

Особенности энергоснабжения автономных объектов в условиях труднодоступных территорий

М. Ю. Карелина, Р. В. Ключев[✉], Д. В. Сердечный

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Государственный университет управления»
109542, Россия, Москва, Рязанский проспект, 99

Аннотация. Освоение арктических и других труднодоступных территорий является стратегической задачей Российской Федерации, обеспечивающей национальную безопасность и социально-экономическое развитие страны. Устойчивое функционирование объектов, расположенных на труднодоступных территориях, напрямую зависит от надежности и эффективности их энергетической инфраструктуры. Актуальность исследования обусловлена растущим числом автономных объектов (метеостанций, баз добычи полезных ископаемых, телекоммуникационных вышек) в труднодоступных регионах Российской Федерации (Арктика, Дальний Восток, Сибирь), где подключение к единой энергосистеме технически бывает невозможно или экономически нецелесообразно. Энергоснабжение таких объектов сопряжено с экстремальными климатическими условиями, логистическими сложностями и требованиями высокой надежности.

Цель исследования – разработка методики оптимизации состава гибридной энергетической системы для автономных объектов в труднодоступных регионах на основе многокритериального анализа, обеспечивающей минимизацию стоимости энергии при заданных требованиях к надежности электроснабжения и экологическим показателям.

Методы исследования. Методы системного анализа и математического моделирования использованы для комплексной оценки эффективности гибридных энергетических систем (комплексов), совмещающих возобновляемые источники энергии с традиционными дизель-генераторами и системами накопления энергии.

Результаты. В ходе исследования разработана многокритериальная оптимизационная модель, позволяющая определить рациональную структуру и параметры гибридных энергетических систем по критериям минимума стоимости жизненного цикла, максимума надежности и минимума выбросов. Проведенное имитационное моделирование работы системы в условиях случайного набора метеопараметров и нагрузки подтвердило возможность снижения расхода дизельного топлива на 40–60 % и выбросов CO₂ на 35–55 % при сохранении высокого уровня надежности энергоснабжения.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы для проектирования и модернизации систем энергоснабжения автономных объектов, эксплуатируемых в суровых условиях Российской Арктики.

Ключевые слова: автономное энергоснабжение, гибридная энергетическая система, возобновляемые источники энергии, системный анализ, оптимизация, труднодоступные территории, накопление энергии, арктические условия

Поступила 29.08.2025, одобрена после рецензирования 19.09.2025, принята к публикации 29.09.2025

Для цитирования. Карелина М. Ю., Ключев Р. В., Сердечный Д. В. Особенности энергоснабжения автономных объектов в условиях труднодоступных территорий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 43–53. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-43-53

Features of power supply for autonomous objects in hard-to-reach areas

M.Yu. Karelina, R.V. Klyuev[✉], D.V. Serdechnyy

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“State University of Management”
99 Ryazansky prospekt, Moscow, 109542, Russia

Abstract. The development of the Arctic and other hard-to-reach territories is a strategic objective of the Russian Federation, ensuring national security and socio-economic development of the country. Sustainable operation of facilities located in hard-to-reach territories directly depends on the reliability and efficiency of their energy infrastructure. The relevance of the study is due to the growing number of autonomous facilities (weather stations, mining bases, telecommunication towers) in hard-to-reach regions of the Russian Federation (Arctic, Far East, Siberia), where connection to the unified energy system is technically impossible or economically impractical. Power supply of such facilities is associated with extreme climatic conditions, logistical difficulties and high reliability requirements.

Aim. The purpose of the study is to develop a methodology for optimizing the composition of a hybrid energy system for autonomous facilities in hard-to-reach regions based on multi-criteria analysis, ensuring the minimization of energy costs under specified requirements for the reliability of power supply and environmental indicators.

Methods. Methods of system analysis and mathematical modeling are used for a comprehensive assessment of the efficiency of hybrid energy systems (complexes) combining renewable energy sources with traditional diesel generators and energy storage systems.

Results. The study developed a multi-criteria optimization model that allows determining the rational structure and parameters of hybrid energy systems according to the criteria of minimum life cycle cost, maximum reliability and minimum emissions. The conducted simulation modeling of the system operation under a random set of meteorological parameters and load confirmed the possibility of reducing diesel fuel consumption by 40–60% and CO₂ emissions by 35–55% while maintaining a high level of energy supply reliability.

Conclusions. The results of the work can be used to design and modernize energy supply systems for autonomous facilities operating in the harsh conditions of the Russian Arctic.

Keywords: autonomous power supply, hybrid energy system, renewable energy sources, system analysis, optimization, hard-to-reach areas, energy storage, arctic conditions

Submitted on 29.08.2025,

approved after reviewing on 19.09.2025,

accepted for publication on 29.09.2025

For citation. Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Serdechnyy D.V. Features of power supply for autonomous objects in hard-to-reach areas. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 43–53. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-43-53

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая безопасность и устойчивое развитие труднодоступных и изолированных территорий Российской Федерации является одной из стратегических задач государства¹. К таким территориям относятся значительные части Арктической зоны, Дальнего

¹Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации (Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216 утверждена новая Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации – документ стратегического планирования в сфере обеспечения национальной безопасности Российской Федерации). <https://minenergo.gov.ru/ministry/energy-security-doctrine>

Востока, Сибири и высокогорья, где расположены населенные пункты, объекты добывающей промышленности, объекты инфраструктуры связи и другие важные объекты – ответственные потребители [1]. Подключение этих объектов к централизованным системам энергоснабжения зачастую невозможно из-за колоссальных расстояний, сложного рельефа и суровых климатических условий.

Традиционно энергоснабжение таких автономных потребителей обеспечивается дизель-генераторными установками (ДГУ). Однако этот подход имеет существенные недостатки: высокие и постоянно растущие затраты на завоз топлива, значительные эксплуатационные расходы, сильная зависимость от логистических цепочек, негативное воздействие на хрупкую экосистему северных регионов [2, 3].

В этих условиях все более актуальным становится создание гибридных энергетических комплексов (ГЭК), комбинирующих ДГУ с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), прежде всего солнечными (СЭС) и ветровыми (ВЭУ) генераторами, и системами накопления энергии (СНЭ) – многоэлементными аккумуляторными батареями [4, 5]. Подобные системы позволяют значительно сократить потребление дизельного топлива, повысить надежность энергоснабжения и снизить экологическую нагрузку [6]. Однако проектирование и управление ГЭК сопряжены со значительными трудностями, обусловленными случайной природой ВИЭ, нелинейностью характеристик оборудования, многообразием критериев оптимизации и суровостью климатических условий, влияющих на эффективность работы и срок службы компонентов [7].

Цели и задачи исследования

Таким образом, существует потребность в разработке адаптивных алгоритмов контроля и управления ГЭК для автономных объектов, позволяющих учесть всю совокупность технико-экономических, климатических и эксплуатационных факторов. Данное исследование направлено на решение этой задачи. Цель исследования заключается в повышении эффективности и надежности энергоснабжения автономных объектов на труднодоступных территориях на основе методов системного анализа и оптимизации структуры гибридных энергетических систем; разработке структурно-функциональной модели гибридной энергосистемы, включающей ДГУ, солнечные панели, ветрогенераторы (ВЭУ), многоэлементные накопители энергии и систему управления. Также необходимо формализовать задачу оптимизации состава оборудования и режимов управления ГЭК как многокритериальную задачу – минимизация приведенной стоимости энергии (LCOE), минимизация вероятности потери электроснабжения (LPSР) и минимизация объема выбросов CO_2 .

Необходимо разработать комплекс математических моделей для компонентов ГЭК, адекватно описывающих их поведение в условиях переменных нагрузок и случайных метеофакторов, а также провести имитационное моделирование для различных конфигураций ГЭК и климатических сценариев, характерных для труднодоступных территорий России.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в работе применяется комплекс методов системного анализа, теории управления и математического моделирования. Инструменты системного анализа позволяют рассмотреть ГЭК как сложную техническую систему, выявить взаимосвязи между ее элементами, формализовать цели и критерии эффективности ее функцио-

нирования [8]. Теория вероятностей и математическая статистика используются для статистического анализа метеорологических данных и профилей нагрузки автономного объекта. Для моделирования случайных данных применяются методы Монте-Карло и генерации временных рядов на основе распределений Вейбулла (ветер) и Бета (солнце) [9, 10].

Задача выбора оптимальной конфигурации ГЭК является многокритериальной. Для ее решения предлагается использование алгоритмов нечеткой логики для свертки разнородных критериев (LCOE, LPSP, выбросы) в единый целевой функционал, а также применение эволюционных алгоритмов, в частности, алгоритма роя частиц (PSO – Particle Swarm Optimization), эффективных для поиска глобального оптимума в задачах большой размерности [11, 12]. Для оценки эффективности работы различных конфигураций ГЭК разработана модель с использованием языка Python. Модель включает: метеомодель (генерация временных рядов скорости ветра и солнечной инсоляции), модели источников энергии (зависимость мощности от скорости ветра, зависимость от инсоляции и температуры, топливная характеристика), модель СНЭ (с учетом глубины разряда, КПД и циклов заряда-разряда), модель системы управления (реализующая стратегию приоритета использования ВИЭ). Для расчета критерия LCOE применяется метод дисконтирования денежных потоков (DCF), учитывающий капитальные и эксплуатационные затраты, стоимость топлива и срок службы объекта [13–15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработаны комплексная модель (блок-схема на рис. 1) и программный инструмент (Свидетельство на программу для ЭВМ «Метод оптимизации конфигурации для гибридного энергетического комплекса»).

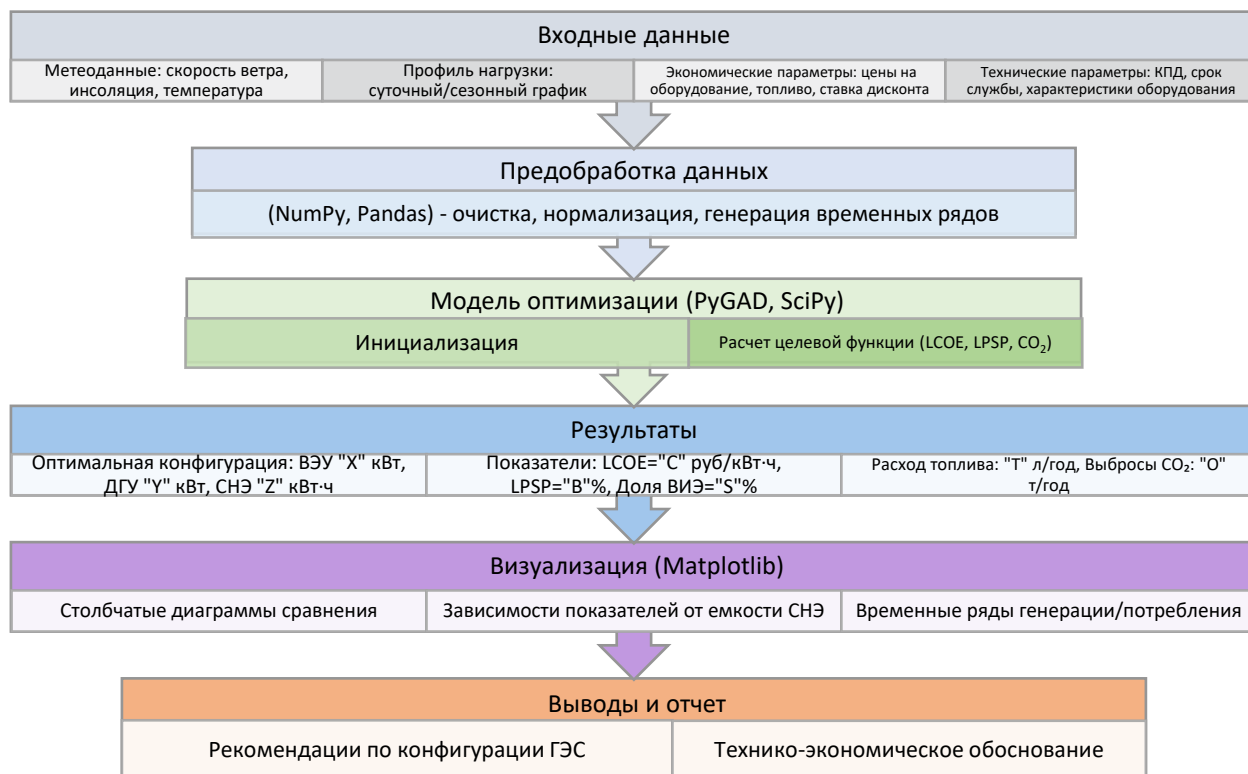


Рис. 1. Блок-схема модели оптимизации ГЭК

Fig. 1. Block diagram of the GEC optimization model

Модель реализована в среде Python с использованием библиотек для научных вычислений (NumPy, Pandas), оптимизации (SciPy, PyGAD для генетического алгоритма) и визуализации (Matplotlib). Для оценки надежности введен расчет коэффициента недостатка мощности (LPSP) по уравнению 1:

$$LPSP = \frac{\sum L}{\sum R} * 100\%, \quad (1)$$

где L – дефицит мощности (кВт*ч), R – нагрузка (кВт*ч).

Для экономической оценки рассчитана приведенная стоимость энергии (LCOE) по методике [13–15]:

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum \frac{OPEX}{(1+d)^t}}{\sum \frac{S}{(1+d)^t}}, \quad (2)$$

где $CAPEX$ – капитальные затраты, $OPEX$ – операционные расходы за год, S – выработка энергии за год, d – ставка дисконтирования, t – год эксплуатации.

Была проведена серия вычислительных экспериментов для автономного объекта с нагрузкой 100 кВт. Смоделированы три конфигурации ГЭК для двух климатических зон – для арктических территорий (п. Тикси) и Северного Кавказа (г. Владикавказ). Исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные по территориям

Table 1. Initial data by territories

п/п	Территория	Годовой профиль ветра	Инсоляция
1	Владикавказ, Республика Северная Осетия – Алания	4,1 м/с	1300 кВт*ч/м ²
2	Тикси, Республика Саха (Якутия)	7,2 м/с	900 кВт*ч/м ²

В таблице 2 приведены данные о стоимости оборудования для ГЭК, а также средняя стоимость дизельного топлива на август 2025 г. Для удобства в расчетах стоимость была округлена в большую сторону (табл. 2).

Таблица 2. Стоимость оборудования для ГЭК

Table 2. Cost of equipment for the hydroelectric power station

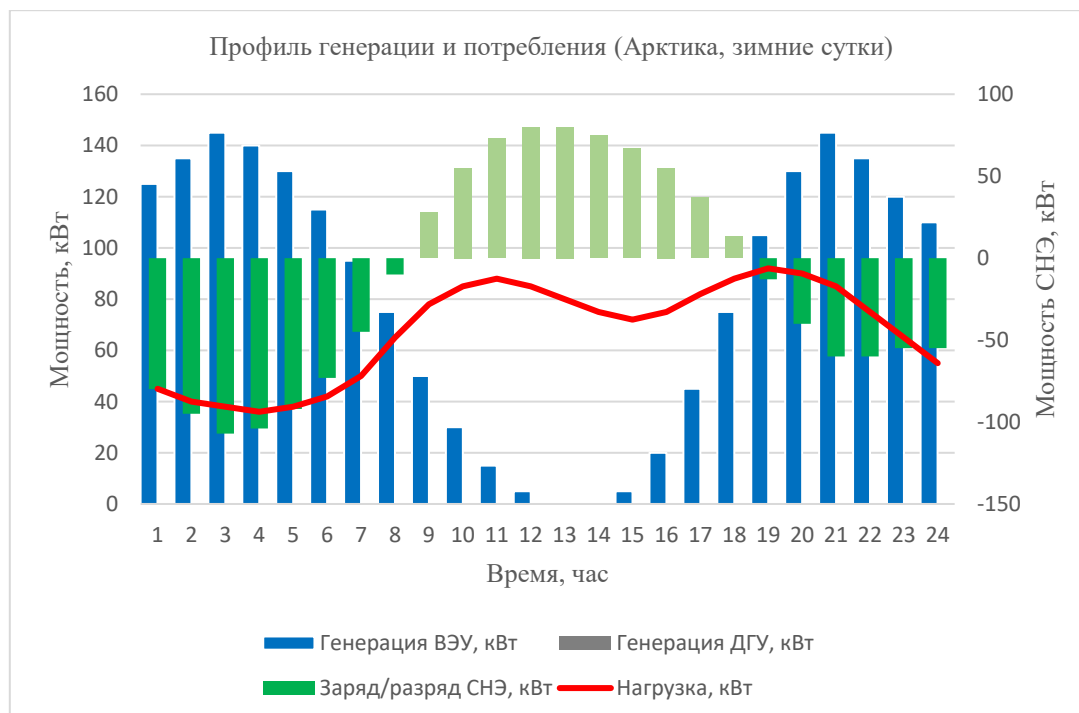
п/п	Оборудование	Стоимость, руб.
1	ДГУ	50 000
2	Солнечная панель	60 000
3	Ветрогенератор	80 000
4	СНЭ (LiFePo4)	120 000
5	Стоимость дизтоплива (за 1 л)	65

Ниже в таблице 3 представлены результаты имитационного моделирования.

Таблица 3. Сравнение оптимальных конфигураций ГЭС для разных регионов (результаты оптимизации)**Table 3.** Comparison of optimal hydroelectric power station configurations for different regions (optimization results)

Параметр	Арктика (ВЭУ+ДГУ+СНЭ)	Северный Кавказ (СЭС+ДГУ+СНЭ)	Арктика (только ДГУ)
Мощность ДГУ, кВт	80	90	120
Мощность ВЭУ, кВт	150	—	—
Мощность СЭС, кВт	—	120	—
Емкость СНЭ, кВт*ч	400	480	—
LCOE, руб/кВт*ч	18.5	16.8	42.3
LPSP, %	2.1	1.8	0.5
Доля ВИЭ, %	68	58	0
Расход топлива, л/год	28 500	34 100	95 000
Выбросы CO ₂ , т/год	75,4	90,2	251

Был проведен анализ суточного профиля работы ГЭК. Выявлено, что в ночные и вечерние часы наблюдается максимальная генерация ветроэнергетической установки (до 145 кВт), что полностью покрывает нагрузку и обеспечивает заряд аккумуляторных батарей. В утренние и дневные часы при снижении скорости ветра генерация от ВЭУ существенно снижается, и в работу включается СНЭ, которая компенсирует дефицит мощности. Дизель-генераторная установка в течение всех суток находится в режиме ожидания, что демонстрирует эффективность предложенной конфигурации ГЭС для арктических условий. На основе данных имитационного моделирования построены временные ряды недели зимнего и летнего периода. Профиль генерации и потребления представлен на рисунке 2.

**Рис. 2.** Профиль генерации и потребления (Арктика, конфигурация ВЭУ+ДГУ+СНЭ, зимняя неделя)**Fig. 2.** Generation and consumption profile (Arctic, wind turbine+diesel generator+electric power station configuration, winter week)

Анализ суточного профиля работы гибридной энергосистемы демонстрирует высокую эффективность интеграции ветрогенерации с системой накопления энергии в арктических условиях. Выявлены три характерных режима работы. Период избыточной генерации (00:00–07:00) – максимальная выработка ВЭУ достигает 145 кВт при нагрузке 36–50 кВт, что создает значительный избыток энергии (до 107 кВт), направляемый на заряд аккумуляторных батарей. Коэффициент использования установленной мощности ВЭУ в этот период составляет 85–95 %. В период разряда СНЭ (08:00–17:00) при снижении скорости ветра генерация ВЭУ падает до 0–30 кВт, а дефицит мощности компенсируется разрядом аккумуляторов (до 80 кВт). Глубина разряда СНЭ достигает 65–70 % от номинальной емкости. В период стабилизации (18:00–23:00) восстановление ветровой генерации (105–145 кВт) позволяет полностью покрыть нагрузку и начать новый цикл заряда СНЭ. Дизель-генераторная установка в течение всех суток не активировалась, что свидетельствует о достаточности мощности ВЭУ и емкости СНЭ.

Для определения оптимальной емкости СЭС проведен параметрический анализ, демонстрирующий взаимосвязь технологических и экономических показателей ГЭК. Результаты расчетов (рис. 3) показывают наличие выраженного компромисса между стоимостью энергии, надежностью электроснабжения и долей возобновляемой генерации. Анализ выявил точку экономической целесообразности при емкости СНЭ 400 кВт*ч, где достигается минимальная стоимость энергии при обеспечении приемлемого уровня надежности.

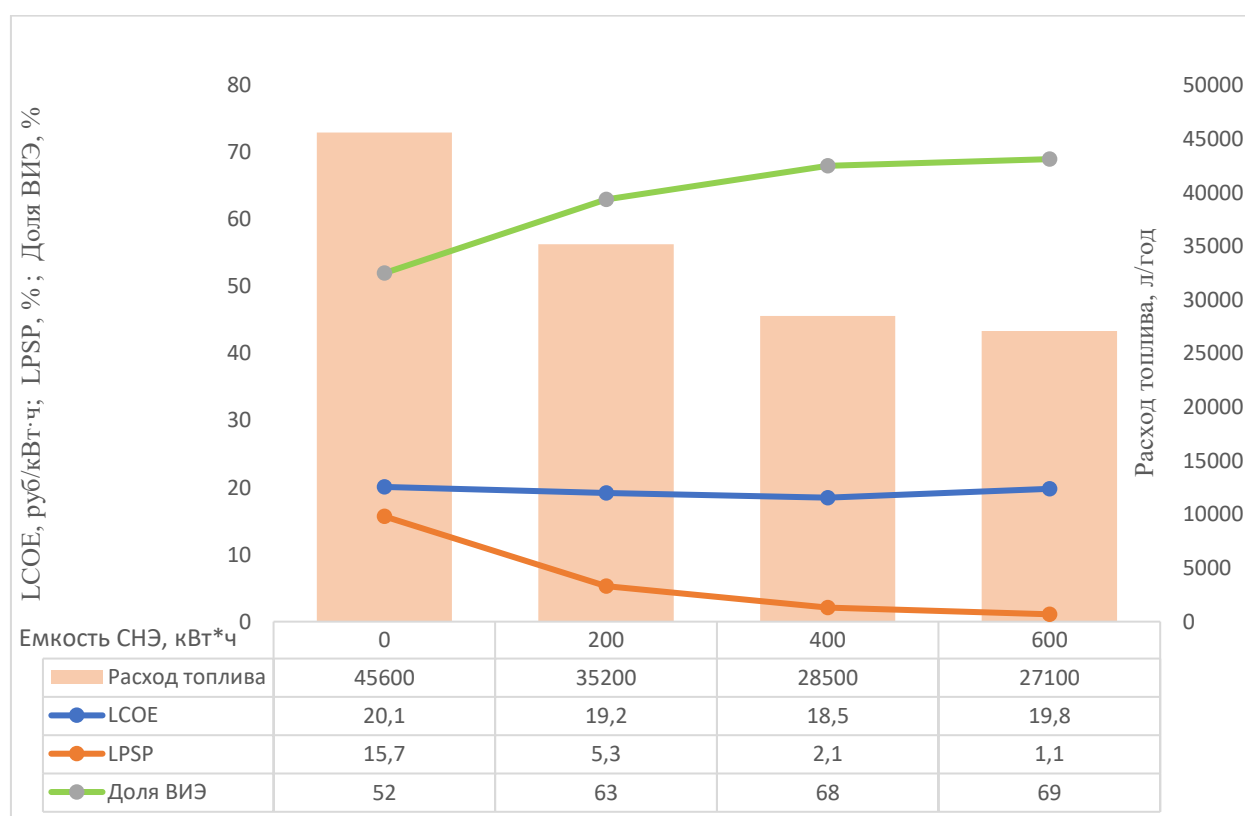


Рис. 3. Оптимизация емкости СНЭ в гибридной энергосистеме

Fig. 3. Optimization of the capacity of the SNE in a hybrid power system

Проведенное параметрическое исследование зависимости ключевых технико-экономических показателей гибридной энергетической системы от емкости СНЭ выявило наличие выраженного нелинейного характера изучаемых зависимостей. Анализ полученных результатов позволяет выделить три характерные зоны функционирования системы. На

участке от 0 до 200 кВт·ч наблюдается значительное улучшение всех показателей. Вероятность потери нагрузки снижается с 15,7 % до 5,3 %, что свидетельствует о достижении минимально приемлемого уровня надежности энергоснабжения. При этом приведенная стоимость энергии снижается на 4,5 %, а доля возобновляемых источников в годовом энергобалансе увеличивается с 52 % до 63 %. Данный эффект объясняется способностью накопителя компенсировать кратковременные колебания генерации и нагрузки. Оптимальная зона функционирования системы наблюдается в диапазоне емкостей 300–500 кВт·ч с точкой оптимума при 400 кВт·ч. В этой области достигается минимальное значение LCOE (18,5 руб/кВт·ч) при обеспечении высокого уровня надежности (LPSP=2,1 %). Доля возобновляемой генерации составляет 68 %, а годовой расход дизельного топлива снижается на 37,5 % по сравнению с системой без накопителя. Физически это объясняется возможностью аккумулирования избыточной ночной ветрогенерации и ее использования в периоды суточных провалов ветра.

При дальнейшем увеличении емкости накопителя свыше 500 кВт·ч проявляется закон убывающей доходности. Рост капитальных затрат на 50 % (с 400 до 600 кВт·ч) приводит к незначительному улучшению показателей: снижение LPSP на 1 %, увеличение доли ВИЭ на 1 % и экономия топлива на 5 %. При этом стоимость энергии возрастает на 7 %, что делает такие инвестиции экономически нецелесообразными.

Полученные результаты позволяют сформулировать практические рекомендации для проектирования автономных гибридных систем в арктических условиях. Оптимальная емкость СНЭ составляет 3,5–4,5 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности ВЭУ, что обеспечивает наилучшее соотношение между надежностью энергоснабжения и экономической эффективностью проекта. Минимально допустимая емкость накопителя должна составлять не менее 2,0 кВт·ч/кВт для обеспечения приемлемого уровня надежности (LPSP<5 %). Выявленные закономерности демонстрируют важность корректного выбора емкости СНЭ при проектировании гибридных энергетических систем и подтверждают необходимость применения методов многокритериальной оптимизации для нахождения компромисса между технологическими и экономическими показателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения гибридных энергетических систем на основе ВИЭ для энергоснабжения автономных объектов на труднодоступных территориях. Разработанный методический аппарат на основе системного анализа и многокритериальной оптимизации позволяет научно обосновать выбор конфигурации ГЭС. Показано, что оптимальный состав оборудования ГЭС зависит от климатических условий региона: в ветровых зонах приоритет следует отдавать ВЭУ, в солнечных – СЭС, а в большинстве случаев максимальную эффективность показывает их комбинация.

Система накопления энергии является ключевым элементом, повышающим надежность и долю использования ВИЭ. Ее емкость является компромиссом между экономическими затратами и требуемым уровнем бесперебойности питания. Внедрение предложенных решений позволит существенно снизить эксплуатационные расходы и экологический ущерб, повысить энергетическую самостоятельность и устойчивость удаленных объектов. Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке адаптивных алгоритмов интеллектуального управления ГЭС на основе методов машинного обучения для прогнозирования генерации и потребления, а также в анализе интеграции других видов ВИЭ (геотермальная энергия, энергия приливов и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гагиев Н. Н., Гончаренко Л. П., Сыбачин С. А., Шестакова А. А. Национальные проекты в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика и Север. 2020. № 41. С. 113–129. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.41.113
2. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 97–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118
3. Клюев Р. В. Системный анализ методов расчета систем электроснабжения карьеров // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 1(59). С. 302–310. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310
4. Мошин А. А., Клюев Р. В. Использование альтернативных источников энергии в промышленности // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2021. Т. 6. № 3(25). С. 81–87. DOI: 10.25744/genb.2021.62.57.008
5. Сердечный Д. В., Томашевский Ю. В. Особенности эксплуатации накопителя энергии на базе многоэлементной литий-ионной аккумуляторной батареи // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 9–10. С. 140–145. EDN: YPSXXR
6. Сердечный Д. В., Томашевский Ю. В. Моделирование многоэлементных литий-ионных батарей в энергообеспечивающих комплексах автономных объектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 86–94. DOI: 10.14529/power170310
7. Ануфриев В. П., Гудим Ю. В., Каминов А. А. Устойчивое развитие. Энергоэффективность. Зеленая экономика. Екатеринбург: ИНФРА-М, 2021. 201 с.
8. Клименко Ю. А., Преображенский А. П. О системном анализе энергетического предприятия // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1(40). С. 122–124. EDN: YONHOS
9. Манусов В. З., Халдаров Ш. К. Моделирование законов распределений вероятностей мощности ветровых и солнечных электростанций // Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3(47). С. 81–91. DOI: 10.5281/zenodo.4018988
10. Мананов А. З., Зиннуров Т. А. Алгоритмы метода Монте-Карло для моделирования ветровой нагрузки на сооружения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1(13). Рр. 147–154. EDN: MWGSBP
11. Илюшин П. В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети // Библиотечка электротехника. 2020. № 8(260). С. 1–116. EDN: CMJIBM
12. Митяшин Н. П., Томашевский Ю. Б., Денисов А. В., Дмитриев А. А. Использование нечеткой меры ценности критериев при многокритериальном выборе // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 9. С. 38–42. EDN: SNQSCR
13. Воронай Н. И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. 2020. № 7. С. 12–21. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-7-12-21
14. Седнев В. А., Седнев А. В. Научно-методический подход обоснования состава источников электрической энергии для электроснабжения жизнеобеспечения автономного полевого лагеря // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2021. № 5. С. 95–120. DOI: 10.36535/0869-4179-2021-05-13
15. Гемечу Б. Д., Шарапов В. И. Оценка энергетической эффективности гибридной гелио-геотермальной электростанции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-3-11

REFERENCES

1. Gagiev N.N., Goncharenko L.P., Sybachin S.A., Shestakova A.A. National projects in the Arctic zone of the Russian Federation. *Arctic and North*. 2020. No. 41. Pp. 113–129. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.41.113. (In Russian)
2. Bogoyavlensky V.I. Natural and man-made threats during the development of fossil fuel deposits in the Earth's cryolithosphere. *Mining Industry Journal*. 2020. No. 1. Pp. 97–118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian)
3. Klyuev R.V. Systems analysis of methods for calculating quarry power supply systems. *Sustainable Development of Mountainous Territories*. 2024. Vol. 16. No. 1(59). Pp. 302–310. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-302-310. (In Russian)
4. Moshin A.A., Klyuev R.V. Use of alternative energy sources in industry. *Grozny Natural Science Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3(25). Pp. 81–87. DOI: 10.25744/genb.2021.62.57.008. (In Russian)
5. Serdechny D.V., Tomashevsky Yu.V. Features of operation of an energy storage device based on a multi-element lithium-ion battery. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Problemy energetiki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Problems of Energy]. 2017. Vol. 19. No. 9–10. Pp. 140–145. EDN: YPSXXR. (In Russian)
6. Serdechny D.V., Tomashevsky Yu.V. Modeling of multi-element lithium-ion batteries in energy supply complexes of autonomous objects. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2017. Vol. 17. No. 3. Pp. 86–94. DOI: 10.14529/power170310. (In Russian)
7. Anufriev V.P., Gudim Yu.V., Kaminov A.A. *Sustainable Development. Energy Efficiency. Green Economy*. Ekaterinburg: INFRA-M, 2021. 201 p. (In Russian)
8. Klimenko Yu.A., Preobrazhensky A.P. On the Systems Analysis of an Energy Enterprise. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies]. 2022. No. 1(40). Pp. 122–124. EDN: YONHOS. (In Russian)
9. Manusov V.Z., Khaldarov Sh.K. Modeling the laws of probability distributions of the capacity of wind and solar power plants. *Problems of the Regional Energetics*. 2020. No. 3(47). Pp. 81–91. DOI: 10.5281/zenodo.4018988. (In Russian)
10. Manapov A.Z., Zinnurov T.A. Algorithms of the Monte Carlo method for modeling wind loads on structures. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Izvestiya of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]. 2010. No. 1(13). Pp. 147–154. EDN: MWGSBP. (In Russian)
11. Ilyushin P.V. Prospects for the application and problematic issues of integrating distributed energy sources into electrical networks. *Bibliotekha elektrotehnika* [Library of Electrical Engineering]. 2020. No. 8(260). Pp. 1–116. EDN: CMJIBM. (In Russian)
12. Mityashin N.P., Tomashevsky Yu.B., Denisov A.V., Dmitriev A.A. Using a fuzzy measure of the value of criteria in multi-criteria selection. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and Modern Technologies]. 2014. No. 9. Pp. 38–42. EDN: SNQSCR. (In Russian)
13. Voropai N.I. Directions and problems of transformation of electric power systems. *Elektrichestvo*. 2020. No. 7. Pp. 12–21. DOI: 10.24160/0013-5380-2020-7-12-21. (In Russian)
14. Sednev V.A., Sednev A.V. Scientific and methodological approach to substantiating the composition of electrical energy sources for power supply of life support of an autonomous field camp. *Problemy bezopasnosti i chrezvychajnykh situatsiy* [Security and emergency issues]. 2021. No. 5. Pp. 95–120. DOI: 10.36535/0869-4179-2021-05-13. (In Russian)
15. Gemechu B.D., Sharapov V.I. Assessment of the energy efficiency of a hybrid solar-geothermal power plant. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Problemy energetiki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Problems of Energy]. 2019. Vol. 21. No. 4. Pp. 3–11. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-4-3-11. (In Russian)

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета Государственного университета управления по государственному заданию «Научные, методологические и практические основы разработки и применения цифровых и интеллектуальных технологий в целях обеспечения устойчивого развития регионов Российской Федерации, включая удаленные и труднодоступные территории Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны», код научной темы FZNW-2025-0021.

Funding. The article was prepared based on the results of research carried out at the expense of the federal budget of the State University of Management under the state assignment «Scientific, methodological and practical foundations for the development and application of digital and intelligent technologies in order to ensure sustainable development of the regions of the Russian Federation, including remote and hard-to-reach territories of Siberia, the Far East and the Arctic zone»; the code of the scientific topic FZNW-2025-0021.

Информация об авторах

Карелина Мария Юрьевна, д-р техн. наук, д-р пед. наук, профессор, проректор, Государственный университет управления;

109542, Россия, Москва, Рязанский проспект, 99;

myu_karelina@guu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0335-7550>, SPIN-код: 1852-1782

Клюев Роман Владимирович, д-р техн. наук, доцент, гл. науч. сотр. лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Государственный университет управления;

109542, Россия, Москва, Рязанский проспект, 99;

rv_kluev@guu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>, SPIN-код: 5817-8259

Сердечный Денис Владимирович, канд. техн. наук, доцент, начальник лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Государственный университет управления;

109542, Россия, Москва, Рязанский проспект, 99;

dv_serdechnyj@guu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3060-9469>, SPIN-код: 5330-3250

Information about the authors

Maria Yu. Karelina, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Vice-Rector, State University of Management;

99 Ryazansky prospekt, Moscow, 109542, Russia;

myu_karelina@guu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0335-7550>, SPIN-code: 1852-1782

Roman V. Klyuev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher, Laboratory of Digital and Intelligent Technologies for Development of Territories of the Russian Federation, State University of Management;

99 Ryazansky prospekt, Moscow, 109542, Russia;

rv_kluev@guu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>, SPIN-code: 5817-8259

Denis V. Serdechnyy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head, Laboratory of Digital and Intelligent Technologies for Development of Territories of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “State University of Management”;

99 Ryazansky prospekt, Moscow, 109542, Russia;

dv_serdechnyj@guu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3060-9469>, SPIN-code: 5330-3250