_{i1} и k_{i2} – коэффициенты, полученные гиперболической аппроксимацией методом наименьших квадратов;

$P_{\text{дгу.ном.}}$ – номинальная мощность ДГУ, кВт.

Значения коэффициентов, полученных при гиперболической аппроксимации указаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Коэффициенты аппроксимации (по данным автора)

Коэффициент	k_{11}	k_{21}	k_{31}	k_{12}	k_{22}	k_{32}
Значение	0,0185	–0,0361	0,2745	5,3978	–11,4831	11,6284

На рисунке 2.10 изображена зависимость удельного расхода дизельного топлива от номинальной мощности ДГУ и ее загрузки относительно номинальной мощности.

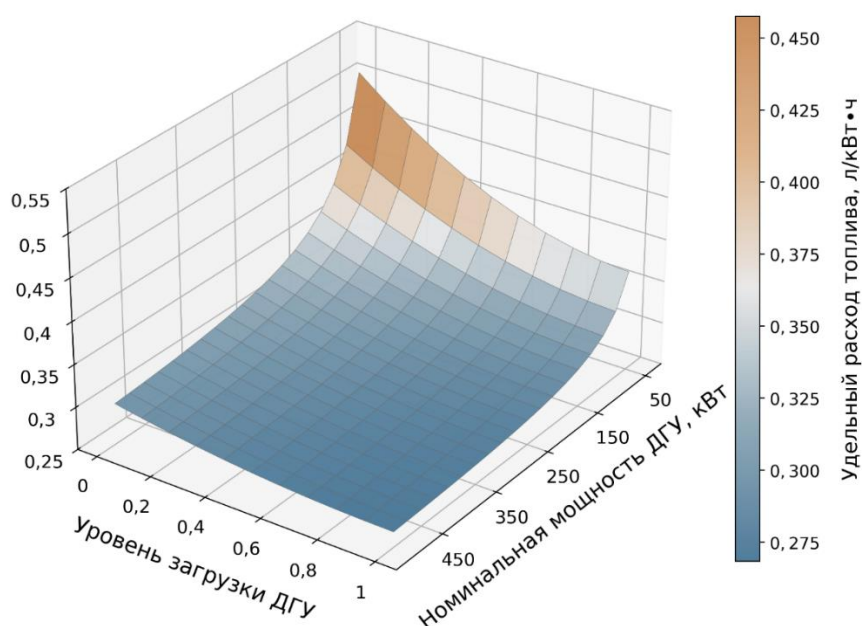


Рисунок 2.10 – Удельный расхода ДТ (составлено автором)

Основным отличием представленного подхода от научных работ по теме диссертации является зависимость удельного расхода дизельного топлива от номинальной мощности ДГУ. Наибольшее влияние значение номинальной мощности ДГУ оказывает до 150 кВт, после чего падение удельного расхода топлива снижается. На ДГУ большей мощности изменение загрузки также оказывает меньше влияния.

2.7 Математическая модель ВЭУ

ВЭУ в рамках имитационной модели в каждой итерации может находиться в одном из трех дискретных эксплуатационных состояний (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Дискретные состояния ВЭУ (по данным автора)

Состояния ВЭУ	Генерация	Примечание
Недоступность	0%	В ремонте, ВЭУ исключается из расчётов
Простой	0%	Отсутствие генерации из-за недопустимой скорости ветра (слишком низкой или высокой)
Номинальный режим	0–100%	Генерация в зависимости от скорости ветра

Расчет генерации ВЭУ производится на основе уравнения (2.18) с учетом почасовых значений скорости ветра и параметров ВЭУ [135]:

$$P_{\text{вэу}} = \begin{cases} 0, V < V_{\min} \\ P_{\text{ном}} \left(\frac{V^3 - V_{\min}^3}{V_{\text{ном}}^3 - V_{\min}^3} \right), V_{\min} \leq V < V_{\text{ном}}, \\ P_{\text{ном}}, V_{\text{ном}} \leq V \leq V_{\max} \\ 0, V > V_{\max} \end{cases} \quad (2.18)$$

где V – скорость ветра, м/с;

$V_{\min}$ – минимальная скорость ветра ВЭУ, м/с;

$V_{\text{ном}}$ – номинальная скорость ветра ВЭУ, м/с;

$V_{\max}$ – максимальная скорость ветра ВЭУ, м/с;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ВЭУ, м/с.

В таблице 2.7 представлены технические параметры ВЭУ, на основе которых рассчитывается генерация.

Таблица 2.7 – Технические параметры ВЭУ (по данным автора)

Параметр	Значение
Высота мачты, м	50
Минимальная скорость ветра, м/с	3
Номинальная скорость ветра, м/с	12,5
Максимальная скорость ветра, м/с	25
Срок эксплуатации, лет	20

В диссертационном исследовании используются часовые метеорологические данные (скорость ветра) из базы NASA MERRA2 [117]. Достоверность и точность выбранной базы данных обоснована в работах [137, 164]. Значения скорости ветра получены для точки с координатами $70^{\circ}53'41''$ с. Ш. $78^{\circ}30'14''$ в. Д. (с. Гыда, ЯНАО). Для пересчета скорости ветра из базы NASA на высоту мачты ВЭУ используется формула (2.19) [20]:

$$V_H = V_{\phi} \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{H_{\phi}}{z_0}}, \quad (2.19)$$

где V_H – скорость ветра на высоте H , м;

H_ϕ – высота установки прибора измерения скорости, м;

Z_0 – коэффициент шероховатости для различных типов поверхностей (для с. Гыда используется значение 0,03).

2.8 Математическая модель СНЭ

СНЭ в рамках имитационной модели в каждой итерации может находиться в одном из четырех дискретных эксплуатационных состояний (таблица 2.8), связанных с изменением уровня заряда (SOC – State of Charge).

Таблица 2.8 – Дискретные состояния СНЭ (по данным автора)

Состояния СНЭ	Изменение уровня заряда	Примечание
Недоступность	0%	В ремонте, СНЭ исключается из расчётов
Простой	0%.	СНЭ не используется, уровень заряда снижается из-за саморазряда на 3% в месяц
Заряд	$+\Delta SOC$	Увеличение уровня заряда за счет генерации ВЭУ и/или прожига ДГУ
Разряд	$-\Delta SOC$	Уменьшение уровня заряда для обеспечения нагрузки

Для СНЭ выбраны литий-ионные аккумуляторные батареи ($LiFePO_4$), т.к. они отличаются высокой энергетической плотностью, долговечностью и возможностью работы в широком диапазоне режимов нагрузки. Текущий уровень заряда SOC определяется формулой (2.20):

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{C_{max,0} \cdot k_{self}}{C_{max,t}} + \begin{cases} \frac{\eta \cdot E_{зар,t}}{C_{max,t}}, \text{ заряд} \\ \frac{-E_{разр,t}}{\eta \cdot C_{max,t}}, \text{ разряд} \end{cases}, \quad (2.20)$$

где $C_{max,0}$ и $C_{max,t}$ – начальная и текущая максимальные емкости СНЭ, кВт·ч;

k_{self} – коэффициент скорости саморазряда (3% в месяц);

η – КПД заряда/разряда, принят равным 0,93;

$E_{зар}$ и $E_{разр}$ – энергия заряда и разряда, кВт·ч.

Максимальный объем энергии, доступный для заряда/разряда СНЭ определяется выражениями (2.21-2.22):

$$E_{max,зар,t} = C_{max,t} \frac{SOC_{max} - SOC_t}{\eta}, \quad (2.21)$$

$$E_{max,разр,t} = C_{max,t}(SOC_t - SOC_{min})\eta, \quad (2.22)$$

где $C_{max,t}$ – максимальная емкость СНЭ, кВт·ч;

SOC_{max} , SOC_{min} и SOC_t – максимальный, минимальный и текущий уровни заряда СНЭ.

При этом мощность СНЭ ограничивается с учетом максимальных значений токов заряда/разряда. В имитационной модели максимальный ток заряда/разряда задается в относительных единицах как кратность тока относительно номинальной емкости СНЭ. Максимально допустимая мощность заряда/разряда определяется произведением номинальной емкости СНЭ и максимального тока заряда/разряда.

Значение максимальной емкости СНЭ нельзя считать постоянным в течение жизненного цикла, так как по мере эксплуатации накопителя происходит деградация его емкости. Причем скорость деградации определяется режимом работ СНЭ [6, 60]. Текущая максимальная емкость СНЭ с учетом деградации определяется по формуле (2.23):

$$C_{max,t} = C_{max,0}(1 - K \cdot EFC_t^Z), \quad (2.23)$$

где $C_{max,0}$ – начальная максимальная емкость, кВт·ч;

K и Z – эмпирические коэффициенты выбираются из условия снижения максимальной емкости до 80% от номинального значения при числе эквивалентных циклов (EFC – Equivalent Full Cycles), равном 3000.

Количество эквивалентных циклов определяется по формуле (2.24):

$$EFC_t = \sum_{j=1}^t \frac{|\Delta E_j|}{2C_{max,0}} \cdot \max\left(1, \frac{|P_{снэ,j}|}{P_{1c}}\right)^h, \quad (2.24)$$

где ΔE_j – изменение энергии СНЭ, кВт·ч;

$P_{снэ,j}$ и P_{1c} – мощности текущего заряда/разряда и при максимальных токах заряда/разряда $1C$, кВт;

h – эмпирический коэффициент влияния мощности на интенсивность деградации (принят равным 0,5).

Заряд СНЭ производится в следующих случаях:

- профицит генерации ВЭУ – избыточная энергия от ВЭУ заряжается в СНЭ;
- прожиг ДГУ – во время прожига генерация ДГУ идет на заряд СНЭ;

В работе СНЭ может выполнять 3 функции:

- обеспечивать нагрузку при дефиците мощности, при котором СНЭ может разряжаться полностью;
- выступать в роли гарантированного источника энергии. Если СНЭ способна обеспечить нагрузку на время пуска резервной ДГУ, то нагруженный (вращающийся) резерв не используется;
- замещать долю генерации ДГУ в общем энергобалансе ЭТК.

При использовании СНЭ для снижения доли генерации ДГУ в общем энергобалансе гибридного ЭТК проверяется условие сохранения заданного минимального уровня заряда (2.25):

$$\frac{E_{\text{разр},t} - E_{\text{тр},t}}{C_{\text{max},t}} \geq L_t, \quad (2.25)$$

где L – минимальный уровень заряда при замещении генерации ДГУ;

$C_{\text{max},t}$ – максимальная емкость СНЭ, кВт·ч;

$E_{\text{разр}}$ и $E_{\text{тр}}$ – доступная и требуемая для разряда энергии, кВт·ч.

В таблице 2.9 представлены технические параметры рассматриваемой СНЭ.

Таблица 2.9 – Технические параметры СНЭ (по данным автора)

Параметр	Значение
КПД заряда/разряда (η)	93%
Минимальный уровень заряда ($SOC_{\min}$)	0,2
Максимальный уровень заряда ($SOC_{\max}$)	1
Скорость саморазряда k_{self}	3%/месяц
Номинальный ресурс СНЭ (EFC)	3000 циклов
Коэффициент деградации (K)	0,003
Степень деградации (z)	0,55

При минимальном уровне заряда, равным 1, СНЭ используется только для резервирования и ограничения работы ДГУ в нагруженном (вращающемся) резерве. В конце каждой итерации моделирования производится саморазряд СНЭ, который принят равным 3% в месяц (720 часов). Саморазряд – единственный способ снизить текущий уровень заряда СНЭ ниже минимального значения.

2.9 Выводы к главе 2

1. Представлен алгоритм расчета показателей гибридного ЭТК, также математические зависимости, описывающие модели ДГУ, ВЭУ и СНЭ.
2. Получен годовой график нагрузки потребителей поселения на ИТТ на основе измерений фактической загрузки ДГУ.
3. Установлена математическая зависимость, позволяющая определить удельный расход дизельного топлива ДГУ при различных значениях номинальной мощности и уровня загрузки.
4. На основе представленных математических зависимостей разработаны программы для ЭВМ, позволяющие выполнять расчёт расхода дизельного топлива, количества ТО и износа ДГУ [29], капитальных, эксплуатационных и полных затрат за период эксплуатации гибридного ЭТК [28], а также основных показателей функционирования комплекса, включая LCOE, LOLP, LPSP.

ГЛАВА 3 ВЫБОР СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ГИБРИДНОГО ЭТК

3.1 Глобальная оценка чувствительности показателей гибридного ЭТК

Разработанная имитационная модель гибридного ЭТК содержит большое количество входных параметров, связанных с параметрами оборудования, показателями надежности оборудования и экономическими затратами. Для того, чтобы определить наиболее значимые параметры, которые требуют более точного определения использована глобальная оценка чувствительности методом Соболя.

Метод Соболя разработан российским математиком Ильей Мееровичем Соболем как развитие методов Монте-Карло и является одним из наиболее эффективных подходов к глобальному анализу чувствительности. Основная особенность указанного метода заключается в использовании квазислучайных последовательностей (последовательность Соболя), которые обеспечивают равномерное заполнение пространства изменяемых параметров, что позволяет избежать формирования пустот и кластеров точек, а также существенно снизить требуемое количество итераций моделирования. Применение квазислучайных последовательностей позволяет достичь погрешности порядка N^{-1} , а псевдослучайные $N^{-0,5}$.

Суть метода заключается в декомпозиции дисперсии выходного параметра модели. Имитационная модель гибридного ЭТК представляется в виде (3.1):

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.1)$$

где Y – выходной параметр модели (оцениваемые показатели гибридного ЭТК);
 x_i – независимые входные параметры модели.

Метод Соболя позволяет выразить полную дисперсию $D(Y)$ как сумму дисперсий отдельных параметров (D_i), парных взаимодействий (D_{ij}) и полных взаимодействий параметров, согласно выражению (3.2):

$$D(Y) = \sum_{i=1}^k D_i + \sum_{i < j} D_{ij} + D_{12\dots n} \quad (3.2)$$

В работе оценивается полный индекс чувствительности ST , который характеризует суммарное влияние входного параметра на значение выходного параметра с учетом всех взаимодействий с остальными входными параметрами.

Полный индекс определяется методом Saltelli, который является развитием метода Соболя. Для расчета полного индекса формируется две независимые матрицы входных параметров A и B размерностью $N \times k$, где N – количество выборок, k – количество входных параметров модели. Из матриц A и B формируются смешанные матрицы, в которых все параметры берутся из матрицы A кроме i -го параметра, взятого из матрицы B .

Полный индекс чувствительности ST определяется из выражения (3.3) [141]:

$$ST_i = \frac{\frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N (Y_A^{(j)} - Y_{AB_i}^{(j)})^2}{Var(Y)}, \quad (3.3)$$

где Y_A – результат для матрицы A ;

Y_{AB_i} – результат для гибридной матрицы AB_i ;

N – размер выборки;

$Var(Y)$ – дисперсия выходного параметра.

В рамках исследования выполнена оценка чувствительности показателей LCOE, LOLP, LPSP, расхода дизельного топлива и наработки ДГУ к изменению показателей надежности оборудования, параметров оборудования гибридного ЭТК и экономических параметров системы.

В таблице 3.1 указаны входные параметры имитационной модели и их диапазоны изменения, используемые при глобальной оценке чувствительности показателей гибридного ЭТК. Стоимость РУ задается относительно базовой стоимости соответствующей одиночной несекционированной системе шин. Стоимость секционированной системы шин принята в 1,5 раза выше базовой стоимости РУ, а двойной – в 1,7 раз выше, что обусловлено увеличением количества коммутационного оборудования и усложнением схемы РУ. Ущерб от недоотпуска энергии для потребителей I и II категорий надежности электроснабжения принят соответственно в 10 и 5 раз выше ущерба за недоотпуск потребителям III категории.

Таблица 3.1 – Параметры и диапазоны значений гибридного ЭТК (по данным автора)

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Доля потребителей I кат.	0	0,5
Доля потребителей II кат.	0	0,5
λ ВЭУ, год ⁻¹	0,97	2,91
λ ДГУ, год ⁻¹	2,375	7,125
λ СНЭ, год ⁻¹	0,1625	0,4875
λ шины, год ⁻¹	0,008	0,024
λ СВ/МШВ, год ⁻¹	0,025	0,075
μ ВЭУ, год ⁻¹	97,335	292,005
μ ДГУ, год ⁻¹	89,39	268,17
μ СНЭ, год ⁻¹	121,65	364,95
μ шины, год ⁻¹	365	1095
μ СВ/МШВ, год ⁻¹	438	1314
Количество ДГУ	6	10
Мощность одной ДГУ, кВт	170	510
Мощность ВЭУ, %	100	300
Емкость СНЭ, %	25	75
Максимальный ток заряда СНЭ, С	0,3	0,9
Максимальный ток разряда СНЭ, С	1	3
Допустимая глубина разряда СНЭ	0,3	0,9
Ставка дисконтирования	0,04	0,12
Базовая стоимость РУ, руб.	2 500 000	7 500 000
Стоимость ДГУ, руб./кВт	30 000	90 000
Обслуживание ДГУ, руб./кВт/тыс. мч.	2 500	7 500
Стоимость топлива, руб./тонна	45 000	135 000
Стоимость ВЭУ, руб./кВт	100 000	300 000
Обслуживание ВЭУ, руб./кВт/год	2 000	6 000
Стоимость СНЭ, руб./кВт·ч	22 500	67 500
Обслуживание СНЭ, руб./кВт·ч/год	600	1800
Ущерб за недоотпуск III кат., руб./кВт·ч	100	300

Количество ВЭУ в работе принято равным двум, по одной установке на каждую шину/секцию. Выбор оптимального количества ВЭУ является отдельной задачей проектирования гибридных ЭТК, которой уже посвящены другие работы [68, 126, 144]. Кроме того, в существующих гибридных ЭТК, как правило, применяется небольшое (до трех) количество установок средней или большой мощности.

Мощность ВЭУ задается в процентах относительно расчетной мощности, емкость СНЭ задается в процентах относительно расчетной мощности, приведенной к часовому интервалу.

На рисунках 3.1–3.5 представлены результаты глобальной оценки чувствительности выходных показателей гибридного ЭТК к изменению входных параметров. Синим цветом указаны значения для одиночной секционированной системы шин, оранжевым – для двойной системы шин. Над каждой группой параметров приведен диапазон изменения соответствующего выходного показателя гибридного ЭТК при вариации указанных входных параметров.

На рисунке 3.1 представлены результаты оценки чувствительности показателя LCOE.

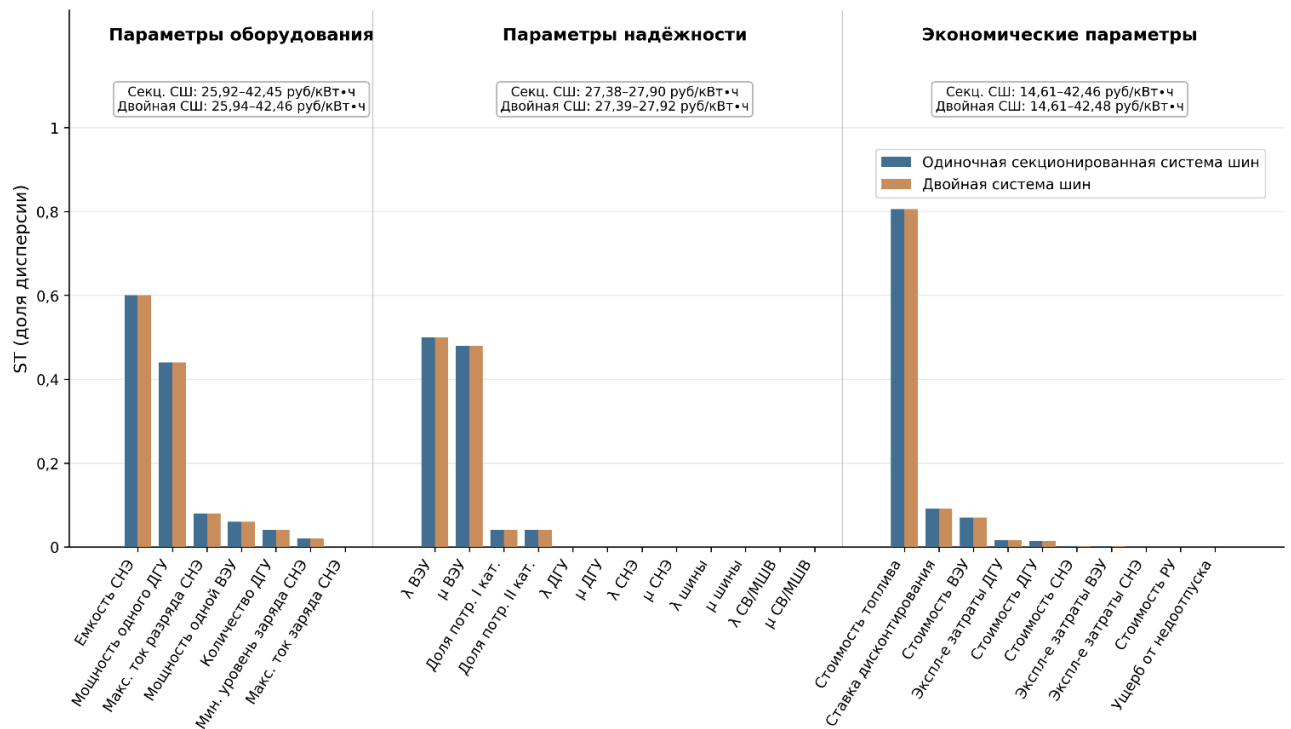


Рисунок 3.1 – Результаты глобального анализа чувствительности LCOE
(составлено автором)

Среди параметров оборудования наибольший вклад в дисперсию LCOE оказывает емкость СНЭ и номинальная мощность одной ДГУ. Чрезмерное увеличение значений данных параметров приводит к значительным капитальным затратам, но не дает дополнительного технического эффекта. Среди параметров надежности оборудования наибольший вклад в дисперсию имеют показатели надежности ВЭУ, так как частые отказы и долгие ремонты существенно снижают замещение генерации ДГУ. При этом данная группа параметров имеет наименьшее влияние на ширину диапазона изменения LCOE (27,38–27,92 руб./кВт•ч).

Среди экономических параметров наиболее значимым является стоимость топлива, что подтверждает важность показателей надежности ВЭУ. Вторым по значимости является ставка дисконтирования, однако ее вклад в дисперсию существенно ниже. Ставка дисконтирования определяется внешними экономическими условиями и не является параметром, на который можно непосредственно повлиять при проектировании гибридного ЭТК. Остальные экономические параметры имеют еще меньшие значения полных индексов чувствительности, их влияние на LCOE является незначительным. Для обеих рассматриваемых схем РУ значения полных индексов чувствительности по всем параметрам совпадают.

На рисунке 3.2 представлены результаты оценки чувствительности показателя расхода топлива. Точность определения указанного параметра напрямую влияет на достоверность значений LCOE.

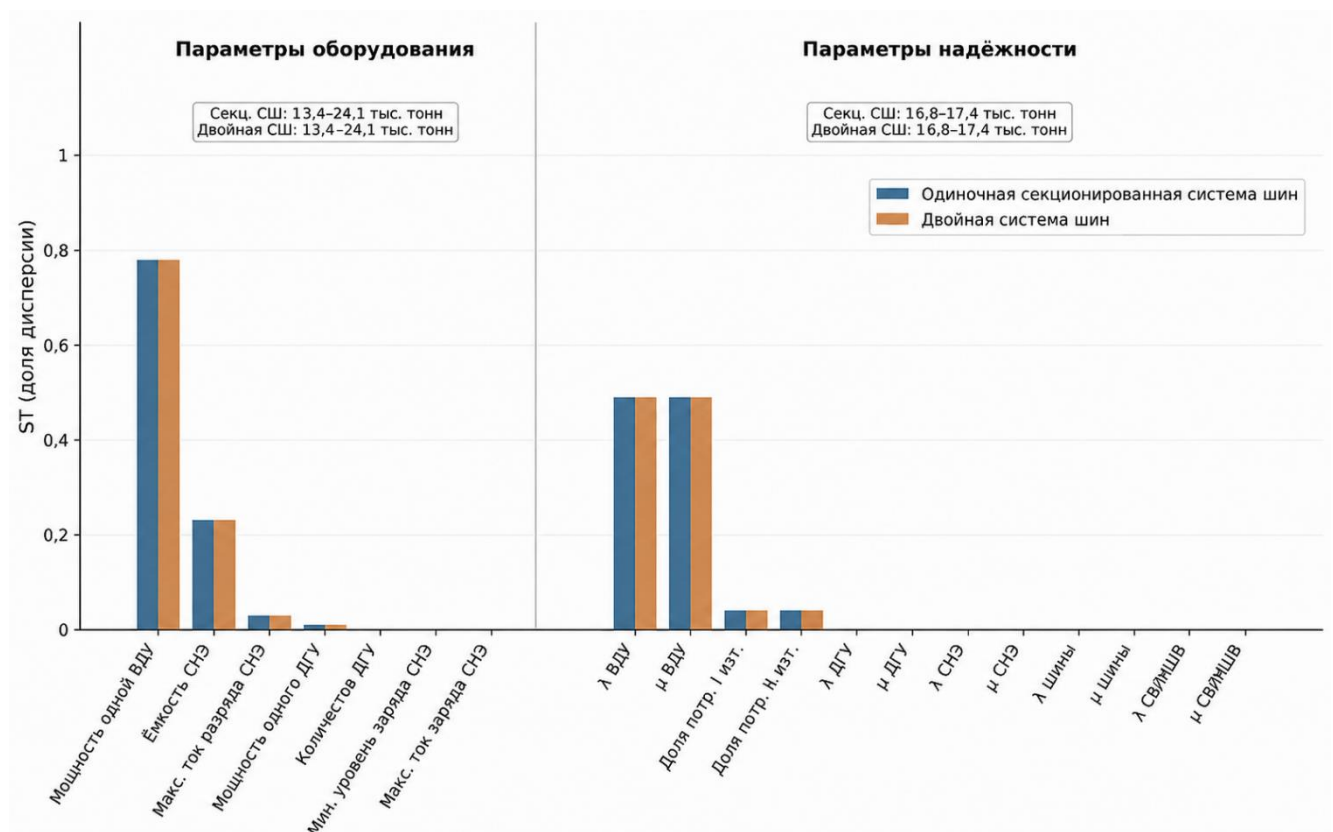


Рисунок 3.2 – Результаты глобального анализа чувствительности расхода топлива (составлено автором)

Наибольший вклад в дисперсию значения расхода топлива среди параметров оборудования вносят мощность ВЭУ и ёмкость СНЭ, так как этот показатель

гибридного ЭТК напрямую зависит от генерации ВЭУ и возможности отказа от нагруженного резерва ДГУ за счет СНЭ. Среди параметров надежности оборудования аналогично графику на рисунке 3.1 наибольшее влияние имеют параметры надежности ВЭУ.

На рисунке 3.3 представлены результаты оценки чувствительности наработки ДГУ, выраженной в количестве моточасов. На количество моточасов в большей степени влияет емкость СНЭ, при достаточном значении которой ДГУ работает без нагруженного резерва. Кроме того, значение номинальной мощности ДГУ определяет количество используемых в каждой итерации установок. При этом вариации параметров оборудования приводят к разбросу значений моточасов ДГУ от 307 до 1092 тыс. мч.

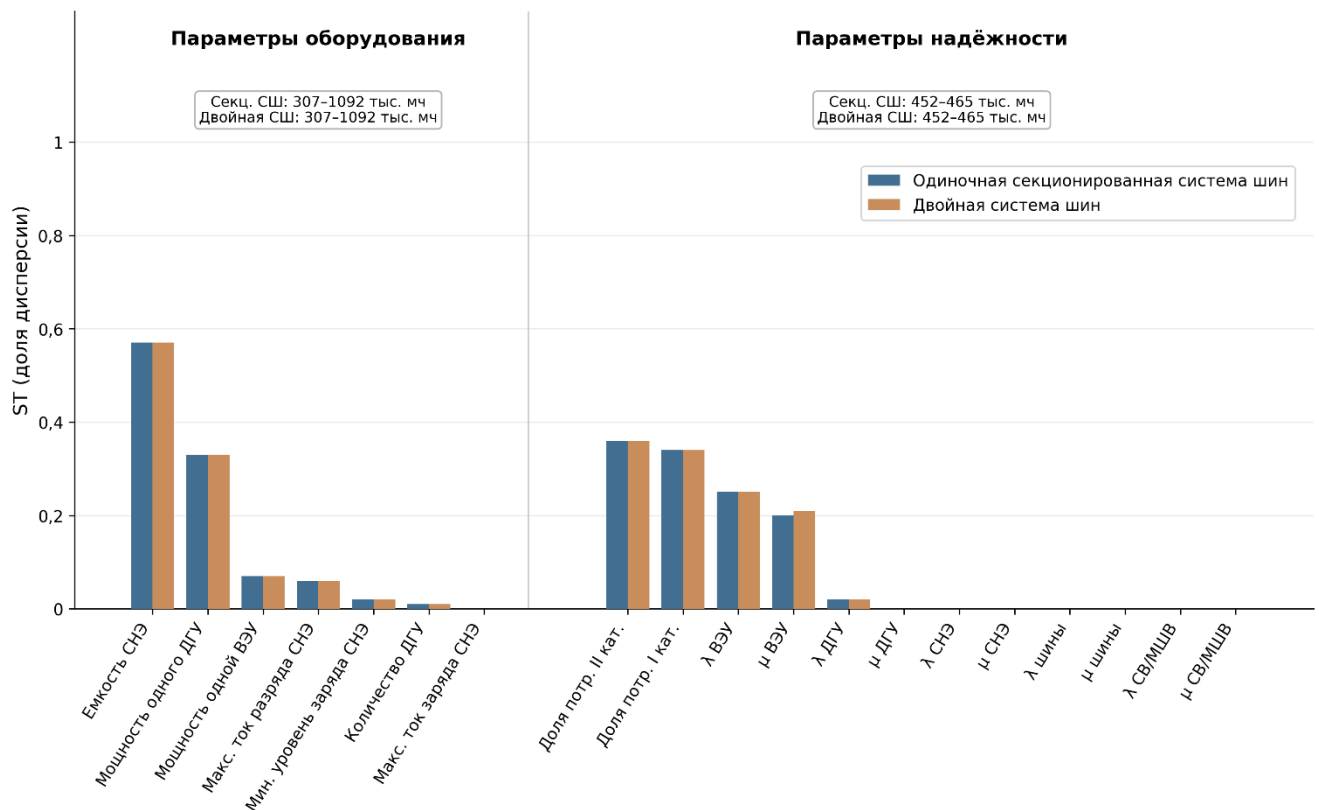


Рисунок 3.3 – Результаты глобального анализа чувствительности моточасов ДГУ (составлено автором)

Среди параметров надежности наибольший вклад в дисперсию количества моточасов соответствует долям потребителей I и II категорий надежности электроснабжения и параметрам надежности ВЭУ. Это объясняется тем, что при изменении структуры нагрузки на шине/секции и доступности ВЭУ значительно

изменяется требуемое для электроснабжения потребителей количество ДГУ. При этом параметры надежности оборудования не приводят к значительному разбросу значений расхода топлива и моточасов ДГУ. Для обеих схем РУ значения полных индексов чувствительности совпадают как для расхода топлива, так и для моточасов ДГУ, так как указанные показатели гибридного ЭТК определяются параметрами оборудования и структурой нагрузки, а не выбранной схемой РУ.

На рисунке 3.4 представлены результаты оценки чувствительности показателя LOLP. Среди параметров оборудования наибольшее влияние оказывают количество и мощность одной ДГУ, поскольку вероятность потери нагрузки в первую очередь зависит от наличия достаточного объема гарантированной мощности. Вариации указанных параметров обуславливают изменение вероятности потери нагрузки на три–четыре порядка. Среди параметров надежности для секционированной системы шин доминирующим является интенсивность отказов шины, так как отказ секции приводит к ограничению электроснабжения потребителей III категории (при ее наличии). В двойной системе шин возможен перенос потребителей не только I и II категорий надёжности электроснабжения, но и III, из-за чего влияние интенсивности отказов на дисперсию LOLP ниже. Для двойной системы шин наибольшее влияние на дисперсию LOLP оказывает интенсивность отказов СНЭ, поскольку после отказов шины и переноса всех потребителей на рабочую шину, вероятность потери нагрузки определяется способностью генерирующего оборудования обеспечить нагрузку. При отказе СНЭ уменьшается доступный резерв мощности.

При отказе секции в секционированной системе шин длительность недоотпуска электроэнергии не зависит от соотношения потребителей I и II категорий надежности электроснабжения, за исключением сценариев, в которых отсутствуют потребители III категории. В связи с этим доли потребителей I и II категорий надежности электроснабжения не оказывают влияния на дисперсию LOLP для секционированной системы шин.

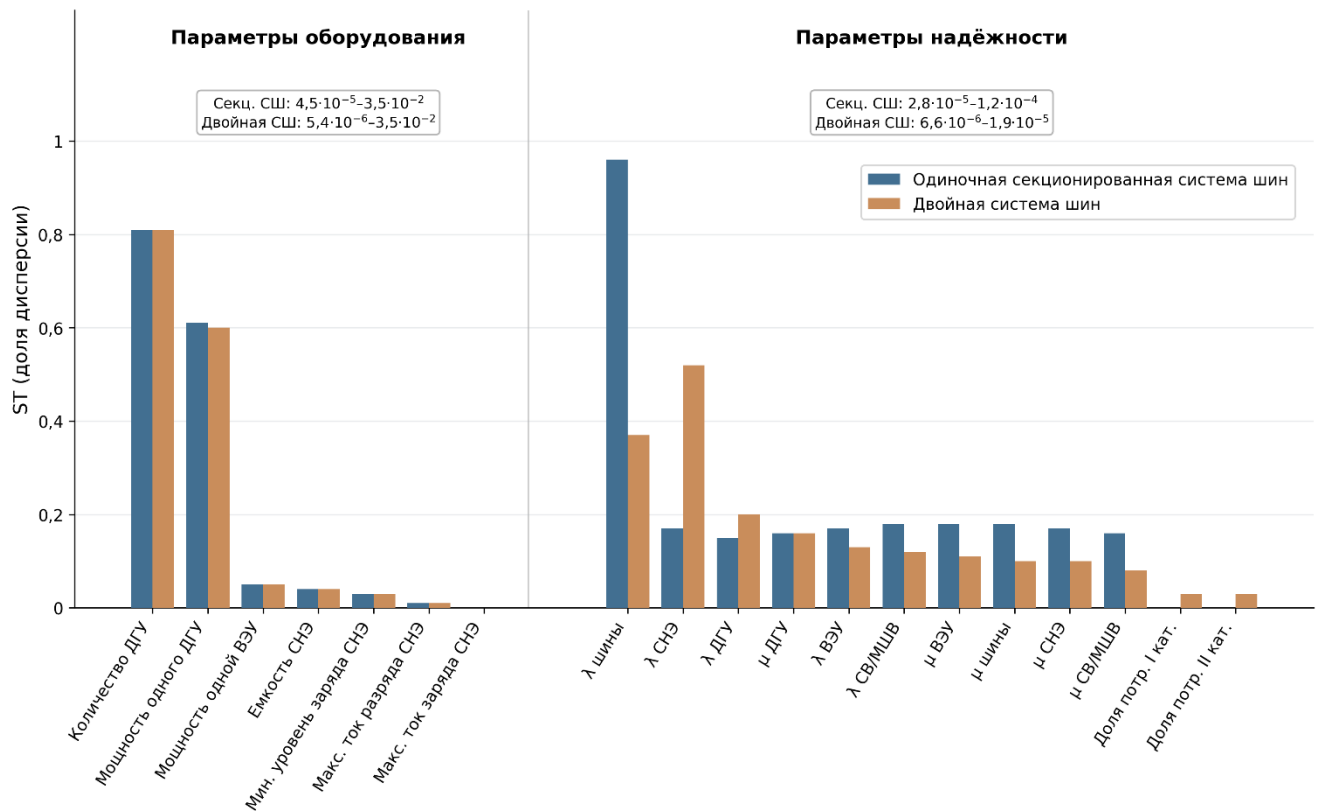


Рисунок 3.4 – Результаты глобального анализа чувствительности *LOLP*
(составлено автором)

На рисунке 3.5 приведены результаты оценки чувствительности показателя LPSP. Аналогично графику для LOLP на рисунке 3.4 среди параметров оборудования наибольшее влияние оказывают количество и мощность одной ДГУ. Однако на дисперсию LPSP интенсивность отказа шины оказывает большее влияние для двойной системы шин, чем для секционированной. Это связано с тем, что дефицит мощности в секционированной схеме может возникать не только при отказе шины, но и при нехватке доступных генерирующих мощностей. В двойной системе шин потеря электроснабжения возникает реже и в основном связана с отказом шины в сочетании с дополнительным неблагоприятным событием, например, отказом элемента генерирующего оборудования или недостатком доступной резервной мощности. Поэтому изменение интенсивности отказов шины формирует большую долю дисперсии LPSP.

Для двойной системы шин характерны более узкие диапазоны изменения LOLP и LPSP при меньших минимальных значениях данных показателей гибридного ЭТК по сравнению с секционированной системой шин.

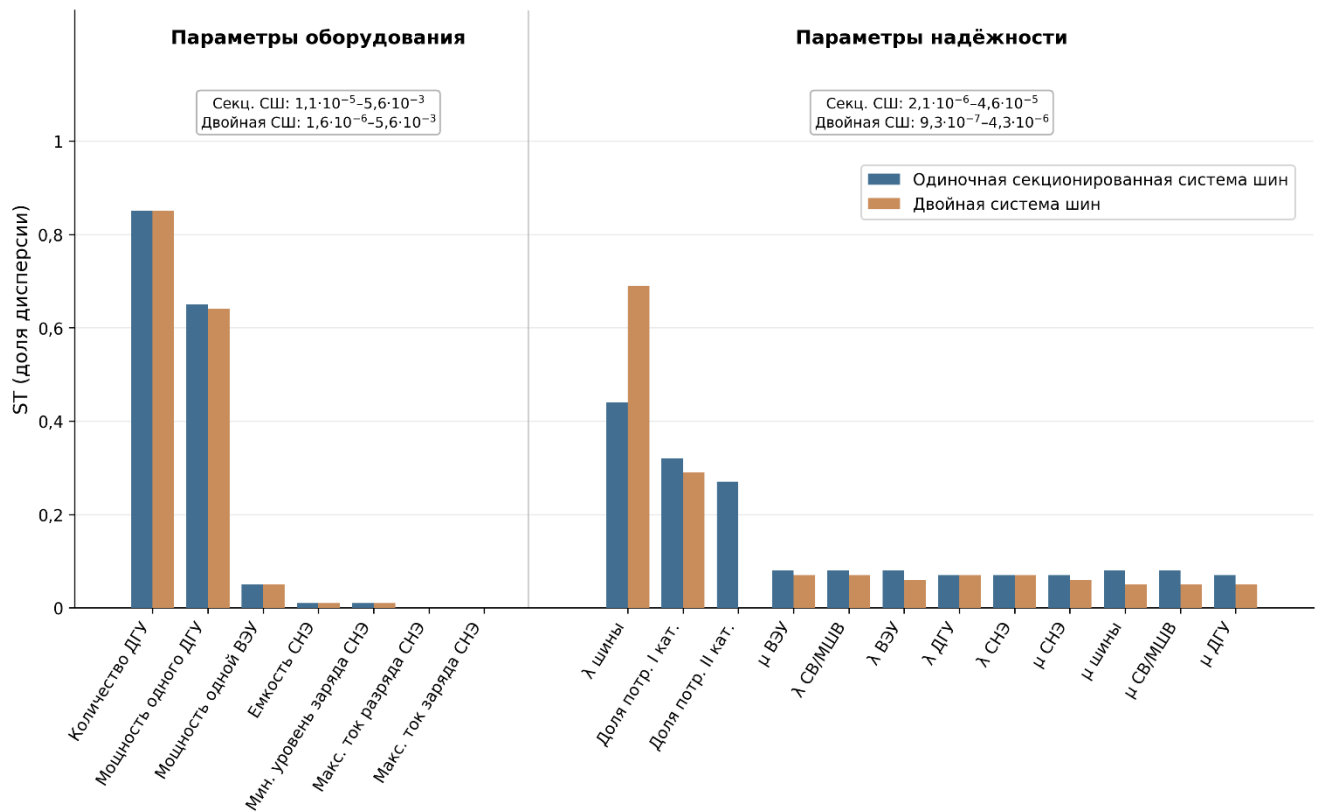


Рисунок 3.5 – Результаты глобального анализа чувствительности *LPSP*

(составлено автором)

При этом влияние схемы РУ заметно именно для показателей надежности оборудования гибридного ЭТК, тогда как для экономических и технических показателей оборудования различия между секционированной и двойной системой шин незначительны. Значения LCOE в основном определяются расходом дизельного топлива и его стоимостью, а также параметрами, косвенно влияющими на него (установленная мощность ВЭУ и емкость СНЭ, показатели надежности ВЭУ).

3.2 Выбор количества и номинальной мощности ДГУ

По результатам глобального анализа чувствительности сделан вывод о том, что при проектировании гибридного ЭТК первоначально необходимо определиться с количеством и номинальной мощностью ДГУ, так как эти параметры оказывают наибольшее влияние на оцениваемые показатели ЭТК.

Для обоснования количества ДГУ проведено моделирование при вариации количества ДГУ (6, 8 и 10 агрегатов) и суммарной установленной мощности ДГУ от 100 до 200% относительно расчетной нагрузки для установленной мощности

ВЭУ 100, 200 и 300%. Остальные параметры, используемые при моделировании приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения параметров моделирования гибридного ЭТК (по данным автора)

Параметр	Минимальное значение
Доля потребителей I категории	0,25
Доля потребителей. II категории	0,25
λ ВЭУ, год ⁻¹	1,94
λ ДГУ, год ⁻¹	4,75
λ СНЭ, год ⁻¹	0,325
λ шины, год ⁻¹	0,016
λ СВ/МШВ, год ⁻¹	0,05
μ ВЭУ, год ⁻¹	194,67
μ ДГУ, год ⁻¹	178,78
μ СНЭ, год ⁻¹	243,3
μ шины, год ⁻¹	730
μ СВ/МШВ, год ⁻¹	876
Емкость СНЭ, %	50
Максимальный ток заряда СНЭ, С	0,6
Максимальный ток разряда СНЭ, С	2
Допустимая глубина разряда СНЭ	0,6
Ставка дисконтирования	0,08
Базовая стоимость РУ, руб.	5 000 000
Стоимость ДГУ, руб./кВт	60 000
Обслуживание ДГУ, руб./кВт/тыс. мч.	5 000
Стоимость топлива, руб./тонна	90 000
Стоимость ВЭУ, руб./кВт	200 000
Обслуживание ВЭУ, руб./кВт/год	4 000
Стоимость СНЭ, руб./кВт·ч	45 000
Обслуживание СНЭ, руб./кВт·ч/год	1 125
Ущерб за недоотпуск III категории, руб./кВт·ч	200

На рисунках 3.6–3.10 приведены зависимости показателей гибридного ЭТК от количества и установленной мощности ДГУ для секционированной системы шин, поскольку для двойной системы шин характер влияния параметров аналогичен, что подтверждается результатами глобального анализа чувствительности.

На рисунке 3.6 приведен график влияния количества ДГУ на расход топлива. При увеличении установленной мощности ВЭУ расход топлива снижается за счет роста генерации ВЭУ в энергобалансе гибридного ЭТК. При одинаковой установленной мощности ДГУ меньшему количеству установок соответствует меньший расход топлива (максимальная разница составляет 6%). Это обусловлено

тем, что ДГУ большей номинальной мощности имеет меньший удельный расход топлива при сопоставимом уровне загрузки.

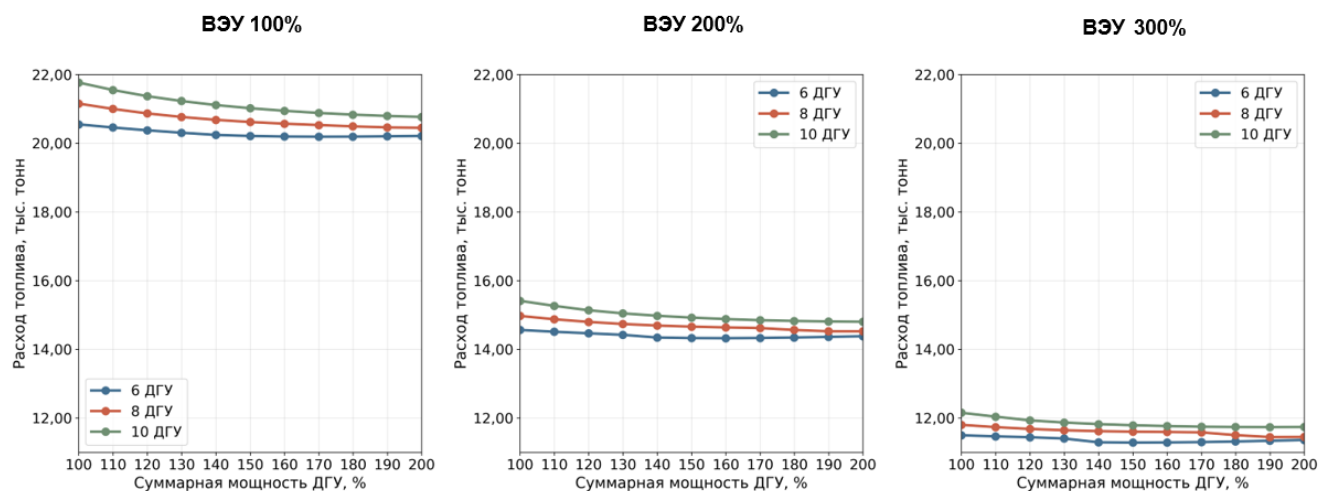


Рисунок 3.6 – Влияния количества ДГУ на расход топлива (составлено автором)

На рисунке 3.7 приведен график влияния количества ДГУ на их износ. Увеличение мощности ВЭУ оказывает на количество моточасов ДГУ влияние, аналогичное влиянию на расход топлива. С ростом установленной мощности ДГУ количество моточасов снижается, так как требуется меньшее количество установок для обеспечения нагрузки.

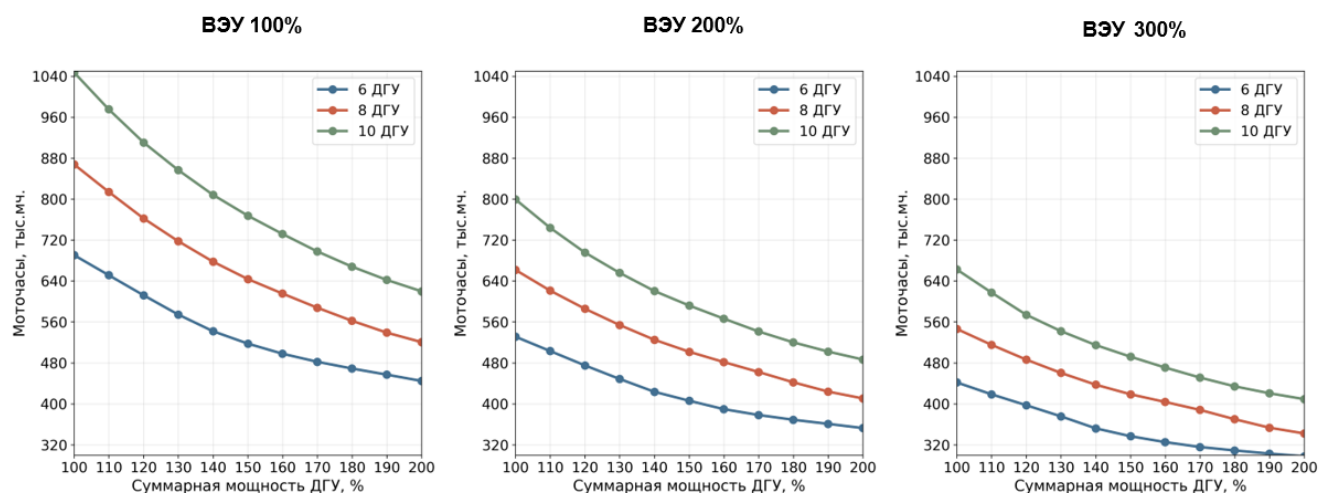


Рисунок 3.7 – Влияния количества ДГУ на количество моточасов (составлено автором)

На рисунке 3.8 приведен график влияния количества ДГУ на LCOE. Область наименьших значений LCOE соответствует суммарно установленной мощности ДГУ в диапазоне 100–130% относительно расчетной нагрузки.

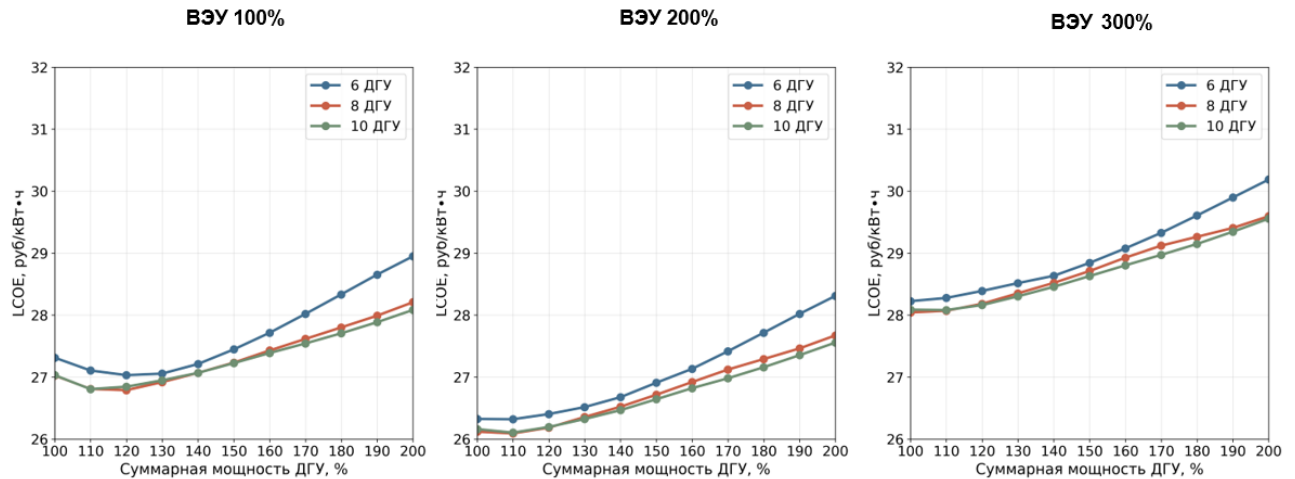


Рисунок 3.8 – Влияния количества ДГУ на LCOE (составлено автором)

Увеличение установленной мощности ВЭУ со 100 до 200% приводит к снижению LCOE на 2–3% за счет снижения расхода топлива и моточасов. Дальнейшее увеличение мощности ВЭУ приводит к росту LCOE, так как дополнительная мощность не обеспечивает снижения расхода топлива сопоставимого с капитальными и эксплуатационными затратами на ее установку. С ростом установленной мощности ДГУ выше 130% относительно расчетной нагрузки увеличивается значение LCOE, так как при росте капитальных затрат не достигается существенного снижения недоотпуска энергии.

На рисунках 3.9–3.10 приведены графики влияния количества ДГУ на LOLP и LPSP.

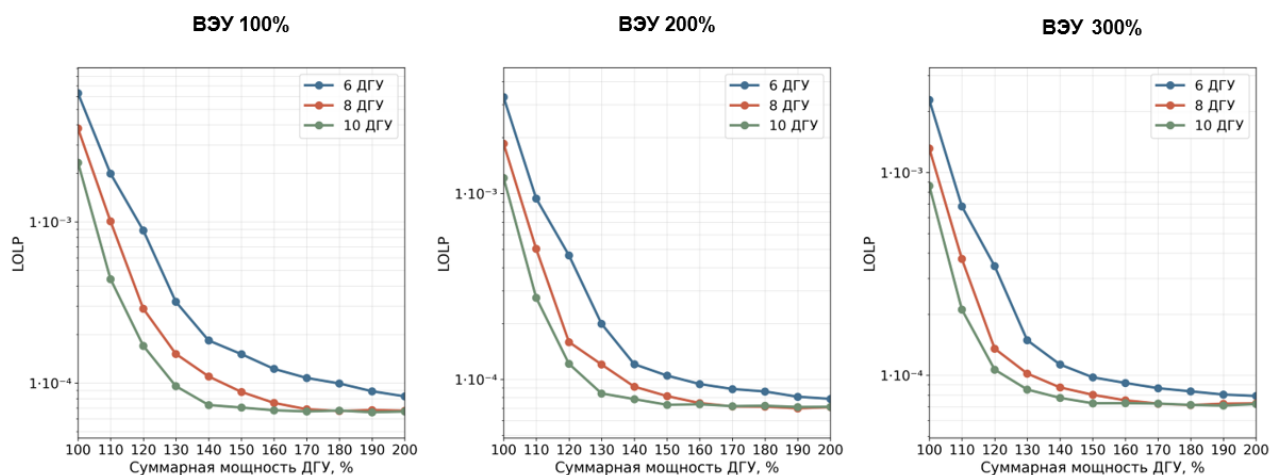


Рисунок 3.9 – Влияния количества ДГУ на LOLP (составлено автором)

Увеличение установленной мощности ДГУ приводит к снижению LOLP и LPSP.

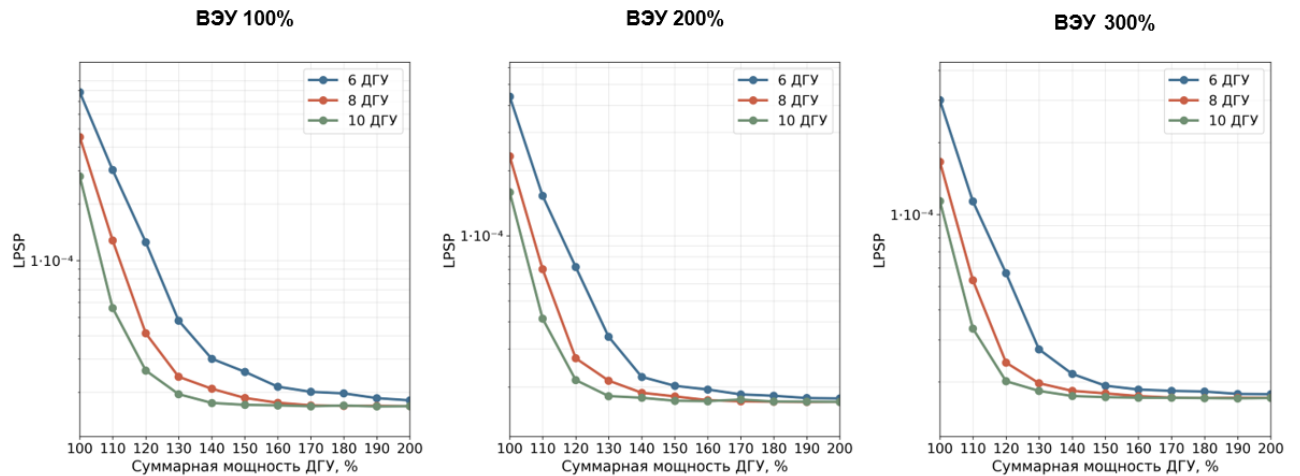


Рисунок 3.10 – Влияния количества ДГУ на LPSP (составлено автором)

Оси значений показателей надежности гибридного ЭТК представлены в логарифмическом масштабе, поэтому визуальные различия между вариантами выглядят значительными, однако абсолютные значения длительности недоотпуска и объема недоотпущенной энергии малы и не существенны в масштабе 20 лет.

Поскольку вариант с 6 ДГУ характеризуется наихудшими показателями надежности, а различие показателей LOLP и LPSP для вариантов с 8 и 10 ДГУ является несущественным, в работе принято количество ДГУ, равное 8. При этом вариант с 8 ДГУ обеспечивает меньшие значения расхода дизельного топлива и моточасов по сравнению с вариантом с 10 ДГУ, что приводит к меньшему количеству ТО и ремонтов. Номинальная мощность одной ДГУ принята равной 200 кВт, поскольку данное значение входит в диапазон мощностей, соответствующих минимальным значениям LCOE, а также соответствует типовым промышленно выпускаемым дизель-генераторным установкам.

3.3 Распределение потребителей поселения по категориям надежности электроснабжения

Проведено имитационное моделирование работы гибридного ЭТК при изменении распределения потребителей поселения по категориям надежности электроснабжения. Доли потребителей I и II категории изменялись с шагом 0,1, а доля потребителей III категории определялась как остаточная часть нагрузки.

Моделирование проведено для 8 ДГУ мощностью 200 кВт и СНЭ емкостью 50% относительно расчётной нагрузки, приведённой к часовому интервалу, и минимальным уровнем заряда СНЭ равным 0,6.

На рисунке 3.11 представлены графики зависимости LCOE от распределения потребителей по категориям электроснабжения для одиночной секционированной и двойной систем шин. Значения LCOE находятся в диапазоне 26,21–26,26 руб./кВт·ч, что свидетельствует о незначительном влиянии распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения. Небольшой рост LCOE при увеличении долей потребителей I и II категорий связан с увеличением объема нагрузки, сохраняемой при аварийных режимах, что приводит к незначительному росту расхода топлива и моточасов ДГУ. Значение нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) одинаково для двойной и секционированной систем шин.

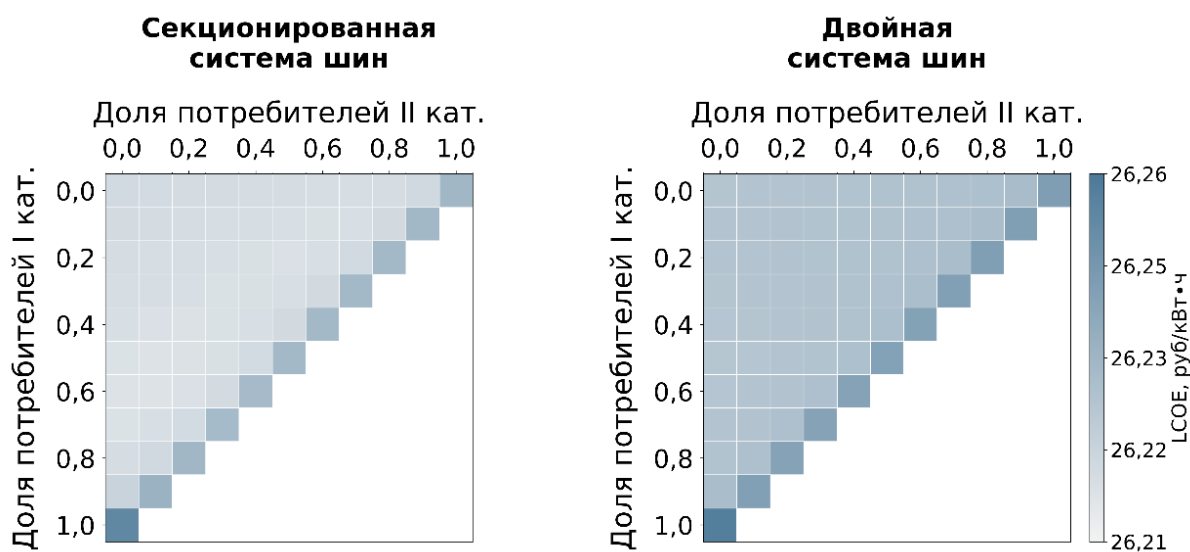


Рисунок 3.11 – Влияние распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения на LCOE (составлено автором)

Поскольку основное отличие рассматриваемых схем РУ заключается в аварийной логике перераспределения нагрузки между шинами/секциями, далее рассматривается влияние распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения на показатели надежности гибридного ЭТК.

На рисунке 3.12 представлены зависимости LOLP от долей потребителей I и II категорий. Двойной системе шин соответствуют меньшие значения LOLP,

которые не зависят от распределения потребителей по категориям, так как вся нагрузка будет перенесена с отказавшей шины на рабочую. В секционированной системе шин для того, чтобы добиться схожего результата необходимо отсутствие потребителей III категории надежности. В остальных случаях в секционированной системе шин распределение потребителей по категориям также не оказывает ощутимого влияния. При этом даже при 100% потребителей I категории двойная система шин имеет меньшее значение LOLP, так как помимо потребителей в аварийных сценариях возможен перенос генерации между шинами.

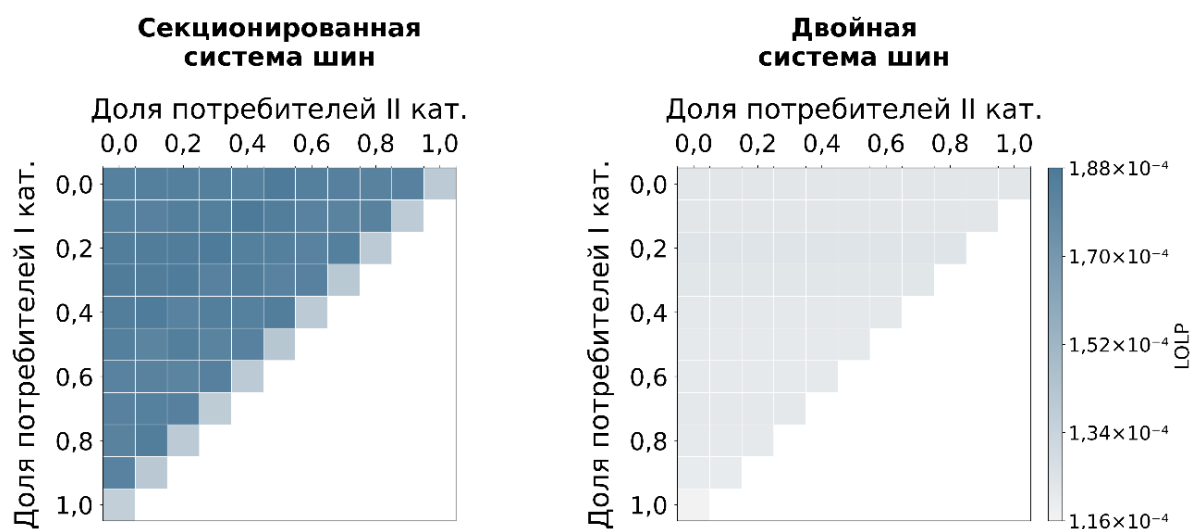


Рисунок 3.12 – Влияние распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения на LOLP (составлено автором)

На рисунке 3.13 представлены зависимости LPSP от долей потребителей I и II категорий надежности электроснабжения. Аналогично LOLP для двойной системы шин характерны меньшие значения LPSP, чем для секционированной системы шин. Распределение по категориям также не оказывает существенного влияния на LPSP, ширина диапазона изменения для двойной шины эквивалентна 400 кВт·ч за 20 лет эксплуатации гибридного ЭТК. В секционированной системе шин повышение долей потребителей I и II категории приводит к снижению LPSP.

Результаты подтверждают оценку чувствительности, проведенную ранее, а также демонстрируют превосходство двойной системы шин по показателям надежности гибридного ЭТК. Установлено, что распределение потребителей по категориям надёжности электроснабжении не оказывает существенного влияния на нормированную стоимость электроэнергии вне зависимости от схемы РУ.

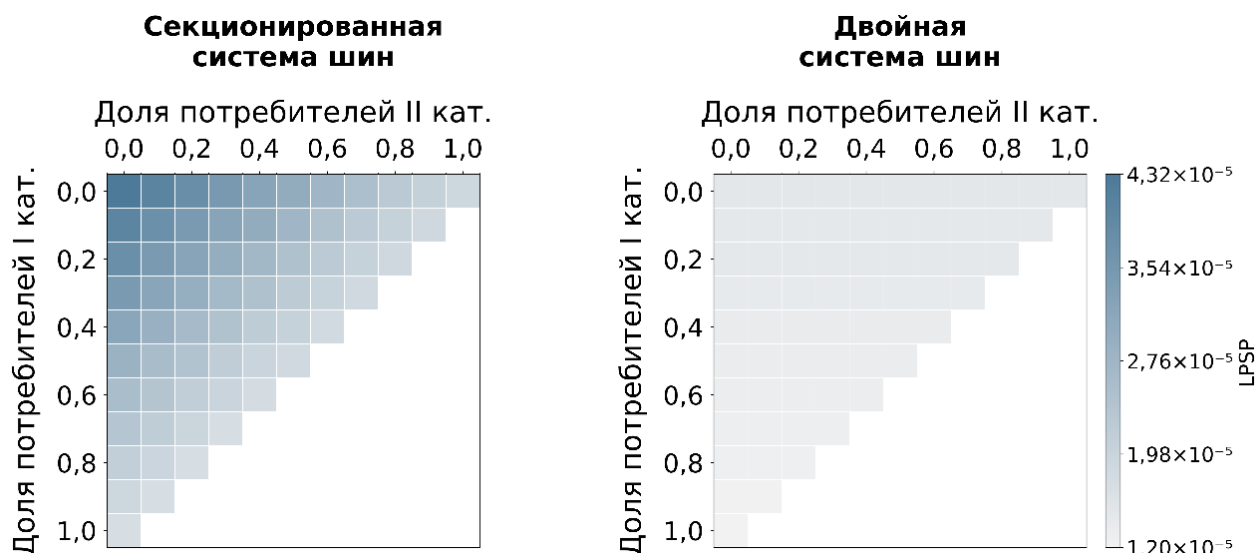


Рисунок 3.13 – Влияние распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения LPSP (составлено автором)

Для дальнейших расчетов приняты доли потребителей I и II категорий надежности электроснабжения, равные 10 и 40% соответственно. Указанное распределение соответствует структуре нагрузки автономного населенного пункта, в которой основную часть составляют потребители III категории, а потребители I категории представлены ограниченным числом объектов. Принятые значения позволяют учитывать наличие потребителей всех категорий надежности электроснабжения и обеспечивают корректное сравнение различных схем РУ и режимов работы оборудования гибридного ЭТК.

3.4 Выбор и обоснование схемы распределительного устройства гибридного ЭТК

Сравнение схем РУ производится при вариации мощности ДГУ в диапазоне 180–300 кВт (100–180% относительно расчетной нагрузки), суммарной установленной мощности ВЭУ до 300% относительно расчетной нагрузки при значении емкости СНЭ, равном 50% относительно расчетной нагрузки, приведённой к часовому интервалу, и минимальным уровнем заряда равным 0,6.

На рисунке 3.14 представлены результаты сравнения РУ по нормированной стоимости электроэнергии (LCOE).

Оптимальной по минимуму LCOE является область значений мощности ВЭУ 75–150% и ДГУ 180–250 кВт. Наименьшее значение LCOE соответствует

мощности ВЭУ 100% и ДГУ 200 кВт. Как отмечалось ранее, увеличение установленной мощности ВЭУ больше 150% не приводит к соразмерному увеличению капитальных затрат снижению расхода топлива.

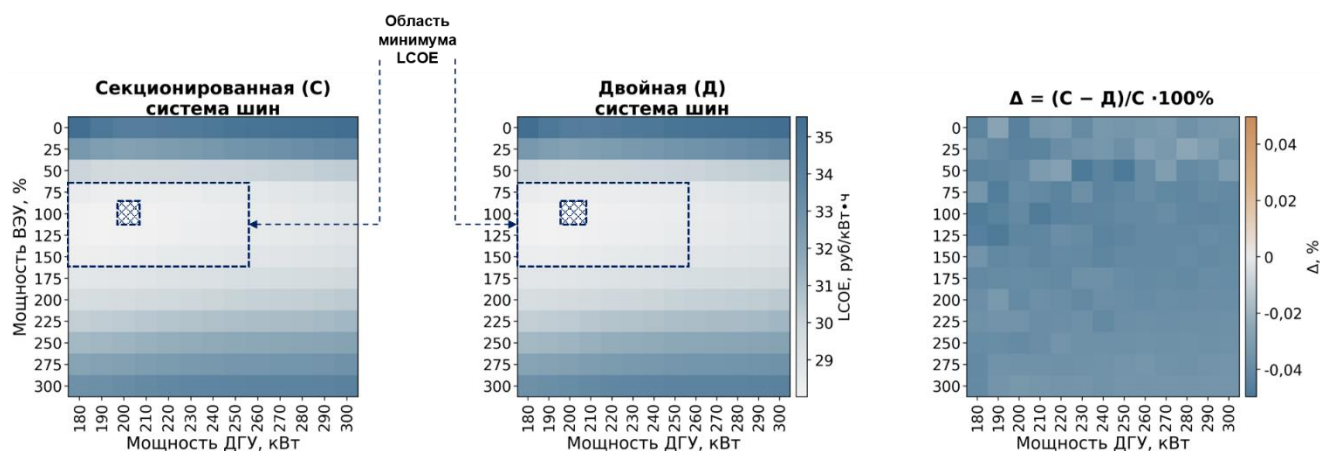


Рисунок 3.14 – Сравнение схем РУ по LCOE (составлено автором)

На рисунке 3.15 представлены результаты сравнения РУ по вероятности потери нагрузки (LOLP), электроснабжения (LPSP), максимальной длительности недоотпуска энергии и количеству недоотпусков. Двойной системе шин соответствуют меньшие значения LOLP, чем одиночной секционированной системе шин. В оптимальной по минимуму LCOE области, значение LOLP для двойной системы шин меньше на 5–32% относительно одиночной секционированной.

Двойная система шин также обеспечивает меньшие значения LPSP по сравнению с секционированной. В области минимума LCOE двойная система шин демонстрирует значения LPSP ниже на 3–17% относительно секционированной. Превосходство двойной системы шин по показателям LOLP и LPSP обусловлено аварийной логикой схемы РУ, при которой все потребители, включая потребителей III категории надежности электроснабжения, могут быть переведены на работоспособную шину при отказе одной из шин или возникновении дефицита мощности.

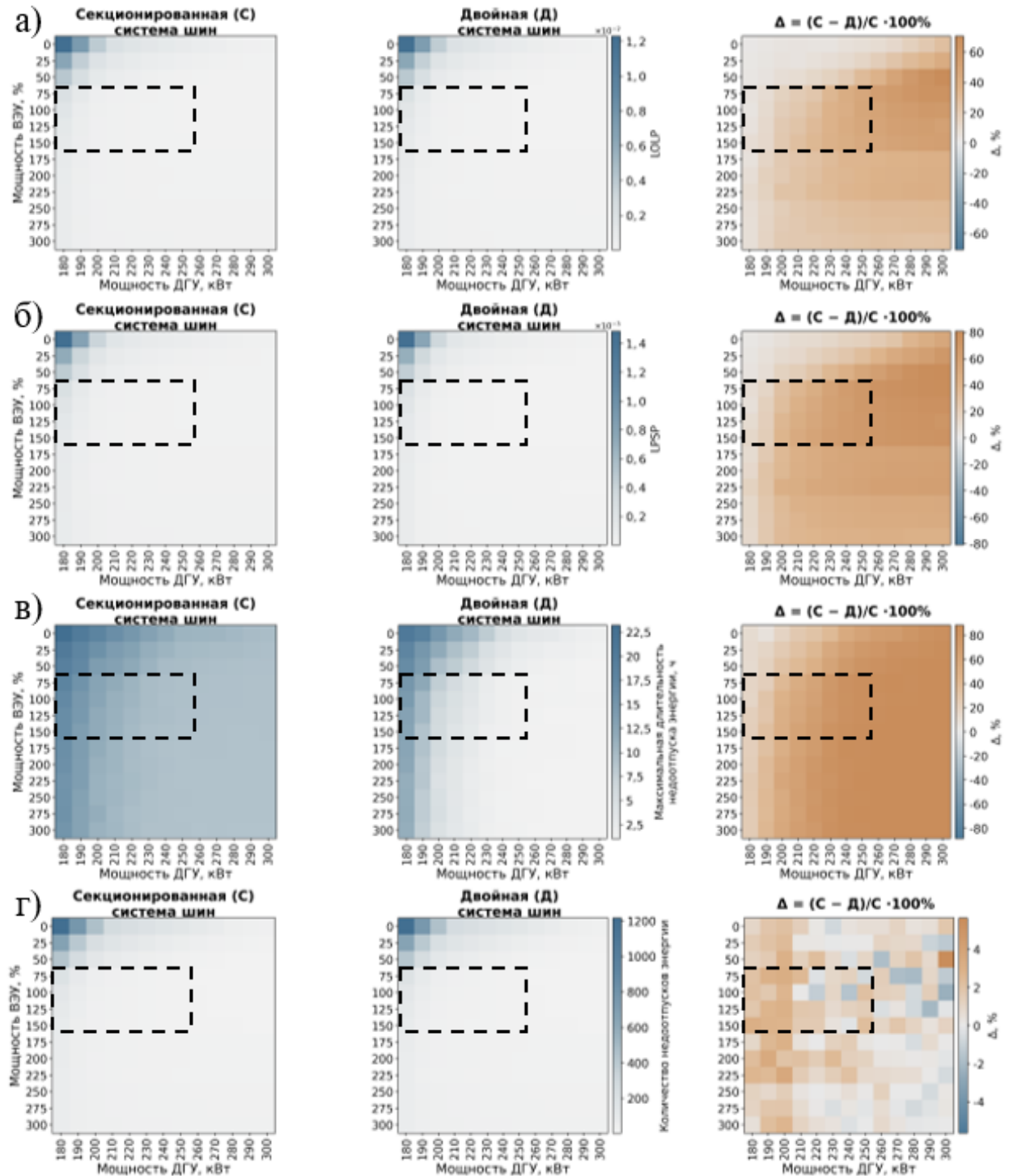


Рисунок 3.15 – Сравнение схем РУ по: а) LOLP, б) LPSP, в) максимальной длительности недоотпуска энергии, г) количеству недоотпусков (составлено автором)

Максимальная длительность недоотпуска для двойной системы шин также ниже относительно одиночной секционированной. При мощности ДГУ более 200 кВт дальнейшее увеличение мощности ДГУ и ВЭУ, а также изменение схемы РУ не оказывают существенного влияния на максимальную длительность

недоотпуска энергии. В данной области значений максимальная длительность недоотпуска определяется преимущественно отказами шин. В большинстве конфигураций гибридного ЭТК двойной системе шин характерно меньшее или равное количество недоотпусков энергии.

По результатам моделирования для дальнейших исследований выбрана двойная система шин, так как ей соответствуют меньшие значения LPSP, LOLP и максимальной длительности недоотпуска энергии. Снижение указанных показателей достигает 60, 40 и 75% соответственно относительно секционированной системы шин. Оптимальной по минимуму LCOE для гибридного ЭТК с принятыми значениями параметров СНЭ и долями потребителей I и II категорий надежности электроснабжения 10 и 40% соответственно является конфигурация 8 ДГУ по 200 кВт и ВЭУ 100% относительно расчетной нагрузки.

Превосходство двойной системы шин относительно одиночной секционированной системы шин наблюдается во всех режимах работы СНЭ. При этом оптимальные по минимуму LCOE значения мощности ВЭУ и ДГУ остаются неизменными. В таблице 3.3 приведены значения показателей гибридного ЭТК для оптимальных конфигураций параметров ДГУ и ВЭУ для двойной системы шин.

Таблица 3.3 – Значения показателей гибридного ЭТК для оптимального по LCOE набора ДГУ и ВЭУ (по данным автора)

Параметр	Без СНЭ	СНЭ $L_t=1$	СНЭ $L_t=0,6$
$LCOE$, руб./кВт·ч	29,5	28,3	28
$LOLP$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
$LPSP$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$
Недоотпуск энергии, кВт·ч	44512	8804	4371
Суммарная длительность недоотпуска, ч	545,5	96,3	52,4
Расход топлива, тыс. тонн	22,7	21,98	21,77
Моточасы, тыс. мч.	1105,7	915,4	855,7
Количество дефицитных событий	355,3	54,2	36,6
Максимальная длительность дефицита, ч	15,1	10,4	6,8

Применение СНЭ при $L_t=1$ позволяет значительно уменьшить объем и длительность недоотпуска энергии, а также уменьшить LCOE за счет снижения расхода топлива и количества моточасов ДГУ. Дополнительное снижение значений показателей гибридного ЭТК достигается за счет использования СНЭ при $L_t=0,6$.

Одинокная несекционированная система шин может применяться только при отсутствии потребителей I и II категории. При сравнении двойной и несекционированной систем шин для оптимальных по LCOE конфигураций параметров применение несекционированной позволяет достичь на 3% меньшего значения LCOE, за счет сокращения количества моточасов ДГУ на 10% и меньшей стоимости РУ. При этом несекционированной системе шин соответствуют значительно большие значения LOLP и LPSP.

3.5 Выводы к главе 3

1. Проведена глобальная оценка чувствительности показателей гибридного ЭТК к изменению входных параметров оборудования комплекса. Установлено, что на показатели надежности гибридного ЭТК наибольшее влияние оказывает интенсивность отказов шины. Наибольший вклад в дисперсию нормированной себестоимости энергии вносят стоимость дизельного топлива, а также параметры прямо или косвенно влияющие на его расход. Среди параметров оборудования наибольшее значение на показатели надежности гибридного ЭТК оказывает номинальная мощность ДГУ.

2. Выполнено имитационное моделирование работы гибридного ЭТК при вариации параметров ДГУ, ВЭУ и СНЭ, а также при различных распределениях потребителей по категориям надёжности электроснабжения для одиночной секционированной и двойной систем шин.

3. Установлено, что распределение потребителей по категориям надёжности электроснабжения не оказывает существенного влияния на нормированную стоимость электроэнергии вне зависимости от схемы РУ гибридного ЭТК. При этом двойной системе шин соответствуют меньшие значения вероятностей потери электроснабжения и нагрузки во всех сценариях распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения.

4. Доказано, что применение двойной системы шин в качестве низковольтного РУ позволяет снизить вероятность потери электроснабжения и нагрузки относительно одиночной секционированной системы шин. В области

оптимальных по критерию минимума LCOE параметров гибридного ЭТК снижение LPSP и LOLP достигает 32 и 17% соответственно.

5. Доказано, что применение ВЭУ и СНЭ для автономного электроснабжения поселения позволило повысить энергоэффективность гибридного ЭТК за счет снижения расхода топлива на 35%, что привело к снижению LCOE с 33,71 до 28,08 руб./кВт·ч. При этом LOLP и LPSP снизились более чем на 90%.

ГЛАВА 4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА РАБОТЫ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

4.1 Резервный режим работы СНЭ

Под резервным режимом работы СНЭ понимается работа со значением минимального уровня заряда $L_t = 1$, при котором СНЭ выполняет функции гарантированного источника (позволяет избежать работы ДГУ в режиме нагруженного резерва) и применяется для обеспечения нагрузки на случаи отказа оборудования. Моделирование проводится для двойной системы шин с 8 ДГУ номинальной мощностью 200 кВт. Доли потребителей I и II категорий надежности электроснабжения приняты равными 10% и 40% соответственно.

Максимальный ток заряда СНЭ не оказывает существенного влияния на показатели гибридного ЭТК, что подтверждается оценкой чувствительности, представленной в Главе 3. Это объясняется тем, что в большинстве итераций величина заряда СНЭ определяется не предельной мощностью заряда, которая зависит от максимального тока заряда, а объемом избыточной генерации ВЭУ и текущим уровнем заряда СНЭ. При генерации ВЭУ, превышающей нагрузку, СНЭ успевает достичь максимального уровня заряда даже при малых значениях максимального тока заряда, особенно в случаях работы СНЭ в резервном режиме. По указанным причинам увеличение максимального тока заряда не оказывает существенного влияния на расход топлива ДГУ, и, как следствие, на нормированную себестоимость электроэнергии. Максимальный ток заряда принят равным 1С.

Более заметное влияние максимального тока заряда могло бы проявляться при уменьшении шага моделирования с учетом кратковременных изменений генерации ВЭУ и нагрузки в масштабе минут.

Максимальный ток разряда СНЭ является одним из наиболее важных параметров, увеличение которого позволяет использовать СНЭ меньшей установленной емкости для достижения аналогичного расхода топлива и моточасов.

На рисунках 4.1–4.2 представлены графики расхода дизельного топлива и моточасов ДГУ при вариации максимального тока разряда и емкости СНЭ.

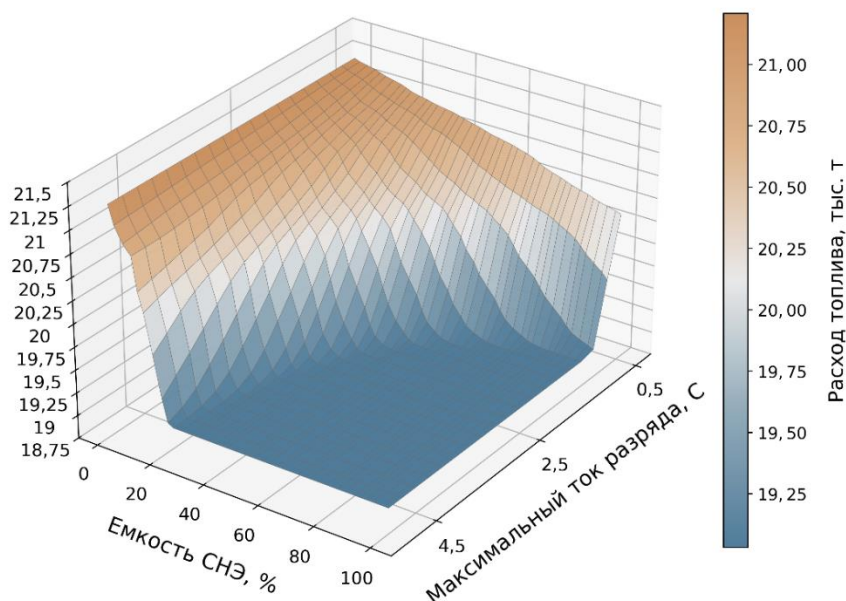


Рисунок 4.1 – Расход топлива при резервном режиме работы СНЭ
(составлено автором)

Снижение расхода топлива при работе СНЭ в резервном режиме обеспечивается за счет уменьшения необходимости работы ДГУ в нагруженном резерве.

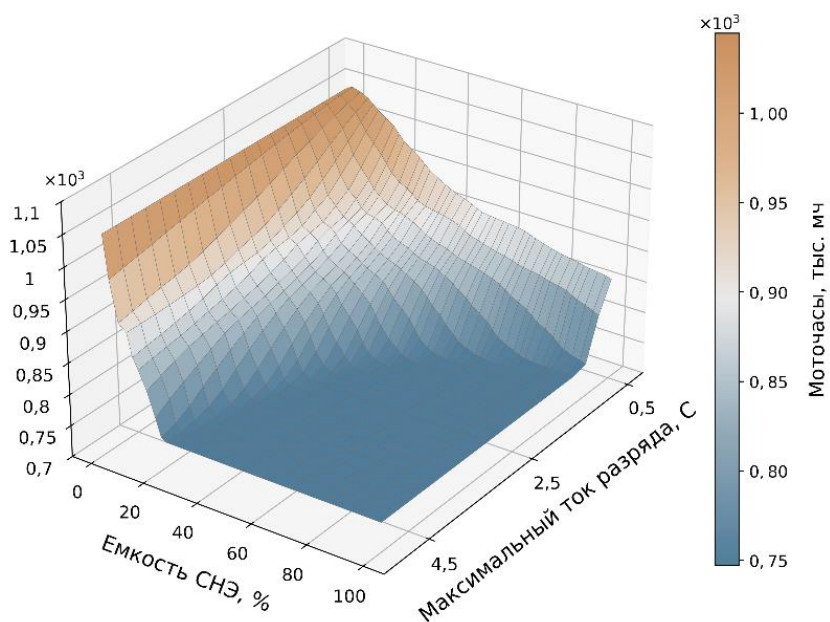


Рисунок 4.2 – Моточасы ДГУ при резервном режиме работы СНЭ
(составлено автором)

При определенных конфигурациях емкости СНЭ и максимального тока разряда достигается «плато» значений расхода дизельного топлива (19 тыс. т) и моточасов ДГУ (747 тыс. мч.).

Дальнейшее повышение емкости и/или максимального тока разряда СНЭ не приводит к дополнительному снижению расхода топлива и моточасов. На рисунке 4.3 представлен график нормированной себестоимости электроэнергии (LCOE) при вариации емкости и максимального тока разряда СНЭ.

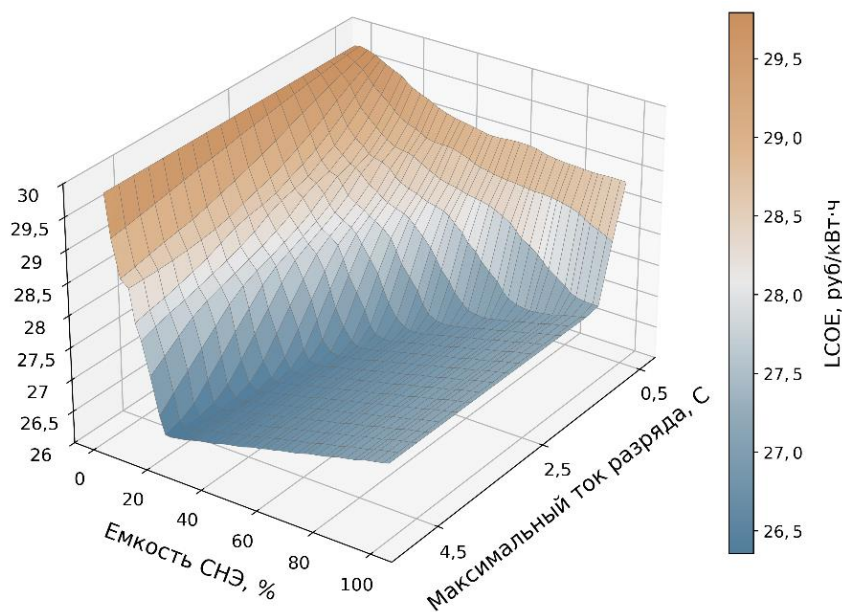


Рисунок 4.3 – LCOE при резервном режиме работы СНЭ (составлено автором)

Конфигурациям параметров, при которых достигается выход на «плато» расхода топлива и моточасов, соответствуют наименьшие значения нормированной стоимости электроэнергии (LCOE). Дальнейшее увеличение емкости приводит к росту капитальных и эксплуатационных затрат. Увеличение максимального тока разряда позволяет устанавливать СНЭ меньшей емкости и приводит к снижению LCOE.

За счет уменьшения времени работы ДГУ в режиме нагруженного резерва снижается фактическая наработка установок, что способствует повышению их ресурса и уменьшению количества отказов ДГУ, что следует из графика на рисунке 4.4. При оценке корреляционной связи между показателями балансовой надежности и количеством отказов ДГУ получены значения коэффициента

Пирсона, равные 0,904 для LPSP и LOLP, что свидетельствует о сильной положительной связи между указанными показателями гибридного ЭТК.

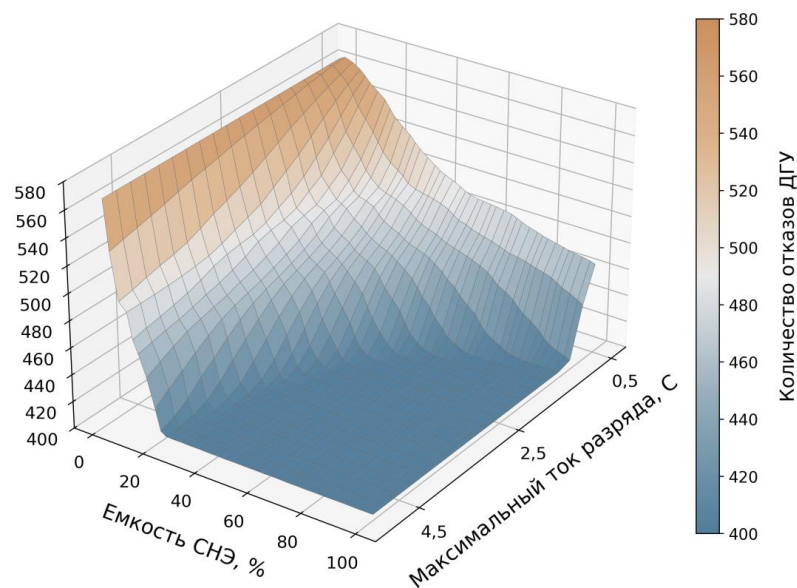


Рисунок 4.4 – Количество отказов ДГУ при резервном режиме работы СНЭ
(составлено автором)

На рисунках 4.5–4.6 представлены графики вероятностей потери электроснабжения (LPSP) и нагрузки (LOLP) при вариации емкости и максимального тока разряда СНЭ.

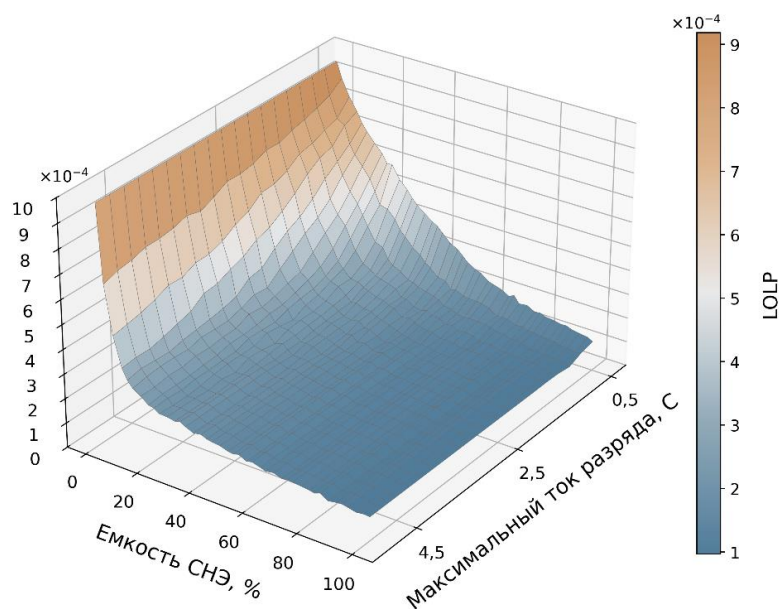


Рисунок 4.5 – LOLP при резервном режиме работы СНЭ (составлено автором)

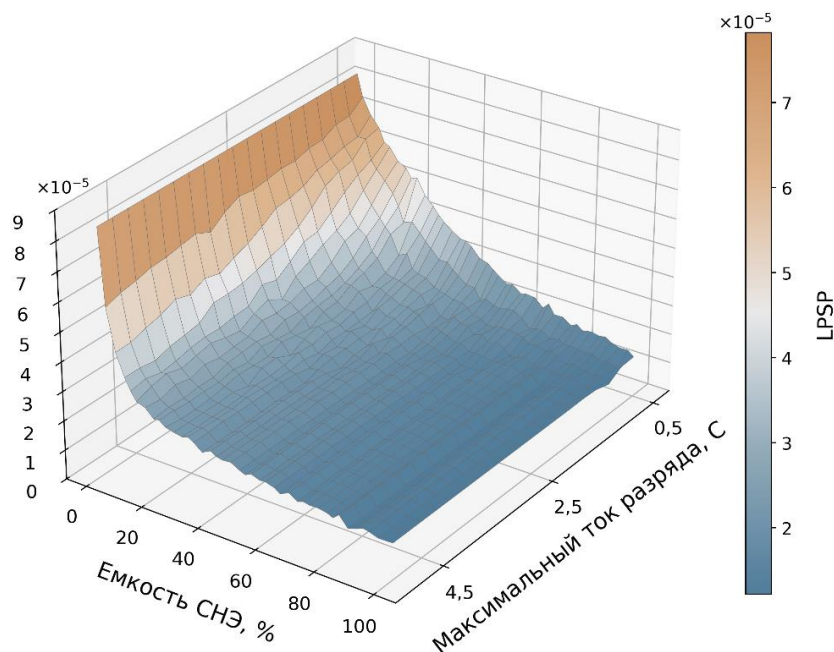


Рисунок 4.6 – LPSP при резервном режиме работы СНЭ (составлено автором)

Зависимости LPSP и LOLP от емкости СНЭ и максимального тока разряда имеют схожий характер, при значениях емкости СНЭ менее 30–50% относительно расчетной нагрузки, приведенной к часовому интервалу, увеличение емкости и максимального тока разряда СНЭ обеспечивает значительное снижение показателей надежности. Дальнейшее увеличение емкости СНЭ приводит к снижению значения LOLP и LPSP, но эффект становится менее выраженным, а влияние увеличения максимального тока разряда становится несущественным.

Проведена оценка корреляционной связи между показателями надежности LOLP и LPSP при вариации емкости и максимального тока разряда СНЭ. Значение коэффициента корреляции Пирсона составило $r = 0,998$, что свидетельствует о сильной положительной связи между ними.

Максимальная продолжительность дефицита мощности практически не зависит от максимального тока разряда и в основном определяется значением емкости СНЭ, что видно из графика на рисунке 4.7.

Таким образом, в резервном режиме работы СНЭ увеличение максимального тока разряда и емкости эффективно до достижения «плато» по расходу топлива, моточасам и отказам ДГУ. Дальнейшее увеличение параметров приводит к

повышению нормированной стоимости электроэнергии и незначительному снижению значений показателей балансовой надежности (LOLP и LPSP).

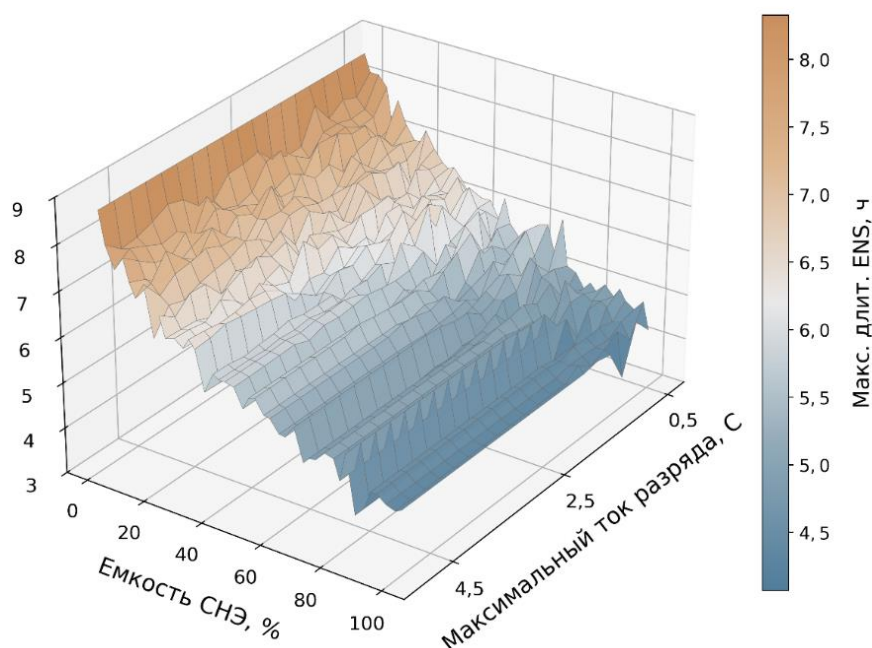


Рисунок 4.7 – Максимальная длительность недоотпуска при резервном режиме работы СНЭ (составлено автором)

4.2 Режим замещения генерации ДГУ

Резервный режим работы СНЭ не позволяет использовать весь потенциал накопителя для снижения расхода топлива и повышения энергоэффективности гибридного ЭТК. В работе рассматривается режим замещения генерации ДГУ за счет СНЭ (значение минимального уровня заряда L_t меньше 1), при котором накопленная энергия используется для сокращения доли дизельной генерации в общем энергобалансе гибридного ЭТК.

На рисунках 4.8–4.13 представлены графики зависимости показателей гибридного ЭТК при вариации емкости и минимального уровня заряда СНЭ. Максимальные токи заряда и разряда приняты равными 1С и 2С соответственно.

На рисунке 4.8 представлен график зависимости расхода топлива от емкости и минимального уровня заряда СНЭ.

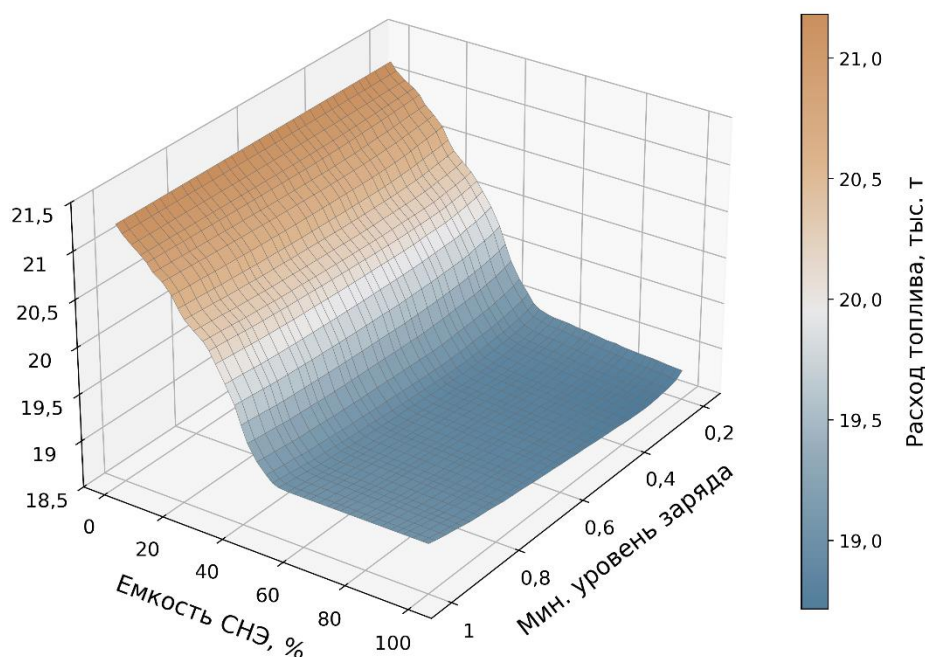


Рисунок 4.8 – Расход топлива в режиме замещения генерации ДГУ
(составлено автором)

Увеличение емкости СНЭ приводит к снижению расхода топлива за счет уменьшения доли дизельной генерации и сокращения необходимости работы ДГУ в режиме нагруженного резерва.

Наиболее интенсивное снижение расхода топлива наблюдается при увеличении емкости СНЭ до 50–55% относительно часовой нагрузки, приведенной к часовому интервалу. Данная область соответствует минимальному значению LCOE при работе СНЭ в режиме резервирования. При достижении указанной емкости накопитель обеспечивает достаточный резерв энергии для отказа от использования нагруженного резерва ДГУ в большинстве режимов работы гибридного ЭТК. Дальнейшее увеличение емкости СНЭ приводит лишь к дополнительному снижению доли дизельной генерации, однако соответствующее уменьшение расхода топлива незначительно относительно отказа от нагруженного резерва.

Минимальный уровень заряда СНЭ также оказывает влияние на расход топлива. Полный разряд СНЭ до уровня 0,2 приводит к ситуациям, когда накопитель не способен обеспечить необходимый резерв мощности, при этом возрастает продолжительность работы ДГУ в режиме нагруженного резерва.

Минимальные значения расхода топлива соответствуют уровню заряда 25–35% в зависимости от установленной емкости СНЭ. В свою очередь снижение минимального уровня заряда до 0,9 позволяет уменьшить LCOE на 0,5% относительно резервного режима работы СНЭ, что подтверждает целесообразность использования СНЭ для замещения генерации ДГУ.

На рисунке 4.9 представлен график зависимости моточасов ДГУ от емкости и минимального уровня заряда СНЭ. Характер зависимости аналогичен зависимости расхода топлива. Минимальный уровень заряда СНЭ ниже 0,3 приводит к росту моточасов на 10%, снижение минимального уровня заряда с 1 до 0,9 позволяет снизить количество моточасов на 4%.

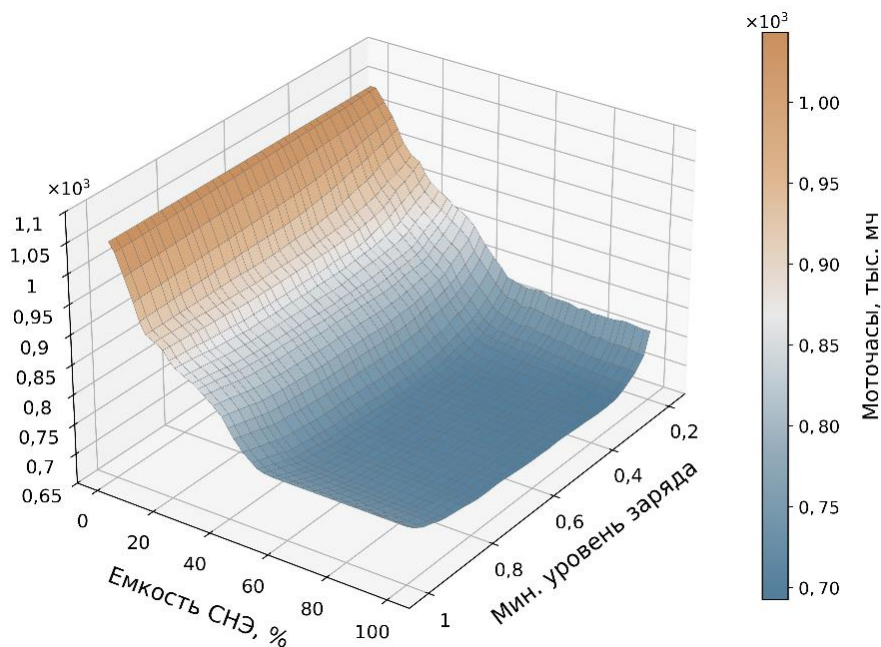


Рисунок 4.9 – Моточасы в режиме замещения генерации ДГУ
(составлено автором)

На рисунке 4.10 представлен график зависимости LCOE от емкости и минимального уровня заряда СНЭ. Минимальные значения LCOE достигаются при емкости СНЭ, равной 52,5% относительно расчётной нагрузки, приведённой к часовому интервалу, и минимальном уровне заряда 0,45. Снижение LCOE достигает 1,6% относительно работы СНЭ в резервном режиме.

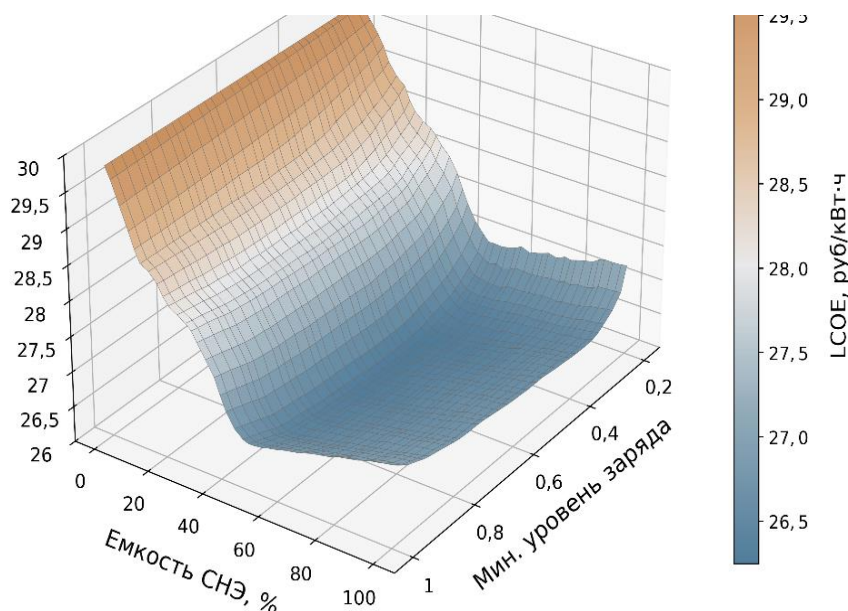


Рисунок 4.10 – LCOE в режиме замещения генерации ДГУ (составлено автором)

Оптимальные по минимуму LCOE значения емкости СНЭ в резервном режиме и режиме замещения дизельной генерации совпадают. Это обусловлено тем, что оптимальная емкость определяется в первую очередь возможностью отказа от нагруженного резерва ДГУ. Таким образом, выбор значения емкости можно осуществлять для СНЭ, работающей в резервном режиме, с последующим определением оптимального минимального уровня заряда.

На рисунках 4.11–4.12 приведены графики зависимости LOLP и LPSP от емкости и минимального уровня заряда СНЭ.

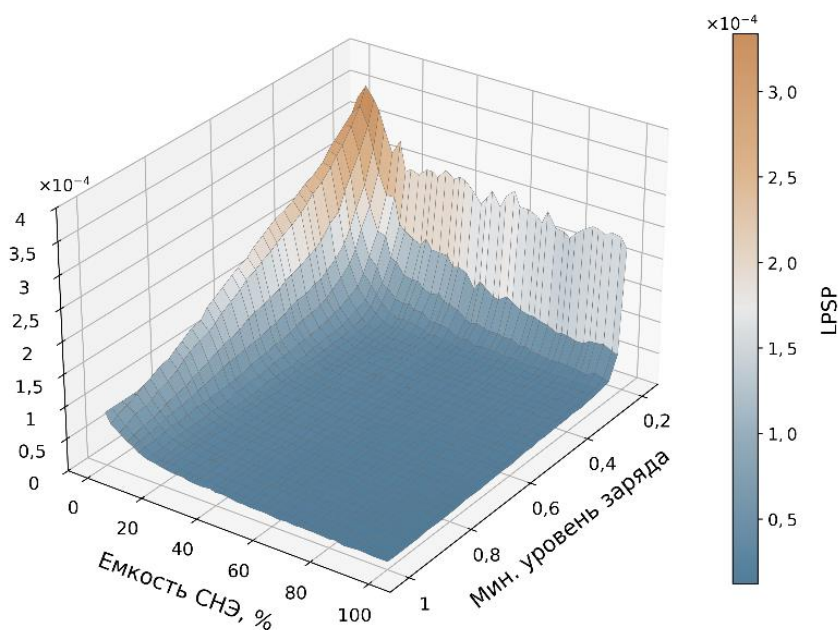


Рисунок 4.11 – LPSP в режиме замещения генерации ДГУ (составлено автором)

Снижение значений LPSP и LOLP наблюдается при увеличении емкости до 40–50% и минимального уровня заряда до 0,3–0,4, затем значения показателей балансовой надежности достигают плато. Снижение минимального уровня заряда ниже 0,3–0,4 приводит к критически низкому запасу энергии, который не позволяет обеспечить достаточного резервирования потребителей за счет СНЭ.

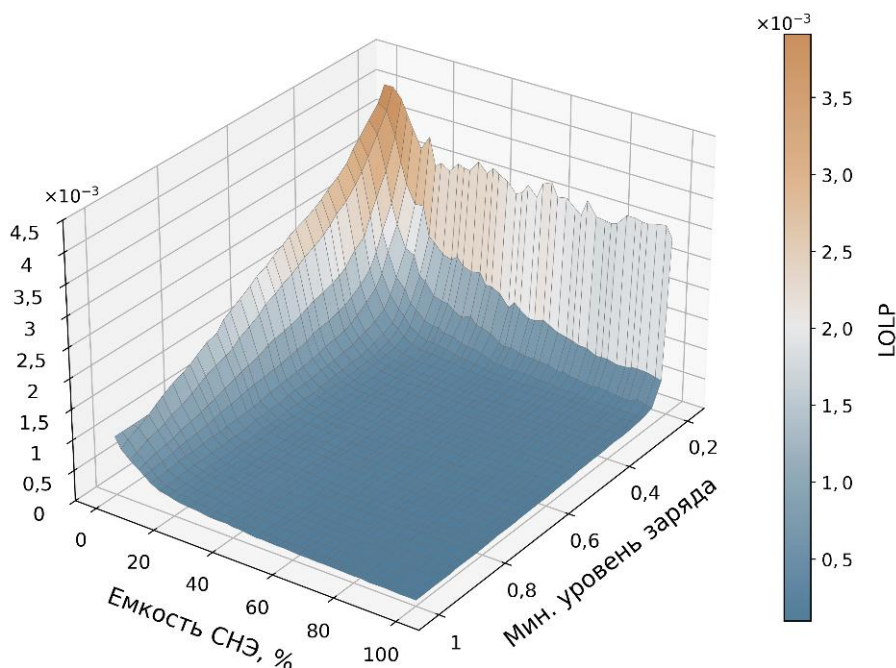


Рисунок 4.12 – LOLP в режиме замещения генерации ДГУ (составлено автором)

На рисунке 4.13 представлен график зависимости максимальной длительности недоотпуска от емкости и минимального уровня заряда СНЭ. Увеличение обоих параметров приводит к снижению максимальной длительности недоотпуска, поскольку обеспечивается большее количество энергии, доступной для резервирования, и, как следствие, увеличивается продолжительность обеспечения нагрузки при недоотпуске энергии за счет СНЭ.

Таким образом, применение СНЭ в режиме замещения генерации ДГУ позволяет дополнительно повысить экономическую эффективность на 1–2% за счет снижения расхода топлива и моточасов. При этом данный уровень не следует опускать ниже 0,3–0,4 в зависимости от установленной емкости СНЭ.

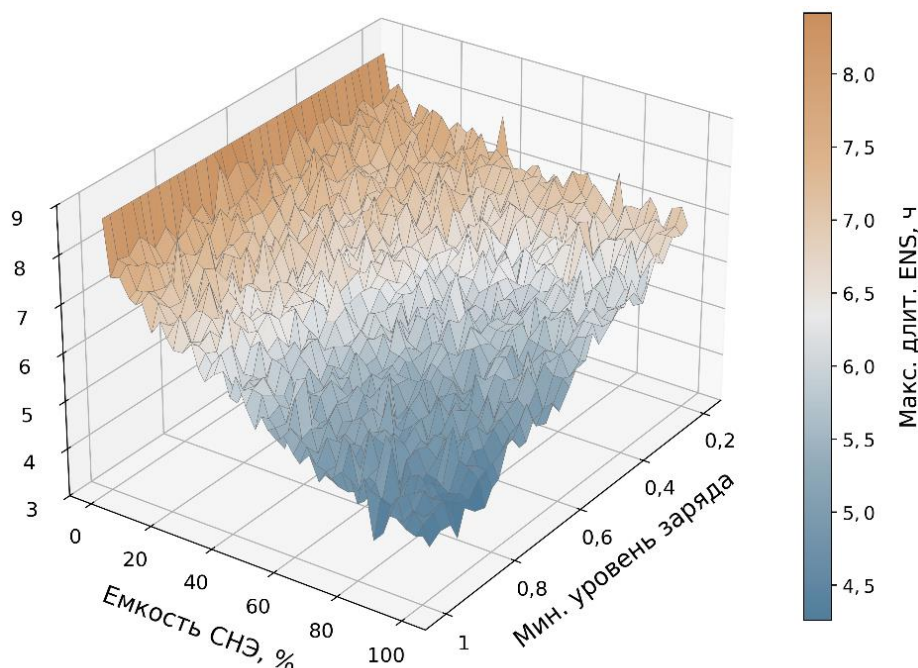


Рисунок 4.13 – Максимальная длительность недоотпуска в режиме замещения генерации ДГУ (составлено автором)

Для значений установленной мощности ВЭУ от 25 до 300% относительно расчетной нагрузки определены оптимальные по критерию минимума LCOE значения установленной емкости СНЭ с учетом фиксированного минимального уровня заряда, результаты приведены на рисунке 4.14. Оптимальный минимальный уровень заряда СНЭ также определяется по минимуму LCOE и находится в диапазоне 0,45–0,775 для различных значений емкости. Оптимизация выполнена для максимальных токов разряда 1–3С.

По мере увеличения мощности ВЭУ увеличивается оптимальное значение емкости и снижается минимальный уровень заряда СНЭ. В диапазоне 150–200% мощности ВЭУ достигается плато оптимальной по LCOE емкости, после чего дальнейшее увеличение ВЭУ практически не влияет на значение оптимальной емкости. Для меньших токов разряда оптимальными являются большие значения емкости СНЭ, а также меньшие значения минимального уровня заряда.

Области минимума LCOE соответствуют значения установленной мощности ВЭУ 125–200%, в которой достигаются значения нормированной стоимости электроэнергии около 26,5 руб./кВт·ч.

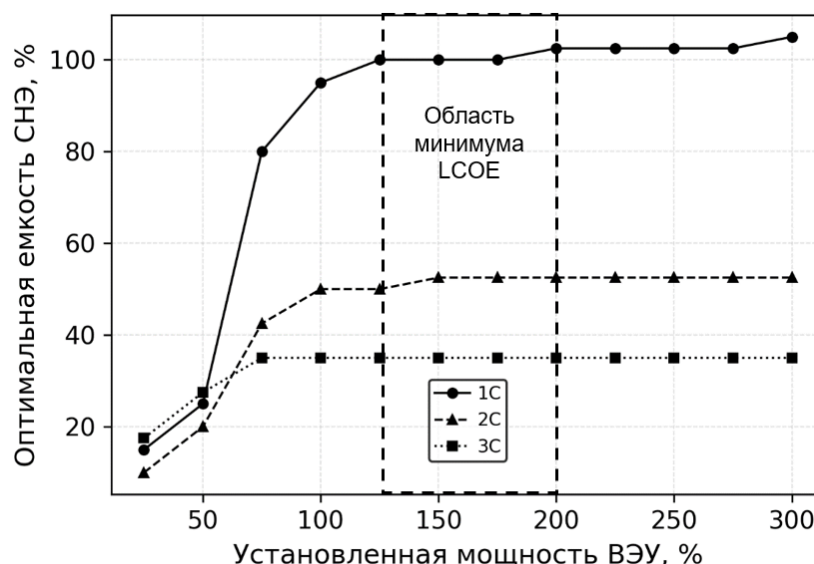


Рисунок 4.14 – Оптимальные по LCOE значения емкости СНЭ с учетом фиксированного минимального уровня заряда (составлено автором)

4.3 Адаптивный алгоритм управления минимальным уровнем заряда СНЭ

Эффективность использования СНЭ в составе гибридного ЭТК в значительной степени определяется выбранной стратегией разряда накопителя. Использование фиксированного уровня минимального заряда является грубым подходом, который не позволяет учитывать текущие режимы работы оборудования гибридного ЭТК и состояние нагрузки. В связи с этим разработан алгоритм адаптивного управления минимальным уровнем заряда СНЭ в режиме замещения генерации ДГУ, который реализует квазидинамическое изменение допустимой глубины разряда СНЭ в зависимости от текущей нагрузки, генерации ВЭУ и состояний ДГУ.

Минимальный уровень заряда изменяется в диапазоне от 0,2 до 1 и определяется выражением (4.1):

$$L_t = 0,2 + 0,8 \cdot \min(\max(F_t, 0), 1), \quad (4.1)$$

где L_t – минимальный уровень заряда СНЭ;

F_t – интегральный управляющий фактор, изменяемый от 0 до 1.

Интегральный фактор определяется выражением (4.2) как взвешенная сумма предложенных факторов, характеризующих состояние нагрузки и оборудования гибридного ЭТК:

$$F = k_D F_D + k_T F_T + k_Y F_Y + k_{\Pi} F_{\Pi} + k_P F_P + k_3 F_3, \quad (4.2)$$

где $F_D, F_T, F_Y, F_P, F_R, F_Z$ – факторы дефицита, тренда дефицита, ускорения дефицита, пуска, резерва мощности и замещения ДГУ;

$k_D, k_T, k_Y, k_P, k_R, k_Z$ – весовые коэффициенты соответствующих факторов.

Для определения мощности, которая требуется от ДГУ и/или СНЭ (ΔP) используется выражение (4.3):

$$\Delta P = P_H - P_{ВЭУ} \quad (4.3)$$

где $P_H, P_{ВЭУ}$ мощности нагрузки и ВЭУ соответственно, кВт.

На основе выражения (4.3) производится расчет факторов дефицита, тренда дефицита и ускорения дефицита по формулам (4.4–4.6):

$$F_{D,t} = \max\left(\frac{\Delta P_{t-1}}{P_{ДГУ,сум}}, 0\right), \quad (4.4)$$

где $P_{ДГУ,сум}$ – суммарная мощность ДГУ подключенных к шине.

$$F_{T,t} = \frac{\Delta P_{t-1} - \Delta P_{t-2}}{P_{ДГУ,сум}}, \quad (4.5)$$

$$F_{Y,t} = \frac{(\Delta P_{t-1} - \Delta P_{t-2}) - (\Delta P_{t-2} - \Delta P_{t-3})}{P_{ДГУ,сум}} \quad (4.6)$$

Указанные факторы формируют минимальный уровень заряда СНЭ с точки зрения энергии, которую необходимо хранить в накопителе с учётом ожидаемого энергетического баланса. Данные факторы позволяют учитывать динамику изменения нагрузки и генерации ВЭУ.

Фактор пуска снижает минимальный уровень заряда СНЭ повышая приоритет разряда в ситуациях, когда ДГУ ранее простаивали, что позволяет сократить время их работы. Фактор пуска определяется выражением (4.7):

$$F_{P,t} = \begin{cases} -1, N_{ДГУ,t-1} = 0 \\ 0, N_{ДГУ,t-1} > 0 \end{cases}, \quad (4.7)$$

где $N_{ДГУ}$ – количество загруженных ДГУ.

Фактор резерва мощности ДГУ обеспечивает накопление энергии на случай возможного дефицита, вызванного отказами установок и определяется выражением (4.8):

$$F_{R,t} = \frac{P_{H,t-1}}{P_{ДГУ,раб,t-1}}, \quad (4.8)$$

где $P_{\text{дгу,раб}}$ – суммарная мощность работоспособных ДГУ на шине.

Фактор замещения, определяемый по выражению (4.9), ограничивает чрезмерное вытеснение ДГУ за счет СНЭ, что позволяет избежать кратковременного замещения большого количества ДГУ и уменьшить частоту пусков:

$$F_{3,t} = \begin{cases} \left(\frac{N_{\text{дгу,тр},t} - N_{\text{дгу,факт},t}}{N_{\text{дгу,тр},t}} \right)^2, & N_{\text{дгу,тр},t} > 0 \\ 0, & N_{\text{дгу,тр},t} = 0 \end{cases}, \quad (4.9)$$

где $N_{\text{дгу,тр}}$ – требуемое количество ДГУ;

$N_{\text{дгу,факт}}$ – количество ДГУ, не замещенное СНЭ.

Блок-схема адаптивного алгоритма представлена на рисунке 4.15. В каждом интервале моделирования определяются факторы дефицита, тренда дефицита, ускорения дефицита, пуска, и резерва мощности ДГУ. Затем определяется требуемое количество ДГУ по формуле (2.11). Далее алгоритм проверяет возможность работы гибридного ЭТК при замещении генерации ДГУ за счет СНЭ. Для каждого значения замещенных ДГУ рассчитывается фактор замещения, а затем интегральный управляющий фактор и минимальный уровень заряда. После чего производится проверка обеспечения минимального уровня заряда СНЭ.

Сначала рассматривается полное замещение ДГУ, затем, при невозможности обеспечить минимальный уровень заряда СНЭ, количество замещаемых ДГУ постепенно уменьшается. Если минимально допустимый уровень заряда обеспечивается, принимается режим работы с уменьшенным количеством ДГУ, а СНЭ переходит в режим разряда для покрытия части нагрузки.

График изменения минимального уровня заряда СНЭ приведен на рисунке 4.16. На рисунке показано изменение адаптивного минимального уровня заряда СНЭ в зависимости от состояния ДГУ на каждой шине. На рассматриваемом интервале продолжительностью 15 суток выделены участки, соответствующие проведению ТО или возникновению отказов ДГУ для двух шин схемы РУ с двойной системой шин. В таких режимах минимальный уровень заряда СНЭ повышается, что обусловлено увеличением риска возникновения дефицита

мощности. После завершения ТО или ремонта ДГУ минимальный уровень заряда снижается.

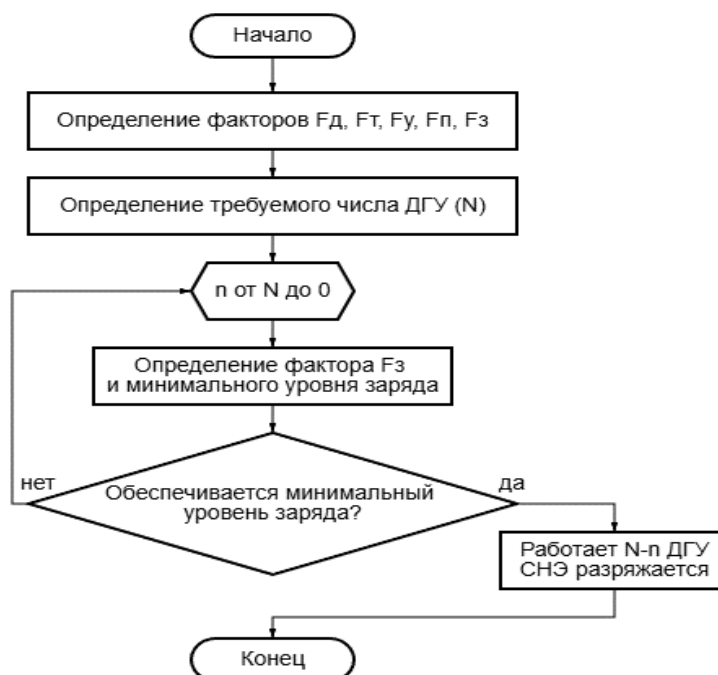


Рисунок 4.15 – Блок-схема адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ (составлено автором)

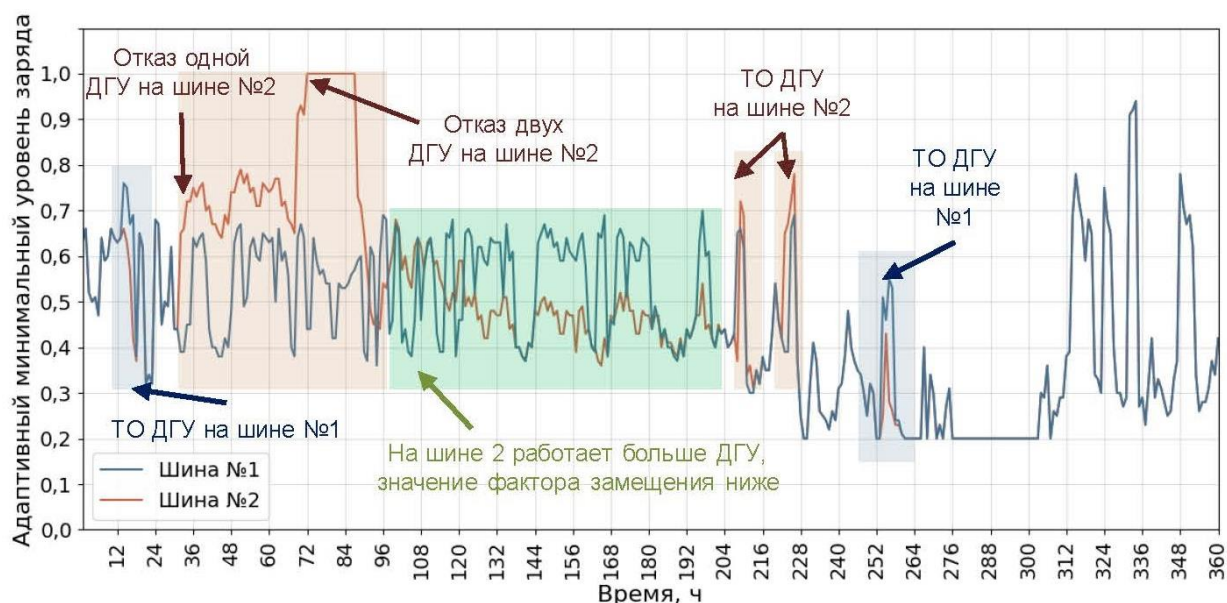


Рисунок 4.16 – Результат работы адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ (составлено автором)

Зеленым цветом отмечен участок, на котором на шинах работает различное количество ДГУ. После отказов ДГУ на шине №2 текущий уровень заряда СНЭ снижается до значения, при котором СНЭ уже не может выполнять функцию резервирования ДГУ. В результате ДГУ вынуждены работать в нагруженном

резерве. Для шины №2 в этом режиме фактор замещения становится ниже, что приводит к снижению расчетного минимального уровня заряда СНЭ.

После 260 ч значения минимального уровня заряда СНЭ для обеих шин становятся одинаковыми, что связано со стабилизацией состояния оборудования. На большей части периода моделирования минимальные уровни заряда СНЭ для шин совпадают, поскольку состав работающего оборудования и условия резервирования на обеих шинах являются эквивалентными.

4.4 Эффективность адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ

Для оценки эффективности разработанного адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ проведено моделирование с использованием последовательностей Соболя для формирования наборов весовых коэффициентов. Использование последовательности Соболя обеспечивает более равномерное заполнение пространства коэффициентов по сравнению с использованием псевдослучайных значений коэффициентов, что позволяет повысить эффективность поиска оптимальных комбинаций коэффициентов при ограниченном количестве вычислительных экспериментов.

Для каждого набора весовых коэффициентов выполнено моделирование работы гибридного ЭТК методом Монте-Карло с последующей оценкой среднеарифметических значений показателей комплекса. Полученные значения сравнивались с базовыми значениями, соответствующими использованию оптимальных фиксированных значения минимального уровня разряда СНЭ.

Моделирование проводилось при изменении установленной мощности ВЭУ в диапазоне 50–300% относительно расчетной нагрузки с использованием ранее определенных оптимальных значений емкости СНЭ. Выбор оптимального набора весовых коэффициентов адаптивного алгоритма выполнен по критерию минимума LOLP при дополнительном ограничении: значение LCOE не должно ухудшаться относительно базового варианта с фиксированным уровнем.

Сначала проводился расчет для наборов коэффициентов, полученных на основе последовательности Соболя. Затем отбирались лучшие 10 точек,

соответствующие минимальным значениям LOLP при меньших или равных LCOE. Для каждой из отобранных точек выполнялось дополнительное моделирование с новыми наборами коэффициентов на основе последовательности Соболя в локальной окрестности, равной $\pm 5\%$ от ширины исходного диапазона изменения соответствующего весового коэффициента.

На рисунке 4.17 представлен график эффективности адаптивного алгоритма относительно использования фиксированного минимального уровня заряда СНЭ в режиме замещения генерации ДГУ.

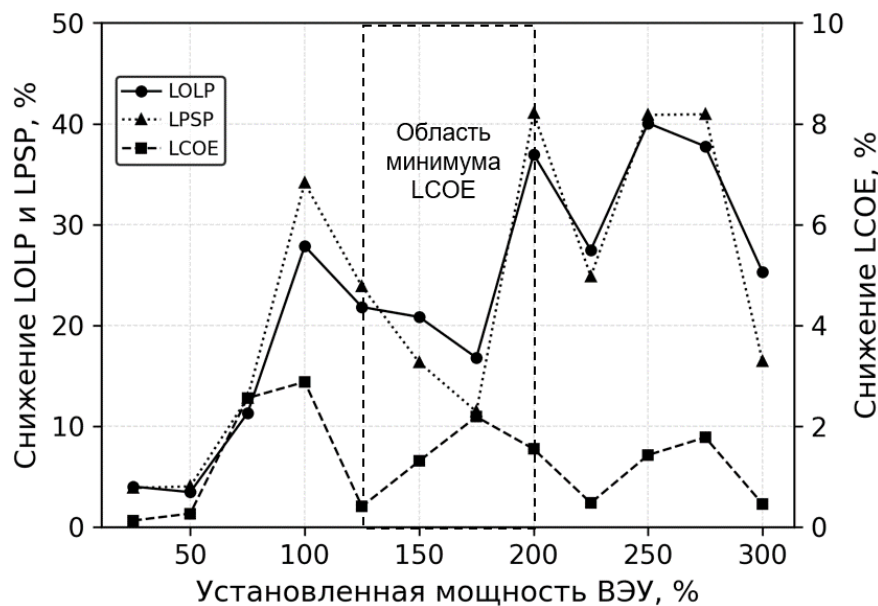


Рисунок 4.17 – Эффективность адаптивного алгоритма (составлено автором)

Как видно из графика, адаптивный алгоритм позволяет снизить LOLP и LPSP при сохранении экономической эффективности гибридного ЭТК, что подтверждает его преимущество по сравнению с фиксированным значением минимального уровня разряда СНЭ. Максимальное снижение LOLP составляет 40%, LPSP – 41%, LCOE – 3%. В области минимума LCOE дополнительно достигается снижение указанного показателя на 2%.

Оптимальные по LOLP наборы весовых коэффициентов приведены в таблице 4.1. Исходя из значений весовых коэффициентов для оптимальных значений по LOLP следует, что наибольший вклад в управление минимальным уровнем заряда СНЭ вносит фактор замещения ДГУ. Полученный результат

указывает на необходимость ограничения чрезмерного замещения генерации ДГУ за счет СНЭ.

Проведен анализ Парето-эффективных решений при вариации максимального тока разряда для ВЭУ 200%, полученные результаты представлены на рисунках 4.18–4.19. Парето-эффективными называются решения, для которых невозможно улучшить один из рассматриваемых показателей гибридного ЭТК без ухудшения другого.

Таблица 4.1 – Эффективность применения адаптивного алгоритма (по данным автора)

Мощность ВЭУ, %		100	150	200	250	300
Снижение значения показателя гибридного ЭТК	LPSP, %	34,1	16,3	41	40,9	16,5
	LOLP, %	27,9	20,8	37	40,1	25,3
	LCOE, %	2,9	1,3	1,6	1,4	0,5
Значения весовых коэффициентов для оптимальных наборов по LOLP	k_d	0,548	0,480	0,520	0,352	0,031
	k_T	0,93	1,009	0,179	1,658	0,577
	k_y	0,288	0,552	0,166	0,452	0,224
	k_n	0,022	3,019	3,209	1,978	0,541
	k_p	0,196	0,292	0,348	0,287	0,944
	k_z	2,198	2,955	2,751	2,999	3,046

Базовыми вариантами на графиках называются значения показателей гибридного ЭТК для работы СНЭ с фиксированным значением минимального уровня заряда, которое определяется по критерию минимума LCOE. Каждая точка соответствует отдельному набору весовых коэффициентов для адаптивного управления минимальным уровнем заряда СНЭ, который соответствует условию снижения LOLP без ухудшения LCOE относительно базового варианта. Точки, для которых невозможно дополнительно снизить один из показателей гибридного ЭТК, не ухудшив другой, объединяются линией и образуют Парето-фронт. Цветами на графиках выделены группы решений, соответствующие различным значениям максимального тока разряда СНЭ.

На рисунке 4.18 представлен график Парето-эффективности в координатах LCOE–LOLP. Для СНЭ с максимальным током разряда 1С оптимальными по минимуму LCOE являются большие значения емкости, чем для токов 2–3С. Поэтому гибридный ЭТК с СНЭ с максимальным током разряда 1С имеет большее значение LCOE, но меньшее значение LOLP и LPSP. Так как емкость СНЭ с

максимальным током разряда 1С значительно больше, чем у 2–3С, адаптивный алгоритм позволяет значительно снижать расход топлива и, как следствие, нормированную стоимость электроэнергии (LCOE).

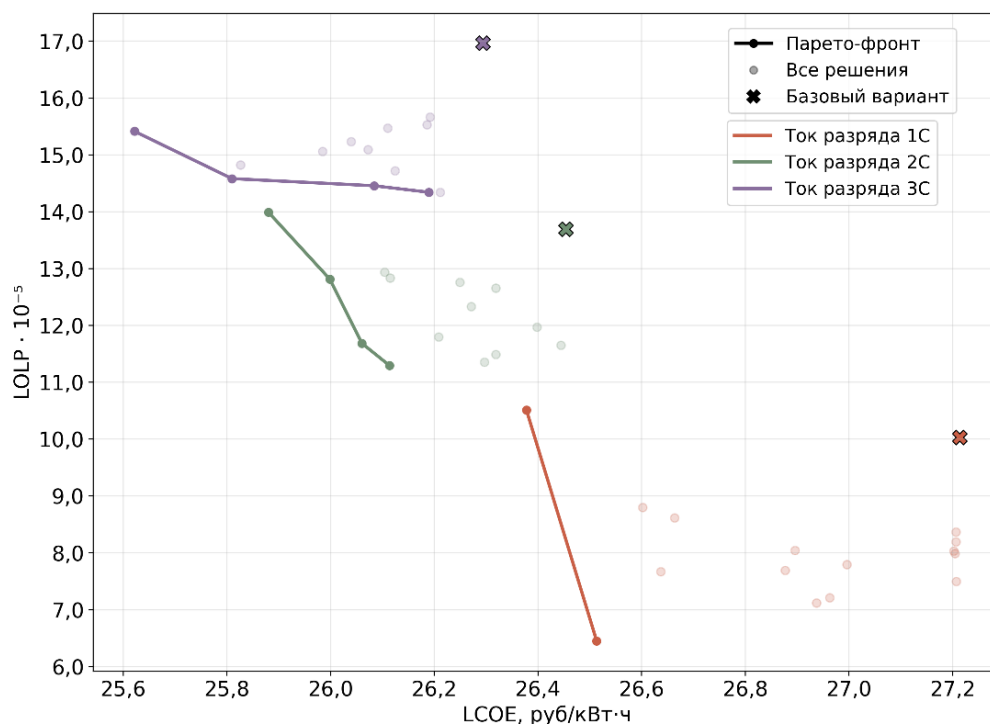


Рисунок 4.18 – Парето-эффективные решения применения адаптивного алгоритма при вариации максимального тока разряда СНЭ (составлено автором)

На рисунке 4.19 представлен график Парето-эффективности в координатах LCOE–LPSP. Характер Парето-фронтов аналогичен графику в координатах LCOE–LOLP. Максимальный ток разряда 2С является компромиссным вариантом, позволяющим добиться меньшего LCOE относительно 1С, и меньших LOLP и LPSP относительно 3С.

На рисунке 4.20 представлен график Парето-эффективности в координатах LCOE–LOLP для разных значений установленной мощности ВЭУ при максимальном токе разряда СНЭ 2С. Цветами на графиках выделены группы решений, соответствующие различным значениям мощности ВЭУ в процентах относительно расчетной нагрузки. Рост установленной мощности ВЭУ приводит к снижению LOLP за счет увеличения доступной мощности и снижения наработки ДГУ. При мощности ВЭУ, равной расчетной нагрузке, ветровой генерации недостаточно для того, чтобы снижение расхода топлива компенсировало капитальные вложения на установку ВЭУ. Увеличение установленной мощности

ВЭУ до 150% обеспечивает минимальное значение LCOE. После 200% дальнейшее увеличение установленной мощности ВЭУ приводит к снижению эффективности замещения ДГУ и сопровождается увеличением LCOE.

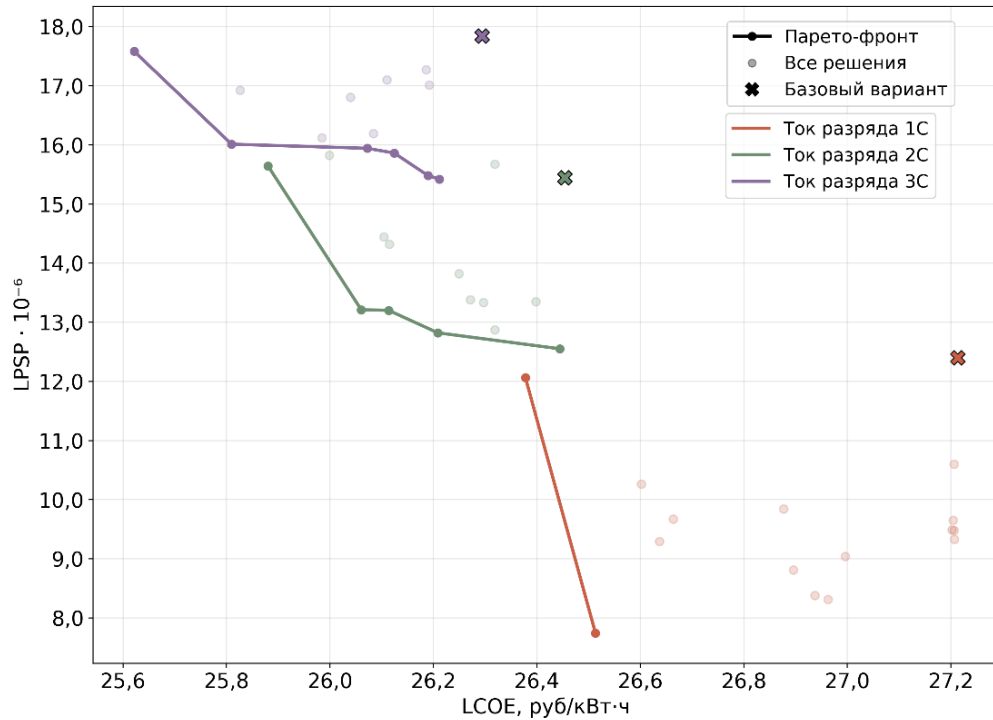


Рисунок 4.19 – Парето-эффективные решения применения адаптивного алгоритма при вариации максимального тока разряда СНЭ (составлено автором)

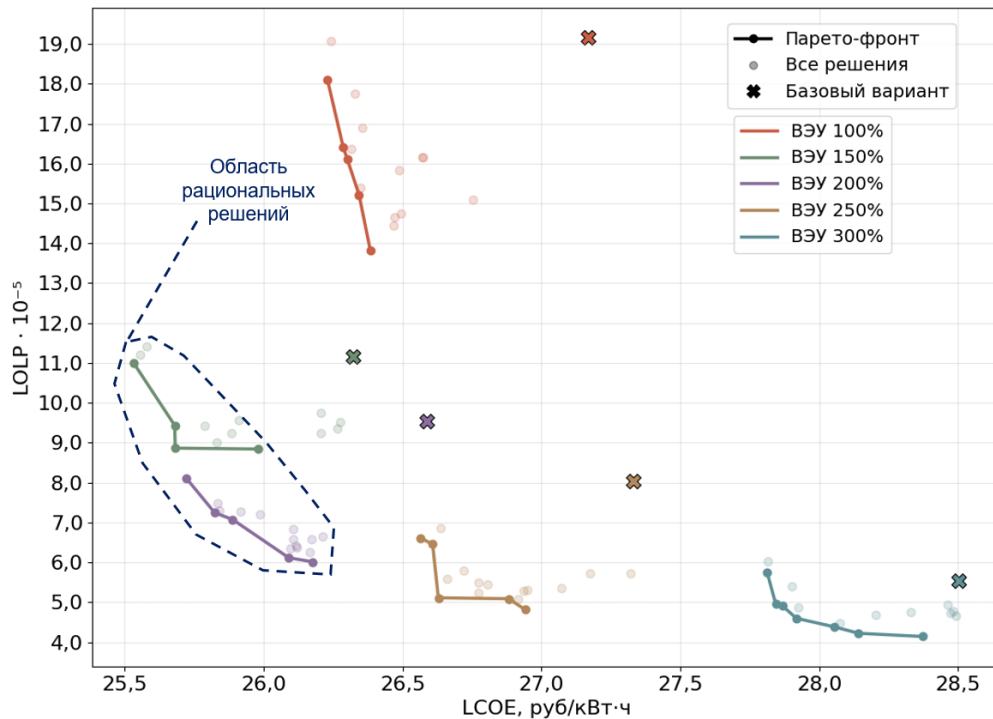


Рисунок 4.20 – Парето-эффективные решения применения адаптивного алгоритма при вариации мощности ВЭУ (составлено автором)

На рисунке 4.21 представлен график Парето-эффективности в координатах LCOE–LPSP. Характер Парето-фронт аналогичен графику в координатах LCOE–LOLP. Парето-фронты демонстрируют устойчивый компромисс между LCOE и LOLP. Следовательно, выбор конфигурации гибридного ЭТК должен осуществляться не по одному критерию, а на основе анализа области Парето-эффективных решений. Область рациональных значений соответствует установленной мощности ВЭУ 150–200% и значениям LCOE 25,5–26,2 руб./кВт·ч, LOLP $(6–11) \cdot 10^{-5}$, LPSP $(8–13,3) \cdot 10^{-6}$.

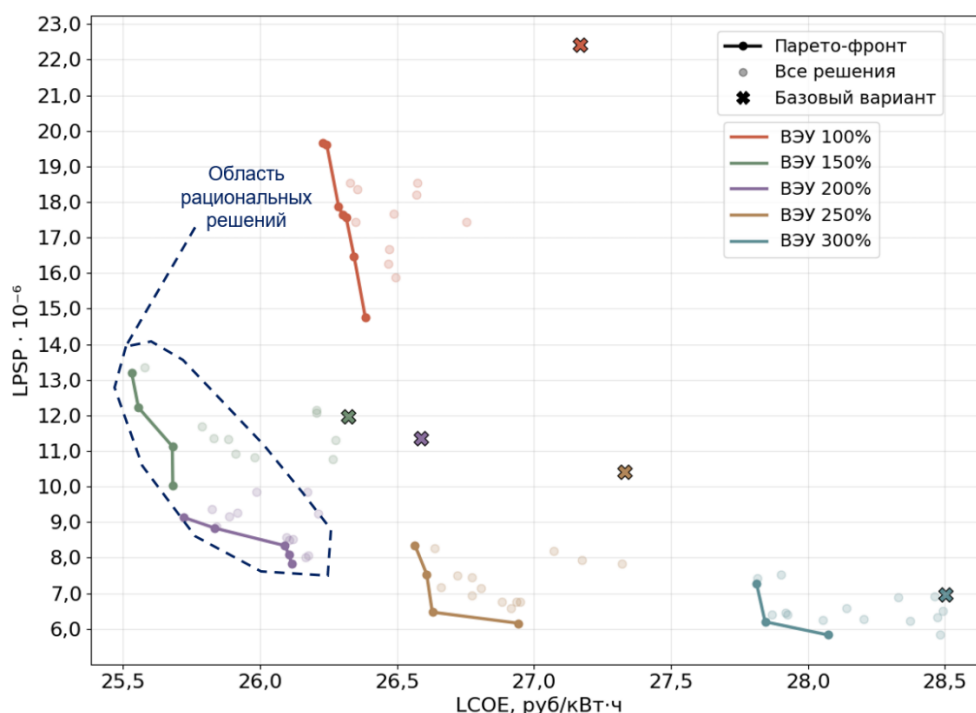


Рисунок 4.21 – Парето-эффективные решения применения адаптивного алгоритма при вариации мощности ВЭУ (составлено автором)

4.5 Выводы к главе 4

1. Проведено имитационное моделирование работы гибридного ЭТК при использовании СНЭ с различными параметрами. Установлено, что оптимальная по критерию минимума LCOE емкость СНЭ определяется преимущественно возможностью отказа от использования ДГУ в режиме нагруженного резерва.

2. Определены оптимальные по минимуму нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) значения емкости СНЭ относительно расчётной нагрузки,

приведённой к часовому интервалу, с учетом максимального тока разряда и фиксированного минимального уровня заряда.

3. Разработан адаптивный алгоритм управления минимальным уровнем заряда СНЭ при замещении генерации ДГУ, учитывающий баланс генерации ВЭУ и нагрузки, а также состояния ДГУ и степень замещения дизельной генерации.

4. Оценена эффективность применения разработанного адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ относительно использования фиксированного значения и определены весовые коэффициенты, позволяющие достичь минимальных значений вероятности потери нагрузки (LOLP) для вариантов гибридного ЭТК с ВЭУ мощностью от 25 до 300% относительно расчётной нагрузки.

5. Доказано, что адаптивное управление минимальным уровнем заряда СНЭ обеспечивает снижение LCOE, LOLP и LPSP. Максимальное снижение LOLP составило 40%, LPSP – 41%, LCOE – 3%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложено новое решение актуальной научно-технической задачи по повышению энергоэффективности гибридного ЭТК с ДГУ, ВЭУ и СНЭ для автономного электроснабжения поселений на ИТТ за счет выбора рациональной схемы распределительного устройства и обоснования параметров и режимов работы основного оборудования с учетом категории надежности электроснабжения потребителей и вероятности отказов элементов комплекса.

По результатам выполнения работы сделаны следующие выводы:

1. Проанализировано текущее состояние проблемы автономного электроснабжения поселений на ИТТ и существующие методы и критерии оптимизации параметров оборудования гибридного ЭТК. Рассмотрены две схемы РУ и алгоритмы распределения нагрузки в нормальных и аварийных режимах с учетом категорий надежности электроснабжения потребителей.

2. Получен годовой график нагрузки потребителей поселения на ИТТ на основе измерений фактической загрузки ДГУ. Расчетная нагрузка составила 1 346 кВт. Получена математическая зависимость удельного расхода топлива от номинальной мощности и загрузки ДГУ мощностью от 80 до 400 кВт.

3. Разработана имитационная компьютерная модель на языке программирования Java для расчета показателей гибридного ЭТК. На основе полученных результатов моделирования произведена оптимизация параметров комплекса. Оптимальным по LCOE набором является 8 ДГУ по 200 кВт и 100% установленной мощности ВЭУ относительно расчетной нагрузки с принятыми параметрами СНЭ.

4. Проведена глобальная оценка чувствительности выходных показателей гибридного ЭТК при вариации входных параметров методом Соболя. Наибольшее влияние на LCOE оказывают стоимость топлива, мощность ДГУ, показатели надежности ВЭУ и емкость СНЭ. Для LPSP и LOLP принципиальными являются количество и установленная мощность ДГУ, ее показатели надежности, а также показатели надежности шины.

5. Выполнено имитационное моделирование при вариации параметров гибридного ЭТК. Выбор двойной системы шин осуществлен по показателям надежности LOLP и LPSP, снижение которых составляет 5–32% и 3–17% соответственно относительно секционированной системы шин в оптимальной по LCOE области.

6. Применение ВЭУ и СНЭ позволило повысить энергоэффективность гибридного ЭТК за счет снижения расхода топлива на 35%, что привело к снижению LCOE с 33,71 до 28,02 руб./кВт·ч. При этом LOLP и LPSP снизились более чем на 90%.

7. Определены зависимости показателей гибридного ЭТК от параметров и режимов работы СНЭ. Рациональные параметры СНЭ соответствуют току разряда не менее 2С и емкости в диапазоне 33–55% от расчетной нагрузки, приведенной к часовому интервалу. Избыточное увеличение глубины разряда нецелесообразно ввиду роста деградации и ухудшения показателей надежности при незначительном экономическом эффекте.

8. Разработан адаптивный алгоритм управления минимальным уровнем заряда СНЭ, обеспечивающий уменьшение LCOE до 3%, а LOLP и LPSP до 40% по сравнению с фиксированным уровнем.

Перспективным направлением дальнейшего развития темы исследований является расширение модели путем добавления других типов возобновляемых источников и схем распределительных устройств.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АБ – аккумуляторная батарея;

АВР – автоматический ввод резерва;

БС – балластное сопротивление;

ВА – вводной автомат;

ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ВЭС – ветроэлектрическая станция;

ВЭУ – ветроэлектрическая установка;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ДГУ – дизель-генераторная установка;

ИТТ – изолированные и труднодоступные территории;

КПД – коэффициент полезного действия;

МШВ – межшинный выключатель;

ПУЭ – правила устройства электроустановок;

ПЧ – преобразователь частоты;

РУ – распределительное устройство;

СВ – секционный выключатель;

СНЭ – система накопления энергии;

СУ – система управления;

СЭС – солнечная электростанция;

ТО – техническое обслуживание;

ФЭУ – фотоэлектрическая установка;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

ЭТК – электротехнический комплекс;

ЯНАО – Ямало-Ненецкий автономный округ;

DoD – Depth of Discharge, глубина разряда аккумуляторной батареи;

EFC – Equivalent Full Cycles, эквивалентное число полных циклов заряда-разряда;

FOR – Forced Outage Rate, коэффициент вынужденного простоя;

LCOE – Levelized Cost of Energy, нормированная стоимость электроэнергии;

LiFePO₄ – Lithium Iron Phosphate, литий-железо-фосфатный аккумулятор;

LOLP – Loss of Load Probability, вероятность потери нагрузки;

LPSP – Loss of Power Supply Probability, вероятность потери электроснабжения;

MTBF – Mean Time Between Failures, средняя наработка между отказами;

MTTF – Mean Time To Failure, средняя наработка до отказа;

MTTR – Mean Time To Repair, среднее время восстановления;

SOC – State of Charge, уровень заряда аккумуляторной батареи;

λ – интенсивность отказов;

μ – интенсивность восстановления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н., Бельский, А.А. Выбор параметров ветродизельной установки для энергообеспечения минерально-сырьевого комплекса //Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 227-230.
2. Абрамович, Б.Н., Яковлева, Э.В. Фотоэлектрическая станция прямого преобразования для объектов минерально-сырьевого комплекса //Записки Горного института. – 2012. – Т. 196. – С. 210-213.
3. Архив погоды в Гыде (Ямало-Ненецкий АО, Тазовский район) [Электронный ресурс]. – URL: <https://global-weather.ru/archive/gyda> (дата обращения: 28.05.2026).
4. Ассоциация развития возобновляемой энергетики. Статистика ВИЭ [Электронный ресурс]. – URL: <https://rreda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 28.05.2026).
5. Башмаков, И.А., Дзедзичек, М.Г. Анализ финансовой нагрузки на регионы с дорогостоящим децентрализованным энергоснабжением //ЭНЕРГОСОВЕТ. – 2017. – №. 47. – С. 7-16.
6. Бельский, А.А. Анализ степени влияния учета характеристик литий-ионных аккумуляторов на оценку жизненного цикла гибридного комплекса с ветроэлектрической установкой / А.А. Бельский, **Е.А. Емельянов** // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 3 (167). – С. 13-21. – DOI: 10.26730/1816-4528-2023-3-13-21.
7. Бельский, А.А. Модель дизельной электростанции при оценке жизненного цикла автономного гибридного ветроэлектрического комплекса / А.А. Бельский, **Е.А. Емельянов** // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – № 6 (170). – С. 10-16. – DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-10-16.
8. Бельский, А.А. Оптимизация параметров автономного ветродизельного комплекса, эксплуатируемого на горных территориях / А.А. Бельский, **Е.А. Емельянов** // Устойчивое развитие горных территорий. – 2026. – Т. 18, № 1 (67). – С. 69-80. – DOI: 10.21177/1998-4502-2026-18-1-69-80.

9. Бельский, А.А. Оценка показателей автономного электротехнического комплекса с дизельными и ветроэлектрическими установками / А.А. Бельский, **Е.А. Емельянов** // Горный журнал. – 2025. – № 9. – С. 37-44. – DOI: 10.17580/gzh.2025.09.04.

10. Дизельные электростанции ЯМЗ от ООО «Компания Дизель» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comd.ru/catalog/dizelnye-elektrostancii-tsena-des/professional/dgu-dizel-generatory-yamz/> (дата обращения: 28.05.2026).

11. Дубровин, Е.А., Дубровин, И.А. Как снизить затраты на углеводородное топливо в Арктике //Энергетика и промышленность России. – 2018. – №. 01-02. – С. 32-33.

12. Елистратов, В.В. Автономное энергоснабжение территорий России энергокомплексам на базе возобновляемых источников энергии //Энергетический вестник. – 2016. – №. 21. – С. 42-49.

13. **Емельянов, Е.А.** Анализ графика электрических нагрузок поселения с автономным электроснабжением / **Е.А. Емельянов**, А.А. Бельский // Электрические сети: надежность, безопасность, энергосбережение и экономические аспекты : Материалы V международной научно-практической on-line конференции, Казань, 15 мая 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 101-105.

14. **Емельянов, Е.А.** Оценка влияния вращающегося резерва на показатели автономного ветродизельного комплекса / **Е.А. Емельянов** // Актуальные вопросы науки 2025 : сборник статей XI Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 ноября 2025 года. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. –Часть 1. – С. 49-51.

15. Емельянов, Е.А. Сравнение подходов в оценке расхода топлива при моделировании работы дизельной электростанции в составе автономного гибридного комплекса / **Е.А. Емельянов** // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции в рамках Десятилетия науки и технологий в Российской Федерации, Кемерово, 06-08 декабря 2023 года. – Кемерово : КузГТУ, 2024. – С. 135.1-135.5.

16. Зырянов, В.М. и др. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт //Энергетическая политика. – 2020. – №. 6 (148). – С. 76-87. – DOI: 10.46920/2409-5516_2020_6148_76.

17. Карасевич, В., Васильев, Ю., Негримовский, В. Перспективы автономного энергоснабжения изолированных объектов и поселений в арктических регионах РФ с применением водородных технологий //Энергетическая политика. – 2023. – №. 9 (188). – С. 62-69.

18. Киселев, Е.А. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» //Москва. – 2020.

19. Ларин, О.М., Коратаев, К.И. Особенности систем электроснабжения небольших населенных пунктов в отдаленных районах страны //Юность и знания – гарантия успеха : сборник научных статей Международной молодежной научной конференции. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2019. – Т. 4. – С. 90-95.

20. Лукутин, Б.В., Муравлев, И.О., Плотников, И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учебное пособие / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 128 с.

21. Лукутин, Б.В., Суржикова, О.А., Шандарова, Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении : монография. – 2008. – С. 231.

22. Мельников, А.В. и др. Система автономного энергоснабжения изолированных населенных пунктов с использованием аккумуляторных батарей и водородных накопителей энергии //12-я Всероссийская конференция с международным участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». – Институт физики твердого тела имени Ю. А. Осипяна Российской академии наук, 2025. – Т. 12. – С. 124-126. – DOI: 10.24412/CL-37298-FC-12.54.

23. Модернизация объектов генерации в изолированных и труднодоступных территориях [Электронный ресурс]. – URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 28.05.2026).

24. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1312459681> (дата обращения: 28.05.2026).

25. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России: аналитический доклад [Электронный ресурс]. – URL: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/генерации_в_ИТТ.pdf (дата обращения: 28.05.2026).

26. РАВИ. Обзор ветроэнергетического рынка России за 2021 год [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/42a/c0imfdotv1rmhxr0hzpeqngztsollj92/%D0%A0%D0%90%D0%92%D0%98.pdf> (дата обращения: 28.05.2026).

27. Распределенная генерация — ключ к освоению месторождений редких и редкоземельных металлов [Электронный ресурс]. – URL: https://nedradv.ru/nedradv/ru/page_industry?obj=541043ec87966411dd6058fbf1751b85 (дата обращения: 28.05.2026).

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611997 Российская Федерация. Программа для оценки жизненного цикла гибридного комплекса с ветроэлектрической установкой. Заявка № 2023610557 : заявл. 18.01.2023 : опубл. 26.01.2023 / А.А. Бельский, Е.А. Емельянов ; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 596 КБ.

29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024618725 Российская Федерация. Программа для оптимизации состава и оценки жизненного цикла дизельной электростанции. Заявка № 2024617353 : заявл. 08.04.2024 : опубл. 16.04.2024 / А.А. Бельский, Е.А. Емельянов ; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 450 КБ.

30. Сокольникова, Т.В., Суслов, К.В., Ломбарди, П. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – №. 10 (105). – С. 206-211.

31. Тремясов, В.А., Зограф, Я.Е. Модель надежности аккумуляторной батареи в системе генерации с возобновляемыми источниками энергии //Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции, Нижний Новгород, 17 декабря 2021 года. – Нижний Новгород : Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 415-420. – DOI: 10.46960/44170389_2021_415.

32. Условные обозначения ESP и PRP, (Emergency Stand-by Power) и PRP (Prime Power) - статьи компании «Первый генераторный салон» [Электронный ресурс]. – URL: <https://1gen.ru/stati/uslovnye-oboznacheniya-esp-i-prp/> (дата обращения: 28.05.2026).

33. Электроэнергетическая система России [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2026/> (дата обращения: 28.05.2026).

34. Abdelmassih, G., Al-Numay, M., El Aroudi, A. Map Optimization Fuzzy Logic Framework in Wind Turbine Site Selection with Application to the USA Wind Farms //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 19. – P. 6127. – DOI: 10.3390/en14196127.

35. Abu-Rayash, A., Dincer, I. Development and assessment of an integrated wind-solar based energy system for sustainable communities //Energy Conversion and Management. – 2023. – Т. 277. – P. 116680. – DOI: 10.1016/j.enconman.2023.116680.

36. Adefarati, T., Bansal, R. C. Reliability and economic assessment of a microgrid power system with the integration of renewable energy resources //Applied Energy. – 2017. – Т. 206. – P. 911-933. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.228.

37. Adefarati, T., Bansal, R. C. Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation //Applied Energy. – 2017. – T. 185. – P. 158-171. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.087.
38. Aitio, A., Howey, D.A. Predicting battery end of life from solar off-grid system field data using machine learning //Joule. – 2021. – T. 5. – №. 12. – P. 3204-3220. – DOI: 10.1016/j.joule.2021.11.006.
39. Ajayi, O.O. et al. Potential and econometrics analysis of standalone RE facility for rural community utilization and embedded generation in North-East, Nigeria //Sustainable Cities and Society. – 2016. – T. 21. – P. 66-77. – DOI: 10.1016/j.scs.2016.01.003.
40. Al Ameri, A. et al. Power Loss Analysis for Wind Power Grid Integration Based on Weibull Distribution //Energies. – 2017. – T. 10. – №. 4. – P. 463. – DOI: 10.3390/en10040463.
41. Al Hasibi, R. A., Haris, A. An analysis of the implementation of a hybrid renewable-energy system in a building by considering the reduction in electricity price subsidies and the reliability of the grid //Clean Energy. – 2023. – T. 7. – №. 5. – P. 1125-1135. – DOI: 10.1093/ce/zkad053.
42. Al-falahi, M. D. A., Jayasinghe, S. D. G., Enshaei, H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system //Energy Conversion and Management. – 2017. – T. 143. – P. 252-274. – DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.019.
43. Alkuhayli, A.A., Raghavan, S., Chowdhury, B.H. Reliability evaluation of distribution systems containing renewable distributed generations //2012 North American Power Symposium (NAPS). – Champaign, IL, USA : IEEE, 2012. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/NAPS.2012.6336324.
44. Almutairi, K. et al. Ranking Locations for Hydrogen Production Using Hybrid Wind-Solar: A Case Study //Sustainability. – 2021. – T. 13. – №. 8. – P. 4524. – DOI: 10.3390/su13084524.

45. Alqarni, M. Sodium sulfur batteries allocation in high renewable penetration microgrids using coronavirus herd immunity optimization //Ain Shams Engineering Journal. – 2022. – T. 13. – №. 2. – P. 101590. – DOI: 10.1016/j.asej.2021.09.017.
46. Al-Rawashdeh, H. et al. Performance Analysis of a Hybrid Renewable-Energy System for Green Buildings to Improve Efficiency and Reduce GHG Emissions with Multiple Scenarios //Sustainability. – 2023. – T. 15. – №. 9. – P. 7529. – DOI: 10.3390/su15097529.
47. Arenas-López, J.P., Badaoui, M. Stochastic modelling of wind speeds based on turbulence intensity //Renewable Energy. – 2020. – T. 155. – P. 10-22. – DOI: 10.1016/j.renene.2020.03.104.
48. Bai, H., Song, Z. Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems //Journal of Power Sources. – 2023. – T. 580. – P. 233426. – DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.233426.
49. Baidya, H. et al. Techno-Economic Comparative analysis of hybrid renewable energy systems optimization considering Off-Grid remote area electrification in Bangladesh //Energy Conversion and Management: X. – 2025. – T. 26. – P. 101004. – DOI: 10.1016/j.ecmx.2025.101004.
50. Bartecka, M. et al. Reliability Model of Battery Energy Storage Cooperating with Prosumer PV Installations //Energies. – 2024. – T. 17. – №. 23. – P. 5839. – DOI: 10.3390/en17235839.
51. Bogdanov, I., Abramovich, B. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises //Journal of Mining Institute. – 2021. – T. 249. – P. 408-416. – DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.
52. Canziani, F. et al. Reliability and Energy Costs Analysis of a Rural Hybrid Microgrid Using Measured Data and Battery Dynamics: A Case Study in the Coast of Perú //Energies. – 2021. – T. 14. – №. 19. – P. 6396. – DOI: 10.3390/en14196396.
53. Canziani, F., Vargas, R., Gastelo-Roque, J. A. Hybrid Photovoltaic-Wind Microgrid With Battery Storage for Rural Electrification: A Case Study in Perú //Frontiers in Energy Research. – 2021. – T. 8. – P. 528571. – DOI: 10.3389/fenrg.2020.528571.

54. Carta, J. A., Ramírez, P., Velázquez, S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – T. 13. – №. 5. – P. 933-955. – DOI: 10.1016/j.rser.2008.05.005.
55. Chang, C.-A., Wu, Y.-K., Chen, B.-K. Determination of Maximum Wind Power Penetration in an Isolated Island System by Considering Spinning Reserve //Energies. – 2016. – T. 9. – №. 9. – P. 688. – DOI: 10.3390/en9090688.
56. Chen, Y., Yang, Z., Wang, Y. SOC Estimation of Lead Carbon Batteries Based on the Operating Conditions of an Energy Storage System in a Microgrid System //Energies. – 2019. – T. 13. – №. 1. – P. 33. – DOI: 10.3390/en13010033.
57. Cheynet, E., Jakobsen, J. B., Obhrai, C. Spectral characteristics of surface-layer turbulence in the North Sea //Energy Procedia. – 2017. – T. 137. – P. 414-427. – DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.366.
58. Come Zebra, E. I. et al. A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – T. 144. – P. 111036. – DOI: 10.1016/j.rser.2021.111036.
59. DaneshvarDehnavi, S. et al. Can 100% renewable power system be successfully built? //Renewable Energy. – 2021. – T. 177. – P. 715-722. – DOI: 10.1016/j.renene.2021.06.002.
60. Davoudkhani, I. F., Dejamkhooy, A., Nowdeh, S. A. A novel cloud-based framework for optimal design of stand-alone hybrid renewable energy system considering uncertainty and battery aging //Applied Energy. – 2023. – T. 344. – P. 121257. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.121257.
61. Deep, S. et al. Estimation of the wind energy potential for coastal locations in India using the Weibull model //Renewable Energy. – 2020. – T. 161. – P. 319-339. – DOI: 10.1016/j.renene.2020.07.054.
62. Drouilhet, S., Shirazi, M. Wales, Alaska High Penetration Wind-Diesel Hybrid Power System: Theory of Operation / S. Drouilhet, M. Shirazi. – 2002. – DOI: 10.2172/15000710.

63. Dubey, S. M. et al. Multiobjective Scheduling of Hybrid Renewable Energy System Using Equilibrium Optimization //Energies. – 2021. – T. 14. – №. 19. – P. 6376. – DOI: 10.3390/en14196376.
64. Elia, S., Santini, E., Tobia, M. Comparison between Different Electrical Configurations of Emergency Diesel Generators for Redundancy and Reliability Improving //Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. – 2018. – T. 62. – №. 4. – P. 144-148. – DOI: 10.3311/PPee.13242.
65. Emrani, A., Berrada, A. A comprehensive review on techno-economic assessment of hybrid energy storage systems integrated with renewable energy //Journal of Energy Storage. – 2024. – T. 84. – P. 111010. – DOI: 10.1016/j.est.2024.111010.
66. Enasel, E., Dumitrascu, G. Storage solutions for renewable energy: A review //Energy Nexus. – 2025. – T. 17. – P. 100391. – DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100391.
67. Esan, A. B. et al. Reliability assessments of an islanded hybrid PV-diesel-battery system for a typical rural community in Nigeria //Heliyon. – 2019. – T. 5. – №. 5. – P. e01632. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01632.
68. Fakhfour, K., Pourfayaz, F. Size optimization of standalone wind-photovoltaics-diesel-battery systems by Harris hawks optimization (HHO): Case study of a wharf located in Bushehr, Iran //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2024. – T. 163. – P. 110353. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110353.
69. Fang, L. et al. Reliability assessment of the port power system based on integrated energy hybrid system //Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2022. – P. 140372-140372. – DOI: 10.24425/bpasts.2022.140372.
70. Fang, Z., Shek, J. K. H., Sun, W. A review of grid-connected hybrid energy storage systems: Sizing configurations, control strategies, and future directions //Journal of Energy Storage. – 2025. – T. 118. – P. 116226. – DOI: 10.1016/j.est.2025.116226.
71. Fathy, A., Kaaniche, K., Alanazi, T. M. Recent Approach Based Social Spider Optimizer for Optimal Sizing of Hybrid PV/Wind/Battery/Diesel Integrated Microgrid in Aljouf Region //IEEE Access. – 2020. – T. 8. – P. 57630-57645. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982805.

72. Feio, A. D. et al. Viability of renewable energy integration in isolated systems in Brazil – A case study at Trindade Island (Espírito Santo, Brazil) //Renewable Energy. – 2024. – T. 222. – P. 119805. – DOI: 10.1016/j.renene.2023.119805.
73. Fellah, K. et al. Comparative study of battery energy storage systems in a micro-grid based on real-time simulation //Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI). – 2021. – T. 9. – №. 2. – P. 371-383. – DOI: 10.52549/ijeei.v9i2.2926.
74. Fendzi Mbasso, W. et al. Reliability analysis of a grid-connected hybrid renewable energy system using hybrid Monte-Carlo and Newton Raphson methods //Frontiers in Energy Research. – 2024. – T. 12. – P. 1435221. – DOI: 10.3389/fenrg.2024.1435221.
75. Foles, A., Fialho, L., Collares-Pereira, M. Microgrid Energy Management Control with a Vanadium Redox Flow and a Lithium-Ion Hybrid Battery System for PV Integration //38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. – 2021. – P. 1464-1469. – DOI: 10.4229/EUPVSEC20212021-6BV.5.17.
76. García-Vera ,Y., Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. Optimization of Isolated Hybrid Microgrids with Renewable Energy Based on Different Battery Models and Technologies //Energies. – 2020. – T. 13. – №. 3. – P. 581. – DOI: 10.3390/en13030581.
77. Ghani, R. et al. Wind energy at remote islands in arctic region—A case study of Solovetsky islands //Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2019. – T. 11. – №. 5. – P. 053304. – DOI: 10.1063/1.5110756.
78. Ginocchi, M., Ponci, F., Monti, A. Sensitivity Analysis and Power Systems: Can We Bridge the Gap? A Review and a Guide to Getting Started / Sensitivity Analysis and Power Systems //Energies. – 2021. – T. 14. – №. 24. – P. 8274. – DOI: 10.3390/en14248274.
79. Gonzalez, A. et al. Environmental and cost optimal design of a biomass–Wind–PV electricity generation system //Renewable Energy. – 2018. – T. 126. – P. 420-430. – DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.062.

80. Hadi, F. A., Makki, Z. F., Al-Baldawi, R. A. Optimum Selection of Wind Turbines Using Normalized Power and Capacity Factor Curves //Iraqi Journal of Science. – 2021. – P. 2813-2823. – DOI: 10.24996/ij.s.2021.62.8.33.
81. Hamilton, J. M. et al. Utilization and Optimization of Diesel Generation for Maximum Renewable Energy Integration //Smart Energy Grid Design for Island Countries : Green Energy and Technology / eds. F.M.R. Islam et al. – Cham : Springer International Publishing, 2017. – P. 21-70. – DOI: 10.1007/978-3-319-50197-0_2.
82. Hemeida, A. M. et al. Optimum design of hybrid wind/PV energy system for remote area //Ain Shams Engineering Journal. – 2020. – T. 11. – №. 1. – P. 11-23. – DOI: 10.1016/j.asej.2019.08.005.
83. Hulio, Z. H., Jiang, W., Rehman, S. Techno-Economic assessment of wind power potential of Hawke's Bay using Weibull parameter: A review //Energy Strategy Reviews. – 2019. – T. 26. – P. 100375. – DOI: 10.1016/j.esr.2019.100375.
84. Ibrahim, H. et al. Wind-Diesel hybrid system: energy storage system selection method. – 2012.
85. Icaza, D. et al. Challenges, Roadmaps and Smart Energy Transition towards 100% Renewable Energy Markets in American Islands: A Review //Energies. – 2024. – T. 17. – №. 5. – P. 1059. – DOI: 10.3390/en17051059.
86. Issa, M. et al. Effects of Low Charge and Environmental Conditions on Diesel Generators Operation //Eng. – 2020. – T. 1. – №. 2. – P. 137-152. – DOI: 10.3390/eng1020009.
87. Jahid, A. et al. Renewable Energy Assisted Cost Aware Sustainable Off-Grid Base Stations With Energy Cooperation //IEEE Access. – 2018. – T. 6. – P. 60900-60920. – DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2874131.
88. Jin, L. et al. Optimal sizing of hybrid renewable energy system with bi-dimensional energy management strategy //Energy Conversion and Management. – 2025. – T. 341. – P. 120084. – DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120084.
89. Kaabeche, A., Ibtouen, R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system //Solar Energy. – 2014. – T. 103. – P. 171-182. – DOI: 10.1016/j.solener.2014.02.017.

90. Karki, R., Billinton, R. Reliability/Cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems //IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2001. – Т. 16. – №. 4. – P. 368-373. – DOI: 10.1109/60.969477.
91. Karmich, S. et al. Impact of integration of renewable energies and energy efficiency on the reliability of the national electricity grid //International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). – 2023. – Т. 14. – №. 4. – P. 2433. – DOI: 10.11591/ijpeds.v14.i4.pp2433-2446.
92. Kathleen, Valley [Электронный ресурс]. – URL: <https://zenithenergy.com.au/kathleen-valley-2/> (дата обращения: 28.05.2026).
93. Katiraei, F., Abbey, C. Diesel Plant Sizing and Performance Analysis of a Remote Wind-Diesel Microgrid //2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. – Tampa, FL, USA : IEEE, 2007. – P. 1-8. – DOI: 10.1109/PES.2007.386275.
94. Khare, V., Nema, S., Baredar, P. Reliability analysis of hybrid renewable energy system by fault tree analysis //Energy & Environment. – 2019. – Т. 30. – №. 3. – P. 542-555. – DOI: 10.1177/0958305X18802765.
95. Kolontsov, V. D. et al. Modeling of a wind-diesel plant for supplying decentralized areas of the Far North //Yugra State University Bulletin. – 2024. – Т. 20. – №. 4. – P. 36-44. – DOI: 10.18822/byusu20240436-44.
96. Lavrik, A., Zhukovskiy, Y., Buldysko, A. Features of the Optimal Composition Determination of Energy Sources During Multi-Criterial Search in the Russian Arctic Conditions //2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – Moscow, Russia : IEEE, 2020. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059215.
97. Li, C. et al. An innovative hybrid system for wind speed forecasting based on fuzzy preprocessing scheme and multi-objective optimization //Energy. – 2019. – Т. 174. – P. 1219-1237. – DOI: 10.1016/j.energy.2019.02.194.
98. Liang, H. et al. Modeling and Simulation on the Hybrid Solution of Static Var Generator and Synchronous Condenser for Unlocking Power Output Limitation of Wind Farms Integrated into Weak Grid //Energies. – 2025. – Т. 18. – №. 3. – P. 471. – DOI: 10.3390/en18030471.

99. Lin, J. et al. Reliability based power systems planning and operation with wind power integration: A review to models, algorithms and applications //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – T. 31. – P. 921-934. – DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.034.
100. Lin, X.-M. et al. A multi-criteria framework for designing of stand-alone and grid-connected photovoltaic, wind, battery clean energy system considering reliability and economic assessment //Energy. – 2021. – T. 224. – P. 120154. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.120154.
101. Liu, M. et al. Reliability evaluation of tidal and wind power generation system with battery energy storage //Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2016. – T. 4. – №. 4. – P. 636-647. – DOI: 10.1007/s40565-016-0232-5.
102. Lopez-Villalobos, C. A. et al. Effects of wind power spectrum analysis over resource assessment //Renewable Energy. – 2021. – T. 167. – P. 761-773. – DOI: 10.1016/j.renene.2020.11.147.
103. Lu, J. et al. Multi-Objective Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER //Energies. – 2017. – T. 10. – №. 10. – P. 1664. – DOI: 10.3390/en10101664.
104. Mangunkusumo, K.G. H. et al. Enhancing Grid Stability in Renewable Energy Systems Through Synchronous Condensers: A Case Study on Dedieselization and Assessment Criteria Development //Energies. – 2025. – T. 18. – №. 6. – P. 1410. – DOI: 10.3390/en18061410.
105. MansourLakouraj, M. et al. Optimal market-based operation of microgrid with the integration of wind turbines, energy storage system and demand response resources //Energy. – 2022. – T. 239. – P. 122156. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.122156.
106. Marcelino, C.G. et al. Evaluating the use of a Net-Metering mechanism in microgrids to reduce power generation costs with a swarm-intelligent algorithm //Energy. – 2023. – T. 266. – P. 126317. – DOI: 10.1016/j.energy.2022.126317.
107. Marqusee, J., Jenket, D. Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions //Applied Energy. – 2020. – T. 268. – P. 114918. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114918.

108. McMaster, R., Noble, B., Poelzer, G. Assessing local capacity for community appropriate sustainable energy transitions in northern and remote Indigenous communities //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2024. – T. 191. – P. 114232. – DOI: 10.1016/j.rser.2023.114232.
109. Mi, Y. et al. Frequency control of a wind-diesel system based on hybrid energy storage //Protection and Control of Modern Power Systems. – 2022. – T. 7. – №. 1. – P. 31. – DOI: 10.1186/s41601-022-00250-1.
110. Michalopoulos, P. et al. Optimal Selection of the Diesel Generators Supplying a Ship Electric Power System //Applied Sciences. – 2022. – T. 12. – №. 20. – P. 10463. – DOI: 10.3390/app122010463.
111. Ming, D., Wu, Y. Optimal Expansion Planning of Wind-Diesel Energy System //2006 International Conference on Power System Technology. – Chongqing, China : IEEE, 2006. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/ICPST.2006.321412.
112. Misra, A., Sharma, M. P. Development of Hybrid Energy System for a Remote Area in Kutch District of Gujarat State, India //Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2025. – T. 47. – №. 1. – P. 2128-2150. – DOI: 10.1080/15567036.2020.1840673.
113. Mohamed, M.A. et al. Multi-agent based optimal sizing of hybrid renewable energy systems and their significance in sustainable energy development //Energy Reports. – 2024. – T. 12. – P. 4830-4853. – DOI: 10.1016/j.egyr.2024.10.051.
114. Monroy-Morales, J. et al. Complete Transitions of Hybrid Wind-Diesel Systems with Clutch and Flywheel-Based Energy Storage //Energies. – 2022. – T. 15. – №. 19. – P. 7120. – DOI: 10.3390/en15197120.
115. Motta, S., Ihonen, J., Kiviluoma, J. A new method for analysing financial damages caused by grid faults on individual customers //Electric Power Systems Research. – 2022. – T. 207. – P. 107839. – DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107839.
116. Nanda Kishore, L., Fernandez, E. Reliability well-being assessment of PV-wind hybrid system using Monte Carlo simulation //2011 International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology. – Nagercoil, India : IEEE, 2011. – P. 63-68. – DOI: 10.1109/icetect.2011.5760092.

117. NASA POWER | Data Access Viewer (DAV) [Электронный ресурс]. – URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 28.05.2026).
118. Natividad, L.E., Benalcazar, P. Hybrid Renewable Energy Systems for Sustainable Rural Development: Perspectives and Challenges in Energy Systems Modeling //Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 3. – P. 1328. – DOI: 10.3390/en16031328.
119. Neshat, M. et al. Wind turbine power output prediction using a new hybrid neuro-evolutionary method //Energy. – 2021. – Т. 229. – P. 120617. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.120617.
120. Nguyen, T.-T. et al. Grid-Forming Inverter-based Wind Turbine Generators: Comprehensive Review, Comparative Analysis, and Recommendations //arXiv. – 2022. – DOI: 10.48550/arXiv.2203.02105.
121. Nur'Aini, E. et al. Reliability Analysis and Maintainability for the Design of Grid and Hybrid Solar Power Plant Systems in Wonogiri Regency //ELKHA. – 2021. – Т. 13. – №. 1. – P. 77. – DOI: 10.26418/elkha.v13i1.46011.
122. Ogunjuyigbe, A.S.O., Ayodele, T.R., Akinola, O.A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building //Applied Energy. – 2016. – Т. 171. – P. 153-171. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.051.
123. Olatomiwa, L. et al. Hybrid renewable energy supply for rural healthcare facilities: An approach to quality healthcare delivery //Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2018. – Т. 30. – P. 121-138. – DOI: 10.1016/j.seta.2018.09.007.
124. Olsina, F., Larisso, C. Optimization of Spinning Reserve in Stand-alone Wind-Diesel Power Systems //Wind Power. – InTech, 2010. – DOI: 10.5772/8362.
125. Ozioko, I.O. et al. Wind energy penetration impact on active power flow in developing grids //Scientific African. – 2022. – Т. 18. – P. e01422. – DOI: 10.1016/j.sciaf.2022.e01422.
126. Pamuk, N. Feasibility analysis and optimal sizing of islanded hybrid energy system by using bio-inspired algorithms //Ain Shams Engineering Journal. – 2025. – Т. 16. – №. 12. – P. 103799. – DOI: 10.1016/j.asej.2025.103799.

127. Parol, M. et al. Reliability Analysis of MV Electric Distribution Networks Including Distributed Generation and ICT Infrastructure //Energies. – 2022. – T. 15. – №. 14. – P. 5311. – DOI: 10.3390/en15145311.
128. Pedersen, M.M., Larsen, G.C. Integrated wind farm layout and control optimization //Wind Energy Science. – 2020. – T. 5. – №. 4. – P. 1551-1566. – DOI: 10.5194/wes-5-1551-2020.
129. Penisa, X.N. et al. Projecting the Price of Lithium-Ion NMC Battery Packs Using a Multifactor Learning Curve Model //Energies. – 2020. – T. 13. – №. 20. – P. 5276. – DOI: 10.3390/en13205276.
130. Pérez, Uc D. A., De León Aldaco S. E., Aguayo Alquicira J. Trends in Hybrid Renewable Energy System (HRES) Applications: A Review //Energies. – 2024. – T. 17. – №. 11. – P. 2578. – DOI: 10.3390/en17112578.
131. Petrović, A., Đurišić, Ž. Genetic algorithm based optimized model for the selection of wind turbine for any site-specific wind conditions //Energy. – 2021. – T. 236. – P. 121476. – DOI: 10.1016/j.energy.2021.121476.
132. Qin, C. et al. Comparative Study of Global Sensitivity Analysis and Local Sensitivity Analysis in Power System Parameter Identification //Energies. – 2023. – T. 16. – №. 16. – P. 5915. – DOI: 10.3390/en16165915.
133. Qiu, K., Entchev, E. Modeling, design and optimization of integrated renewable energy systems for electrification in remote communities //Sustainable Energy Research. – 2024. – T. 11. – №. 1. – P. 10. – DOI: 10.1186/s40807-024-00103-5.
134. Raghuwanshi, S. S., Arya, R. Reliability evaluation of stand-alone hybrid photovoltaic energy system for rural healthcare centre //Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2020. – T. 37. – P. 100624. – DOI: 10.1016/j.seta.2019.100624.
135. Rajanna, S., Saini, R.P. Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area //Energy. – 2016. – T. 111. – P. 803-817. – DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.005.
136. Ramesh, M., Saini, R.P. Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India //Journal of Cleaner Production. – 2020. – T. 259. – P. 120697. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120697.

137. Ramon, J. et al. What global reanalysis best represents near-surface winds? //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2019. – T. 145. – №. 724. – P. 3236-3251. – DOI: 10.1002/qj.3616.
138. Rathore, A., Patidar, N.P. Reliability assessment using probabilistic modelling of pumped storage hydro plant with PV-Wind based standalone microgrid //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – T. 106. – P. 17-32. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.09.030.
139. Rivera-Niquepa, J. D. et al. Planning stand-alone electricity generation systems, a multiple objective optimization and fuzzy decision making approach //Heliyon. – 2020. – T. 6. – №. 3. – P. e03534. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03534.
140. Salameh, T. et al. Hybrid renewable energy system for a remote area in UAE //2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC). – Amman, Jordan : IEEE, 2021. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/IREC51415.2021.9427823.
141. Saltelli, A. et al. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index //Computer Physics Communications. – 2010. – T. 181. – №. 2. – P. 259-270. – DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018.
142. Samatar, A.M. et al. Techno-economic and environmental analysis of a fully renewable hybrid energy system for sustainable power infrastructure advancement //Scientific Reports. – 2025. – T. 15. – №. 1. – P. 12140. – DOI: 10.1038/s41598-025-96401-z.
143. Schlachtberger, D.P. et al. Cost optimal scenarios of a future highly renewable European electricity system: Exploring the influence of weather data, cost parameters and policy constraints //Energy. – 2018. – T. 163. – P. 100-114. – DOI: 10.1016/j.energy.2018.08.070.
144. Selim, A. et al. Hybrid off-grid energy systems optimal sizing with integrated hydrogen storage based on deterministic balance approach //Scientific Reports. – 2024. – T. 14. – №. 1. – P. 6888. – DOI: 10.1038/s41598-024-55631-3.
145. Sen, R., Bhattacharyya, S.C. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER //Renewable Energy. – 2014. – T. 62. – P. 388-398. – DOI: 10.1016/j.renene.2013.07.028.

146. Sharma, P.K., Bhuvana, V., Ramakrishnan, M. Reliability analysis of Diesel Generator power supply system of Prototype Fast Breeder Reactor //Nuclear Engineering and Design. – 2016. – T. 310. – P. 192-204. – DOI: 10.1016/j.nucengdes.2016.10.013.
147. Shi, Z., Liang, F., Pezzuolo, A. Renewable energy communities in rural areas: A comprehensive overview of current development, challenges, and emerging trends //Journal of Cleaner Production. – 2024. – T. 484. – P. 144336. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144336.
148. Shklyarskiy, Y.E., Starshaya, V.V. Autonomous complex for electro-thermal heating of oil wells fed by a photovoltaic installation //E3S Web of Conferences. – 2021. – T. 266. – P. 04006. – DOI: 10.1051/e3sconf/202126604006.
149. Sinha, S., Chandel, S.S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – T. 32. – P. 192-205. – DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035.
150. Sosnina, E. et al. Review of Efficiency Improvement Technologies of Wind Diesel Hybrid Systems for Decreasing Fuel Consumption //Energies. – 2022. – T. 16. – №. 1. – P. 184. – DOI: 10.3390/en16010184.
151. Stroykov, G., Cherepovitsyn, A.Y., Iamshchikova, E.A. Powering Multiple Gas Condensate Wells in Russia's Arctic: Power Supply Systems Based on Renewable Energy Sources //Resources. – 2020. – T. 9. – №. 11. – P. 130. – DOI: 10.3390/resources9110130.
152. Suhane, P. et al. Sizing and performance analysis of standalone wind-photovoltaic based hybrid energy system using ant colony optimisation //IET Renewable Power Generation. – 2016. – T. 10. – №. 7. – P. 964-972. – DOI: 10.1049/iet-rpg.2015.0394.
153. Sumair, M. et al. Wind potential estimation and proposed energy production in Southern Punjab using Weibull probability density function and surface measured data //Energy Exploration & Exploitation. – 2021. – T. 39. – №. 6. – P. 2150-2168. – DOI: 10.1177/0144598720920748.

154. Suslov, K.V. A microgrid concept for isolated territories of Russia //2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). – Berlin, Germany : IEEE, 2012. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465614.
155. The Impact Of Generator Set Underloading [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cat.com/en_US/by-industry/electric-power/Articles/White-papers/the-impact-of-generator-set-underloading.html (дата обращения: 28.05.2026).
156. Thongsan, S., Jiajitsawat, S., Sonsaree, S. Performance of a 10 kWh Zinc-Bromine Flow Battery in Solar Power System //GMSARN International Journal. – 2024. – Т. 18. – №. 2. – P. 183-188.
157. Tina, G., Gagliano, S., Raiti, S. Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment //Solar Energy. – 2006. – Т. 80. – №. 5. – P. 578-588. – DOI: 10.1016/j.solener.2005.03.013.
158. Tremyasov, V.A., Krivenko, T.V. Reliability Evaluation Method of the Wind-Diesel Installation with Application of Dynamic Fault Tree //Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2017. – Т. 10. – №. 3. – P. 414-425. – DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-414-425.
159. Tsvetkova, O., Ouarda, T.B.M.J. A review of sensitivity analysis practices in wind resource assessment //Energy Conversion and Management. – 2021. – Т. 238. – P. 114112. – DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114112.
160. Ummels, B.C. et al. Impacts of Wind Power on Thermal Generation Unit Commitment and Dispatch //IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – Т. 22. – №. 1. – P. 44-51. – DOI: 10.1109/TEC.2006.889616.
161. Wangdee, W., Billinton, R. Reliability assessment of bulk electric systems containing large wind farms //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2007. – Т. 29. – №. 10. – P. 759-766. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2007.06.028.
162. Yadav, S., Kumar, P., Kumar, A. Hybrid renewable energy systems design and techno-economic analysis for isolated rural microgrid using HOMER //Energy. – 2025. – Т. 327. – P. 136442. – DOI: 10.1016/j.energy.2025.136442.

163. Yao, Y. et al. A comprehensive review of optimizing hybrid renewable energy system using optimization techniques //Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2026. – T. 78. – P. 102384. – DOI: 10.1016/j.jestch.2026.102384.
164. Yu, J. et al. Evaluation of Near-Surface Wind Speed Changes during 1979 to 2011 over China Based on Five Reanalysis Datasets //Atmosphere. – 2019. – T. 10. – №. 12. – P. 804. – DOI: 10.3390/atmos10120804.
165. Zahran, M. B. A. Photovoltaic Hybrid Systems Reliability and Availability //Journal of Power Electronics. – 2003. – T. 3. – №. 3. – P. 145-150.
166. Zarate-Perez, E., Colmenar-Santos, A., Rosales-Asensio, E. Optimizing Hybrid Renewable Systems for Critical Loads in Andean Medical Centers Using Metaheuristics //Electronics. – 2025. – T. 14. – №. 16. – P. 3273. – DOI: 10.3390/electronics14163273.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации****ООО «Балтэнерготех»**

194017, г. Санкт-Петербург, ул. Дрезденская д.8, корпус 2, литера А,
пом. 4-Н, офис 14

Тел. +7 812 612 00 60

e-mail: info@baltenergotech.ru

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Балтэнерготех»
Колеватов М.С.
«10» апреля 2025 г.

**АКТ****о внедрении результатов кандидатской диссертации
Емельянова Евгений Александровича**

по научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

Комиссия в составе:**Председатель:**

Генеральный директор, Колеватов Михаил Сергеевич

Члены комиссии:

Начальник отдела АСУ ТП, Кирьянов Валерий Михайлович

Ведущий инженер-программист, Артамонов Вячеслав Викторович

Ведущий инженер-проектировщик, Кондратенко Роман Александрович

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Гибридный электротехнический комплекс с дизель- и ветроэлектрической установками для автономного электроснабжения поселения», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в инженерно-проектировочной деятельности ООО «Балтэнерготех» при разработке методических указаний и рекомендаций, направленных на повышение эффективности электротехнических систем и комплексов автономного электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии в виде:

– технических предложений и рекомендаций по выбору схем распределительного устройства в автономных электротехнических комплексах;

– рекомендации и методики по выбору номинальных параметров гибридного электротехнического комплекса с дизель- и/или ветроэлектрической установками

при проведении технико-экономического обоснования внедрения автономных систем электроснабжения и систем накопления энергии.

Использование полученных результатов позволит:

- оценить влияние показателей надежности основного энергетического оборудования на показатели автономного электротехнического комплекса с ветроэлектрической установкой и без нее;
- оптимизировать параметры гибридного электротехнического комплекса на этапе проектирования с учетом генерации ветроэлектрической установки, расхода топлива и показателей надежности основного оборудования;
- сократить за счет оптимального выбора схемы распределительного устройства и параметров комплекса недоотпуск электроэнергии не менее чем на 30%;
- повысить срок службы оборудования дизельной электростанции на 20–40%, сократить расход дизельного топлива до 30% за счет внедрения ветроэлектрической установки, и предлагаемых алгоритмов управления генерирующим оборудованием.

Председатель комиссии

Генеральный директор



Колесов М.С.

Члены комиссии:

Начальник отдела АСУ ТП



Кирьянов В.М.

Ведущий инженер-программист



Артамонов В.В.

Ведущий инженер-проектировщик



Кондратенко Р.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023611997

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023611997

**Программа для оценки жизненного цикла гибридного
комплекса с ветроэлектрической установкой**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Бельский Алексей Анатольевич (RU), Емельянов
Евгений Александрович (RU)*

Заявка № 2023610557

Дата поступления 18 января 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 января 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024618725

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024618725

Программа для оптимизации состава и оценки
жизненного цикла дизельной электростанции

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II» (RU)*

Авторы: *Бельский Алексей Анатольевич (RU), Емельянов
Евгений Александрович (RU)*



Заявка № 2024617353

Дата поступления 08 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Ресстрс программ для ЭВМ 16 апреля 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe1853164ba196f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов