

УДК 621.311.26

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-40-58

Выбор и оптимизация гибридных энергетических систем в отдалённых районах Китая

Хе Хайян, М.Г. Тягунов, Ту Рейн Мин

Обеспечение электроэнергией отдалённых районов — одна из важнейших мер по улучшению условий жизни населения. С учетом ресурсных, технических и экономических факторов рассмотрены чистые и надёжные способы производства электрической энергии для решения проблем с электричеством для жителей отдалённых районов Китая. С помощью программного обеспечения HOMER с целью минимизации общей чистой текущей стоимости (NPC, Total Net Present Cost) и выравнивания стоимости энергии (COE, Levelized Cost of Energy), создана гибридная энергетическая система с дизельной (ДЭС)/солнечной фотоэлектрической (СФЭС)/ветряной (ВЭС)/гидроаккумулирующей (ГАЭС) электростанциями, предназначенная для удовлетворения потребностей посёлка Сяоциндао (регион Чандао, Китай) в электроэнергии. В систему вошли: ДЭС 1 мощностью 150 кВт, ДЭС 2 — 140 кВт, СФЭС — 529 кВт, ВЭС — 50 кВт, ГАЭС — 200 кВт (объём верхнего резервуара — 10000 м³, напор — 98 м) и инвертор — 201 кВт. Выход энергии из возобновляемых источников в гибридной системе составляет 91,6%. Решая проблему потребления электроэнергии жителями, система эффективно снижает выбросы загрязняющих веществ, вызванные потреблением электроэнергии, что имеет важное значение для эффективного использования возобновляемой энергии в отдалённых районах.

Ключевые слова: гибридная энергетическая система, возобновляемые источники энергии, оптимизация.

Для цитирования: Хе Хайян, Тягунов М.Г., Ту Рейн Мин. Выбор и оптимизация гибридных энергетических систем в отдалённых районах Китая // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 40—58. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-40-58.

Selection and Optimization of Hybrid Power Systems in Remote Areas of China

He Haiyang, M.G. Tyagunov, Thu Rein Min

Providing electricity to remote areas is one of the most important measures to improve the living conditions of local inhabitants. Clean and reliable ways of electricity generation to meet the electricity demands of residents in remote areas of China are considered proceeding from resource, technical and economic factors. To minimize the total net present cost (NPC) and levelized cost of energy (COE), a hybrid power system comprising a diesel power plant (DPP), a solar photovoltaic plant (SPPP), a wind power plant (WPP), and a pumped storage power plant (PSPP) has been designed by using the HOMER software to meet the electricity demands of residents in Xiaoqindao Township (Chandao County, China). The system includes a 150 kW DPP 1, a 140 kW DPP 2, a 529 kW SPPP, a 50 kW WPP, a 200 kW PSPP (with the upper reservoir volume equal to 10000 m³ and head equal to 98 m), and a 201 kW inverter. The renewable sources account for 91.6% of the hybrid power system total electricity output. Along with meeting the electricity demands of residents, the hybrid system efficiently reduces the pollutant emissions caused by electricity consumption, which is important for efficient use of renewable energy in remote areas.

Key words: geothermal fluid, geothermal power plant, power unit, turbine, separator, condenser.

For citation: He Haiyang, Tyagunov M.G., Thu Rein Min. Selection and Optimization of Hybrid Power Systems in Remote Areas of China. Bulletin of MPEI. 2022;4:40—58. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-40-58.

Введение

В связи с непрерывным развитием индустриализации и урбанизации, а также стремлением людей к комфортной жизни, растёт мировое потребление электроэнергии [1]. В настоящее время ископаемые источники энергии, представленные углём, нефтью и природным газом, по-прежнему являются основным сырьём. Однако, с одной стороны, ископаемая энергия обладает характеристиками ограниченных запасов и невозобновляема. С другой стороны, при ее использовании образуется большое количество парниковых газов, таких как диоксид углерода и оксиды азота, способствующих потеплению климата [2]. По данным Международного энергетического агентства (МЭА) (International Energy

Agency, IEA), за два десятилетия с 2000 по 2019 гг. глобальные выбросы углекислого газа (CO₂) увеличились с 23,1 до 33,3 Гт [3]. На климатическом саммите в Глазго в сентябре 2021 г. страны-участницы достигли соглашения о сокращении выбросов парниковых газов, а поиск альтернативных источников энергии стал темой, вызывающей озабоченность международного сообщества. В 2011 г. Организация Объединённых Наций (ООН) выступила с новой инициативой, направленной на поощрение стран к увеличению производства экологически чистой энергии. С этой целью многие государства выступили с инициативой по сокращению выбросов парниковых газов и значительному увеличению использования нетрадиционных источников энер-

гии [4]. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) — самые перспективные источники энергии в мире в последние годы.

За период с 2011 по 2020 гг. во всем мире установленная мощность на ВИЭ выросла с 1329886 до 2799094 МВт, а доля ВИЭ в общей установленной электрической мощности — с 25,1 до 36,6% [5]. МЭА прогнозирует, что для достижения цели «чистый ноль к 2050 г.» более половины мирового объема электроэнергии должно производиться ВИЭ к 2030 г. и более 90% — к 2050 г. [6].

Китай выдвинул концепцию «пика выбросов углерода и углеродной нейтральности». Одними из ключевых мер для достижения данной цели стали продвижение и применение технологий на основе ВИЭ и увеличение доли ВИЭ в общем энергопотреблении [7].

В последние годы по всему миру наблюдался обширный и систематический рост научных изысканий в области ВИЭ, включая разведку и прогнозирование ресурсов, компьютерное моделирование, теоретические и экспериментальные исследования. Опыт показал, что строительство гибридной энергетической системы в отдалённых районах может гарантировать спрос на энергию, эффективно снизить затраты на обслуживание и эксплуатацию и повысить уровень жизни жителей [8]. В гибридную энергетическую систему входят два или более различных источника энергии. В ней традиционные энергетические установки (например, тепловые (ТЭС), дизельные (ДЭС) и т. д.) сочетаются с установками на основе возобновляемой энергии (ветроэлектрическими (ВЭС), солнечными фотоэлектрическими СФЭС, гидроэлектростанциями (ГЭС) и др.). Наиболее исследованы гибридные энергетические системы, основанные на объединении ВЭС/СФЭС [9], ВЭС/СФЭС/АБ [10], ВЭС/ДЭС, СФЭС/ДЭС/АБ, СФЭС/ГЭС, ВЭС/СФЭС/ГЭС и т. д. [11]. Гибридные энергетические системы имеют преимущества в снижении выбросов загрязняющих веществ и обеспечении стабильного энергоснабжения. В последние годы, в связи со снижением совокупной стоимости оборудования установок на базе ВИЭ (солнечных энергетических систем и ветровых турбин), конкурентоспособность ВИЭ значительно выросла.

Общий объем электроэнергии, потребляемой в отдалённых районах, расположенных на островах, невелик, и, как правило, не охватывается крупными муниципальными электросетями из-за высокой стоимости строительства и низкой экономической эффективности. Однако нехватка электроэнергии серьезно затрудняет экономическое развитие подобных районов, негативно влияет на повседневную жизнь жителей. Разработка эффективных гибридных энергетических систем, основанных на местных ресурсах, даст адекватный и стабильный доступ к электрической энергии по низкой цене, повысит уровень жизни населения и способствует экономическому развитию отдалённых районов, одновременно сокращая выбросы парниковых газов и сохраняя окружающую среду.

Рассмотрим создание гибридного энергетического комплекса на островной территории в регионе Чандао (КНР).

Обзор ресурсов и развития региона Чандао

Географическое положение, население и экономическое развитие.

Регион Чандао, расположенный на $37^{\circ}53'$ — $38^{\circ}23'$ северной широты и $120^{\circ}35'$ — $120^{\circ}56'$ восточной долготы, находится между полуостровами Цзяодун и Ляодун, где встречаются Желтое и Бохайское моря. В его состав входят 32 острова, из которых освоены 10. Площадь суши — 59,258 км², береговая линия — 187,64 км. На рисунке 1 показано географическое положение Чандао [12].

Согласно статистике, к концу 2020 г. в регионе постоянно проживало 40898 человек. Рыболовство и туризм — важные отрасли экономики Чандао, на них приходится более 90% валового регионального продукта (ВРП). В регионе расположено 5 крупных и средних промышленных предприятий [13].

Регион Чандао имеет юрисдикцию над одним подрайоном, одним городом и шестью посёлками. Среди них островной посёлок Сяоциндао, расположенный на острове Малый Цинь, длина которого составляет 2 км, ширина — 0,85 км, площадь — 1,11 км², береговая линия — 6,44 км, а численность постоянного населения около 750 человек (рис. 2).

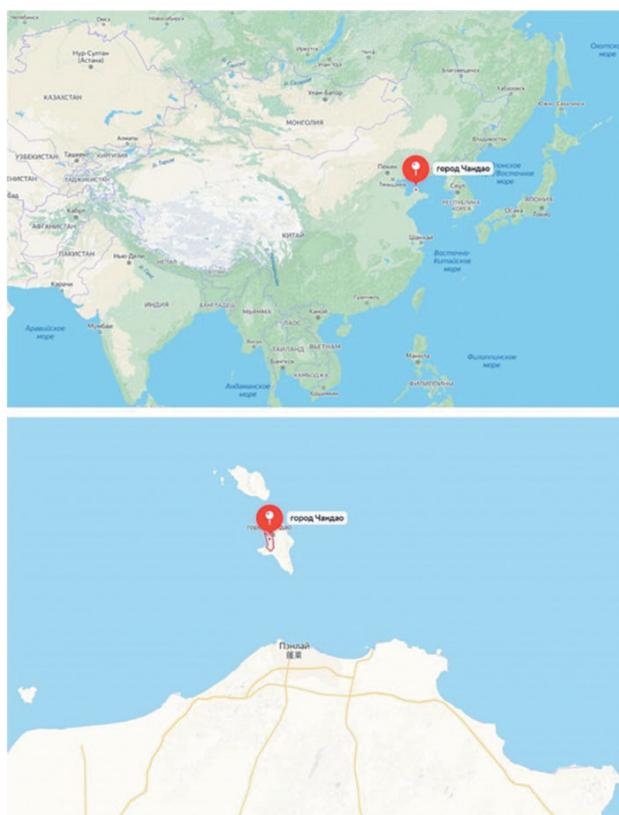


Рис. 1. Географическое положение региона Чандао в Китае

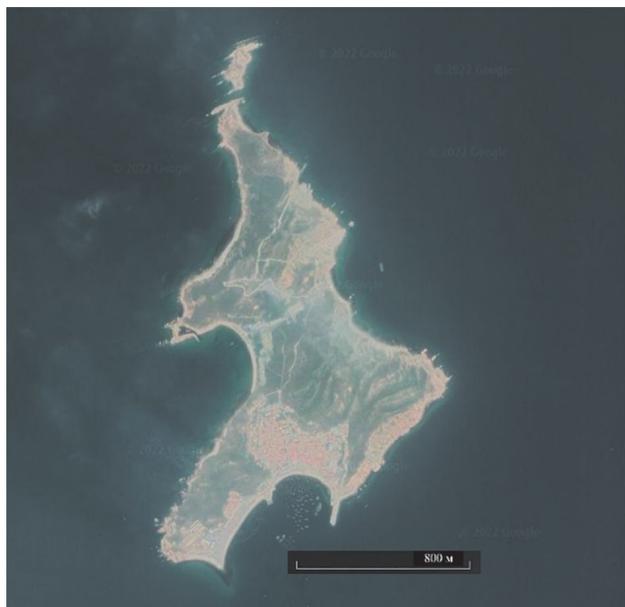


Рис. 2. Топография посёлка Сяоциндао, регион Чандао, Китай
Источник: Google Map: CNES / Airbus Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

В качестве объекта исследования взят посёлок Сяоциндао региона Чандао, и на его примере исследовано решение проблемы надёжного, стабильного и чистого электроснабжения отдалённых районов.

Метеорологические условия и потребление электроэнергии в посёлке Сяоциндао.

Согласно метеорологическим данным, среднегодовая температура в посёлке Сяоциндао составляет $11,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя температура в августе — $24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в январе — $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3). Среднегодовое количество осадков — $565,2\text{ мм}$, относительная влажность — 67% , солнечное время — $2792,8\text{ ч}$, скорость ветра —

$6,12\text{ м/с}$, максимальная зафиксированная скорость ветра — 40 м/с [14, 15].

Наблюдение за потреблением электроэнергии в посёлке ведется в течение многих лет. Статистический анализ позволяет выполнить ежемесячную разбивку электрической нагрузки переменного тока (рис. 4, 5). Среднесуточное потребление электроэнергии — $2023,28\text{ кВт}\cdot\text{ч}$, суточная пиковая нагрузка — $238,36\text{ кВт}$.

Состояние возобновляемых энергетических ресурсов в посёлке Сяоциндао.

Солнечная энергия.

На рисунке 6 продемонстрирована среднесуточная солнечная радиация в разные месяцы. Данные взяты из базы данных NASA по поверхностной метеорологии и солнечной энергии (NASA SSE, NASA Surface Meteorology and Solar Energy Database), собирающей информацию о солнечной радиации в этом районе с июля 1983 г. по июнь 2005 г. Видно, что солнечная радиация с апреля по июль в посёлке значительно выше, чем в другие месяцы [16]. Исходя из многолетних данных о солнечной радиации, рассчитаем среднюю дневную радиацию в исследуемом месте, она составляет около $4,33\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, что подходит для строительства СФЭС.

Энергия ветра.

Используя показатели скорости ветра в базе данных NASA SSE, получим среднемесячное распределение скорости ветра в посёлке (рис. 7). Месяцы с января по май, ноябрь и декабрь являются периодом, когда фиксируется самая высокая скорость ветра. Средняя скорость составляет $6,12\text{ м/с}$, т. е. регион обладает большим ветровым потенциалом [16].

Гибридная энергетическая система

Гибридная энергетическая система или гибридный энергетический комплекс (ГЭК) — разумное ре-

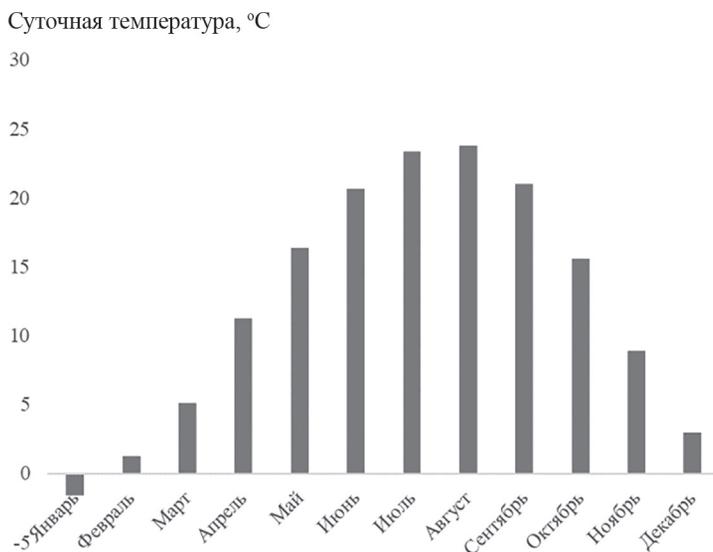


Рис. 3. Среднесуточная температура в разные месяцы в посёлке Сяоциндао

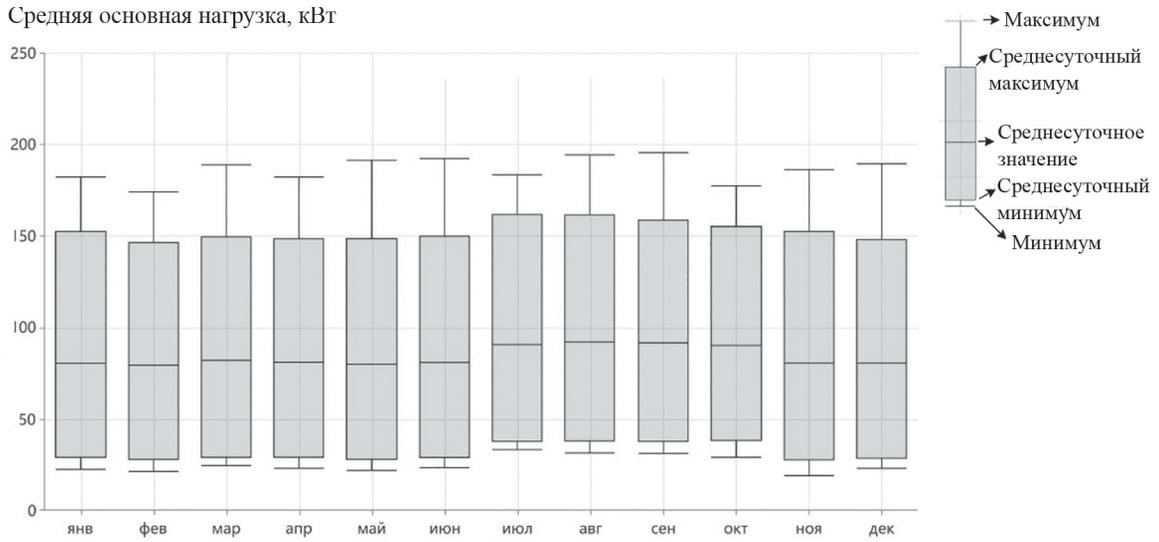


Рис. 4. Помесячная разбивка нагрузки переменного тока для посёлка Сяоциньдао

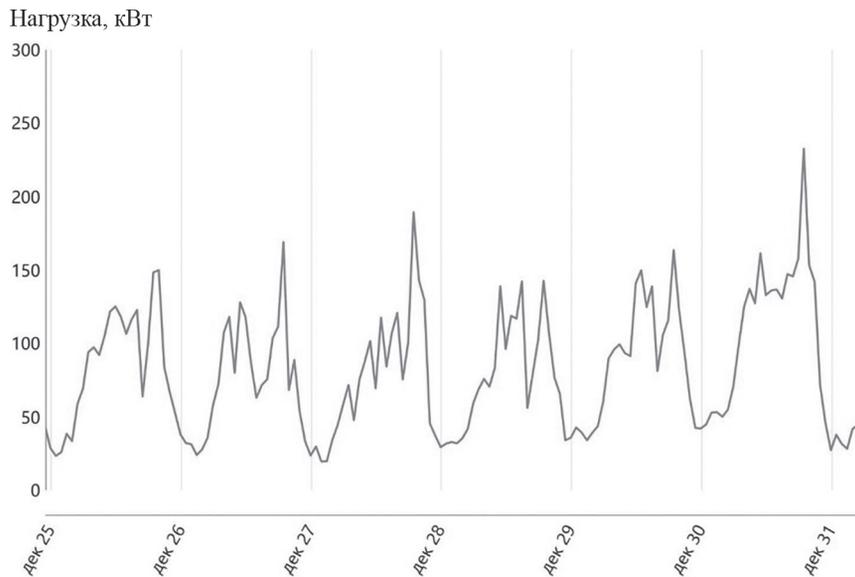


Рис. 5. Электрическая нагрузка посёлка Сяоциньдао с 25 декабря по 31 декабря

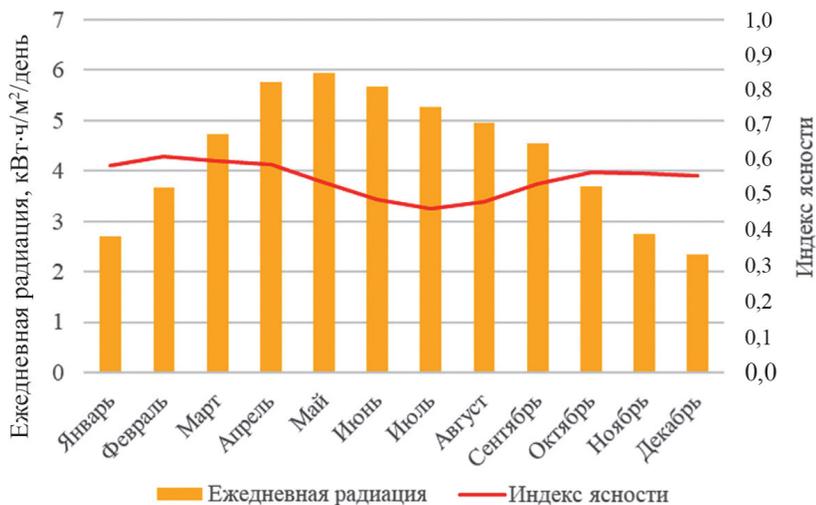


Рис. 6. Среднемесячная солнечная радиация и индекс ясности в посёлке Сяоциньдао

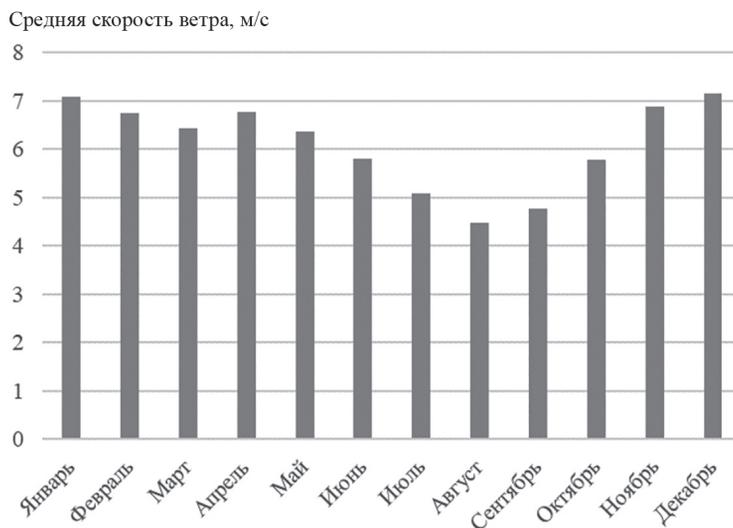


Рис. 7. Среднемесячная скорость ветра в посёлке Сяоциндао

шение противоречия между непрерывным ростом потребления электроэнергии, нехваткой ее выработки и загрязнением окружающей среды в рамках отдельного поселения или изолированной энергосистемы. Однако нестабильность возобновляемых ресурсов создаёт проблемы для безопасности и надёжности электроснабжения. С помощью компьютеров, позволяющих строить модели гибридных энергетических систем, проводить симуляции и расчёты, исследователи и инженеры могут изучать влияние ГЭК на энергосистему, оптимизировать мощность установок на основе ВИЭ, повышать общую эффективность использования энергии, снижать волатильность, вызванную доступом возобновляемой электроэнергии к электросети, и обеспечивать бесперебойность энергоснабжения сети. С этой целью для изучения гибридных энергетических систем университетами и частными компаниями разработаны несколько программных пакетов, таких как Hybrid2, RETScreen, SAM, EnergyPLAN, HOMER, iHOGA, TRNSYS и т. д. [17 — 20]. Для настоящего исследования выбран пакет HOMER, как наиболее распространённый и имеющий положительные оценки.

Введение в программное обеспечение HOMER.

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) — программа моделирования для исследования гибридных энергосистем, содержащих ВИЭ, созданная Национальной лабораторией возобновляемой энергии (NREL, National Renewable Energy Laboratory) в США [21]. Путём ввода метеорологических данных (солнечной радиации, скорости ветра, температуры и т. д.) и сведений об электрической нагрузке в районе исследования, можно установить параметры гибридной энергетической системы с различными генерирующим оборудованием, мощностью генерации, стоимостью компонентов, моделируя ее работу при различных конфигурациях, анализируя техническую и экономическую составляющие схемы. Итогом работы

становится оптимальный выбор оборудования для гибридной энергетической системы по условиям экономичности и надёжности.

HOMER моделирует работу системы, выполняя расчёт энергетического баланса для каждого из 8760 ч в течение года. Для каждого часа сравнивается почасовой спрос на электрическую и тепловую энергии с выработкой, предоставленной системой в течение этого часа, и рассчитывается поток энергии, связанный с каждым компонентом системы. Для систем с аккумулятором или топливным генератором программа определяет, как эксплуатировать генератор каждый час, нужно ли его заряжать или разряжать. HOMER рассчитывает энергетический баланс для каждой конфигурации системы, которую пользователь хочет проанализировать, а затем определяет, является ли эта конфигурация выполнимой. После моделирования всех возможных конфигураций HOMER ранжирует системы в порядке убывания NPC (the Total Net Present Cost).

При моделировании энергосистемы применяют две стратегии диспетчеризации. Стратегия диспетчеризации (Dispatch Strategy, DS) — это набор правил, управляющих работой двух подключённых генераторов и батарей. Циклическая зарядка (Cycle Charging, CC) и отслеживание нагрузки (Load Following, LF) — стратегии диспетчеризации в программном обеспечении HOMER. Согласно стратегии CC, генераторы работают на максимальной номинальной мощности для обслуживания нагрузки и зарядки батарей. При стратегии LF они работают автоматически и могут подавать энергию на нагрузку самостоятельно без зарядки батарей. При моделировании рассматриваемой энергосистемы использованы обе стратегии диспетчеризации.

Критериями оптимизации в HOMER считаются общая чистая текущая стоимость (NPC, the Total Net Present Cost) и стоимость энергии (COE, Levelized Cost of Energy) системы. NPC системы — это приведённая

стоимость всех затрат, которые система несёт в течение своего срока службы, за вычетом приведённой стоимости всех доходов, которые она получает в течение срока службы. Затраты включают начальный капитал, стоимость замещения (замены) оборудования в рамках жизненного цикла проекта, эксплуатации и обслуживания (стоимость Э и О, Operation and Maintenance Cost, O&M Costs), стоимость на топливо, штрафы за выбросы и затраты на покупку электроэнергии из сети. В доходы попадают ликвидационная стоимость и выручка от продажи в сеть [22]. Для изолированной энергосистемы покупка из сети и продажа в сеть отсутствуют.

НOMER рассчитывает общую NPC путём суммирования общих дисконтированных денежных потоков в каждый год срока службы проекта, и уравнение выглядит следующим образом [23]:

$$NPC = \frac{C_{ann, tot}}{CRF(i, R_{proj})},$$

где NPC — общая чистая текущая стоимость, руб./г; $C_{ann, tot}$ — общая годовая стоимость, руб./г; CRF — фактор восстановления капитала; i — процентная ставка, %; R_{proj} — срок службы проекта, г.

НOMER определяет COE как среднюю стоимость за 1 кВт·ч полезной электроэнергии, произведённой системой [24]. Для расчёта COE программа делит годовую стоимость производства электроэнергии на годовую электрическую нагрузку, используя уравнение [25]:

$$COE = \frac{C_{ann, tot}}{E_{ann, tot}},$$

где $E_{ann, tot}$ — годовое электропотребление, кВт·ч/год.

Доля ВИЭ (RF, Renewable Fraction) — доля энергии, поступающая от ГЭК. В HOMER она рассчитывается так [26]:

$$RF = 1 - \frac{E_{nonren} + H_{nonren}}{E_{served} + H_{served}},$$

где E_{nonren} , H_{nonren} — годовое производство электро- и тепловой энергии из невозобновляемых источников, кВт·ч/год; E_{served} , H_{served} — годовое электропотребление и потребление тепла, кВт·ч/год.

Выбор типов гибридных энергетических систем.

Исходя из запасов ветровой и солнечной энергии в посёлке Сяоциндао, в качестве источников возобновляемой энергии выбраны ВЭС и СФЭС. В качестве гарантирующего энергоисточника взята ДЭС, обладающая стабильной производительностью, безопасностью и надёжностью.

Посёлок окружён морем со всех сторон и имеет холмистый рельеф. В нем хорошие условия для строительства гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС), как регулирующего накопителя энергии. ГАЭС добавлена для поглощения избыточной энергии при перенасыщении ветром или солнечным излучением или для генерации энергии в часы отсутствия или недостатка солнечной и ветровой энергии в дополнение к инверторам. Таким образом, складывается надёжная гибридная энергетическая система (рис. 8). Две ДЭС предусмотрены для обеспечения надёжного снабжения электроэнергией в случае аварии, технического обслуживания одной из них или в случае экстремаль-

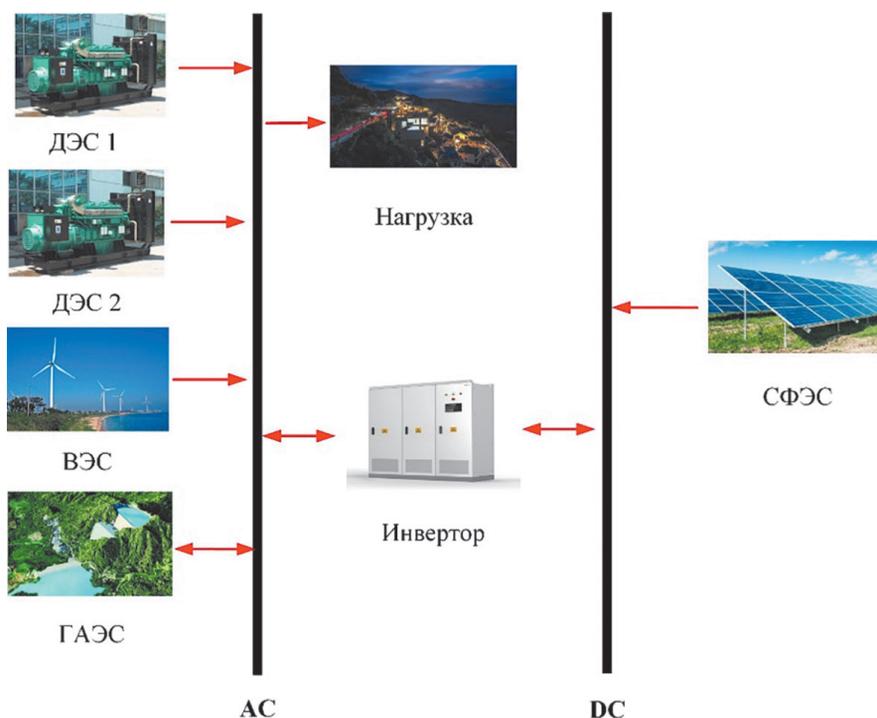


Рис. 8. Состав гибридной энергетической системы в посёлке Сяоциндао

ных природных условий, когда энергия ветра и солнца недоступна.

Различные компоненты и характеристики гибридной энергетической системы.

Для моделирования процесса выработки электроэнергии ВЭС и СФЭС программное обеспечение HOMER проводит расчёты путём статистического анализа исторических многолетних среднемесячных данных о скорости ветра и солнечной радиации в районе исследования, переводя их на почасовые данные о скорости ветра и солнечной радиации (рис. 9, 10) для каждого из 8760 ч (в течение года).

Программа обрабатывает данные, используя распределения Вейбулла для модели вероятности скорости ветра и Бета — для модели вероятности солнечной радиации:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right],$$

где v — скорость ветра, м/с; k — коэффициент формы Вейбулла; c — параметр масштаба Вейбулла, м/с.

$$\varphi_v(R) = \frac{\Gamma(k_1 + k_2)}{\Gamma(k_1)\Gamma(k_2)} \left(\frac{R}{R_{\max}}\right)^{k_1-1} \left(1 - \frac{R}{R_{\max}}\right)^{k_2-1},$$

где R — солнечная радиация, Вт/м²; R_{\max} — максимальная солнечная радиация, Вт/м²; k_1, k_2 — параметры формы функции.

В автономной гибридной энергосистеме с возобновляемыми источниками энергии резервы мощности важны для обеспечения надёжного электроснабжения в случае внезапного увеличения нагрузки или снижения выработки электроэнергии. HOMER использует четыре переменные для определения резервов мощности, из которых две относятся к изменениям электрической нагрузки и две — к изменениям возобновляемых источников энергии. Общий резерв мощности, необходимый для гибридной энергосистемы, является суммой четырёх переменных. В расчётах по моделированию программа управляет энергосистемой таким образом, чтобы расчётный оперативный резерв был равен или превышал требуемый оперативный резерв. Он регистрирует любой дефицит как нехватку мощности.

В настоящем исследовании значения данных четырёх переменных установлены следующим образом:

- нагрузка на текущем временном шаге — 10%, что означает, что система должна поддерживать достаточное количество резервных мощностей для обслуживания внезапного увеличения нагрузки на 10%;
- годовая пиковая нагрузка — 10% (на каждом временном шаге следует обеспечить как минимум 10% пиковой нагрузки в качестве оперативного резерва);
- выходная мощность солнечной энергии — 80% (на каждом временном отрезке система гарантирует достаточную рабочую резервную мощность для обслуживания нагрузки, даже если мощность фотоэлектрического массива внезапно снизится на 80%);

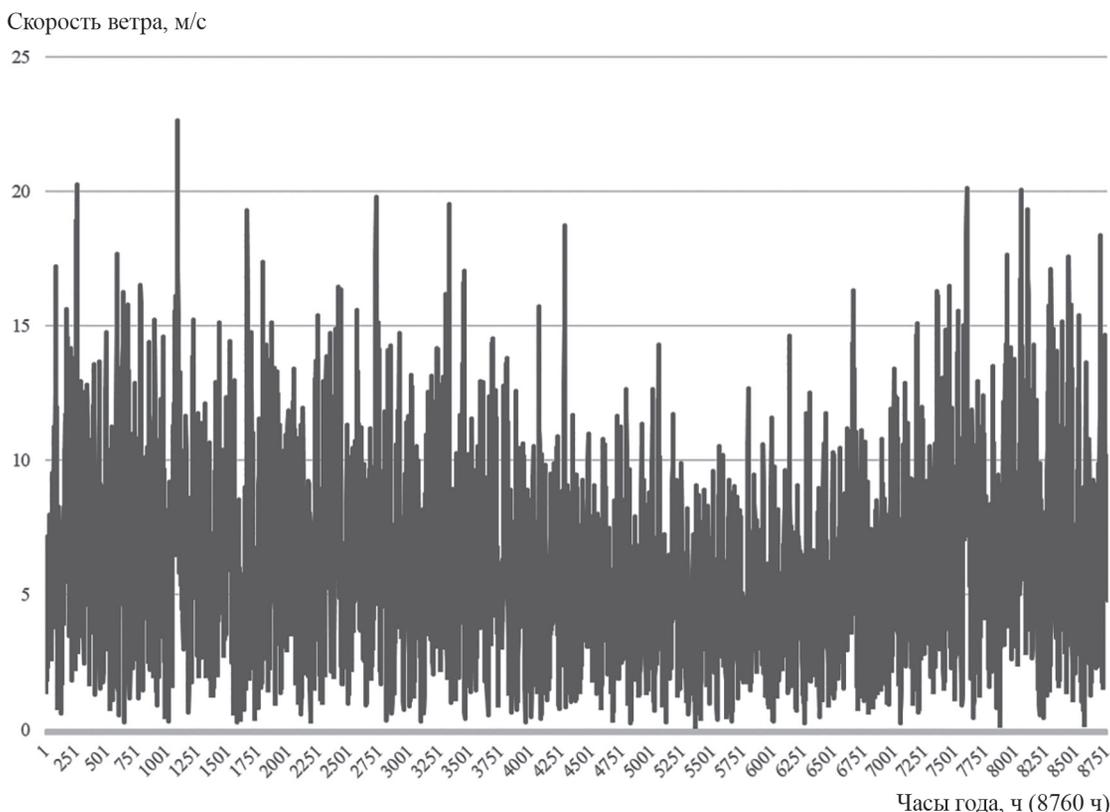


Рис. 9. Моделирование скорости ветра в посёлке Сяоциндао в течение года

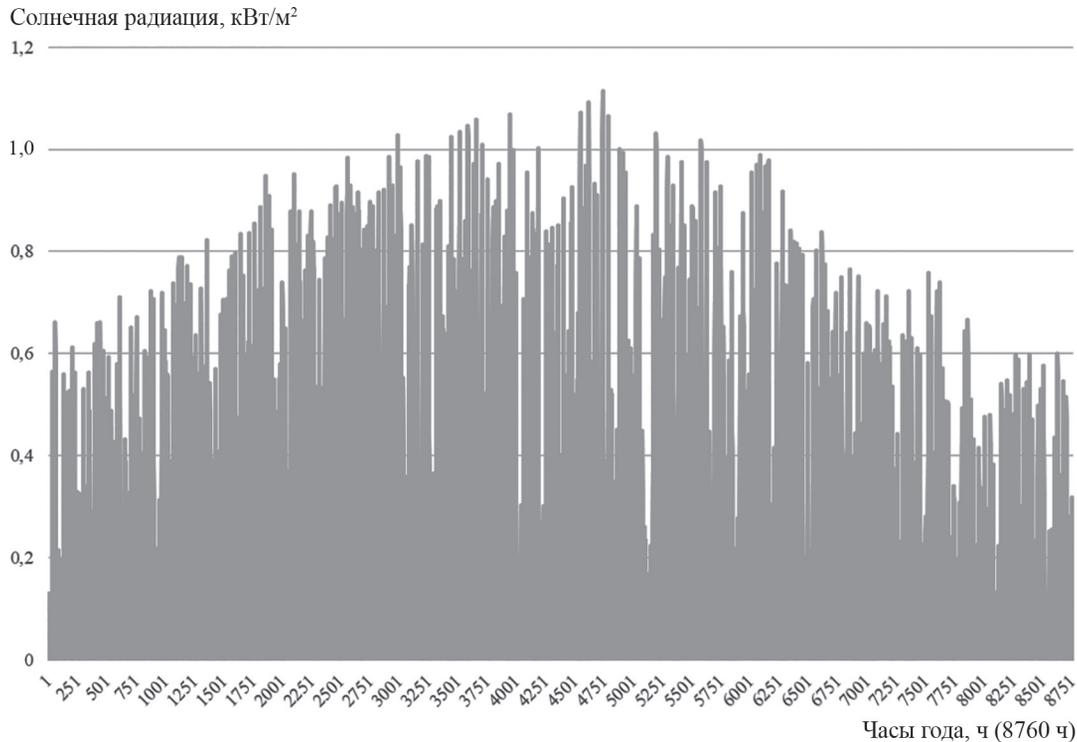


Рис. 10. Моделирование солнечной радиации в посёлке Сяоциндао в течение года

● выходная мощность ветра — 50% (на каждом временном шаге система обязана поддерживать достаточную резервную мощность для обслуживания нагрузки, даже если мощность ветряной турбины внезапно упадет на 50%).

НOMER получает необходимый оперативный резерв на шинах переменного и постоянного тока, используя следующие выражения:

$$\begin{cases} L_{res,AC} = r_{load}L_{prim,AC} + r_{peakload}\hat{L}_{prim,AC} + r_{wind}P_{wind,AC}; \\ L_{res,DC} = r_{load}L_{prim,DC} + r_{peakload}\hat{L}_{prim,DC} + r_{wind}P_{wind,DC} + \\ + r_{solar}P_{PV}, \end{cases}$$

где $L_{res,AC}$, $L_{res,DC}$ — требуемые оперативные резервы на шинах переменного и постоянного тока; r_{load} — оперативный резерв, как процент от нагрузки на текущем временном шаге; $L_{prim,AC}$, $L_{prim,DC}$ — средние первичные нагрузки переменного и постоянного тока на текущем временном шаге; $r_{peakload}$ — оперативный резерв, как процент от годовой пиковой нагрузки; $\hat{L}_{prim,AC}$, $\hat{L}_{prim,DC}$ — наибольшие первичные нагрузки переменного и постоянного токов, испытываемые системой в течение года; r_{wind} — оперативный резерв, как процент от переменной мощности ветра; $P_{wind,AC}$, $P_{wind,DC}$ — средние мощности ветра переменного и постоянного токов на текущем временном шаге; r_{solar} — оперативный резерв (процент от переменной мощности солнечной энергии); P_{PV} — средняя мощность фотоэлектрической батареи на текущем временном шаге.

Исходя из потребностей посёлка Сяоциндао в электроэнергии (см. рис. 4, 5, 11) и имеющихся площади и

рельефа, начальные условия выбора для каждого компонента при моделировании с помощью программного NOMER следующие:

— ДЭС: ДЭС 1 — 150 кВт, мощность ДЭС 2 под- лежит определению;

— ВЭС: мощность отдельной установки — 10 кВт со значениями в диапазоне 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 кВт;

— СФЭС: мощность отдельного солнечного фото-электрического модуля — 1 кВт, оптимизированная мощность получена путём расчёта;

— ГАЭС: индивидуальная мощность — 20 кВт, значения определяются;

— инвертор: индивидуальная мощность — 1 кВт, значение должно быть установлено.

Основные параметры работы и экономические показатели каждого компонента даны в табл. 1, 2.

Дизельная электростанция.

Дизель-генераторы ДЭС с быстрой реакцией на нагрузку и стабильной работой широко используются в гибридных энергетических системах для повышения безопасности и надёжности энергетических систем.

Связь между расходом топлива, номинальной и выходной мощностями ДЭС выглядит следующим образом [25, 27]:

$$F_{DG} = aP_{DG-rated} + bP_{DG-out}$$

где: $P_{DG-rated}$, P_{DG-out} — номинальная и выходная мощности ДЭС, кВт; a — коэффициент пересечения кривой расхода топлива, л/ч/кВт; b — наклон кривой расхода топлива, л/ч/кВт.

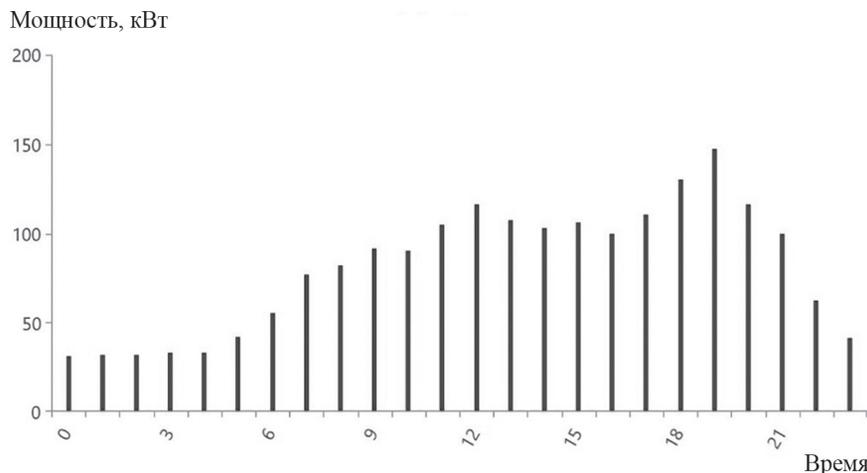


Рис. 11. Типичная кривая летней суточной электрической нагрузки в посёлке Сяоциндао

Таблица. 1

Технические характеристики компонентов системы

Компоненты системы	Технические характеристики	
	ДЭС (дизель-генератор)	Мощность
	Минимальный коэффициент нагрузки	25,00%
	Наклон кривой расхода топлива	0,251 л/ч/кВт
ВЭС (ветряная турбина)	Мощность	10 кВт
	Диаметр ротора	7 м
	Количество лопастей	3
	Высота ступицы	30
	Номинальная скорость ветра	11 м/с
	Скорость ветра на входе	2 м/с
	Скорость ветра на выходе	нет
	Экстремальная скорость ветра	60 м/с
СФЭС (фотоэлектрическая батарея)	Номинальная мощность	1 кВт
	Рабочая температура	25 °С
	КПД	17,8%
	Дерирующий фактор	80%
	Температурный коэффициент	-0,42
ГАЭС (гидроаккумулирующая электростанция)	Мощность	20 кВт
	Максимальный ток заряда	91,6 А
	Максимальный ток разряда	91,6 А
	КПД	67%
Инвертор	КПД	95%

Электрическую эффективность ДЭС найдем с помощью следующего уравнения [28, 29]:

$$\eta = \frac{3,6P_{DG-out}}{\rho_{fuel}F_{DG}H_{L-fuel}},$$

где ρ_{fuel} — плотность дизельного топлива, кг/м³; H_{L-fuel} — нижняя теплотворная способность дизельного топлива, МДж/кг.

В настоящей работе, учитывая, что пиковая электрическая нагрузка составила 238,36 кВт, для обеспечения экстренного электроснабжения выбран ДЭС мощностью 250 кВт. Начальный капитал ДЭС составил 3850000 руб., стоимость замещения — 3500000 руб., а эксплуатационные расходы — 2 руб./ч.

Выбраны две ДЭС, одна мощностью 150 кВт, а другая — мощностью, которую необходимо определить

Таблица. 2

Экономические и технические показатели различных частей гибридной энергетической системы

Показатель	Элементы гибридной энергетической системы				
	ДЭС	ВЭС	СФЭС	ГАЭС	Инвертор
Мощность, кВт	150	10	1	20	1
Начальный капитал, руб./кВт	15400	94850	61810	48000	11900
Стоимость замещения, руб./кВт	14000	91000	61810	35000	11900
Стоимость эксплуатации и обслуживания	2 руб./ч	35000 руб./шт./г	700 руб./кВт/г	6000 руб./кВт/г	700 руб./кВт/г
Срок службы	30000 ч	20 лет	25 лет	35 лет	15 лет

из условия баланса мощности. Начальный капитал ДЭС — 154000 руб./кВт, стоимость замещения — 140000 руб./кВт, эксплуатационные расходы — 2 руб./ч.

Солнечная фотоэлектрическая станция.

Выходная мощность фотоэлектрической батареи в HOMER рассчитывается по выражению [30]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})],$$

где Y_{PV} — номинальная мощность фотоэлектрической батареи (выходная мощность при стандартных условиях испытаний), кВт; f_{PV} — дерирующий фактор фотоэлектрической батареи, %; \overline{G}_T — солнечное излучение, падающее на фотоэлектрическую решётку на текущем временном шаге, кВт/м²; $\overline{G}_{T,STC}$ — падающее излучение при стандартных условиях испытания, 1 кВт/м²; α_P — температурный коэффициент мощности, %/°C; T_c — температура фотоэлемента на текущем временном шаге, °C; $T_{c,STC}$ — температура фотоэлемента при стандартных условиях испытания (25 °C).

Для моделирования был взят солнечный фотоэлектрический модуль мощностью 1 кВт с КПД 17,8% и сроком службы 25 лет. Начальный капитал и стоимость замещения СФЭС составили 61810 руб./кВт, а эксплуатационные расходы — 700 руб./кВт/г. Мощность СФЭС рассчитана с помощью оптимизации программного обеспечения HOMER.

Ветряная электростанция.

Связь между высотой ступицы и скоростью ветра оценивается программой с использованием логарифмического закона [31]:

$$\frac{U_{hub}}{U_{anem}} = \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)},$$

где U_{hub} , U_{anem} — скорости ветра на высотах ступиц ветрогенератора и анемометра, м/с; Z_{hub} , Z_{anem} — высоты ступицы ветряной турбины и анемометра, м; Z_0 — длина шероховатости поверхности, м.

Выходная мощность ветровой турбины выглядит следующим образом [31]:

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) P_{WTG,STP},$$

где P_{WTG} — выходная мощность ветровой турбины, кВт; $P_{WTG,STP}$ — выходная мощность ветровой турбины при стандартных температуре и давлении, кВт; ρ — фактическая плотность воздуха, кг/м³; ρ_0 — плотность воздуха при стандартных температуре и давлении, $\rho_0 = 1\,225$ кг/м³.

Ветровая турбина выбрана с шагом единичной мощности 10 кВт, начальный капитал — 948500 руб. за единицу ВЭС, стоимость замещения — 910000 руб. за единицу ВЭС и эксплуатационными расходами 35000 руб. в год на одну ВЭС. При моделировании количество и мощность ветровых турбин данного типа в системе равны: 0 (0 кВт), 1 (10 кВт), 2 (20 кВт), 3 (30 кВт), 4 (40 кВт), 5 (50 кВт), 6 (60 кВт), 7 (70 кВт), 8 (80 кВт), 9 (90 кВт), 10 (100 кВт), 11 (110 кВт), 12 (120 кВт).

Гидроаккумулирующая электростанция.

Посёлок Сяоциндао окружён морем и холмами, следовательно, при строительстве ГАЭС можно использовать уровень моря в качестве естественного резервуара для воды в нижнем бьефе. Мощность ГАЭС рассчитаем по следующему уравнению:

$$P_{hydro-pumped} = \frac{9,81 \rho_{water} h \eta F}{1000},$$

где $P_{hydro-pumped}$ — мощность ГАЭС, кВт; ρ_{water} — плотность воды, кг/м³; h — высота напора, м; η — эффективность преобразования энергии; F — водный поток, м³/с.

В настоящей работе выбрана ГАЭС мощностью 20 кВт, с эффективностью преобразования 67% и начальным капиталом в 48000 руб./кВт, стоимость замещения — 35000 руб./кВт, эксплуатационный расход — 6000 руб./кВт/г.

Инвертор.

Конструкции гибридной энергетической системы, в которой вырабатывается энергия как постоянного, так и переменного токов, необходимо наличие инвертора. Взят инвертор мощностью 1 кВт с КПД 90%, начальным капиталом и стоимостью замещения — 11900 руб./кВт и эксплуатационными расходами — 700 руб./кВт/г.

Результаты и обсуждение

При выборе гибридных энергетических систем для посёлка Сяоциньдао положим, что ставка дисконтирования составляет 8%, а срок службы проекта — 25 лет. С помощью HOMER смоделируем и рассчитаем все возможные способы комбинирования блоков на основе изменений спроса на электроэнергию, метеорологических условий, цен на топливо и других факторов.

Оптимизация системы.

При условии, что средняя солнечная радиация составляет 4,33 кВт·ч/м²/день, средняя скорость ветра — 6,12 м/с, а цена дизельного топлива — 50 руб./л, расчёт оптимизации основан на минимальных NPC и COE и комбинации различных единиц представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что оптимальная гибридная энергетическая система состоит из ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС системы, включающей в себя ДЭС № 1 мощностью 150 кВт, ДЭС № 2 мощностью 140 кВт, СФЭС мощностью 529 кВт, ВЭС мощностью 50 кВт (5 ветряных турбин по 10 кВт каждая), ГАЭС мощностью 200 кВт (объём верхнего резервуара — 10000 м³; объём нижнего резервуара — море; напор — 98 м), инверторы мощностью 201 кВт. Таким образом, за весь срок службы системы NPC будет равна 89942478,11 руб., начальный капитал — 53908793,14 руб., стоимость эксплуатации и обслуживания — 24214283,59 руб., а COE — 11,41 руб./кВт·ч (табл. 4).

Среднемесячная выработка электроэнергии оптимизированной гибридной системой ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС показана на рис. 12. СФЭС служат основой для производства электроэнергии, и производят ее гораздо больше, чем ДЭС и ВЭС.

Общее производство электроэнергии оптимизированной системы смоделировано на уровне 985549 кВт·ч/г, из которых 823334 кВт·ч/г (83,5%) произведено СФЭС, 100379 кВт·ч/г (10,2%) — ВЭС, 11024 кВт·ч/г (1,12%) — ДЭС № 1 и 50812 кВт·ч/г (5,16%) — ДЭС № 2. Оптимизированная система генерирует 149411 кВт·ч/г (15,2% от общего годового производства электроэнергии) избыточной электроэнергии, которую можно использовать для отопления/охлаждения или поставлять в соседние населённые пункты.

На рисунке 13 продемонстрировано потребление топлива гибридной энергетической системой в разное время года. Благодаря высокому потенциалу солнечной и ветровой энергии в этом районе, общее потребление дизельного топлива невелико, и дизельное топливо, в основном, требуется в период от захода до восхода солнца.

На рисунке 14 изображена выработка электроэнергии установками на основе ВИЭ, а на рис. 15 — выработка электроэнергии по компонентам в разное время суток в течение года. Видно, что периоды выработки электроэнергии из ВИЭ и дизельный генератор дополняют друг друга, и доказывают эффективность гибридной энергетической системы.

Таблица 3

Результаты оптимизации

Номер	Архитектура, кВт						Стратегия (LF/CC)	Стоимость				Система
	СФЭС	ВЭС	ДЭС № 1	ДЭС № 2	ГАЭС	инвертор		COE, руб.	NPC, млн руб.	эксплуатация, млн руб./г	начальный капитал, млн руб.	
1	529	50	150	140	200	201	LF	11,41	89,9	3,38	53,9	91,6
2	615	0	150	140	220	207	LF	11,54	91,0	3,33	55,5	91,6
3	0	120	150	140	120	112	CC	17,36	137	10,7	22,9	22,7
4	0	0	150	140	80	77,5	CC	19,91	157	13,8	9,23	0
5	0	0	150	140	0	0	CC	21,31	168	15,3	4,47	0
6	749	10	0	0	500	272	CC	14,57	115	3,77	74,5	100

Таблица 4

Сводка различных затрат, связанных с оптимальной гибридной системой ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС

Компонент системы	Капитал, руб.	Замещение, руб.	Стоимость эксплуатации и обслуживания, руб.	Топливо, руб.	Утилизация, руб.	NPC, руб.
ДЭС 1	2310000,000	0,00	374684,6400	1785989,14	-276740,430	4193933,350
ДЭС 2	2156000,000	304520,700	3706282,290	9459139,08	-276655,260	15349286,82
СФЭС	32709634,35	0,00	3954337,780	0,00	0,00	36663972,13
ВЭС	4742500,000	976194,340	1868085,830	0,00	-498286,100	7088494,080
ГАЭС	9600000,000	0,00	12809731,43	0,00	-292035,810	22117695,62
Инвертор	2390658,790	753635,350	1501161,620	0,00	-116359,660	4529096,110
Система	53908793,14	2034350,39	24214283,59	11245128,22	-1460077,26	89942478,11

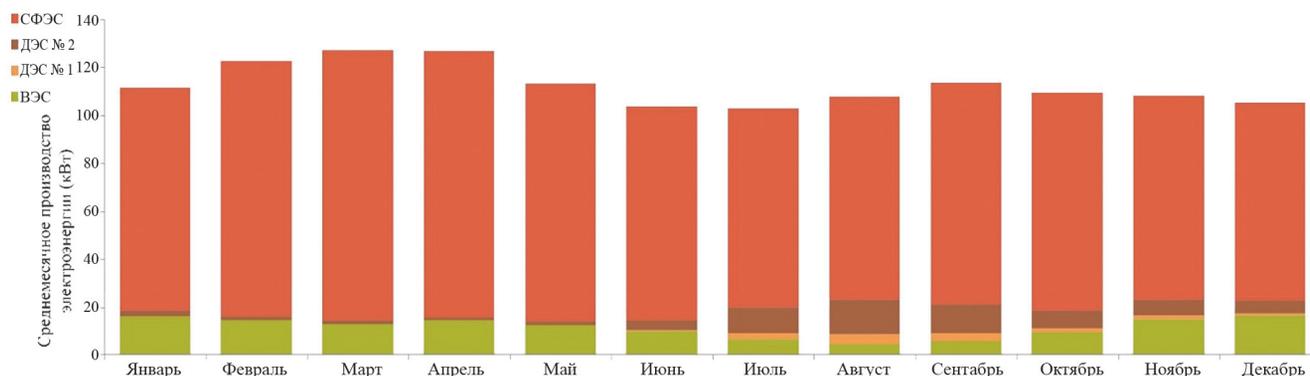


Рис. 12. Ежемесячная разбивка вклада источников энергии в выработку электроэнергии для оптимальной гибридной ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС системы

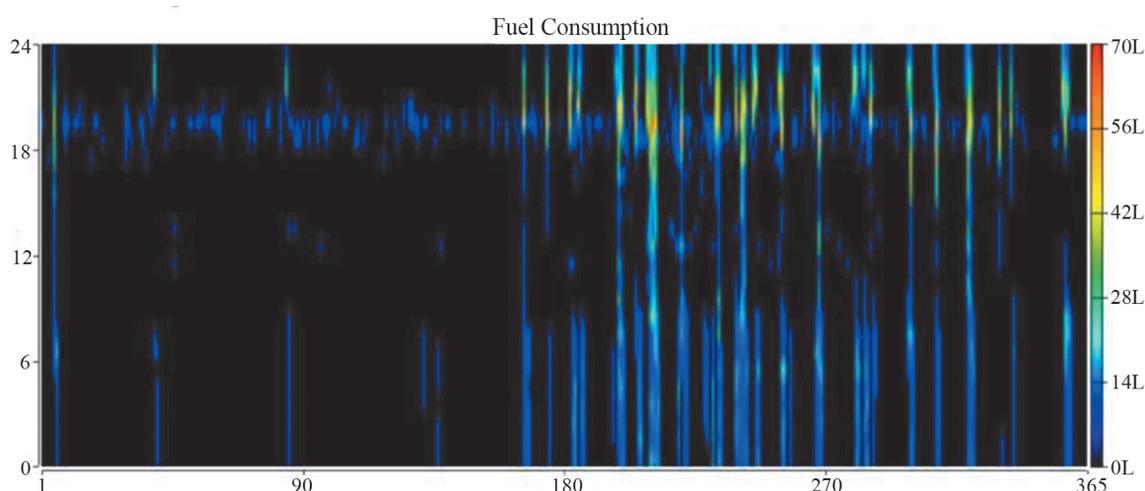


Рис. 13. Расход топлива для оптимальной гибридной ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС системы

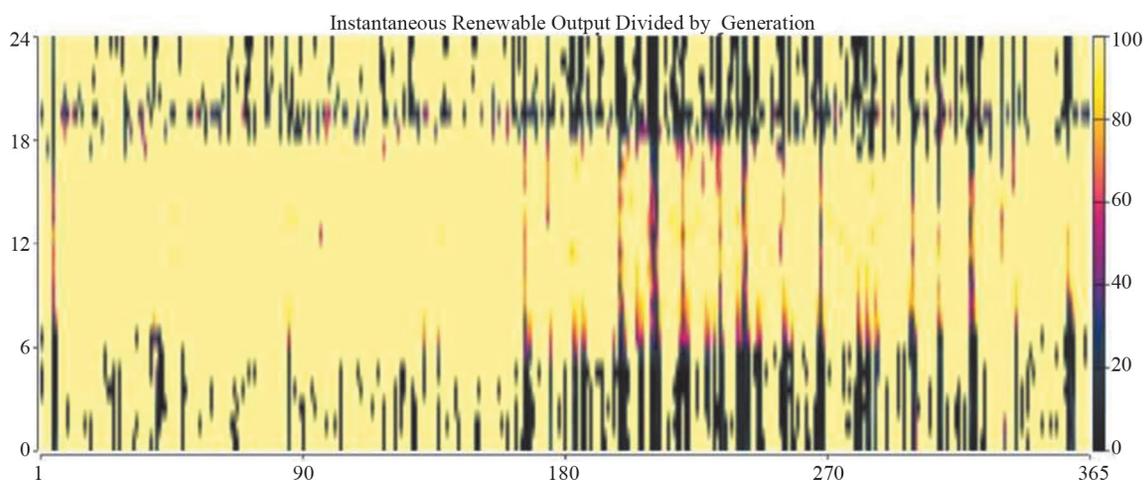


Рис. 14. Мгновенная выработка возобновляемой энергии, разделенная на генерацию, для оптимальной гибридной ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС системы

На рисунке 16 изображено состояние зарядки ГАЭС. Видно, что в течение всего года (с 12 до 17 часов каждый день) скорость зарядки ГАЭС поддерживается на высоком уровне. Этот период также является периодом пиковой выработки солнечной фотоэлектрической энергии, и указывает на то, что ГАЭС

может эффективно поглощать оставшуюся электрическую энергию.

Загрязняющие вещества, выбрасываемые всеми системами, содержат диоксид углерода (CO₂, Carbon Dioxide), монооксид углерода (CO, Carbon Monoxide), несгоревшие углеводороды (UHC, Unburned Hydro-

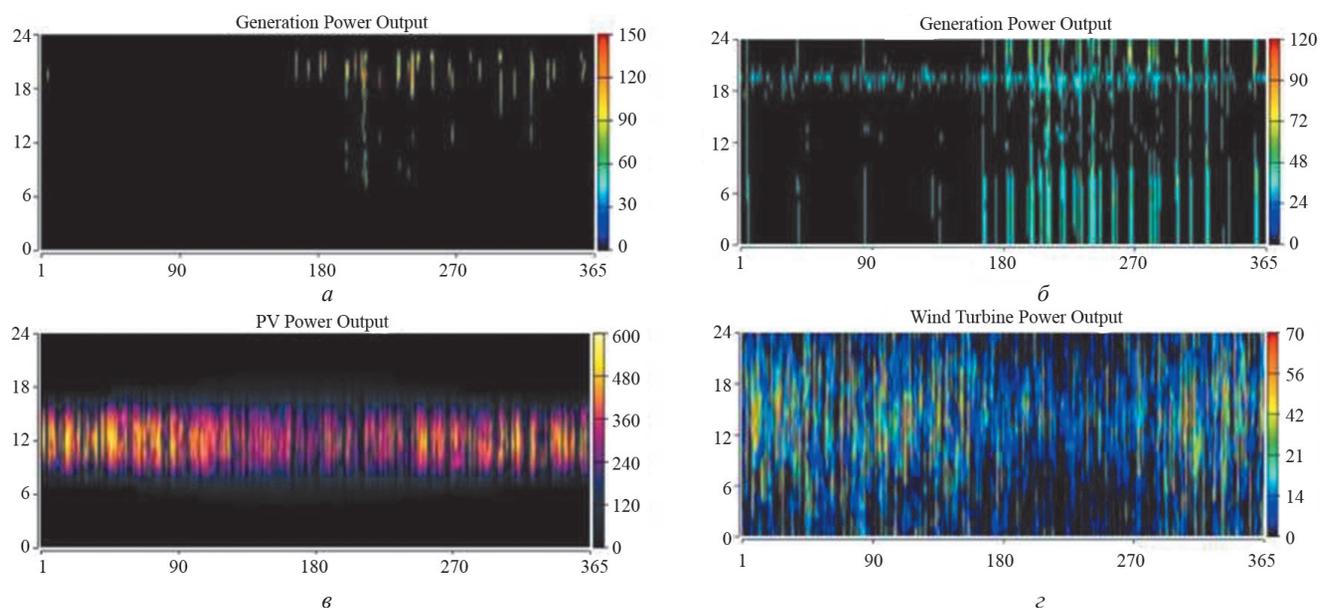


Рис. 15. Годовое производство электроэнергии по компонентам:

a — ДЭС № 1; *б* — ДЭС № 2; *в* — СФЭС; *г* — ВЭС

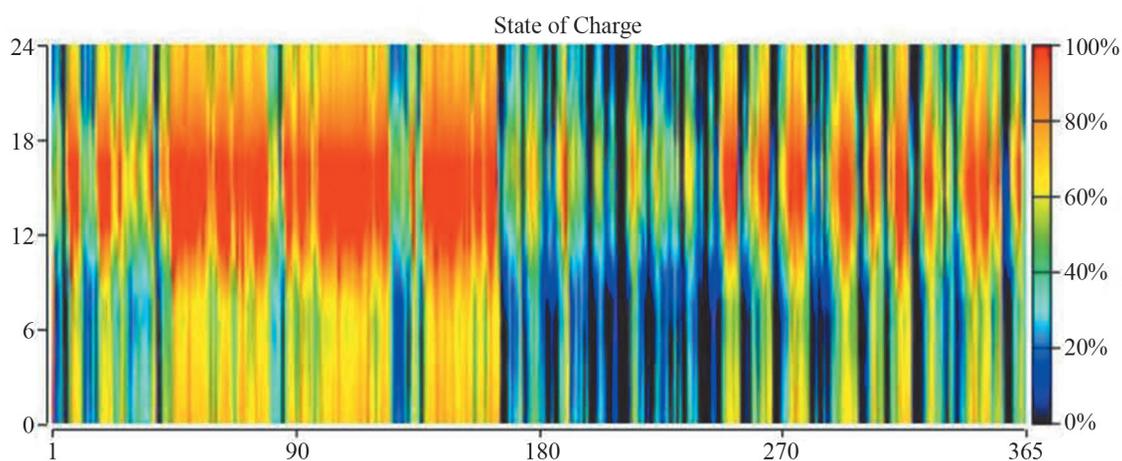


Рис. 16. Состояние зарядки ГАЭС

Carbons), твердые частицы (PM, Particulate Matter), диоксид серы (SO_2 , Sulfur Dioxide) и оксиды азота (NO_x , Nitrogen Oxides). В таблице 5 выполнено сравнение выбросов загрязняющих веществ оптимизированной гибридной энергетической системы и дизель-генератора. Видно, что оптимизированная гибридная энергетическая система выбрасывает 55149 кг/г — CO_2 ; 348 кг/г — CO; 15,2 кг/г — УНС; 2,11 кг/г — PM; 135 кг/г — SO_2 и 327 кг/г — NO_x , что значительно ниже выбросов от системы, работающей только на дизельном генераторе. Фактически, за весь срок службы (25 лет) система ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС выбрасывает в общей сложности 1399,4 т загрязняющих веществ по сравнению с 15496,8 т загрязняющих веществ от системы, использующей только ДЭС. Следовательно, гибридная энергетическая система положительно влияет на сокращение выбросов углерода и защиту окружающей среды.

Анализ чувствительности.

СФЭС составляет наибольшую долю представленной оптимизированной гибридной энергетической системы, поэтому в анализе чувствительности солнечная радиация выбирается в качестве элемента для анализа влияния изменения солнечной радиации на гибридную энергетическую систему, устанавливая цену дизельного топлива — 50 руб./л, скорость ветра — 6,12 м/с. Для расчета взяты следующие значения солнечной радиации: 3,53; 3,73; 3,93; 4,13; 4,33; 4,53; 4,73; 4,93 кВт·ч/м²/день (табл. 6).

Дизельное топливо — основной источник загрязняющих веществ в гибридной энергетической системе. Выбранная цена на него составляет 38; 42; 46; 50; 54; 58; 62; 66 руб./л. Анализ чувствительности проведен для получения состава, NPC и выбросов загрязняющих веществ системы при различных ценах на дизельное топливо. Как следует из данных из табл. 7, 8, чем выше

Таблица 5

Сравнение выбросов для оптимальной гибридной системы и только дизельной системы

Загрязняющие вещества	Выбросы, кг/г	
	ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС	ДЭС
Диоксид углерода (CO ₂)	55149	610720
Монооксид углерода (CO)	348	3850
Несгоревшие углеводороды (УНС)	15,2	168
Твердые частицы (PM)	2,11	23,3
Диоксид серы (SO ₂)	135	1496
Оксиды азота (NO _x)	327	3616
Итого	55976,31	619873,30

Таблица 6

Изменение глобальной солнечной радиации в гибридной системе ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС

Чувствительность	Архитектура, кВт						Стоимость				Система
	СФЭС	ВЭС	ДЭС № 1	ДЭС № 2	ГАЭС	инвертор	СОЕ, руб.	НРС, млн руб.	эксплуатация, млн руб./г	начальный капитал, млн руб.	
3,53	611	80	150	140	200	194	12,57	99,1	3,50	61,7	91,9
3,73	589	70	150	140	200	194	12,23	96,4	3,46	59,4	91,8
3,93	552	70	150	140	200	198	11,92	94,0	3,45	57,2	91,7
4,13	548	60	150	140	200	195	11,66	91,9	3,37	55,9	91,9
4,33	529	50	150	140	200	201	11,41	89,9	3,38	53,9	91,6
4,53	549	30	150	140	220	206	11,17	88,0	3,16	54,3	93,1
4,73	543	20	150	140	220	207	10,94	86,2	3,12	53,0	93,1
4,93	519	20	150	140	220	206	10,72	84,5	3,10	51,5	93,1

Таблица 7

Изменение цены дизельного топлива в гибридной системе ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС (солнечная радиация — 4,33 кВт·ч/м²/день, скорость ветра — 6,12 м/с)

Чувствительность	Архитектура, кВт						Стоимость				Система
	СФЭС	ВЭС	ДЭС № 1	ДЭС № 2	ГАЭС	инвертор	СОЕ, руб.	НРС, млн руб.	эксплуатация, млн руб./г	начальный капитал, млн руб.	
38	508	50	150	140	200	195	11,06	87,2	3,24	52,5	90,7
42	516	50	150	140	200	200	11,18	88,1	3,28	53,1	91,1
46	524	50	150	140	200	195	11,30	89,0	3,33	53,5	91,4
50	529	50	150	140	200	201	11,41	89,9	3,38	53,9	91,6
54	571	40	150	140	220	207	11,50	90,7	3,19	56,6	93,6
58	576	40	150	140	220	206	11,59	91,4	3,23	56,9	93,8
62	565	50	150	140	220	207	11,68	92,1	3,27	57,2	94,1
66	576	50	150	140	220	206	11,76	92,7	3,26	57,8	94,4

цена дизельного топлива, тем больше установленная мощность на основе ВИЭ в системе, и тем меньше выбросы загрязняющих веществ.

Солнечная радиация и скорость ветра — важные факторы, влияющие на установленную мощность в системе. При солнечной радиации — 3,53; 3,73; 3,93; 4,13; 4,33; 4,53; 4,73; 4,93 кВт·ч/м²/день, скорости ветра — 5,32; 5,52; 5,72; 5,92; 6,12; 6,32; 6,52; 6,72 м/с

выполнен анализ чувствительности для выбора оптимального типа системы (рис. 17). Система ДЭС/СФЭС/ГАЭС оптимальна, когда скорость ветра и солнечная радиация располагаются в зелёной области, а система ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС — когда скорость ветра и солнечная радиация находятся в красной области.

По мере роста солнечной радиации и скорости ветра доля ВИЭ в гибридной энергетической системе

Таблица 8

Выбросы вредных веществ при изменении цены дизельного топлива для гибридной системы (солнечная радиация — 4,33 кВт·ч/м²/день, скорость ветра — 6,12 м/с)

Чувствительность Цена дизельного топлива, руб./л	ДЭС (ДЭС № 1 + ДЭС № 2)			Загрязняющие вещества, кг/г						
	всего, л/г	рабочее время, ч/г	производство электроэнергии кВт·ч/г	CO ₂	CO	УНС	PM	SO ₂	NO _x	Итого
38	23442	1506	68840	61363	387	16,90	2,34	150	363	62282,2
42	22440	1440	65921	58738	370	16,20	2,24	144	348	59618,4
46	21762	1405	63804	56963	359	15,70	2,18	139	337	57815,9
50	21068	1357	61836	55149	348	15,20	2,11	135	327	55976,3
54	16017	1027	46891	41926	264	11,50	1,60	103	248	42554,1
58	15652	1003	46009	40971	258	11,30	1,57	100	243	41584,9
62	14869	955	43680	38921	245	10,70	1,49	95,30	230	39503,5
66	14016	905	41100	36688	231	10,10	1,40	89,8	217	37237,3

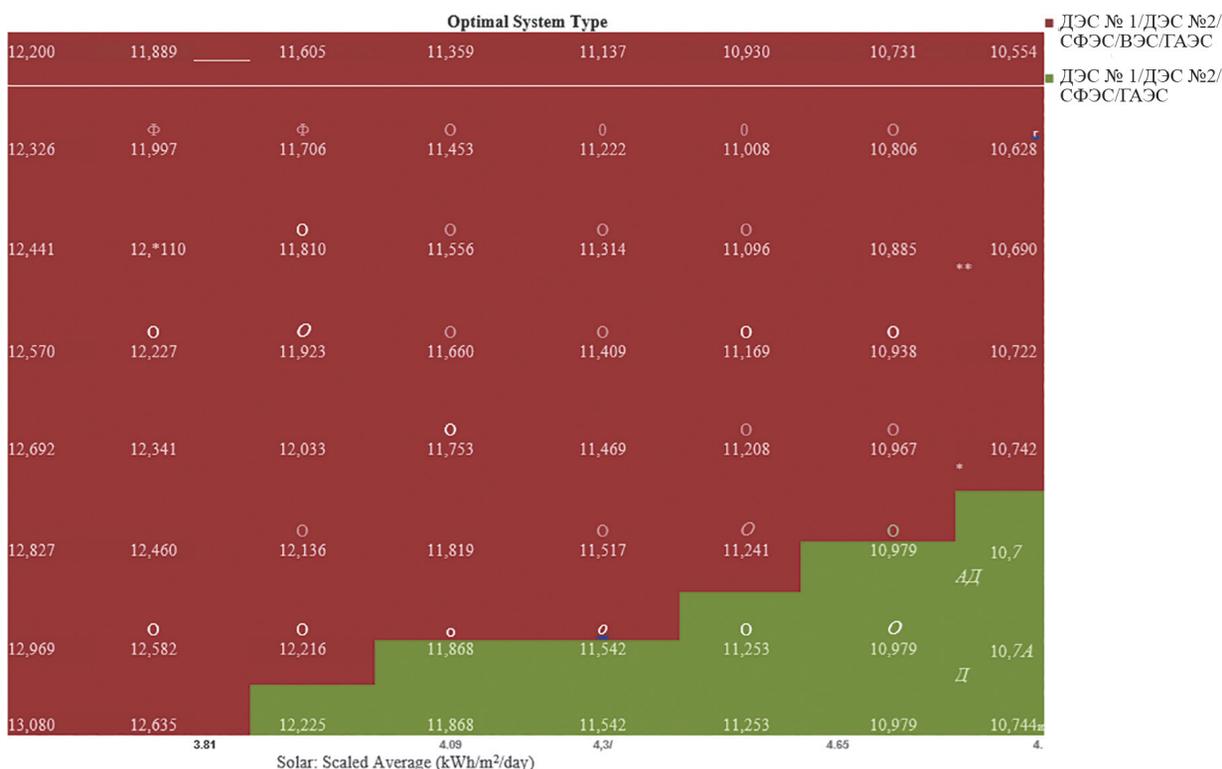


Рис. 17. Результат анализа чувствительности для оптимального типа системы (цена дизельного топлива — 50 руб./л, СОЕ, Р/кВт·ч)

увеличивается, время работы ДЭС сокращается, а выбросы CO₂ уменьшаются (рис. 18). Влияние солнечной радиации на выбросы CO₂ ощутимо, поскольку, чем выше солнечная радиация, тем больше электроэнергии вырабатывают СФЭС в гибридной системе, тем меньше часов работает ДЭС, меньше потребляет дизельного топлива и меньше выбрасывает загрязняющих веществ, включая CO₂.

Выводы

Разработана гибридная энергетическая система для удовлетворения потребностей в электроэнергии

жителей поселка Сяоциндао региона Чандао, Китай. С помощью программного обеспечения HOMER проведены технико-экономический анализ и анализ чувствительности системы. Получены следующие выводы.

Основываясь на состоянии природных ресурсов, (солнечной и ветровой энергии в региона Чандао), в сочетании с потреблением электроэнергии жителями посёлка Сяоциндао, установлено, что гибридная энергетическая система, содержащая ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС, может удовлетворить потребности жителей посёлка в электроэнергии и сэкономить дизельное топли-

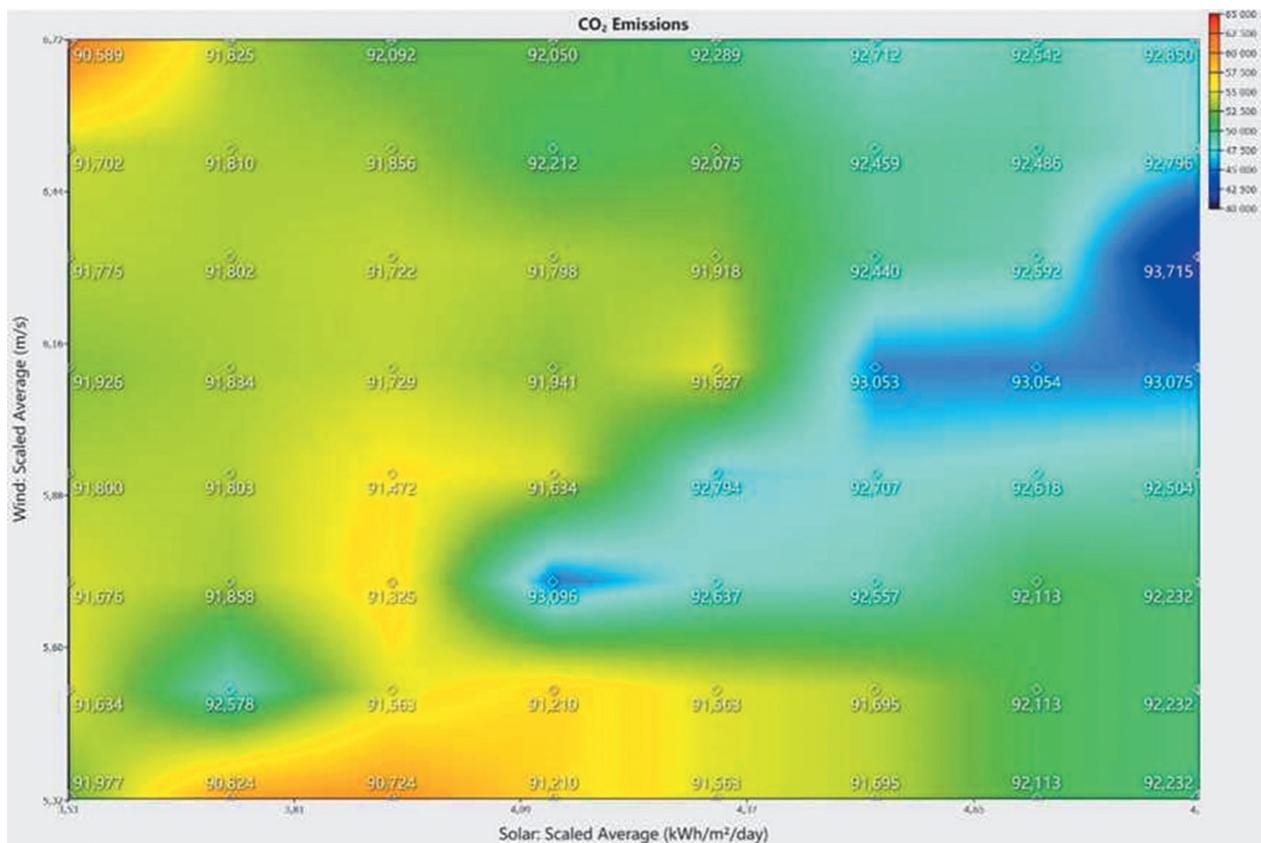


Рис. 18. Результат анализа чувствительности для выбросов CO₂ (цена дизельного топлива — 50 руб./л, доля ВИЭ, %)

во, а, следовательно, снизить выбросы продуктов горения в атмосферу.

Оптимизированная гибридная энергетическая система ДЭС/СФЭС/ВЭС/ГАЭС имеет расчетный срок службы — 25 лет, NPC — 89942478,11 руб., начальный капитал — 53908793,14 руб., стоимость эксплуатации и обслуживания — 24214283,59 руб., COE — 11,41 руб./кВт·ч, в то время как COE только ДЭС составляет 21,31 руб./кВт·ч.

Оптимизированная гибридная энергетическая система состоит из ДЭС № 1 — 150 кВт, ДЭС № 2 — 140 кВт, СФЭС — 529 кВт, ВЭС — 50 кВт, ГАЭС — 200 кВт (объемы верхнего резервуара — 10000 м³, нижнего — море без ограничений, напор — 98 м), инвертора — 201 кВт. Доля ВИЭ в системе достигает 91,6%.

Общая выработка электроэнергии оптимизированной гибридной энергетической системой составляет

985549 кВт·ч/г, из которых: выработка электроэнергии СФЭС — 823334 кВт·ч/г, ВЭС — 100379 кВт·ч/г, ДЭС — 61836 кВт·ч/г.

Система, содержащая только ДЭС, за 25 лет выбросит в общей сложности 15496,8 т загрязняющих веществ, в то время как оптимизированная гибридная энергетическая система — 1399,4 т, что составляет всего 11% от ДЭС системы. Таким образом, гибридная система позволяет сократить выбросы загрязняющих веществ.

Анализ чувствительности показал, что чем выше цена дизельного топлива, тем короче время работы ДЭС и ниже выбросы загрязняющих веществ, а чем выше солнечная радиация, тем меньше NPC и COE системы.

Методы выбора и оптимизации каждого компонента системы, использованные в работе, также применимы к другим отдалённым районам, репрезентативны и практичны.

Литература

1. Manowska A., Nowrot A. The Importance of Heat Emission Caused by Global Energy Production in Terms of Climate Impact // *Energies*. 2019. V. 12(16). P. 3069.
2. Sahu S.K. e. a. Contributions of Power Generation to Air Pollution and Associated Health Risks in India: Current Status and Control Scenarios // *J. Cleaner Production*. 2020. V. 288. P. 125587.

References

1. Manowska A., Nowrot A. The Importance of Heat Emission Caused by Global Energy Production in Terms of Climate Impact. *Energies*. 2019;12(16):3069.
2. Sahu S.K. e. a. Contributions of Power Generation to Air Pollution and Associated Health Risks in India: Current Status and Control Scenarios. *J. Cleaner Production*. 2020;288:125587.

3. **Global CO₂ emissions in 2019** [Электрон. ресурс] www.ica.org/articles/global-co2-emissions-in-2019 (дата обращения 25.01.2022).

4. **Sustainable Energy for All** [Электрон. ресурс] www.sustainabledevelopment.un.org/sdinaction/se4all (дата обращения 25.01.2022).

5. **Renewable Capacity Statistics 2021** [Электрон. ресурс] www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021 (дата обращения 25.01.2022).

6. **Net Zero by 2050_A Roadmap for the Global Energy Sector** [Электрон. ресурс] www.ica.org/reports/net-zero-by-2050 (дата обращения 25.01.2022).

7. **Wang H., Yang X., Xu X., Fei L.** Exploring Opportunities and Challenges of Solar PV Power under Carbon Peak Scenario in China: A PEST Analysis // *Energies*. 2021. V. 14(11). P. 3061.

8. **Ji L., Liang X., Xie Y., Huang G., Wang B.** Optimal Design and Sensitivity Analysis of the Stand-alone Hybrid Energy System with PV and Biomass-CHP for Remote Villages // *Energy*. 2021. V. 225. P. 120323.

9. **Nair A., Murali K., Anbuudayasankar S., Arjunan C.V.** Modelling and Optimising the Value of a Hybrid Solar-wind System // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2017. V. 197. P. 012035.

10. **Moghaddam S., Bigdeli M., Moradlou M.** Optimal Design of an Off-grid Hybrid Renewable Energy System Considering Generation and Load Uncertainty: the Case of Zanjan city, Iran // *SN Appl. Sci.* 2021. V. 3(8). Pp. 1—15.

11. **Umakanta Sahoo e. a.** *Hybrid Renewable Energy System*. N.-Y.: Scrivener Publ. Wiley, 2021. Pp. 37—275.

12. **Overview of Changdao.** The Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Area of Changdao [Электрон. ресурс] www.changdao.gov.cn/col/col6411/index.html (дата обращения 25.01.2022).

13. **Statistical Bulletin of National Economic and Social Development of Changdao County in 2020.** The Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Area of Changdao [Электрон. ресурс] www.changdao.gov.cn/art/2021/7/9/art_30554_2924308.html?xxgkhide=1 (дата обращения 25.01.2022).

14. **Changdao County Statistical Yearbook (2011—2015).** Changdao County Development, Reform and Statistics Bureau [Электрон. ресурс] www.changdao.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&show_name%20=undefined&filename=7e5274d8ddea4fb9847f2a310dfaa39b.pdf (дата обращения 25.01.2022).

15. **Yang Zhijia, Li Benchuan, Liu Wenquan.** Changdao's Natural Environment and Exploitation of Resources // *Marine Sci.* 1987. V. 9(5). Pp. 23—27.

16. **NASA Surface Meteorology and Solar Energy Database** [Электрон. ресурс] www.asdc.larc.nasa.gov/project/SSE (дата обращения 25.01.2022).

3. **Global CO₂ emissions in 2019** [Electron. Resurs] www.ica.org/articles/global-co2-emissions-in-2019 (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

4. **Sustainable Energy for All** [Electron. Resurs] www.sustainabledevelopment.un.org/sdinaction/se4all (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

5. **Renewable Capacity Statistics 2021** [Electron. Resurs] www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021 (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

6. **Net Zero by 2050_A Roadmap for the Global Energy Sector** [Electron. Resurs] www.ica.org/reports/net-zero-by-2050 (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

7. **Wang H., Yang X., Xu X., Fei L.** Exploring Opportunities and Challenges of Solar PV Power under Carbon Peak Scenario in China: A PEST Analysis. *Energies*. 2021;14(11):3061.

8. **Ji L., Liang X., Xie Y., Huang G., Wang B.** Optimal Design and Sensitivity Analysis of the Stand-alone Hybrid Energy System with PV and Biomass-CHP for Remote Villages. *Energy*. 2021;225:120323.

9. **Nair A., Murali K., Anbuudayasankar S., Arjunan C.V.** Modelling and Optimising the Value of a Hybrid Solar-wind System. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2017;197:012035.

10. **Moghaddam S., Bigdeli M., Moradlou M.** Optimal Design of an Off-grid Hybrid Renewable Energy System Considering Generation and Load Uncertainty: the Case of Zanjan city, Iran. *SN Appl. Sci.* 2021;3(8):1—15.

11. **Umakanta Sahoo e. a.** *Hybrid Renewable Energy System*. N.-Y.: Scrivener Publ. Wiley, 2021:37—275.

12. **Overview of Changdao.** The Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Area of Changdao [Electron. Resurs] www.changdao.gov.cn/col/col6411/index.html (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

13. **Statistical Bulletin of National Economic and Social Development of Changdao County in 2020.** The Marine Ecological Civilization Comprehensive Experimental Area of Changdao [Electron. Resurs] www.changdao.gov.cn/art/2021/7/9/art_30554_2924308.html?xxgkhide=1 (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

14. **Changdao County Statistical Yearbook (2011—2015).** Changdao County Development, Reform and Statistics Bureau [Electron. Resurs] www.changdao.gov.cn/module/download/downfile.jsp?classid=0&show_name%20=undefined&filename=7e5274d8ddea4fb9847f2a310dfaa39b.pdf (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

15. **Yang Zhijia, Li Benchuan, Liu Wenquan.** Changdao's Natural Environment and Exploitation of Resources. *Marine Sci.* 1987;9(5):23—27.

16. **NASA Surface Meteorology and Solar Energy Database** [Electron. Resurs] www.asdc.larc.nasa.gov/project/SSE (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

17. **Mills A.** Simulation of Hydrogen-based Hybrid Systems Using Hybrid2 // Intern. J. Hydrogen Energy. 2004. V. 29(10). Pp. 991—999.
18. **Owolabi A.B. e.a.** Measurement and Verification Analysis on the Energy Performance of a Retrofit Residential Building after Energy Efficiency Measures Using RETScreen Expert // Alexandria Eng. J. 2020. V. 59(6). Pp. 4643—4657.
19. **Zhang D., Mu S., Chan C.C., Zhou G.Y.** Optimization of Renewable Energy Penetration in Regional Energy System // Energy Proc. 2018. V. 152. Pp. 922—927.
20. **Venkataramani G., Ramalingam V.** Performance Analysis of a Small Capacity Compressed Air Energy Storage System for Renewable Energy Generation using TRNSYS // J. Renewable and Sustainable Energy. 2017. V. 9(4). P. 044106.
21. **HOMER Software** [Официальный сайт] www.homerenergy.com/ (дата обращения 25.01.2022).
22. **Total Net Present** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/total_net_present_cost.html (дата обращения 25.01.2022).
23. **Amutha, W.M., Rajini V.** Cost Benefit and Technical Analysis of Rural Electrification Alternatives in Southern India Using HOMER // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2016. V. 62. Pp. 236—246.
24. **Levelized Cost of Energy** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/levelized_cost_of_energy.html (дата обращения 25.01.2022).
25. **Li C., Zhou D., Wang H., Cheng H., Li D.** Feasibility Assessment of a Hybrid PV/Diesel/Battery Power System for a Housing Estate In The Severe Cold Zone — a Case Study of Harbin, China // Energy. 2019. V. 185(C). Pp. 671—681.
26. **Renewable Fraction** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/renewable_fraction.html (дата обращения 25.01.2022).
27. **Ramli M.A.M., Hiendro A., Twaha S.** Economic Analysis of PV/Diesel Hybrid System with Flywheel Energy Storage // Renewable Energy. 2015. V. 78. Pp. 398—405.
28. **Olatomiwa L., Mekhilef S., Huda A.S.N., Ounakin O.S.** Economic Evaluation of Hybrid Energy Systems for Rural Electrification in Six Geo-Political Zones of Nigeria // Renewable Energy. 2015. V. 83. Pp. 435—446.
29. **Jahangiri M., Haghani A., Mostafaeipour A., Khosravi A., Raeisi H.A.** Assessment of Solar-wind Power Plants in Afghanistan: a Review // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2019. V. 99. Pp. 169—190.
30. **Output of PV Array** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_calculates_the_pv_array_power_output.html (дата обращения 25.01.2022).
31. **Wind Turbine Power Output** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_calculates_wind_turbine_power_output.html (дата обращения 25.01.2022).
17. **Mills A.** Simulation of Hydrogen-based Hybrid Systems Using Hybrid2. Intern. J. Hydrogen Energy. 2004;29(10):991—999.
18. **Owolabi A.B. e.a.** Measurement and Verification Analysis on the Energy Performance of a Retrofit Residential Building after Energy Efficiency Measures Using RETScreen Expert. Alexandria Eng. J. 2020;59(6):4643—4657.
19. **Zhang D., Mu S., Chan C.C., Zhou G.Y.** Optimization of Renewable Energy Penetration in Regional Energy System. Energy Proc. 2018;152:922—927.
20. **Venkataramani G., Ramalingam V.** Performance Analysis of a Small Capacity Compressed Air Energy Storage System for Renewable Energy Generation using TRNSYS. J. Renewable and Sustainable Energy. 2017;9(4):044106.
21. **HOMER Software** [Официальный сайт] www.homerenergy.com/ (Data Obrashcheniya 25.01.2022).
22. **Total Net Present** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/total_net_present_cost.html (Data Obrashcheniya 25.01.2022).
23. **Amutha, W.M., Rajini V.** Cost Benefit and Technical Analysis of Rural Electrification Alternatives in Southern India Using HOMER. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2016;62:236—246.
24. **Levelized Cost of Energy** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/levelized_cost_of_energy.html (Data Obrashcheniya 25.01.2022).
25. **Li C., Zhou D., Wang H., Cheng H., Li D.** Feasibility Assessment of a Hybrid PV/Diesel/Battery Power System for a Housing Estate In The Severe Cold Zone — a Case Study of Harbin, China. Energy. 2019;185(C):671—681.
26. **Renewable Fraction** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/renewable_fraction.html (Data Obrashcheniya 25.01.2022).
27. **Ramli M.A.M., Hiendro A., Twaha S.** Economic Analysis of PV/Diesel Hybrid System with Flywheel Energy Storage. Renewable Energy. 2015;78:398—405.
28. **Olatomiwa L., Mekhilef S., Huda A.S.N., Ounakin O.S.** Economic Evaluation of Hybrid Energy Systems for Rural Electrification in Six Geo-Political Zones of Nigeria. Renewable Energy. 2015;83:435—446.
29. **Jahangiri M., Haghani A., Mostafaeipour A., Khosravi A., Raeisi H.A.** Assessment of Solar-wind Power Plants in Afghanistan: a Review. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2019;99:169—190.
30. **Output of PV Array** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_calculates_the_pv_array_power_output.html (Data Obrashcheniya 25.01.2022).
31. **Wind Turbine Power Output** [Электронный ресурс] www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/how_homer_calculates_wind_turbine_power_output.html (Data Obrashcheniya 25.01.2022).

Сведения об авторах:

Хе Хайян — магистр техники и технологий по направлению «Электроэнергетика и электротехника», e-mail: oceanyang16@yahoo.com

Тягунов Михаил Георгиевич — доктор технических наук профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: mtyagunov@mail.ru

Ту Рейн Мин — аспирант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: thureinmin06@gmail.com

Information about authors:

He Haiyang — Master of Engineering and Technology in the Direction of «Electric Power and Electrical Engineering», e-mail: oceanyang16@yahoo.com

Tyagunov Mikhail G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: mtyagunov@mail.ru

Thu Yein Min — Ph.D.-student of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: thureinmin06@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 18.02.2022

The article received to the editor: 18.02.2022