

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***

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

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Бельский Алексей Анатольевич

Официальные оппоненты:

Тягунов Михаил Георгиевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, профессор;

Доброскок Никита Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра систем автоматического управления, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 29 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



УСТИНОВ
Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. Обухо-

вым, 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. Сулова, И.С. Токарева, М.Г. Тягунова, R. Dufo-Lopez и многих других. Исследованием режимов работы оборудования занимались А.Г. Васильков, 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.).

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 научных 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 2025 года, 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, 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы автономного электроснабжения поселений на ИТТ. Проанализированы особенности автономного электроснабжения и основные тенденции развития ВИЭ. Рассмотрены существующие подходы к оценке показателей надежности гибридных ЭТК и методы оптимизации параметров оборудования. Сформулированы выводы, определяющие направления дальнейших исследований.

Во второй главе изложены принципы имитационного моделирования гибридного ЭТК. Разработана структура имитационной модели и представлено математическое описание ДГУ, ВЭУ и СНЭ. Описаны подходы к формированию временных рядов электрической нагрузки поселения и ветровой энергии, а также к моделированию отказов оборудования. Описана логика работы РУ в нормальных и аварийных режимах.

В третьей главе проведена глобальная оценка чувствительности показателей гибридного ЭТК к изменению параметров оборудования и режимов работы с использованием метода Соболя. Выявлены наиболее значимые параметры, оказывающие влияние на экономические и технические показатели гибридного ЭТК. Проведен сравнительный анализ схем РУ гибридного ЭТК.

В четвертой главе установлены зависимости технико-экономических показателей гибридного ЭТК от параметров и режимов работы СНЭ. Выполнен выбор оптимальных параметров СНЭ. Разработан адаптивный алгоритм выбора минимального уровня заряда СНЭ.

В заключении представлены выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами. Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

В работе рассмотрены две схемы низковольтного РУ, представленные на рисунке 1. 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. Избыток генерации «сбрасывается» на балластное сопротивление (БС).

Логика работы генерирующего оборудования гибридного ЭТК на каждом интервале моделирования определяется уравнением баланса мощности (1):

$$P_n = (P_{дгу} + P_{взу} + P_{снэ}) - P_{сб} + P_{деф}, \quad (1)$$

где P_n , $P_{дгу}$, $P_{взу}$, $P_{снэ}$, $P_{сб}$, и $P_{деф}$ – мощность нагрузки, ДГУ, ВЭУ, СНЭ, «сброса» на балластную нагрузку и дефицит мощности соответственно, кВт. При дефиците мощности реализуется ступенчатая частотная разгрузка с шагом 10% от текущей нагрузки.

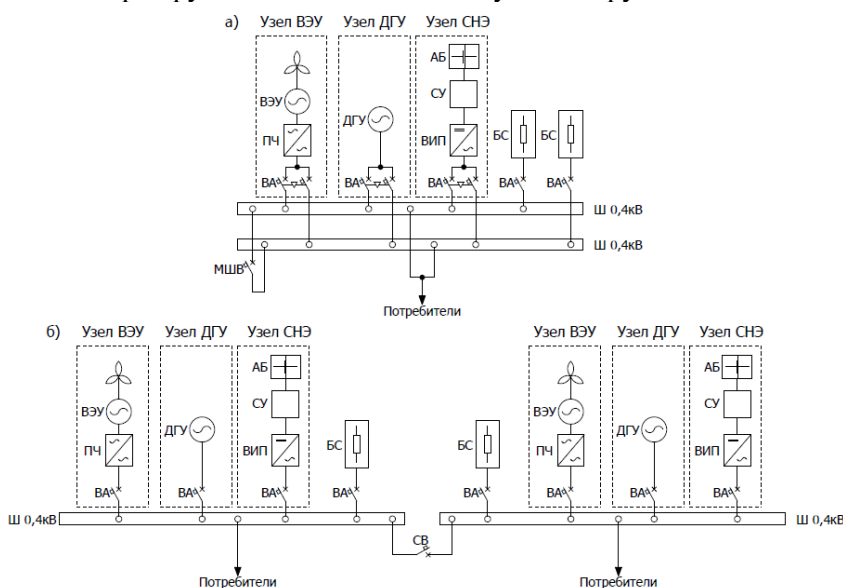


Рисунок 1 – Схемы низковольтного РУ гибридного ЭТК: а – двойная система шин; б – одиночная секционированная система шин

На рисунке 2 представлена блок-схема разработанного алгоритма для расчета показателей гибридного ЭТК. Основные показатели гибридного ЭТК: нормированная стоимость электроэнергии ($LCOE$ – *Levelized Cost of Energy*), вероятности потери электроснабжения ($LPSP$ – *Loss of Power Supply Probability*) и нагрузки ($LOLP$ –

Loss of Load Probability). Основные сценарии распределения нагрузки при аварийных ситуациях приведены на рисунке 3. Алгоритм учитывает распределение потребителей по категориям надежности электроснабжения, при этом структура нагрузки считается неизменной (доли потребителей I, II и III категории сохраняются в каждый интервал моделирования).

На основе представленного алгоритма разработана программа для ЭВМ, реализованная на языке *Java*. Входными данными для имитационного моделирования являются годовой почасовой график нагрузки поселения, полученный на основе измерений фактической загрузки ДГУ (максимальная нагрузка 1 346 кВт принята за расчетную мощность поселения) поселка Гыда (ЯНАО) и график скорости ветра из базы данных *NASA MERRA 2*. Моделирование работы гибридного ЭТК производится с шагом дискретизации 1 час на интервале 20 лет ($T=175\,320$).

Расчет генерации ВЭУ производится на основе уравнения (2) с учетом почасовых значений скорости ветра и параметров ВЭУ:

$$P_{\text{ВЭУ}} = \begin{cases} 0, V < V_{\min} \\ P_{\text{ном}} \left(\frac{V^3 - V_{\min}^3}{V_{\text{ном}}^3 - V_{\min}^3} \right), V_{\min} \leq V < V_{\text{ном}}, \\ P_{\text{ном}}, V_{\text{ном}} \leq V \leq V_{\max} \\ 0, V > V_{\max} \end{cases}, \quad (2)$$

где V – скорость ветра, м/с; $V_{\min}$ – минимальная скорость ветра ВЭУ (3 м/с); $V_{\text{ном}}$ – номинальная скорость ветра ВЭУ (12,5 м/с); $V_{\max}$ – максимальная скорость ветра ВЭУ (25 м/с); $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность ВЭУ, кВт. Высота мачты принята 50 м.

Количество ДГУ, которые должны находиться в работе, определяется выражением (3):

$$N_{\text{дгу.раб}} = \min \left(N_{\text{дгу}}, \left\lceil \frac{P_{\text{н}} - P_{\text{ВЭУ}}}{P_{\text{дгу.ном}}} \right\rceil \right), \quad (3)$$

где $N_{\text{дгу}}$ – общее количество доступных ДГУ; $P_{\text{н}}$, $P_{\text{ВЭУ}}$, $P_{\text{дгу.ном}}$ – мощность нагрузки, ВЭУ и номинальная мощность ДГУ, кВт.

Расход топлива определяется на основе удельного расхода топлива (4), полученного квадратичной аппроксимацией паспортных данных ДГУ с двигателями ЯМЗ мощностью 80–400 кВт:

$$F_{\text{уд,t}} = k_1 \cdot l_t^2 + k_2 \cdot l_t + k_3, \quad (4)$$

где l_t – текущая нагрузка ДГУ относительно номинальной мощности;
 k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, полученные при аппроксимации методом
наименьших квадратов, определяемые по формуле (5):

$$k_i = k_{i1} + \frac{k_{i2}}{P_{\text{дгу. ном.}}}, \quad (5)$$

где k_{i1} и k_{i2} – коэффициенты, полученные гиперболической аппроксимацией методом наименьших квадратов (см. таблицу 1).

Каждые 250 часов работы ДГУ проводятся техническое обслуживание длительностью 4 часа. При работе на низкую нагрузку (меньше 30%) свыше 4 часов подряд проводится прожиг ДГУ при 30% нагрузке. Пуск простаивающей ДГУ требует 5 минут и сопровождается дополнительным увеличением наработки на 5 моточасов.

Формирование параметров сети осуществляется ДГУ или СНЭ. Если СНЭ способна обеспечить нагрузку на время пуска резервной ДГУ, нагруженный (вращающийся) резерв не используется. В ином случае эксплуатация ДГУ осуществляется в режиме нагруженного резерва, при котором одна из работающих установок является резервной, что обеспечивает выполнение критерия $N-1$.

Для СНЭ выбраны литий-ионные аккумуляторные батареи (LiFePO_4), так как они отличаются высокой энергетической плотностью, долговечностью и возможностью работы в широком диапазоне режимов нагрузки. Текущий уровень заряда (SOC – *State of Charge*) определяется формулой (6):

$$SOC_t = SOC_{t-1} - \frac{C_{\max,0} \cdot k_{\text{self}}}{C_{\max,t}} + \begin{cases} \frac{\eta \cdot E_{\text{зар},t}}{C_{\max,t}}, \text{ заряд} \\ -\frac{E_{\text{разр},t}}{\eta \cdot C_{\max,t}}, \text{ разряд} \end{cases}, \quad (6)$$

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; $E_{\text{зар}} / E_{\text{разр}}$ – энергия заряда/разряда, кВт·ч. Максимальный объем энергии, доступный для заряда/разряда СНЭ определяется выражениями (7–8):

$$E_{\max,\text{зар},t} = C_{\max,t} \frac{SOC_{\max} - SOC_t}{\eta}, \quad (7)$$

$$E_{\max,\text{разр},t} = C_{\max,t} (SOC_t - SOC_{\min}) \eta, \quad (8)$$

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.

Текущая максимальная емкость СНЭ с учетом деградации определяется по формуле (9):

$$C_{max,t} = C_{max,0}(1 - K \cdot EFC_t^Z), \quad (9)$$

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 (10):

$$EFC_t = \sum_{j=1}^t \frac{|\Delta E_j|}{2C_{max,0}} \cdot \max\left(1, \frac{|P_{снэ,j}|}{P_{1c}}\right)^h, \quad (10)$$

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).

СНЭ выполняет три основные функции: покрытие дефицита мощности, обеспечение отказа от нагруженного резерва ДГУ и замещение части дизельной генерации. При замещении дизельной генерации проверяется условие сохранения заданного минимального уровня заряда (11):

$$\frac{E_{разр,t} - E_{тр,t}}{C_{max,t}} \geq L_t, \quad (11)$$

где L – минимальный уровень заряда в режиме замещения генерации ДГУ; $C_{max,t}$ – максимальная емкость СНЭ, кВт·ч; $E_{разр}$ и $E_{тр}$ – доступная и требуемая для разряда энергии, кВт·ч.

Для учета стохастического характера отказов оборудования в моделировании использован метод Монте-Карло. Время наработки до отказа и восстановления оборудования рассчитываются как случайные величины, распределенные по экспоненциальному закону, и определяются по формулам (12–13):

$$T_o = \left\lceil \frac{-\ln(U) \cdot 8760}{\lambda} \right\rceil, \quad (12)$$

$$T_v = \left\lceil \frac{-\ln(U) \cdot 8760}{\mu} \right\rceil, \quad (13)$$

где λ – интенсивность отказов оборудования, год⁻¹; μ – интенсивность восстановления, год⁻¹; U – случайная величина, равномерно

распределенная на интервале $[0;1]$. Для каждого типа оборудования использовались независимые последовательности псевдослучайных чисел.

При глобальной оценке чувствительности значения параметров изменяются в диапазоне, указанном в таблице 2 (см. столбец 2). Мощность ВЭУ задается в процентах относительно расчетной мощности, емкость СНЭ задается в процентах относительно расчетной мощности, приведенной к часовому интервалу. Оценка чувствительности выполнена по методу Соболя с использованием полного индекса чувствительности ST , характеризующего суммарный вклад параметров в дисперсию с учетом их взаимодействия (рисунок 4). В дисперсию $LCOE$ наибольший вклад вносят стоимость топлива ($ST = 0,81$), емкость СНЭ ($ST = 0,6$), показатели надежности ВЭУ (ST до $0,6$) и мощность ДГУ ($ST = 0,44$). В дисперсию $LPSP$ и $LOLP$ наибольший вклад вносят количество (ST до $0,85$) и мощность ДГУ (ST до $0,65$), показатели надежности шины ($ST = 0,37-0,96$) и доли потребителей I и II категорий (ST до $0,32$).

Для оценки влияния распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения на показатели гибридного ЭТК проведено моделирование с параметрами, указанными в таблице 2 (см. столбец 3). Результаты (рисунок 5) демонстрируют превосходство двойной системы шин по $LOLP$ и $LPSP$. Распределение потребителей по категориям надёжности электроснабжения не оказывает существенного влияния на $LCOE$ вне зависимости от схемы РУ. Для дальнейших расчетов приняты значения долей I и II категории надежности электроснабжения, равные $0,1$ и $0,4$ соответственно.

Сравнение схем РУ производится при вариации мощности ДГУ в диапазоне $180-300$ кВт, суммарной установленной мощности ВЭУ до 300% и емкости СНЭ 50% ($L_t=0,6$). Результаты сравнения секционированной и двойной систем шин представлены на рисунке 6. Оптимальной по минимуму $LCOE$ является область значений мощности ДГУ $180-250$ кВт и мощности ВЭУ $75-150\%$ относительно расчетной нагрузки.

Выбрана двойная система шин, так как ей соответствуют меньшие значения $LPSP$ и $LOLP$. Снижение указанных показателей

составляет 5–32% и 3–17% соответственно относительно секционированной системы шин в оптимальной по $LCOE$ области. Минимуму $LCOE$ соответствует конфигурация 8 ДГУ по 200 кВт и ВЭУ 100% относительно расчетной нагрузки. Значения показателей гибридного ЭТК для оптимального варианта указаны в таблице 3.

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.

Для оценки влияния параметров СНЭ на показатели гибридного ЭТК проводится моделирование для двойной системы шин с 8 ДГУ по 200 кВт и долями потребителей I и II категорий надежности электроснабжения 0,1 и 0,4 соответственно. Максимальный ток заряда СНЭ не оказывает существенного влияния на показатели комплекса, что подтверждается оценкой чувствительности.

На рисунке 7 представлены графики зависимости показателей гибридного ЭТК при вариации емкости и минимального уровня заряда СНЭ для максимальных токов разряда 1–3С (в рассматриваемом примере максимальный ток разряда равен 2С). Увеличение максимального тока разряда позволяет интегрировать СНЭ меньшей установленной емкости, что способствует снижению $LCOE$.

Для значений установленной мощности ВЭУ до 300% относительно расчетной нагрузки определены оптимальные значения (по критерию минимума $LCOE$) установленной емкости СНЭ с учетом фиксированного минимального уровня заряда и максимального тока разряда (рисунок 8).

В диапазоне мощности ВЭУ 125–200% достигается плато оптимальной по $LCOE$ емкости, после чего дальнейшее увеличение мощности ВЭУ практически не влияет на значение оптимальной емкости.

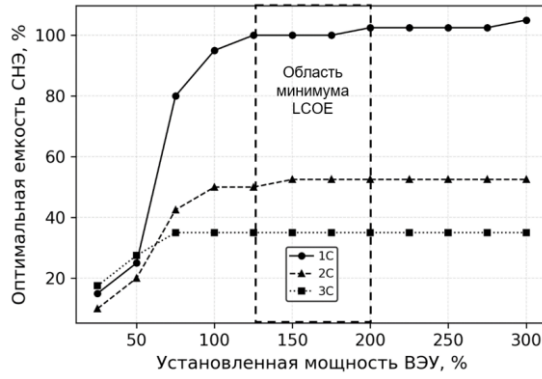


Рисунок 8 – Оптимальные значения емкости СНЭ

Разработан алгоритм адаптивного управления минимальным уровнем заряда СНЭ в режиме замещения генерации ДГУ, который определяется выражениями (14–15):

$$L_t = 0,2 + 0,8 \cdot \min(\max(F_t, 0), 1) \quad (14)$$

$$F = k_d F_d + k_T F_T + k_y F_y + k_{\Pi} F_{\Pi} + k_3 F_3 + k_p F_p, \quad (15)$$

где $F_d, F_T, F_y, F_{\Pi}, F_3, F_p$ – факторы дефицита, тренда дефицита, ускорения дефицита, пуска, замещения и резерва мощности ДГУ; $k_d, k_T, k_y, k_{\Pi}, k_3, k_p$ – весовые коэффициенты соответствующих факторов.

Блок-схема адаптивного алгоритма представлена на рисунке 9. График адаптивного изменения минимального уровня заряда СНЭ приведен на рисунке 10.

Расчет факторов производится по формулам (16–22):

$$\Delta P = P_H - P_{ВЭУ} \quad (16)$$

$$F_{d,t} = \max\left(\frac{\Delta P_{t-1}}{P_{дгу,сум}}, 0\right), \quad (17)$$

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

$$F_{T,t} = \frac{\Delta P_{t-1} - \Delta P_{t-2}}{P_{дгу,сум}} \quad (18)$$

$$F_{y,t} = \frac{(\Delta P_{t-1} - \Delta P_{t-2}) - (\Delta P_{t-2} - \Delta P_{t-3})}{P_{дгу,сум}} \quad (19)$$

$$F_{\Pi,t} = \begin{cases} -1, N_{дгу,t-1} = 0 \\ 0, N_{дгу,t-1} > 0 \end{cases}, \quad (20)$$

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

$$F_{3,t} = \begin{cases} \left(\frac{N_{\text{дгу,тр},t} - N_{\text{дгу,факт},t}}{N_{\text{дгу,тр},t}} \right)^2, & N_{\text{дгу,тр},t} > 0 \\ 0, & N_{\text{дгу,тр},t} = 0 \end{cases}, \quad (21)$$

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

$$F_{p,t} = \frac{P_{\text{н},t-1}}{P_{\text{дгу,раб},t-1}}, \quad (22)$$

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

На рисунке 11 представлен график эффективности адаптивного алгоритма относительно использования фиксированного минимального уровня заряда СНЭ (см. рисунок 8) при настройке на минимум $LOLP$ без ухудшения $LCOE$.

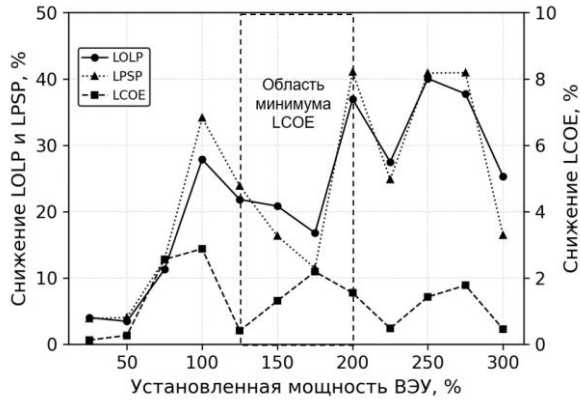


Рисунок 11 – Эффективность адаптивного алгоритма

Весовые коэффициенты подобраны перебором квазислучайных последовательностей Соболя с последующей оценкой каждого набора методом Монте-Карло. Результаты применения адаптивного алгоритма приведены в таблице 4.

Анализ Парето-эффективных решений приведен на рисунке 12. Парето-фронты демонстрируют устойчивый компромисс между $LCOE$ и $LOLP$. Область рациональных значений соответствует установленной мощности ВЭУ 150–200% и значениям $LCOE$ 25,5–26,2 руб/кВт·ч, $LOLP$ $(6–11) \cdot 10^{-5}$ и $LPSP$ $(8–13) \cdot 10^{-6}$.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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. – EDN APNVOM.

2. Бельский, А.А. Модель дизельной электростанции при оценке жизненного цикла автономного гибридного ветроэлектриче-

ского 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. – EDN DUZAPU.

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

3. Бельский, А.А. Оценка показателей автономного электро-технического 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. – EDN CBSRHO.

4. 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. – EDN IQTFKN.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5 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.

6. 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.

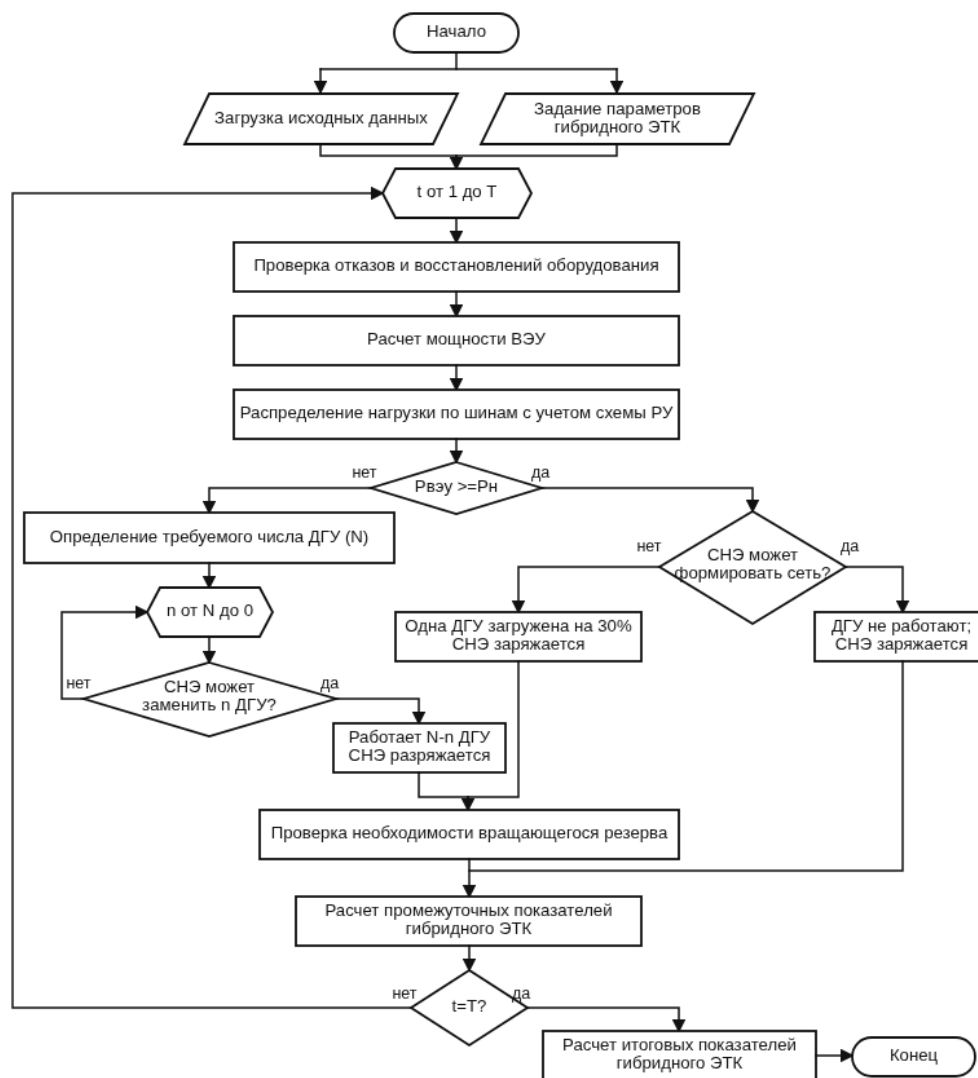


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма для расчета показателей гибридного ЭТК

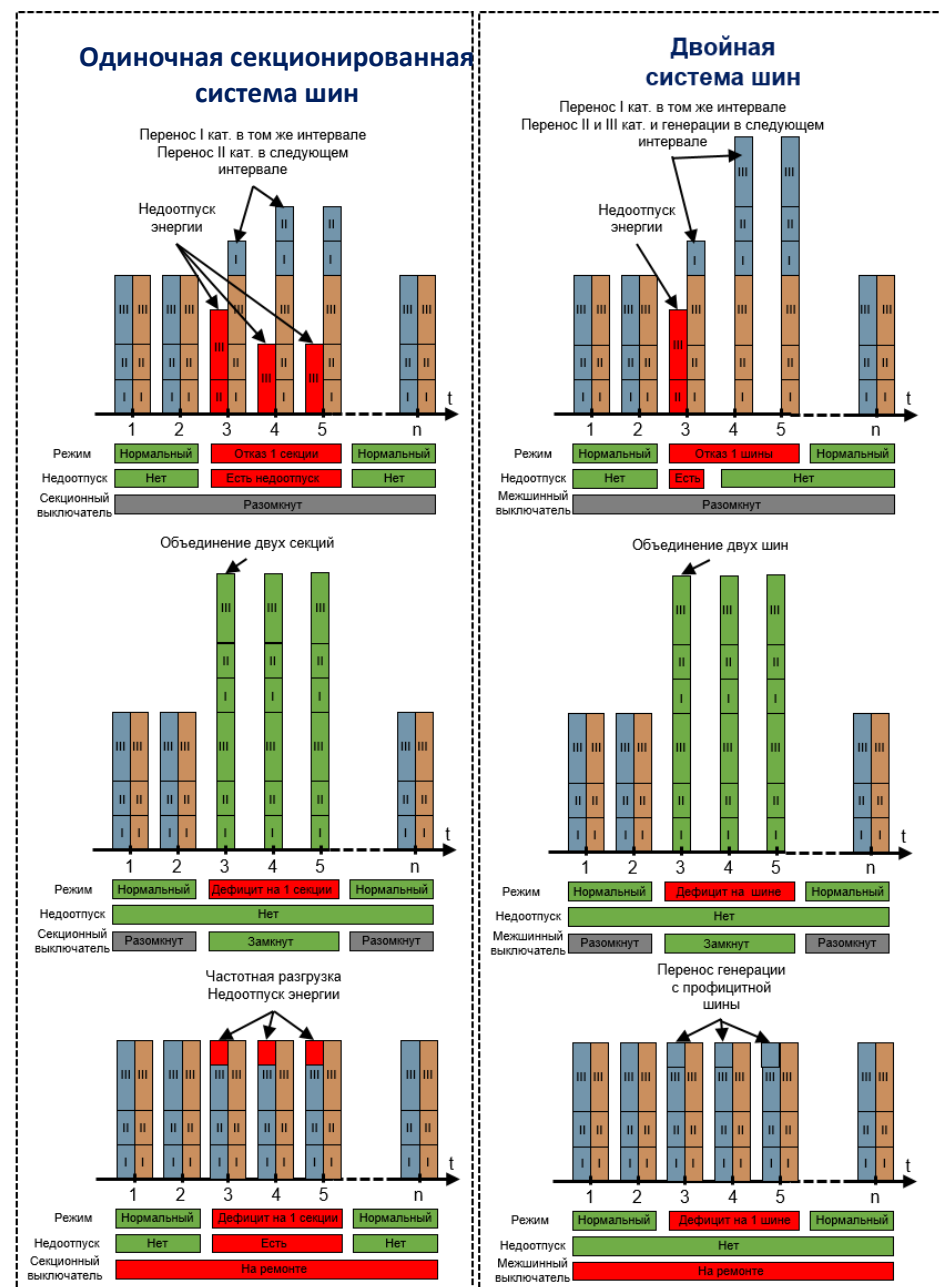


Рисунок 3 – Сценарии работы РУ в аварийных ситуациях

Таблица 1 – Коэффициенты гиперболической аппроксимации удельного расхода топлива ДГУ

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

Таблица 2 – Параметры моделирования гибридного ЭТК

Параметр	Диапазоны значений	Значения
1	2	3
Количество ДГУ	6–10	8
Мощность одной ДГУ, кВт	170–510	200
Мощность ВЭУ, %	100–300	200
Емкость СНЭ, %	25–75	50
Максимальный ток заряда СНЭ, С	0,3–0,9	0,6
Максимальный ток разряда СНЭ, С	1–3	2
Допустимая глубина разряда СНЭ	0,3–0,9	0,6
Доля потребителей I / II кат. надежности	0–0,5	0,25
Интенсивность отказов (λ) ВЭУ, год ⁻¹	0,97–2,91	1,94
Интенсивность отказов (λ) ДГУ, год ⁻¹	2,38–7,13	4,75
Интенсивность отказов (λ) СНЭ, год ⁻¹	0,16–0,49	0,325
Интенсивность отказов (λ) шин, год ⁻¹	0,01–0,024	0,016
Интенсивность отказов (λ) СВ/МШВ, год ⁻¹	0,03–0,08	0,05
Интенсивность восстановления (μ) ВЭУ, год ⁻¹	97,34–292,01	194,67
Интенсивность восстановления (μ) ДГУ, год ⁻¹	89,39–268,17	178,78
Интенсивность восстановления (μ) СНЭ, год ⁻¹	121,65–364,95	243,3
Интенсивность восстановления (μ) шин, год ⁻¹	365–1095	730
Интенсивность восстановления (μ) СВ/МШВ, год ⁻¹	438–1314	876
Ставка дисконтирования	0,04–0,12	0,08
¹ Стоимость несекционированной РУ, тыс. руб.	2500–7500	5000
Стоимость ДГУ, тыс. руб./кВт	30–90	60
Обслуживание ДГУ, тыс. руб./кВт·тыс. м·ч	2,5–7,5	5
Стоимость топлива, тыс. руб./т	45–135	90
Стоимость ВЭУ, тыс. руб./кВт	100–300	200
Обслуживание ВЭУ, тыс. руб./кВт·год	2–6	4
Стоимость СНЭ, тыс. руб./кВт·ч	22,5–67,5	45
Обслуживание СНЭ, тыс. руб./кВт·ч·год	0,6-1,8	1,2
² Ущерб от недоотпуска III кат., тыс. руб./кВт·ч	0,1–0,3	0,2

¹Стоимость РУ% секционированная – ×1,5; двойная – ×1,7 от несекционированной.

²Ущерб: II категория – ×5, I категория – ×10 относительно III.

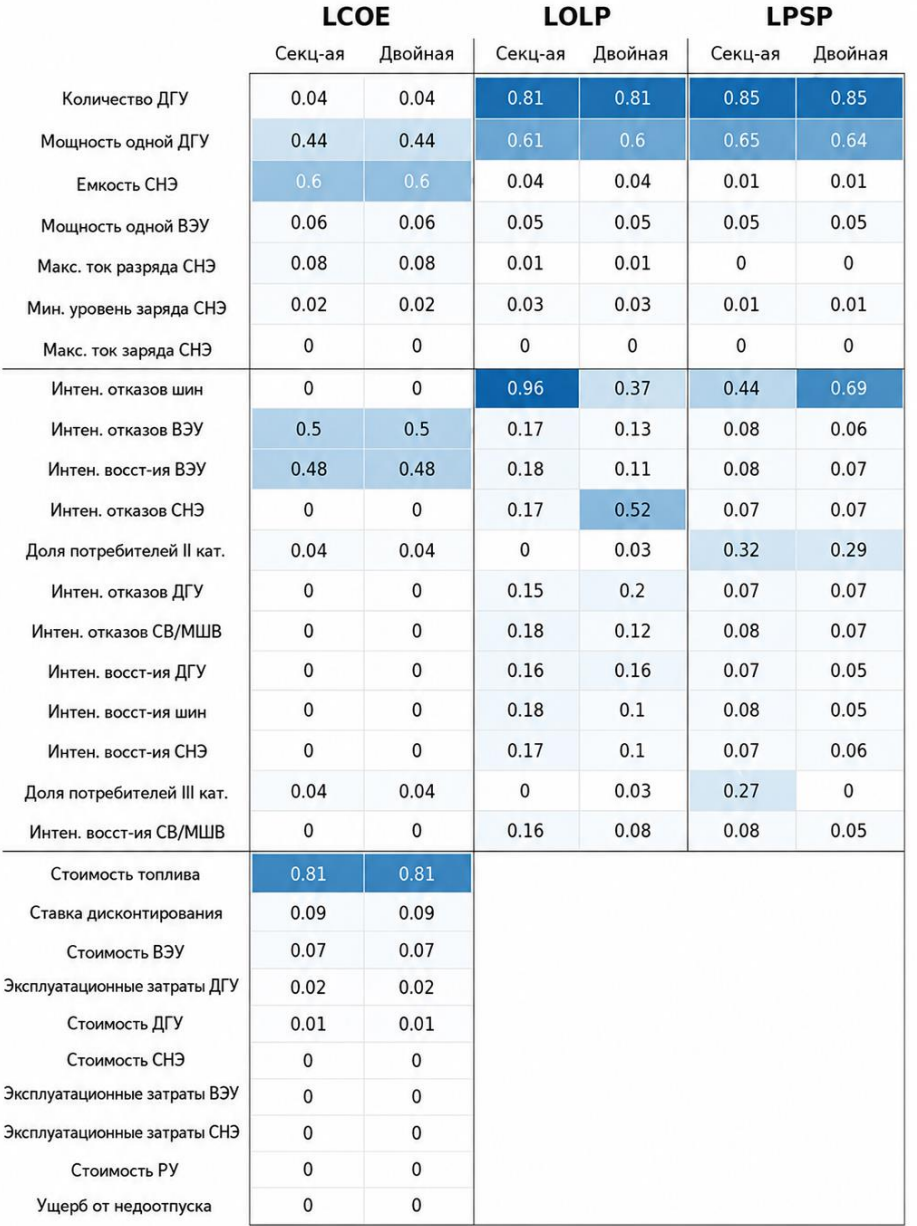


Рисунок 4 – Результаты глобального анализа чувствительности по методу Соболя

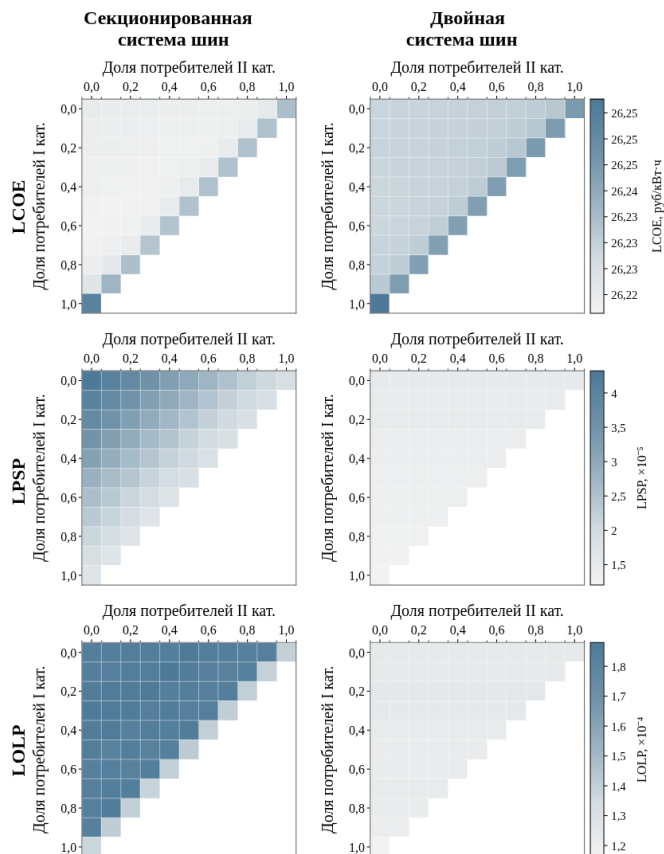
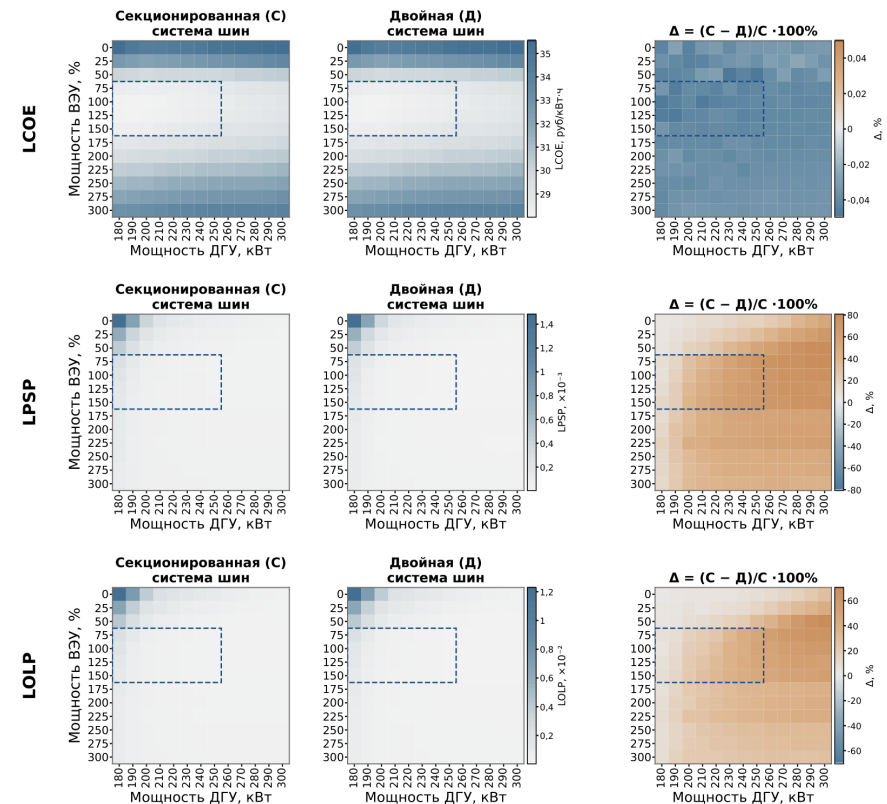


Рисунок 5 – Влияние распределения потребителей по категориям надежности электроснабжения на показатели гибридного ЭТК

Таблица 3 – Значения показателей гибридного ЭТК для оптимального по LCOE набора ДГУ и ВЭУ

Параметр	Значение
LCOE, руб./кВт·ч	28,02
LOLP	$2,986 \cdot 10^{-4}$
LPSP	$3,212 \cdot 10^{-5}$
Расход топлива, тыс. тонн/год	1,08
Моточасы, тыс. мч./год	42,7
Количество дефицитных событий в год	1,83
Максимальная длительность дефицита, ч	6,8



Пунктирной линией обозначены области минимума LCOE
Рисунок 6 – Сравнение схем РУ по показателям гибридного ЭТК

Таблица 4 – Эффективность применения адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ

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
Оптимальные значения весовых коэффициентов	Кд	0,548	0,48	0,52	0,352	0,031
	Кт	0,93	1,01	0,179	1,658	0,577
	Ку	0,29	0,552	0,166	0,452	0,224
	Кп	0,023	3,019	3,21	1,978	0,541
	Кр	0,195	0,292	0,348	0,287	0,944
	Кз	2,198	2,955	2,751	2,999	3,046

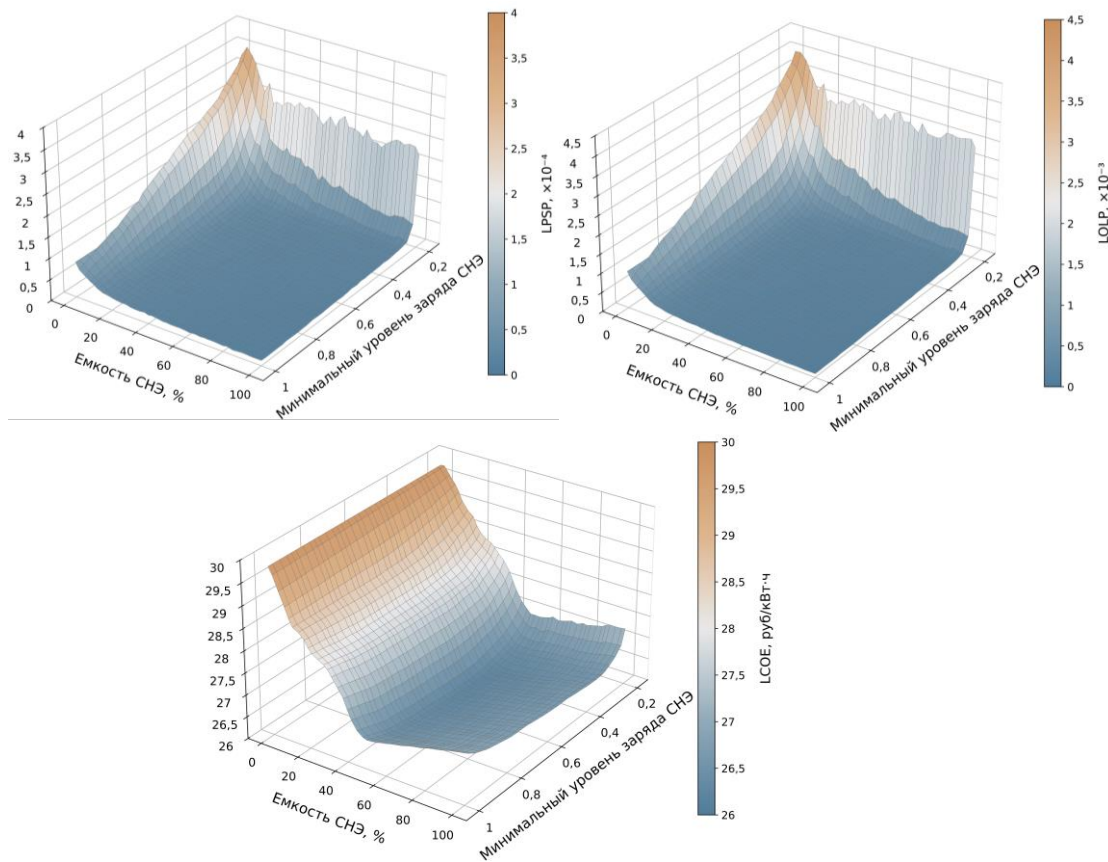


Рисунок 7 – Зависимость показателей гибридного ЭТК от емкости и минимального уровня заряда СНЭ (для максимального тока разряда 2С)

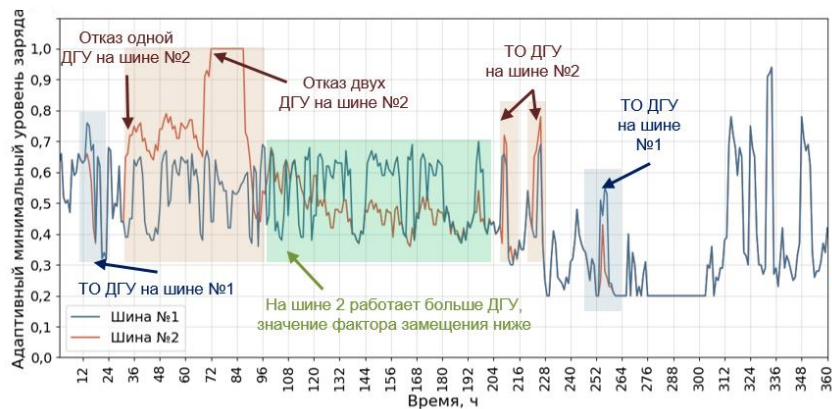


Рисунок 10 – Результат работы адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ

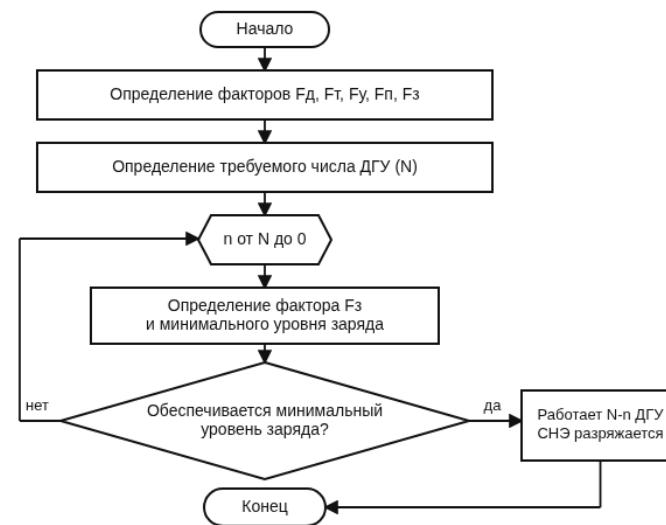


Рисунок 9 – Блок-схема адаптивного алгоритма управления минимальным уровнем заряда СНЭ

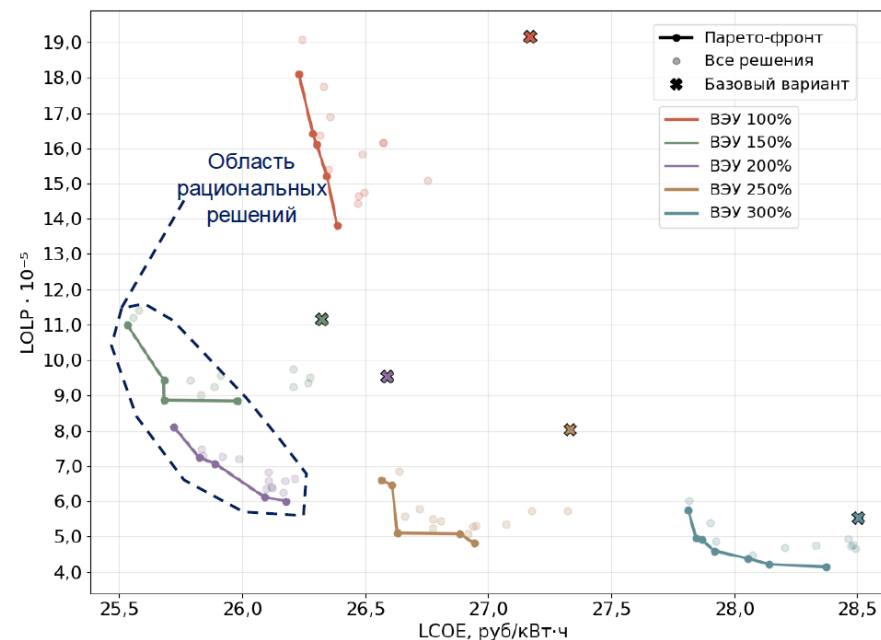


Рисунок 12 – Парето-эффективные решения применения адаптивного алгоритма