

Создание модели ВДЭК и проверка её эффективности на примере электроснабжения посёлка Тикси

Рецензия эксперта на статью получена 11.02.2026 [The expert review of the article was received on February 2, 2026]

Энергетическая независимость арктических и удалённых регионов России требует внедрения новых технологических и организационных решений. Оптимизация энергоснабжения изолированных территорий предполагает преимущественное использование возобновляемых и местных источников энергии. Успешное применение данной стратегии зависит от проведения комплексного исследования возможных альтернатив и оценки их технико-экономической эффективности.

В качестве объекта был выбран посёлок Тикси, расположенный в Республике Саха (Якутия), — важный пункт арктического побережья с навигационными, метеорологическими и научными функциями [1]. Его энергоснабжение остаётся уязвимым, поскольку основано на дизельных электростанциях, зависящих от ежегодной доставки топлива морем или по зимникам, что приводит к высокой себестоимости электроэнергии и экологической нагрузке на окружающую среду.

Мировой опыт (Канада, Гренландия, Норвегия) показывает, что гибридные энергосистемы, объединяющие ветроэлектрические установки (ВЭУ), дизельные электростанции (ДЭС) и системы накопления электрической энергии (СНЭЭ), обеспечивают надёжность энергоснабжения и значительно снижают эксплуатационные затраты [2–4]. Поэтому была поставлена цель исследования — создание универсальной модели ветродизельного энергокомплекса с системой накопления электроэнергии и проверка её эффективности на удалённом потребителе.

Для достижения цели были выделены следующие задачи:

1. Провести климатический анализ района, определить температурный, ветровой и сезонный режимы.
2. Оценить ветроэнергетический потенциал территории.
3. Построить годовой график электропотребления, определить средние и пиковые нагрузки.
4. Выполнить выбор оборудования — ветроустановок, дизельных электростанций, аккумуляторных систем, инверторов и системы управления.
5. Разработать методику расчёта энергетического баланса гибридной системы.
6. Оценить эффективность внедрения комплекса.

Текущее состояние исследований

Гибридные комплексы совместной работы электроустановок, работающих с помощью возобновляемых источников энергии, и традиционных установок изучают уже продолжительное время в различных странах, так как данные системы имеют множество преимуществ.

В работе [5] представлен технико-экономический анализ применения ветродизельной электростанции для энергоснабжения удалённого населённого пункта — села Чапома в Мурманской области. Результаты показали, что реализация такого проекта позволяет снизить стоимость вырабатываемой электроэнергии более чем на 40 %, что демонстрирует высокую экономическую эффективность решения.

УДК 621.311.243:621.311.245:621.311.016. Научная специальность: 2.4.5.

Создание модели ВДЭК и проверка её эффективности на примере электроснабжения посёлка Тикси

Константин Витальевич Суслов, д.т.н., доцент, профессор, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ», г. Москва); **Александр Николаевич Дорошин**, к.т.н., доцент, НИУ «МЭИ»; **Валерий Алексеевич Кabanov**, аспирант, НИУ «МЭИ»; **Иван Андреевич Стрижевский**, студент, НИУ «МЭИ»

Энергоснабжение удалённых арктических территорий сопряжено с высокой зависимостью от привозного дизельного топлива, что ведёт к экстремальному уровню стоимости электроэнергии, логистическим сложностям и значительной экологической нагрузке. В статье разработана модель гибридного ветродизельного энергокомплекса (ВДЭК) с системой накопления электроэнергии (СНЭЭ) и исследована эффективность её применения на изолированном потребителе — посёлке Тикси, расположенном в Республике Саха (Якутия). Рассмотрены различные вариации компоновки оборудования с учётом существующих ВЭУ и выбраны оптимальные варианты. Установлено, что оптимально подобранная гибридная система, сочетающая ВЭУ, СНЭЭ и дизельные генераторы, способна обеспечить надёжное энергоснабжение потребителя. Применение предлагаемого ВДЭК позволяет сократить годовое потребление дизельного топлива на величину до 33 % по сравнению с традиционной дизельной схемой.

Ключевые слова: удалённые территории, труднодоступные территории, Арктика, арктическая зона, Крайний Север, Тикси, автономное энергоснабжение, возобновляемая энергетика, ветродизельный энергокомплекс, ветроэлектрическая установка, аккумуляторная система, дизельная электростанция, система накопления электроэнергии.

UDC 621.311.243:621.311.245:621.311.016. Scientific specialty number: 2.4.5.

Development of a wind-diesel energy complex model and assessment of its efficiency using the example of power supply of the settlement of Tiksi

Konstantin V. Suslov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI", Moscow); **Alexander N. Doroshin**, PhD (Engineering), Associate Professor, NRU "MPEI"; **Valery A. Kabanov**, postgraduate student, NRU "MPEI"; **Ivan An. Strizhevsky**, student, NRU "MPEI"

Energy supply to remote Arctic territories is associated with a high dependence on imported diesel fuel, which leads to extreme electricity costs, logistical difficulties and a significant environmental burden. The development of hybrid energy systems based on renewable energy sources (RES) is a strategically important area for ensuring the energy and economic sustainability of such isolated consumers. The article develops a model of a hybrid wind-diesel energy complex (WDEC) with an electric power storage system (EPSS) and examines the effectiveness of its use in an isolated consumer, Tiksi village, located in the Republic of Sakha (Yakutia). Various variations of the equipment layout are considered, taking into account existing wind turbines, and optimal options are selected. It has been established that an optimally selected hybrid system combining wind turbines, EPSS and diesel generators is capable of providing reliable energy supply to consumers. The use of the proposed WDEC makes it possible to reduce the annual consumption of expensive diesel fuel by up to 33 % compared with the traditional diesel scheme.

Key words: distant territories, hard-to-reach territories, Arctic, Arctic zone, Far North, Tiksi, autonomous energy supply, renewable energy, wind-diesel power complex, wind power plant, battery system, diesel power plant, electric power storage system.

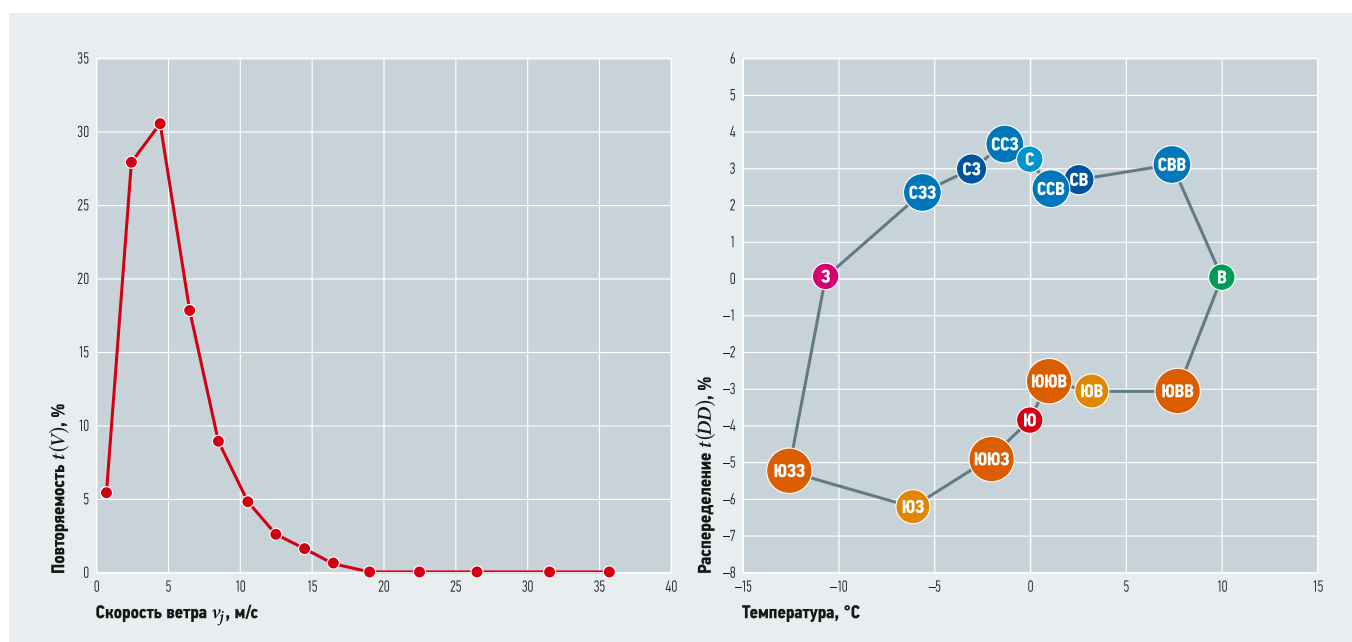


Рис. 1. Повторяемость скоростей ветра (а) и распределения скорости ветра по направлениям (б)

В рамках другого исследования была разработана методика расчёта параметров автономных ветродизельных электростанций с накопителями энергии. Данная методика, реализованная в виде программы, позволяет подбирать оптимальный состав оборудования. Однако её применение связано с рядом допущений, которые могут повлиять на точность. Например, данные о потреблении и скоростях ветра учитываются с дискретностью в три часа, а их параметры условно принимаются статичными. Для районов с высокой изменчивостью ветра такое упрощение может быть критичным. Кроме того, в расчётах оборудование рассматривается лишь в двух состояниях — «работа» и «простой в холодном резерве», что не позволяет детально смоделировать все возможные эксплуатационные режимы [6].

Исследователи из Китая изучили технико-экономическую пригодность автономных ветродизельных комплексов с накопителями электроэнергии для холодного климата на примере пригорода Ланьчжоу (провинция Ганьсу) [7]. В этой работе проведён подбор конфигураций и сравнительный анализ нескольких типов аккумуляторов с точки зрения экономии топлива и надёжности; оптимизация и оценка выполнены с использованием Homer Pro и включают чувствительный анализ ключевых параметров. Для проектирования авторы предлагают практические рекомендации по выбору типа батареи и соотношению мощности/энергетическим — без детального короткопериодного динамического моделирования переходных процессов и без глубокой интеграции алгоритмов управления.

Группой авторов из Греции была предложена интегрированная модель для симуляции производительности гибридных ветродизельных систем, основанная на аналитических уравнениях и подробных моделях компонент: работа охватывает моделирование годовой выработки на основе часовых данных ветра/нагрузки, учитывает схемы зарядно-разрядной логики и демонстрирует, как конфигурация влияет на долю ветровой энергии и экономику [8].

Авторы из США предложили практические процедуры и модульные производственные модели для быстрой первичной оценки конфигураций «ветер — дизель» и модульную архитектуру симуляторов. Эти подходы удобны для оперативного подбора вариантов, обучения и пилотирования, а также демонстрируют модульность как ключ к универсальности модели, но есть

недостаток, а именно — представленные методы предназначены для быстрого проектного расчёта, а не для детальной оценки при быстром изменении ветра [9].

Таким образом, несмотря на большое количество исследований в данной области, проведённый анализ публикаций показывает отсутствие универсальной модели, которая бы учитывала все режимы работы оборудования и была применима для любых климатических условий.

Методика исследования

Посёлок Тикси расположен на побережье моря Лаптевых. Климат — резко континентальный арктический, со среднегодовой температурой -12°C . Зимой температура может опускаться ниже -35°C , порывы ветра превышают 25 м/с, а летом возможны колебания от -5 до $+11^{\circ}\text{C}$. Осадки — около 220 мм в год [10, 11]. Такие условия требуют специальных технологий для работы оборудования. Полярная ночь, длящаяся с ноября по февраль, усиливает вечерние пики нагрузки, а короткое лето снижает потребление. Эти факторы подтверждают целесообразность применения ВЭУ, что согласуется с методическими рекомендациями Минэнерго России [12] и международными исследованиями [13, 14].

Оценка ветроэнергетического потенциала посёлка Тикси проводилась на основе данных NASA в программном комплексе Wind Energy за 2010 год в точке планируемого размещения ВДЭК, координаты — $71,631285$ с. ш., $128,9024$ в. д. (территория доступна для использования и проверена по публичным кадастровым картам) [15]. Средняя скорость ветра составила 5,2 м/с, наблюдения велись на высоте $h = 10$ м.

Также в программе были построены графики повторяемости скоростей ветра и распределения скорости ветра по направлениям для оценки ветроэнергетического потенциала исследуемой площадки (рис. 1). По полученным данным можно сделать вывод, что территория является благоприятной для размещения ветроэнергетических установок.

Энергопотребление посёлка Тикси имеет выраженную сезонную и суточную неравномерность, что связано с климатическими особенностями региона и структурой жилого и коммунального сектора. Годовое потребление электроэнергии составляет порядка 22,5 млн кВт·ч. Среднегодовая нагрузка находится на уровне 2580 кВт, при этом максимальная достигает 4290 кВт в периоды зимних холодов.

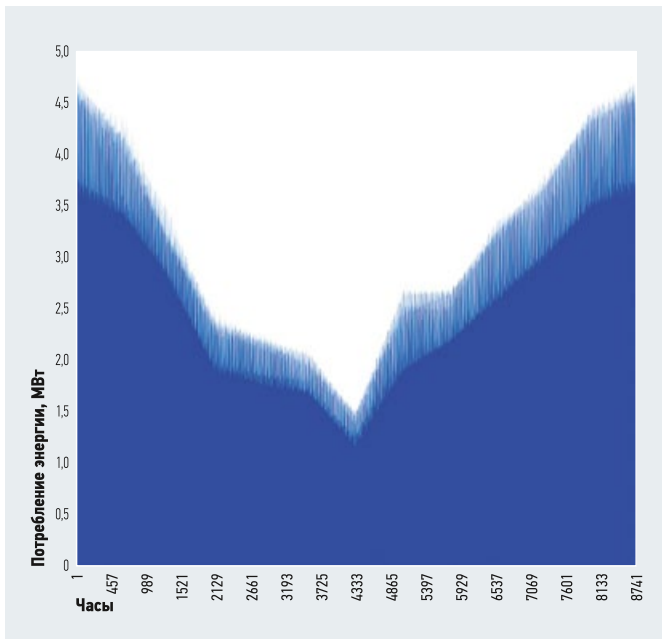


Рис. 2. Годовой график потребления электроэнергии посёлком Тикси

Для расчётов и последующего моделирования работы энергокомплекса был построен годовой почасовой график нагрузки, включающий 8760 точек. Распределение нагрузки получено в среде MS Excel с использованием функции Forecast.Linear, прогнозирующей будущее значение (y) на основе исторических данных (x) и (y) с использованием метода линейной регрессии. Эта модель позволила учесть сезонные и суточные колебания электропотребления (рис. 2).

Разработанная система работает следующим образом (рис. 3): электроэнергия, которая вырабатывается ВЭУ, идёт на покрытие нагрузки потребителей, если её недостаточно, то в работу включается система накопления электроэнергии и выдаёт то количество электроэнергии, которое необходимо для покрытия нагрузки. При недостаточном заряде или при достижении 20 % от номинала СНЭЭ устройство, контролирующее заряд (УКЗ), подаёт сигнал на дизельную электростанцию, и та, в свою очередь, вырабатывает необходимое количество электроэнергии для покрытия потребления. Если ВЭУ вырабатывает избыточное количество электроэнергии, то излишек отходит на заряд системы накопления через выпрямитель. Также ДЭС при работе в режиме «горячего резерва» (не выдаёт энергию потребителю) вырабатывает электроэнергию, которая идёт на заряд СНЭЭ. Таким образом, система функционирует надёжно и эффективно, в максимальной степени используя ветровой ресурс и экономя дорогостоящее дизельное топливо.

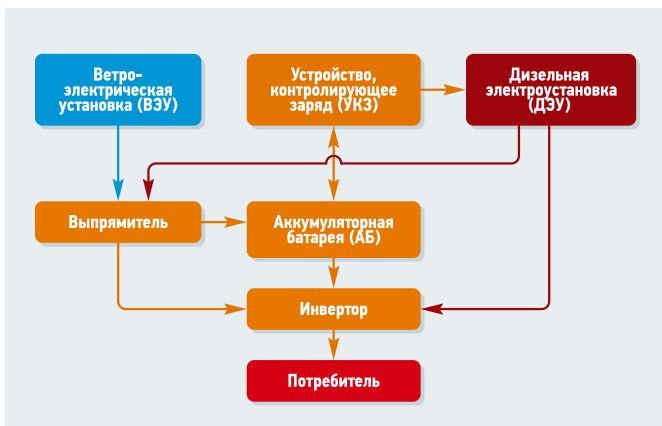


Рис. 3. Блок-схема работы ВДЭК с СНЭЭ

Принятые допущения:

1. Изначальный объём запаса энергии в СНЭЭ составляет 0 % от номинального значения ёмкости (когда уровень заряда достигает 20 %, СНЭЭ перестаёт разряжаться).
2. Топливо расходуется пропорционально нагрузке дизельной энергоустановки (ДЭУ) и составляет 1 л на 4 кВт·ч (среднее значение расхода топлива для ДЭУ).
3. Потери во всех элементах сети принимаются постоянными.
4. Все мощности и скорость ветра в течение $\Delta t = 1$ ч считаются постоянными.
5. $V(t)$ — скорость ветра, представленная в виде базы данных среднечасовых значений скорости ветра.

Моделирование годового ряда скорости ветра расчётного года по высоте производится по степенной зависимости вертикального профиля ветра (ВПВ) с учётом внутригодового изменения показателя степени m [16]:

$$V_{il}(H) = V_{il}(h) \left(\frac{H}{h} \right)^{m_l(V_l)}, \quad (1)$$

где h — высота измерений скоростей ветра, $h = 10$ м; H — высота башни ВЭУ, м; i — порядковый номер скорости в ряду наблюдений; l — номер месяца; $V_{il}(H)$ и $V_{il}(h)$ — скорости ветра на площадке ВЭС на высотах H и h ; $m_l(V_l)$ — эмпирическая зависимость (модель) среднemesячного показателя степени m от среднemesячной скорости ветра на высоте h . Модель $m_l(V_l)$ может быть получена по данным аэрологической метеостанции (АМС) аналога или группы АМС. Получение эмпирической зависимости показателя степени $m_l(V_l)$ основано на расчётно-статистическом определении внутригодовой закономерности изменения среднemesячного значения показателя степени m_l от среднemesячной скорости ветра V_l на высоте h для отдельных АМС или групп АМС, расположенных в идентичных климатических, географических и топографических условиях. Данные для расчёта показателей степени m_l взяты из действующей базы данных ВИК, находящейся в посёлке Тикси.

После пересчёта скоростей ветра для каждого часа в году определяется мощность выбранной ветроустановки с помощью мощностных характеристик по формуле:

$$N_{ВЭУ}(t) = N_{ВЭУ}[V(t)], \quad (2)$$

где $N_{ВЭУ}(t)$ — выработка электроэнергии одной ВЭУ за время $\Delta t = 1$ ч, кВт·ч.

Мощность ВЭС за время $\Delta t = 1$ ч определяется по формуле:

$$N_{ВЭС}(t) = N_{ВЭУ}(t) n, \quad (3)$$

где $N_{ВЭС}(t)$ — выработка электроэнергии ВЭС за время $\Delta t = 1$ ч, кВт·ч; n — количество ВЭУ.

Доля мощности ВЭС, которая выдаётся потребителю, рассчитывается по формуле:

$$N'_{ВЭС}(t) = \begin{cases} N_{ВЭС}(t), & \text{если } N_{ВЭС}(t) \leq P(t); \\ P(t), & \text{если } N_{ВЭС}(t) > P(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $N'_{ВЭС}(t)$ — доля выработка электроэнергии ВЭС за время $\Delta t = 1$ ч, кВт·ч; $P(t)$ — нагрузка потребителя, кВт·ч.

Мощность, которая идёт на заряд СНЭЭ, определяется по формуле:

$$P_{СНЭЭ}(t) = \begin{cases} N_{ВЭС}(t) - P(t), & \text{если } N_{ВЭС}(t) > P(t); \\ 0, & \text{если } N_{ВЭС}(t) \leq P(t). \end{cases} \quad (5)$$

Также необходимо учитывать, что накопитель не может принять энергию, которая превышает его ёмкость, и для продления срока его службы не должен заряжаться более чем на 90 % и разряжаться ниже 20 % от номинала.

Условия для моделирования работы системы накопления электрической энергии выведены в следующей формуле для $(i+1)$ -го часа:

$$W_{\text{зап},i+1} = \begin{cases} 1) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) \geq 0, \\ W_{\text{зап},i} + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] + \\ + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} N_{\text{гор,рез},i+1} < 0,9 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда} \\ W_{\text{зап},i} + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] + \\ + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} N_{\text{гор,рез},i+1}; \\ 2) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) \geq 0, \\ W_{\text{зап},i} + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] + \\ + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} N_{\text{гор,рез},i+1} \geq 0,9 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда } 0,9 W_{\text{СНЭЭ}}; \\ 3) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, \\ W_{\text{зап},i} \leq 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда } W_{\text{зап},i+1}; \\ 4) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} > 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] > 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] + \\ + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} N_{\text{гор,рез},i+1} < 0,9 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда} \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] + \\ + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} N_{\text{гор,рез},i+1}; \\ 5) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} > 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] > 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] + \\ + \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{выпр}} N_{\text{гор,рез},i+1} \geq 0,9 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ \text{тогда } 0,9 W_{\text{СНЭЭ}}; \\ 6) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, \\ W_{\text{зап},i} \leq 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда } 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \end{cases} \quad (6)$$

где $N_{\text{ВЭС},i+1}(t)$ — выработка электроэнергии ВЭС за $(i+1)$ -й час, кВт·ч; $P_{i+1}(t)$ — нагрузка за $(i+1)$ -й час, кВт·ч; $W_{\text{зап},i}$ — запасённая энергия в i -м часу, кВт·ч; $\eta_{\text{СНЭЭ}}$ — КПД СНЭЭ; $\eta_{\text{выпр}}$ — КПД выпрямителя; $N_{\text{гор,рез},i+1}$ — выработка в режиме горячего резерва ДЭС за $(i+1)$ -й час, кВт·ч; $W_{\text{СНЭЭ}}$ — полная мощность СНЭЭ, кВт·ч; $\eta_{\text{инв}}$ — КПД инвертора.

Как только запас энергии в системе накопления достигнет 20 % от номинальной ёмкости, то будет подан сигнал для начала выработки энергии с помощью ДЭС, которая находится в режиме «горячего резерва».

Условия работы дизельной электростанции в проектируемой модели представлены следующей формулой для $(i+1)$ -го часа:

$$N_{\text{ДЭС},i+1} = \begin{cases} 1) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) \geq 0, \text{ тогда } N_{\text{гор,рез},i+1}; \\ 2) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} = 0, \\ |N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)| \leq N_{\text{гор,рез},i+1}, \\ \text{тогда } N_{\text{гор,рез},i+1}; \\ 3) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} = 0, \\ |N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)| > N_{\text{гор,рез},i+1}, \text{ тогда} \\ |N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)|; \\ 4) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} \neq 0, \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] < 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ W_{\text{зап},i} > 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда} \\ |W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] - 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}|; \\ 5) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} \neq 0, \\ W_{\text{зап},i} \leq 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \text{ тогда} \\ |N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)|; \\ 6) \text{ если } N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t) < 0, W_{\text{зап},i} \neq 0, \\ W_{\text{зап},i} - \eta_{\text{СНЭЭ}} \eta_{\text{инв}} [N_{\text{ВЭС},i+1}(t) - P_{i+1}(t)] \geq 0,2 W_{\text{СНЭЭ}}, \\ \text{тогда } N_{\text{гор,рез},i+1}, \end{cases} \quad (7)$$

Число часов в году — 8760. Суммарное потребление электроэнергии за год определяем по формуле:

$$\Theta_{\text{год}} = \sum_{i=1}^{8760} P_i. \quad (8)$$

В течение года дизельная станция выработает энергию, определяемую по формуле:

$$\Theta_{\text{ДЭС}} = \sum_{i=1}^{8760} N_{\text{ДЭС},i}. \quad (9)$$

Годовая выработка электрической энергии ВЭС рассчитывается по формуле:

$$\Theta_{\text{ВЭС}} = \sum_{i=1}^{8760} N_{\text{ВЭС},i}. \quad (10)$$

Для реализации гибридного ветродизельного энергокомплекса проведён детальный анализ технических характеристик и условий эксплуатации различных элементов системы. Выбор оборудования осуществлялся с учётом климатических особенностей посёлка Тикси, ограничений по транспортировке и требований к надёжности в условиях Арктики.

В качестве ветроэнергетических установок были взяты Komai KWT 300 с установленной мощностью 300 кВт и высотой башни 40 м [17]. Данная модель выбрана неслучайно, именно три таких ВЭУ уже установлены в посёлке Тикси. Как показывает практика, они хорошо справляются с работой в таких экстремальных условиях, помимо этого, в технической спецификации ветроустановки Komai KWT 300 указано, что она использует систему преобразования электроэнергии с индукционным генератором и системой с преобразователем «AC–DC–AC» (переменный ток в постоянный и обратно) [17]. Это означает, что внутри ветроустановки присутствуют выпрямители и инверторы. Также стоит отметить, что при моделировании работы ветродизельного комплекса эти установки будут учтены в расчётах.

Резервным источником питания в комплексе служит дизельная электростанция, состоящая из четырёх дизельных установок GMGen GMC1400 мощностью 1024 кВт каждая. Оборудование размещено в утеплённом контейнере типа БКС-1 «Север», что обеспечивает его надёжную эксплуатацию при температурах окружающего воздуха от -40 до $+40^\circ\text{C}$ [18].

Аккумуляторная подсистема построена на основе литий-железо-фосфатных (LFP) ячеек, отличающихся повышенной термостабильностью и долговечностью. Каждая ячейка имеет номинальную ёмкость 280 А·ч (896 Вт·ч) и напряжение 3,2 В [19].



Для достижения рабочего напряжения 400 В используется последовательное соединение 125 ячеек, объединённых в модули с интегрированной системой управления BMS (Battery Management System). Немаловажным является и то, что использование СНЭЭ помогает регулировать частоту в энергокомплексе, что продлевает срок службы ДЭУ, сдвигая сроки капитальных ремонтов или реконструкции. СНЭЭ оснащена модульной системой, состоящей из гибридных инверторов Rosvetro DMWG20K мощностью 20 кВт [20].

Ключевым элементом комплекса является система управления, реализованная на базе SCADA-платформы. Она выполняет функции централизованного мониторинга и управления всеми источниками генерации, контролирует режимы заряда и разряда аккумуляторов, осуществляет запуск и остановку дизельных агрегатов, а также обеспечивает регистрацию и архивирование параметров работы оборудования в реальном времени [21].

Результаты моделирования

С помощью программного обеспечения MS Excel по приведённой блок-схеме и математической модели был воссоздан гибридный ветродизельный энергокомплекс. Данный прототип может быть использован в расчётах ВДЭК для любых автономных потребителей и совершенно другого состава генерирующего оборудования.

Результаты расчёта исследуемой системы оценены по двум показателям, выраженным в относительных единицах: удельной экономии топлива (УЭТ), рассчитанной по формуле (11), и удельной стоимости строительства самых капиталоемких частей комплекса, а именно ВЭУ и СНЭЭ:

$$УЭТ = \frac{\mathcal{E}_{\text{год}} - \mathcal{E}_{\text{ДЭС}}}{\mathcal{E}_{\text{год}}} \quad (11)$$

Расчёт стоимости строительства в относительных единицах осуществлён по следующей системе: принимается, что максимальная стоимость ВДЭК равна 1,0, в максимальную стоимость входят 12 ветроэнергетических установок и система накопления электроэнергии ёмкостью 15 тыс. кВт·ч (эти части составляют 0,5 от общей стоимости). Рассматриваться будут различные варианты компоновки комплекса с шагом в три ВЭУ и ёмкостью СНЭЭ 5000 кВт·ч. Для системы с тремя ВЭУ и без системы накопления стоимость составит 0,125 о.е., так как стоимость СНЭЭ равна 0, а одна четвёртая часть от 0,5 составляет 0,125.

Рис. 4. Интерпретация результатов оптимизации для четырёх сценариев с разным числом ВЭУ и ёмкостью СНЭЭ

Три ВЭУ				
Ёмкость СНЭЭ, о.е.	0	0,330	0,670	1,000
Удельная экономия топлива УЭТ, о.е.	0,330	0,330	0,330	0,330
Стоимость оборудования, о.е.	0,125	0,292	0,455	0,625
Шесть ВЭУ				
Ёмкость СНЭЭ, о.е.	0	0,330	0,67	1,00
Удельная экономия топлива УЭТ, о.е.	0,550	0,580	0,58	0,58
Стоимость оборудования, о.е.	0,250	0,417	0,58	0,75
Девять ВЭУ				
Ёмкость СНЭЭ, о.е.	0	0,330	0,670	1,000
Удельная экономия топлива УЭТ, о.е.	0,790	0,820	0,820	0,820
Стоимость оборудования, о.е.	0,375	0,542	0,705	0,875
Двенадцать ВЭУ				
Ёмкость СНЭЭ, о.е.	0	0,330	0,670	1,000
Удельная экономия топлива УЭТ, о.е.	0,910	0,970	0,970	1,000
Стоимость оборудования, о.е.	0,500	0,667	0,830	1,000

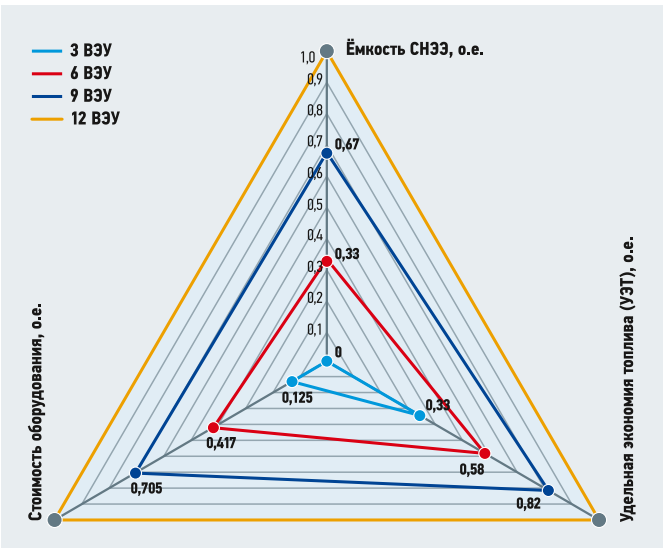


Рис. 4. Интерпретация результатов оптимизации для четырёх сценариев с разным числом ВЭУ и ёмкостью СНЭЭ

Аналогично будут выражены ёмкость СНЭЭ и удельная экономия топлива в относительных единицах, только в данном случае максимальная ёмкость — 15 тыс. кВт·ч будет равна 1,0, а для УЭТ 0,33 или 33 % — равна 1,0.

Моделирование проводилось для разного числа ветроэнергетических установок, начиная с трёх, так как в посёлке Тикси уже установлены три ВЭУ, о чём было сказано ранее, и для СНЭЭ разной ёмкости с шагом в 5000 кВт·ч. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

По полученным значениям можно сделать вывод о том, что при увеличении числа ветроустановок значительно растёт удельная экономия топлива, даже без применения системы накопления электроэнергии, причём в относительных единицах скорость её роста больше, чем скорость роста стоимости оборудования. Увеличение ёмкости и наличие системы накопления энергии позволяет повысить удельную экономию топлива, но только для системы, где мощность выработки ВЭС соизмерима с нагрузкой потребителя, под соизмерима понимается покрытие хотя бы минимальной нагрузки, в противном случае, как можно заметить на примере трёх ВЭУ, добавление системы накопления энергии никак не влияет на исследуемые параметры. Это объясняется тем, что вся вырабатываемая ВЭС электроэнергия идёт на покрытие нагрузки потребителя, но ВЭУ даже в часы работы с номинальной мощностью не могут покрыть её полностью, поэтому в каждый момент времени ДЭС выдаёт недостающую энергию для полного покрытия нагрузки потребителя. Таким образом, система накопления простаивает, а следовательно, её наличие в данном случае не имеет смысла.

Тем не менее, при наличии хотя бы шести ВЭУ и системы накопления электроэнергии ёмкостью 5000 кВт·ч удельная экономия топлива достигает 0,58 о.е., что на три относительных единицы больше, чем в комплексе без СНЭЭ. Наибольший прирост величины УЭТ наблюдается при увеличении мощности ВЭС, что логично, так как большая выработка требует накопления энергии в определённые моменты времени, когда нагрузка минимальна. Однако стоит отметить, что использование СНЭЭ ёмкостью 10 тыс. и 15 тыс. кВт·ч нецелесообразно, так как это делает строительство более капиталоемким, но не даёт значительного прироста по экономии топлива. На рис. 4 приведена графическая интерпретация результатов оптимизации для четырёх сценариев с разным числом ветроустановок и ёмкостью системы накопления (выделены в табл. 1).

Данный графический вид помогает более детально рассмотреть, как изменяются параметры в зависимости от числа ветроустановок и изменения ёмкости.



Из четырёх сценариев, представленных в качестве примера, наиболее рациональными являются варианты с шестью и девятью ветроустановками, так как вложения в них оправданы с точки зрения экономии топлива, приближение к 12 ветроэнергетических установок даёт заметно меньший прирост к удельной экономии топлива (УЭТ), чем ожидалось, но при этом значительно возрастает стоимость оборудования.

Заключение

В проведённой работе была разработана модель ветродизельного энергокомплекса с системой накопления электроэнергии. Прототип ВДЭК был описан математическими формулами и выражениями — создана имитационная модель системы. Для проверки модели был выбран посёлок Тикси, расположенный в Республике Саха (Якутия), который является стратегически важным объектом благодаря наличию одноимённого порта, также посёлок получает электроэнергию преимущественно от дизельной электростанции (то есть является автономным потребителем), кроме того, сильно удалён от централизованных инженерных сетей и имеет слаборазвитую инфраструктуру.

Все названные характеристики показывают, что доставка ископаемому потребителю топлива для работы дизельных электростанций является сложной и требующей значительных финансовых затрат.

Эффективность проекта оценивалась по показателям стоимости основного оборудования и удельной экономии топлива, которая напрямую связана с производством энергии ДЭС в год, так как именно она отражает экономию топлива. Для существующей дизельной схемы годовая выработка составляет около 22,5 млн кВт·ч, что эквивалентно полному покрытию потребности посёлка при традиционной схеме энергоснабжения.

По результатам моделирования было установлено, что внедрение дополнительных ветроустановок Komai KWT 300 и системы накопления электроэнергии в составе гибридного энергокомплекса позволяет значительно сократить выработку дизельной электростанции. При этом расчёты показали, что наличие СНЭЭ при мощности ветроустановок, несоизмеримой с нагрузкой, нецелесообразно, так как она никаким образом не участву-

Эффективность проекта оценивалась по показателям стоимости основного оборудования и удельной экономии топлива, которая напрямую связана с производством энергии ДЭС в год, так как именно она отражает экономию топлива. Для существующей дизельной схемы годовая выработка составляет около 22,5 млн кВт·ч, что эквивалентно полному покрытию потребности посёлка при традиционной схеме энергоснабжения

ет в энергетическом балансе, однако при увеличении числа ВЭУ и, соответственно, мощности ветровой электростанции она помогает повысить эффективность использования энергии ВЭС, накапливая и выдавая электроэнергию потребителю в моменты времени, когда это необходимо.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением математической модели и внедрением интеллектуальных алгоритмов прогнозирования скоростей ветра и нагрузки. В контексте данного прототипа также следует рассмотреть возможность интеграции других традиционных источников энергии, например, парогазовых установок, что потребует дополнительных корректировок полученной итоговой модели. ●

- Schweitzer P., Povoroznyuk O. Infrastructural legacies and post-Soviet transformations in Northern Sakha (Yakutiya), Russia. *Journal of Environmental Policy & Planning*. 2022. Vol. 24. No. 3. Pp. 297–308.
- Arriaga M., Canizares C.A., Kazerani M. Renewable energy alternatives for remote communities in Northern Ontario, Canada. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2013. Vol. 4. No. 3. Pp. 661–670.
- Pantaleo A., Albert M.R., Snyder H.T., Edens M.Q., Bradley J., Dengel A. Modeling a sustainable energy transition in Northern Greenland: Qaanaaq case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 54. No. 102774.
- Aalde O. Hybrid renewable-diesel energy systems in an off-grid Arctic microgrid: A case study of Ny-Ålesund, Svalbard: Master's thesis. Ås Norwegian University of Life Sciences. 2018. 78 p.
- Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Александрова Т.А. Технико-экономический анализ применения ветро-дизельных электростанций для электроснабжения энергоудалённых поселений // Труды НГТУ, 2016. №1. С. 65–72.
- Харитонов М.С., Кутучева Д.К. Методика расчёта автономных ветродизельных электростанций с накопителями энергии / Балтийский морской форум: Мат. VII Межд. Балтийского морского форума (17–12.10.2019, г. Калининград). В 6 т. / Федеральное агентство по рыболовству РФ (Росрыболовство); Правительство Калининградской области РФ; НГТУ; сост.: Н.А. Кострикова. Т. 1. С. 799–805. — Калининград: Изд-во «БГРАФ», 2019.
- Qiu J., Song Z., Zheng Y. et al. Techno-economic viability of autonomous wind-diesel hybrid energy systems with battery storage for cold climate: A case study in Lanzhou suburb, Gansu Province. *Energy*. 2020. Vol. 192. No. 116575.
- Kaldellis J.K., Koronakis I., Perakis H. An integrated simulation model for hybrid wind-diesel energy systems: Evaluation of annual energy yield, battery charge-discharge dynamics and wind energy penetration. *Renewable Energy*. 2007. Vol. 32. No. 9. Pp. 1544–1564.
- Manwell J.F., McGowan J.G., Abdulwahid U. Simplified performance model for hybrid wind-diesel systems. *Renewables: The Energy for the 21st Century: Proc. of the VI World Renewable Energy Congress*. July 1–7, 2000. Brighton, UK. 1998. Pp. 1183–1188.
- Погода круглый год в любой точке Земли [Электр. ресурс]. WeatherSpark. Режим доступа: ru.weather-spark.com. Дата обращения: 26.10.2025.
- История климата метеостанции Тикси (№21824) [Электр. текст]. Погода и климат. Режим доступа: pogodaiklimat.ru. Дата обращения: 26.10.2025.
- Методические указания по расчёту ветроэнергетического потенциала территорий Российской Федерации. — М.: Минэнерго России, 2020. 52 с.
- Ivanov I.I., Kuznetsov A.V., Morozov D.A. Wind resource assessment and hybrid power solutions for Arctic communities. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 194. Pp. 367–381.
- Byrne J., Zhou A., Shen B. Hybrid energy systems for Arctic settlements: Design and optimization. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. Pp. 1254–1267.
- Публичная кадастровая карта [Электр. ресурс]. «Роскадастр». Режим доступа: roscadaster.com/map. Дата обращения: 29.10.2025.
- Дерюгина Г.В., Чернов Д.А., Тягунов М.Г., Алиходжина Н.В. Модели вертикального профиля ветра по данным ветроизмерительных комплексов полуострова Камчатка // Вестник МЭИ, 2019. №1. С. 35–42.
- Komaihaltec KWT300 [Электр. текст]. Wind-Turbine-Models. Режим доступа: wind-turbine-models.com. Дата обращения: 29.10.2025.
- Электростанция (ДЭС) GMGen GMC1400 [Электр. текст]. Grand Motors. Режим доступа: grandmotors.ru. Дата обращения: 29.10.2025.
- Аккумулятор 3,2 В 280 А·ч LiFePO4 Grade A [Электр. текст]. Lifer04. Режим доступа: lifer04.ru. Дата обращения: 29.10.2025.
- Ветрогенератор Rosvetro DMWG20k [Электр. текст]. «Рос Ветрогенератор». Режим доступа: rosvetrogenerator.ru. Дата обращения: 29.10.2025.
- Kermani M., Adelmanesh B., Shirdare E., Sima C.A., Carni D.L., Martirano L. Intelligent energy management based on SCADA system in a real microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 171. Pp. 1115–1127.

References — see page 80.

Development of a wind-diesel energy complex model and assessment of its efficiency using the example of power supply of the settlement of Tiksi. Pp. 64–69.

Konstantin V. Suslov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, "Moscow Power Engineering Institute" National Research University (NRU "MPEI", Moscow); **Alexander N. Doroshin**, PhD (Engineering), Associate Professor, NRU "MPEI"; **Valery Al. Kabanov**, postgraduate student, NRU "MPEI"; **Ivan An. Strizhevsky**, student, NRU "MPEI"

1. P. Schweitzer, O. Povoroznyuk. Infrastructural legacies and post-Soviet transformations in Northern Sakha (Yakutiya), Russia. *Journal of Environmental Policy & Planning*. 2022. Vol. 24. No. 3. Pp. 297–308.
2. M. Arriaga, C.A. Canizares, M. Kazerani. Renewable energy alternatives for remote communities in Northern Ontario, Canada. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2013. Vol. 4. No. 3. Pp. 661–670.
3. A. Pantaleo, M.R. Albert, H.T. Snyder, M.Q. Edens, J. Bradley, A. Dengel. Modeling a sustainable energy transition in Northern Greenland: Qaanaaq case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 54. No. 102774.
4. O. Aalde. Hybrid renewable-diesel energy systems in an off-grid Arctic microgrid: A case study of Ny-Ålesund, Svalbard: Master's thesis. Ås Norwegian University of Life Sciences. 2018. 78 p.
5. E.N. Sosnina, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, T.A. Aleksandrova. *Tekhniko-ekonomicheskij analiz primeneniya vetro-dizel'nykh elektrostantsij dlya elektroosnabzheniya energoudalennykh poselenij* [Technical and economic analysis of the use of wind-diesel power plants for power supply of remote settlements]. *Trudy NGTU* [Proc. of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev]. 2016. No. 1. Pp. 65–72. [In Russian]
6. M.S. Kharitonov, D.K. Kugucheva. *Metodika rascheta avtonomnykh vetrodizel'nykh elektrostantsij s nakopitel'nyimi energii* [Methodology for calculating autonomous wind-diesel power plants with energy storage devices]. *Baltiyskij morskoy forum: Mat. VII Mezhd. Baltijskogo morskogo foruma* [Baltic Maritime Forum: Proc. of the VII International Baltic Maritime Forum]. October 17–12, 2019. Kaliningrad. In 6 vol. *Federal'noe agentstvo po rybolovstvu RF (Rosrybolovstvo)* [Federal Agency for Fisheries of the Russian Federation]; *Pravitel'stvo Kaliningradskoj oblasti* [Government of the Kaliningrad Region]; *KG TU* [Kaliningrad State Technical University]. Editor: N.A. Kostrikova. Vol. 1. Pp. 799–805. Kaliningrad. Izd-vo "BGRF" [Publishing House of the Baltic State Academy of the Fishing Fleet]. 2019. [In Russian]
7. J. Qiu, Z. Song, Y. Zheng et al. Techno-economic viability of autonomous wind-diesel hybrid energy systems with battery storage for cold climate: A case study in Lanzhou suburb, Gansu Province. *Energy*. 2020. Vol. 192. No. 116575.
8. J.K. Kaldellis, I. Koronakis, H. Perakis. An integrated simulation model for hybrid wind-diesel energy systems: evaluation of annual energy yield, battery charge-discharge dynamics and wind energy penetration. *Renewable Energy*. 2007. Vol. 32. No. 9. Pp. 1544–1564.
9. J.F. Manwell, J.G. McGowan, U. Abdulwahid. Simplified performance model for hybrid wind-diesel systems. *Renewables: The Energy for the 21st Century: Proc. of the VI World Renewable Energy Congress*. July 1–7, 2000. Brighton, UK. 1998. Pp. 1183–1188.
10. *Pogoda kruglyj god v lyuboj tochke Zemli* [Year-round weather anywhere on Earth]. "Weather-Spark" web-portal. Web-source: ru.weatherspark.com. Access date: October 26, 2025. [In Russian]
11. *Istoriya klimata meteostantsii Tiksi (No. 21824)* [Climate history of the Tiksi weather station (No. 21824)]. *Pogoda i klimat* [Weather and climate]. Web-source: pogodaiklimat.ru. Access date: October 26, 2025. [In Russian]
12. *Metodicheskie ukazaniya po raschyotu vetroenergeticheskogo potentsiala territorij Rossijskoj Federatsii* [Methodological guidelines for calculating the wind energy potential of territories of the Russian Federation]. Moscow. *Minenergo Rossii* [Ministry of Energy of Russia]. 2020. 52 p. [In Russian]
13. I.I. Ivanov, A.V. Kuznetsov, D.A. Morozov. Wind resource assessment and hybrid power solutions for Arctic communities. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 194. Pp. 367–381.
14. J. Byrne, A. Zhou, B. Shen. Hybrid energy systems for Arctic settlements: Design and optimization. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. Pp. 1254–1267.
15. *Publchnaya kadaastrovaya karta* [Public cadastral map]. "Roscadaster" ["Roscadaster"]. Web-source: rotsadaster.com/map. Access date: October 29, 2025. [In Russian]
16. G.V. Deryugina, D.A. Chernov, M.G. Tyagunov, N.V. Alikhodzhina. *Modeli vertikal'nogo profilya vetra po dannym vetroizmeritel'nykh kompleksov poluostrova Kamchatka* [Vertical wind profile models based on data from wind measurement complexes on the Kamchatka Peninsula]. *Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI)]. 2019. No. 1. Pp. 35–42. [In Russian]
17. *Komaikhaltets KWT300* [Komaikhaltec KWT300]. *Wind-Turbine-Models*. Web-source: wind-turbine-models.com. Access date: October 29, 2025. [In Russian]
18. *Elektrostantsiya (DES) GMGen GMC1400* [GMGen GMC1400 Power Plant (DPP)]. Grand Motors. Web-source: grandmotors.ru. Access date: October 29, 2025. [In Russian]
19. *Akkumulyator 3,2 V 280 A·ch LiFePO₄ Grade A* [Battery 3.2 V 280 Ah LiFePO₄ Grade A]. *Lifepo4*. Web-source: lifepo4.ru. Access date: October 29, 2025. [In Russian]
20. *Vetrogenerator Rosvetro DMWG20k* [Wind generator Rosvetro DMWG20k]. "Ros Vetro-generator" ["Russia Wind Generator"]. Web-source: rosvetrogenerator.ru. Access date: October 29, 2025. [In Russian]
21. M. Kermani, B. Adelmanesh, E. Shirdare, C.A. Sima, D.L. Carni, L. Martirano Intelligent energy management based on SCADA system in a real microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 171. Pp. 1115–1127.