

Многокритериальный выбор состава оборудования гибридного энергокомплекса с использованием генетического алгоритма

В.А. Шакиров^{1а}, И.Н. Погодаева^{2б}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^а shakirovva@ex.istu.edu, ^б m.inessa13@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3176-2422>

Статья поступила 12.04.2024, принята 23.04.2024

Создание гибридных энергокомплексов — важное направление, позволяющее повысить надежность, экологическую и экономическую эффективность электроснабжения потребителей. Гибридные энергокомплексы внедряются в изолированных и труднодоступных районах, а также в районах с низкой надежностью электроснабжения или высокой стоимостью электроэнергии. Выбор состава оборудования гибридных энергокомплексов является многокритериальной задачей, так как сопряжен с учетом экономических, технических, экологических факторов. В статье предлагается подход к оптимизации состава оборудования гибридного энергокомплекса на основе генетического алгоритма и метода простого аддитивного взвешивания. Генетический алгоритм обеспечивает формирование конфигураций гибридного энергокомплекса и поиск оптимального или близкого к нему решения. Метод простого аддитивного взвешивания используется для многокритериального оценивания конфигураций, формируемых генетическим алгоритмом. Для расчета показателей гибридного энергокомплекса разработана имитационная модель его функционирования на основе системы правил. Имитационная модель учитывает технологические ограничения оборудования и замену компонентов гибридного энергокомплекса. В результате применения модели оцениваются технические, экономические и экологические показатели функционирования за рассматриваемый период с часовой детализацией. Предложенный подход к выбору состава оборудования гибридного энергокомплекса реализован в среде разработки Python. Применение предложенного подхода рассмотрено на примере удаленного населенного пункта Озерпах Хабаровского края. В составе гибридного энергокомплекса рассматриваются дизельные генераторы, ветроэнергетические установки, фотоэлектрические преобразователи, аккумуляторные батареи, инверторы. В качестве критериев используются следующие показатели: нормированная стоимость производства электрической энергии, капитальные затраты, недоотпуск электроэнергии потребителям и выбросы диоксида углерода. Результаты многокритериального выбора показали, что формируемые конфигурации соответствуют задаваемой структуре предпочтений лица, принимающего решения.

Ключевые слова: гибридные энергокомплексы; принятие решений; оптимизация; генетический алгоритм; Python; нормированная стоимость производства электрической энергии; оптимизация.

Multi-criteria selection of a hybrid renewable energy system using a genetic algorithm

V.A. Shakirov^{1а}, I.N. Pogodaeva^{2б}

¹ Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^а shakirovva@ex.istu.edu, ^б m.inessa13@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-3176-2422>

Received 12.04. 2024, accepted 23.04.2024

The creation of hybrid renewable energy systems is an important direction, allowing increasing reliability, environmental and economic efficiency of power supply to consumers. Hybrid renewable energy systems are implemented in isolated and remote areas, as well as in areas with low reliability of power supply or high price of electricity. The choice of the composition of the equipment of hybrid renewable energy systems is a multi-criteria problem, as it involves economic, technical, and environmental factors in the analysis. The article proposes an approach to optimizing the composition of equipment of a hybrid energy complex based on a genetic algorithm and a simple additive weighing method. The genetic algorithm provides the formation of configurations of the hybrid renewable energy system and the search for an optimal or close to it solution. The method of simple additive weighting is used for multi-criteria evaluation of configurations formed by the genetic algorithm. To calculate the indicators of the hybrid renewable energy system, a simulation model based on a system of rules has been developed. The simulation model takes into account the technological constraints of the equipment and the replacement of components of the hybrid renewable energy system. As a result of the application of the model, the technical, economic and ecological performance indicators for the considered period are estimated with hourly resolution. The proposed approach to the selection of the composition of the equipment of the hybrid renewable energy system is implemented in the Python environment. The application of the proposed approach is considered on the example of the remote village of Ozerpakh, Khabarovsk Krai.

As part of the hybrid renewable energy system, diesel generators, wind turbines, photoelectric converters, storage devices, and inverters are considered. The following criteria are employed: levelized cost of electricity, investment costs, unmet load, and carbon dioxide emissions. The results of multi-criteria choice show that the formed configurations correspond to the specified structure of preferences of the decision-maker.

Keywords: hybrid renewable energy system; decision-making; optimization; genetic algorithm; *Python*; levelized cost of electricity.

Введение. Важным направлением использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является энергоснабжение потребителей изолированных и труднодоступных территорий. Эта проблема характерна для многих регионов мира, а основным подходом к ее решению стали гибридные энергокомплексы (ГЭК).

Гибридные энергокомплексы представляют собой систему, которая сочетает в себе одну или несколько технологий ВИЭ, таких как фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), ветроэнергетические установки (ВЭУ), микрогидроэлектростанции. В состав ГЭК входят генераторы, использующие органическое топливо, например, дизель-генераторы, для электроснабжения потребителей в периоды отсутствия возобновляемой энергии. Для накопления избыточной энергии ВИЭ и последующего ее использования в состав ГЭК входят аккумуляторные батареи. Все эти элементы в работе дополняют друг друга, обеспечивая эффективное электроснабжение потребителей.

На сегодняшний день потребители в изолированных и труднодоступных районах преимущественно обеспечиваются энергией от дизельных генераторов. Основными проблемами таких систем энергоснабжения являются повышенный износ оборудования, низкая надежность и экономичность функционирования. Последняя обусловлена не только высокой стоимостью доставки топлива, но и повышенным удельным расходом топлива из-за неоптимальных режимов загрузки дизель-генераторов. Другим аспектом, ограничивающим использование дизельной генерации, является уязвимость экологии многих изолированных и труднодоступных районов. Необходимо учитывать риски загрязнения при доставке и хранении топлива, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Важным фактором при создании ГЭК на изолированных и труднодоступных территориях является надежность электроснабжения. При использовании ВИЭ-генерации могут возникать периоды длительного отсутствия выработки из-за отсутствия первичной энергии. Решением этой проблемы является использование нескольких видов ВИЭ, резервирование управляемым источником энергии, использование аккумуляторов. Для создания надежной и экономически эффективной системы необходимо правильно выбрать мощность компонентов ГЭК, а также провести моделирование работы различных компонентов системы.

На сегодняшний день существует большое многообразие подходов к выбору состава оборудования ГЭК. Эти подходы можно разделить на две большие группы по методам оптимизации — классическим и эвристическим. Среди классических

методов оптимизации можно выделить динамическое программирование, линейное программирование, смешанное целочисленное линейное программирование (СЦЛП). В задачах большой размерности эти методы могут иметь сложности при формализации проблемы и большие временные затраты на выполнение оптимизации [1]. Эвристические методы обеспечивают поиск решений, близких к оптимальному. Формализация проблемы облегчена, а время поиска решений может регулироваться выбором параметров оптимизации. Повысить точность эвристических методов можно увеличением времени поиска решений или повторением оптимизации. В задачах оптимизации ГЭК применение эвристических методов оправдано, так как высокая точность решения не требуется ввиду большой неопределенности как исходных данных, так и будущих условий.

Среди эвристических методов наиболее часто используют метод роя частиц (PSO — *particle swarm optimization*), генетический алгоритм (ГА). Эти алгоритмы позволяют проводить и многокритериальную оптимизацию.

Рассмотрим исследования в области оптимизации состава оборудования ГЭК классическими и эвристическими методами.

В исследовании [2] оптимизация состава оборудования ГЭК в Италии проводится на основе СЦЛП с целью отказа от использования дизельного генератора. Целевой функцией являются затраты системы. В исследовании [3] оптимизация на основе СЦЛП проводится для ГЭК в промышленной зоне. Изменение спроса на электроэнергию, связанное с производственными циклами, учитывается с помощью инструмента стохастического моделирования. В исследовании [4] на основе СЦЛП проводится планирование развития и функционирования ГЭК с различными технологиями — как ВИЭ, так и традиционными. В исследовании [5] представлен многокритериальный подход, направленный на формирование набора конфигураций, представляющих множество Парето-оптимальных альтернатив. При необходимости это множество сокращается с помощью методов принятия решений. Исследование [6] посвящено оптимизации состава оборудования сетевых ГЭК на основе СЦЛП и эвристического алгоритма в среде *Matlab*. В работе [7] рассматривается модель оптимизации ГЭК на основе СЦЛП. Предлагаемый ГЭК ориентирован на удовлетворение нагрузки промышленного объекта в Саудовской Аравии.

В исследованиях [8; 9] на примере задачи оптимизации ГЭК сравнивается эффективность трех широко используемых методов оптимизации: алгоритм искусственной пчелиной колонии, ГА и PSO. В исследовании [10] показана эффективность

оптимизации ГЭК на основе генетического алгоритма. Основное внимание в исследовании [11] нацелено на поиск компромисса между капиталовложениями и надежностью системы при оптимизации состава оборудования ГЭК на основе комбинации ГА и СЦЛП. В исследовании [12] на основе генетического алгоритма был разработан подход к оптимизации конфигурации ГЭК, который может обеспечить требуемую для потребителя вероятность потери питания с минимальной стоимостью системы. В исследовании [13] показано, что генетический алгоритм представил лучшие результаты при оптимизации ГЭК по сравнению с другими методами.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимизация состава и мощности оборудования ГЭК эвристическими методами широко освещена в зарубежных исследованиях. Существенно меньше работ посвящено многокритериальной оптимизации

ГЭК. В статье предложена методика оптимизации состава оборудования ГЭК, основанная на методе многокритериального анализа SAW (SAW — simple additive weighting) и генетическом алгоритме.

Методы исследования. Предлагаемый подход к выбору состава оборудования ГЭК включает два уровня. На верхнем уровне проводятся формирование конфигураций ГЭК и их многокритериальная оценка с помощью генетического алгоритма и метода SAW. На нижнем уровне проводится имитационное моделирование функционирования ГЭК для каждой из сформированных конфигураций. В результате моделирования определяются основные показатели функционирования и оценки по критериям.

На рис. 1 показан алгоритм функционирования ГЭК.

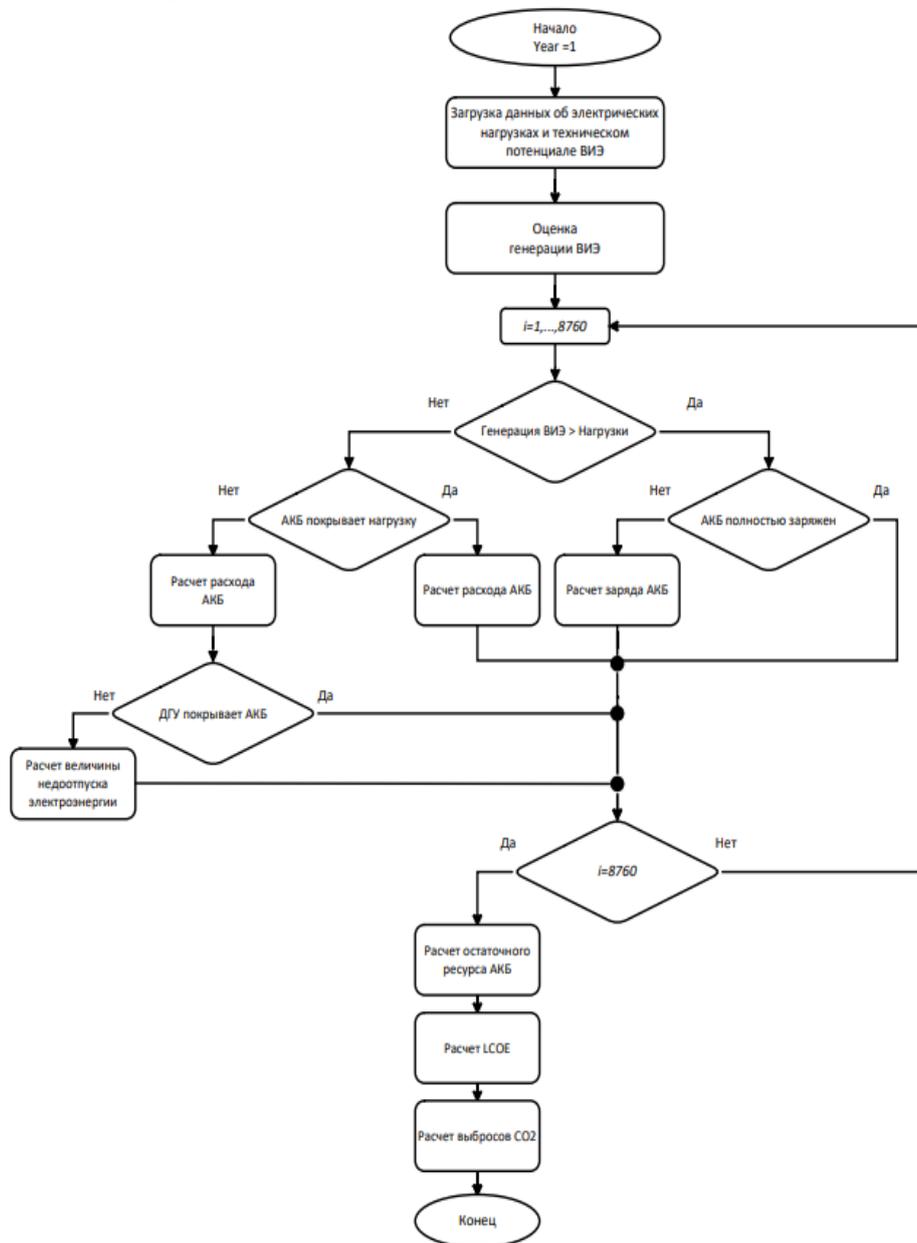


Рис. 1. Алгоритм функционирования ГЭК

В основе алгоритма лежит приоритет использования ВИЭ. Например, электрическая нагрузка покрывается ВИЭ, а избыточная энергия накапливается в аккумуляторах. Если энергии ВИЭ недостаточно, то используется запасенная энергия аккумуляторов, а при ее отсутствии дефицит мощности покрывается дизельным генератором. Расчет ведется с часовой детализацией за годовой период. В результате могут быть детально оценены основные показатели функционирования ГЭК любой конфигурации.

На рис. 2 показана блок-схема оптимизации ГЭК на верхнем уровне.

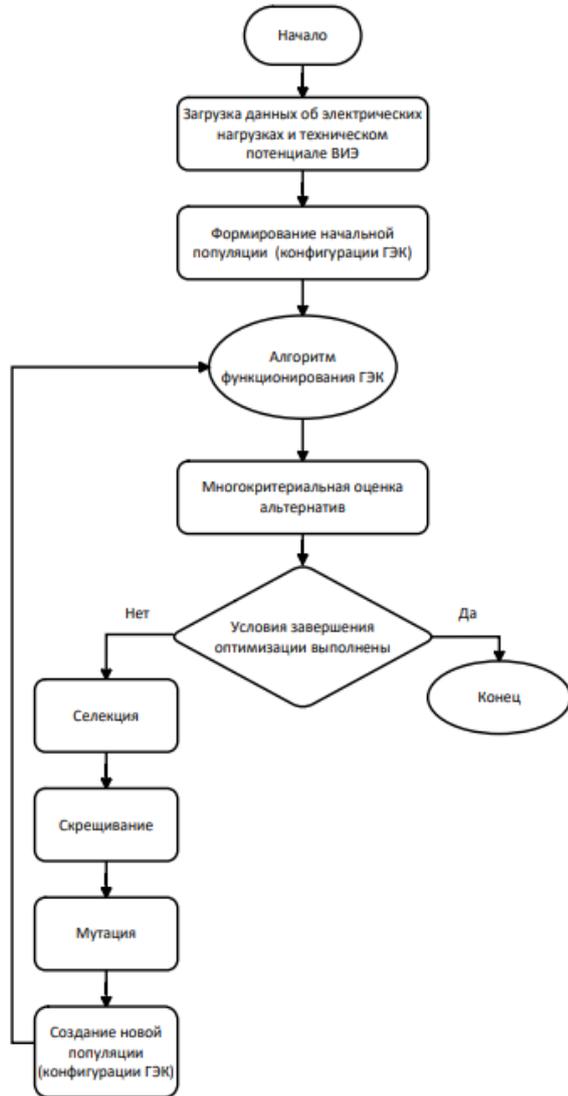


Рис. 2. Алгоритм оптимизации ГЭК

Оптимизация конфигураций ГЭК выполняется генетическим алгоритмом, который является эвристическим методом поисковой оптимизации. Алгоритм построен на основе эволюционных идей естественного отбора и генетики, таких как скрещивание и мутация [14].

ГА обычно используется для решения задач нелинейной оптимизации путем случайного поиска множества возможных решений одновременно, а не в отдельной точке, используя при этом операторы ГА вместо детерминированных. Алгоритму требуются

только функции приспособленности или целевая функция [14].

Первым шагом алгоритма является создание набора начальных поколений (хромосом), которые создаются случайным образом из диапазона предложенных решений. Каждая хромосома — это вариант конфигурации ГЭК, а генами хромосомы являются оптимизируемые параметры — мощности генерирующих установок, емкость накопителя.

Каждая популяция оценивается с помощью целевой функции для отбора наиболее перспективных вариантов для скрещивания и получения новых популяций. Не прошедшие отбор хромосомы исключаются из дальнейшего рассмотрения. Также при оптимизации предусмотрен механизм случайной мутации, когда могут произойти изменения в одном или нескольких генах. Это позволяет обходить локальные экстремумы и смещаться в пространстве решений.

Генетический алгоритм останавливается, когда выполняется условие завершения оптимизации, например, достигнуто предельное количество популяций или не происходит улучшения целевой функции в течение заданного количества поколений.

В предлагаемом подходе целевой функцией является аддитивная свертка критериев, формируемая методом простого аддитивного взвешивания.

Метод SAW, или метод простого аддитивного взвешивания, является одним из самых известных и широко используемых методов многокритериального анализа [14].

В целом процесс оценки состава оборудования ГЭК методом SAW может быть разделен на следующие этапы: оценка конфигурации по критериям; определение весов критериев; нормирование оценок по критериям; ранжирование конфигураций на основе оценок аддитивной функции.

В зависимости от выбираемых весов критериев наиболее предпочтительная конфигурация ГЭК может меняться.

Метод SAW включает следующие этапы [15]:

На первом этапе метода простого аддитивного взвешивания формируется исходная информация об оценках по критериям, представляемая в виде матрицы принятия решений:

$$P = \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где a_i — оцениваемая альтернатива; x_{ij} — оценки альтернатив по критериям.

Далее определяются лучшие значения альтернатив по каждому критерию по формулам:

– если желательны меньшие оценки:

$$x^*_j = \min_j x_{ij}, \quad (2)$$

– если желательны большие оценки:

$$x^*_j = \max_j x_{ij}. \quad (3)$$

На следующем этапе проводится нормализация исходной матрицы принятия решений P . Матрица с

нормализованными величинами показателей эффективности \bar{P} формируется методом линейной нормализации по формулам:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} a_1 \left[\begin{matrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1n} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{x}_{m1} & \bar{x}_{m2} & \dots & \bar{x}_{mn} \end{matrix} \right], i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{x}_j = \frac{x_{ij}}{\min x_{ij}} \quad (5)$$

или:

$$\bar{x}_j = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}}. \quad (6)$$

Для получения многокритериальных оценок элементы столбцов матрицы \bar{P} умножаются на веса критериев q_1, q_2, \dots, q_n и суммируются:

$$\hat{P} = \begin{bmatrix} a_1 \left[\begin{matrix} q_1 \bar{x}_{11} & q_2 \bar{x}_{12} & \dots & q_n \bar{x}_{1n} \\ q_q \bar{x}_{21} & q_2 \bar{x}_{22} & \dots & q_n \bar{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_1 \bar{x}_{m1} & q_2 \bar{x}_{m2} & \dots & q_n \bar{x}_{mn} \end{matrix} \right], \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^n q_j \bar{x}_{ij}. \quad (8)$$

Более высокие оценки K_i соответствуют более эффективным конфигурациям.

Многокритериальная оценка конфигураций ГЭК может проводиться с использованием различных критериев. В статье для исследования качества получаемых решений использовались четыре критерия.

Экономическую эффективность отражают капитальные затраты и нормированная стоимость производства электрической энергии LCOE (*levelized cost of energy*). Минимизация капитальных затрат является важным критерием в условиях отсутствия достаточных средств на реализацию проекта. LCOE позволяет сравнивать стоимость производства энергии от различных источников и определять наиболее экономически эффективные варианты для реализации. Этот показатель может учитывать такие факторы, как срок службы оборудования, ставки по кредитам, операционные расходы и другие параметры, что делает его полезным инструментом для принятия решений в энергетической отрасли. Данный показатель рассчитывается по следующей формуле [16]:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T (IC_t + C_{ft} + C_{omt})(1+d)^{1-t}}{\sum_{t=1}^T W_t(1+d)^{1-t}}, \quad (9)$$

где IC_t — капитальные вложения в t -й год; C_{ft} — затраты на топливо с учетом доставки в t -й год; C_{omt} — затраты на обслуживание и ремонт основного оборудования; W_t — производство электроэнергии за t -й год [16].

Критерием, отражающим надежность электроснабжения потребителей, является доля непокрытой нагрузки за год.

Для оценки воздействия на климат и экологию рассчитываются годовые выбросы диоксида углерода.

Предложенные алгоритмы (рис. 1, 2) реализованы в среде программирования Python.

Результаты моделирования. Применение методики рассматривается на примере оптимизации ГЭК пос. Озерпах в Хабаровском крае, на северо-востоке России. Климат в этом регионе характеризуется как

умеренно-континентальный. В настоящее время электроснабжение потребителей в населенном пункте осуществляется от дизельной электростанции.

Рассматриваемый населенный пункт имеет высокий потенциал для развития экотуризма, что является перспективным как для местной, так и региональной экономики. Использование ГЭК позволит обеспечить покрытие перспективных электрических нагрузок новых потребителей и при этом минимизировать использование дизельных генераторов.

На основе анализа перспективного электропотребления были рассчитаны электрические нагрузки потребителей пос. Озерпах. Был выполнен анализ геологического и ветроэнергетического потенциала, определены удельные выработки ФЭП и ВЭУ на 1 кВт установленной мощности. Выполнена оценка технико-экономических показателей основного оборудования ГЭК.

Для исследования качества решений, получаемых с помощью предлагаемого многокритериального подхода, были разработаны три сценария. Сценарии отличаются различным вниманием к экономическим, экологическим и техническим аспектам проблемы. В каждом из сценариев назначены различные веса критериев (табл. 1). В первом сценарии максимальный вес назначен критериям экономической эффективности, во втором сценарии наибольший вес дан критерию надежности ГЭК, а в третьем сценарии максимальный вес задан критерию, который оказывает влияние на экологию и климат.

Таблица 1. Веса критериев при различных сценариях

Капитальные вложения	LCOE, Е	Выбросы CO ₂	Доля непокрытой нагрузки
Сценарий 1, ориентированный на обеспечение экономической эффективности			
0,4	0,4	0,1	0,1
Сценарий 2, направленный на обеспечение высокой надежности ГЭК			
0,2	0,2	0,1	0,5
Сценарий 3, направленный на обеспечение экологической эффективности			
0,2	0,2	0,5	0,1

Также были заданы ограничения, чтобы сузить область поиска в пространстве решений: доля непокрытой нагрузки не должна превышать 10 %; капитальные затраты не должны превышать 1 300 тыс. дол.

Далее с помощью разработанной в Python программы для каждого сценария была найдена оптимальная конфигурация, принимающая во внимание заданные ограничения. Результаты проведенной оптимизации состава оборудования ГЭК для каждого сценария представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оптимизации ГЭК

Капитальные вложения, тыс. дол.	LCOE, дол./кВт·ч	Выбросы CO ₂ , т	Доля непокрытой нагрузки, %
Сценарий 1, ориентированный на обеспечение экономической эффективности			
351,54	0,308	179,75	9,99

Сценарий 2, направленный на обеспечение высокой надежности ГЭК			
487,19	0,342	172,06	0,8
Сценарий 3, направленный на обеспечение экологической эффективности			
1 098,97	0,334	16,40	9,99

Таким образом, по результатам оптимизации оборудования ГЭК можно сделать следующий вывод: для каждого сценария алгоритмы формируют индивидуальную конфигурацию, оптимизируя ее состав в соответствии с весами критериев и установленными ограничениями.

Так, для сценария 1 была получена конфигурация ГЭК, обеспечивающая низкие капитальные затраты и LCOE. При этом оценки по другим критериям высоки в сравнении с оценками конфигураций, полученных для других сценариев. Для сценария 2 получена конфигурация, обеспечивающая высокую надежность электроснабжения. Для сценария 3 обеспечены минимальные выбросы диоксида углерода.

Таким образом, подходы к оптимизации на основе SAW и ГА позволяют найти эффективное решение для различных условий.

Литература

1. Shaheen A.M., Spea S.R., Farrag S.M., Abido M.A. A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem // *Ain Shams Engineering Journal*. 2018. № 9 (2). P. 215-231.
2. Alberizzi J.C., Rossi M., Renzi M. A MILP algorithm for the optimal sizing of an off-grid hybrid renewable energy system in South Tyrol. *Energy Reports*. 2020. № 6. P. 21-26.
3. Lamedica R., Santini E., Ruvio A., Palagi L., Rossetta I. A MILP methodology to optimize sizing of PV - Wind renewable energy systems. *Energy*. 2018. № 165. P. 385-398.
4. Scheubel C., Zipperle T., Tzschentschler P. Modeling of industrial-scale hybrid renewable energy systems (HRES) - The profitability of decentralized supply for industry. *Renewable Energy*. 2017. № 108. P. 52-63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.038> (дата обращения: 03.05.2024).
5. Antonin Ponsich, Bruno Domenech, Laia Ferrer-Martí, Marc Juanpera, Rafael Pastor. A multi-objective optimization approach for the design of stand-alone electrification systems based on renewable energies. *Expert Syst. Appl.* 2022. V. 199, Aug. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116939> (дата обращения: 03.05.2024).
6. Çapraz Ozan, Güngör Aşkiner. Heuristic based optimization for design of a grid-connected hybrid renewable energy system. 2018. URL: <https://doi.org/10.33422/4kiconf.2018.12.21> (дата обращения: 03.05.2024).
7. Ghaithan A.M., Mohammed A. An Optimization Model for Sizing a Hybrid Photovoltaic-Wind-Grid-Connected System in Saudi Arabia. *Process Integr Optim Sustain*. 2022. № 6. P. 1027-1042.
8. Adetoro S.A., Olatomiwa L., Tsado J., Dauda S.M. A comparative analysis of the performance of multiple meta-heuristic algorithms in sizing hybrid energy systems connected to an unreliable grid. *e-Prime-Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*. 2023. V. 4. 100140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100140> (дата обращения: 03.05.2024).

Заключение. Развитие систем децентрализованного электроснабжения во многих регионах мира, в том числе и в России, выполняется на основе создания гибридных энергокомплексов с ВИЭ. Такие энергокомплексы обеспечивают решение многих задач: повышение экономичности и надежности электроснабжения потребителей, снижение воздействий на окружающую среду от объектов традиционной генерации.

Рассматривая задачу оптимизации оборудования ГЭК при использовании многокритериальных методов и ГА, появляется возможность найти эффективное решение.

ГА формирует конфигурации ГЭК, а метод многокритериального анализа выступает в качестве инструмента для принятия решений при выборе наилучшего результата, так как позволяет учитывать различные факторы с учетом их важности для лица, принимающего решение.

Исследование качества решений, формируемых с помощью предложенного подхода, проводилось для пос. Озерпах Хабаровского края. Оптимизация состава оборудования ГЭК проводилась по трем сценариям, что позволило выявить и провести сравнительную оценку для каждого из них.

9. Ajewole T.O., Oladepo O., Hassan K.A., Olawuyi A.A., Onarinde O. Comparative study of the performances of three metaheuristic algorithms in sizing hybrid-source power system. *Turk J Electr Power Energy Syst*. 2022. № 2 (2). P. 134-146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100140> (дата обращения: 03.05.2024).
10. KCA Khatri KB Shah J Logeshwaran. A Shrestha 2023 Genetic algorithm based techno-economic optimization of an isolated hybrid energy system *J Microelectron* 1680 4. URL: https://www.researchgate.net/publication/368170896_ (дата обращения: 02.02.2024).
11. Rullo P., Braccia L., Luppi P., Zumoffen D., Feroldi D. Integration of sizing and energy management based on economic predictive control for standalone hybrid renewable energy systems. *Renewable Energy*. 2019. № 140. P. 436-451.
12. Yang H., Zhou W., Lu L., Fang Z. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. *Solar Energy*. 2008. № 82 (4). P. 354-367. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005> (дата обращения: 02.02.2024).
13. He W., Tao L., Han L., Sun Y., Campana P.E., Yan J. Optimal analysis of a hybrid renewable power system for a remote island. *Renewable Energy*. 2021. № 179. P. 96-104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.034> (дата обращения: 02.02.2024).
14. Ismail M.S., Moghavvemi M., Mahlia T.M.I. Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems. *Energy Convers. Manag.* 2014. № 85. P. 120-130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.064> (дата обращения: 02.02.2024).
15. Taherdoost H. Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a Multi-Attribute Decision Making Technique: A Step-by-Step Guide // *Journal of Management Science & Engineering Research*. 2023. № 6 (1). P. 21-24. URL: <https://doi.org/10.30564/jmser.v6i1.5400> (дата обращения: 02.02.2024).
16. Shakirov V.A., Ivanova I.Yu., Ivanov R.A. Assessment of the economic feasibility of connecting remote consumers of the

Eastern Arctic to the energy system // Arctic: ecology and economics. 2022. V. 12, № 1. P. 19-33. URL: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-19-33> (дата обращения: 02.02.2024).

References

1. Shaheen A.M., Spea S.R., Farrag S.M., Abido M.A. A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem // Ain Shams Engineering Journal. 2018. № 9 (2). P. 215-231.
2. Alberizzi J.C., Rossi M., Renzi M. A MILP algorithm for the optimal sizing of an off-grid hybrid renewable energy system in South Tyrol. Energy Reports. 2020. № 6. P. 21-26.
3. Lamedica R., Santini E., Ruvio A., Palagi L., Rossetta I. A MILP methodology to optimize sizing of PV - Wind renewable energy systems. Energy. 2018. № 165. P. 385-398.
4. Scheubel C., Zipperle T., Tzscheutschler P. Modeling of industrial-scale hybrid renewable energy systems (HRES) - The profitability of decentralized supply for industry. Renewable Energy. 2017. № 108. P. 52-63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.038> (data obrashcheniya: 03.05.2024).
5. Antonin Ponsich, Bruno Domenech, Laia Ferrer-Martí, Marc Juanpera, Rafael Pastor. A multi-objective optimization approach for the design of stand-alone electrification systems based on renewable energies. Expert Syst. Appl. 2022. V. 199, Aug. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116939> (data obrashcheniya: 03.05.2024).
6. Çapraz Ozan, Güngör Aşkiner. Heuristic based optimization for design of a grid-connected hybrid renewable energy system. 2018. URL: <https://doi.org/10.33422/4kiconf.2018.12.21> (data obrashcheniya: 03.05.2024).
7. Ghaithan A.M., Mohammed A. An Optimization Model for Sizing a Hybrid Photovoltaic-Wind-Grid-Connected System in Saudi Arabia. Process Integr Optim Sustain. 2022. № 6. P. 1027-1042.
8. Adetoro S.A., Olatomiwa L., Tsado J., Dauda S.M. A comparative analysis of the performance of multiple meta-heuristic algorithms in sizing hybrid energy systems connected to an unreliable grid. e-Prime-Adv. Electr. Eng. Electron. Energy. 2023. V. 4. 100140. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100140> (data obrashcheniya: 03.05.2024).
9. Ajewole T.O., Oladejo O., Hassan K.A., Olawuyi A.A., Onarinde O. Comparative study of the performances of three metaheuristic algorithms in sizing hybrid-source power system. Turk J Electr Power Energy Syst. 2022. № 2 (2). P. 134-146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100140> (data obrashcheniya: 03.05.2024).
10. KCA Khatri KB Shah J Logeshwaran. A Shrestha 2023 Genetic algorithm based techno-economic optimization of an isolated hybrid energy system J Microelectron 1680 4. URL: https://www.researchgate.net/publication/368170896_ (data obrashcheniya: 02.02.2024).
11. Rullo P., Braccia L., Luppi P., Zumoffen D., Feroldi D. Integration of sizing and energy management based on economic predictive control for standalone hybrid renewable energy systems. Renewable Energy. 2019. № 140. P. 436-451.
12. Yang H., Zhou W., Lu L., Fang Z. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm. Solar Energy. 2008. № 82 (4). P. 354-367. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.005> (data obrashcheniya: 02.02.2024).
13. He W., Tao L., Han L., Sun Y., Campana P.E., Yan J. Optimal analysis of a hybrid renewable power system for a remote island. Renewable Energy. 2021. № 179. P. 96-104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.034> (data obrashcheniya: 02.02.2024).
14. Ismail M.S., Moghavvemi M., Mahlia T.M.I. Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems. Energy Convers. Manag. 2014. № 85. P. 120-130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.064> (data obrashcheniya: 02.02.2024).
15. Taherdoost H. Analysis of Simple Additive Weighting Method (SAW) as a Multi-Attribute Decision Making Technique: A Step-by-Step Guide // Journal of Management Science & Engineering Research. 2023. № 6 (1). P. 21-24. URL: <https://doi.org/10.30564/jmser.v6i1.5400> (data obrashcheniya: 02.02.2024).
16. Shakirov V.A., Ivanova I.Yu., Ivanov R.A. Assessment of the economic feasibility of connecting remote consumers of the Eastern Arctic to the energy system // Arctic: ecology and economics. 2022. V. 12, № 1. P. 19-33. URL: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-1-19-33> (data obrashcheniya: 02.02.2024).