

УДК 621.311.17

**Яна Дмитриевна Северина**Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, аспирант, Россия, Иркутск,  
e-mail: yan.sewerina2910@yandex.ru**Владислав Альбертович Шакиров**Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
отдела комплексных и региональных проблем энергетики №60, Россия, Иркутск, e-mail: shakirov@isem.irk.ru

## Методическое обеспечение двухуровневой многокритериальной оптимизации и выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов<sup>1</sup>

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Применение гибридных энергокомплексов на базе дизельных электростанций с дополнением их генерирующими установками на основе возобновляемых источников энергии является эффективным направлением повышения эффективности и надежности электроснабжения децентрализованных потребителей. Создание гибридных энергокомплексов сопряжено с необходимостью решения оптимизационной задачи, в рамках которой требуется определить рациональный состав оборудования и его установленные мощности в условиях многокритериальности.

**Материалы и методы.** В целях многокритериальной оптимизации состава оборудования гибридных энергокомплексов использован двухуровневый подход. На верхнем уровне проведено формирование множества Парето-оптимальных альтернатив – конфигураций гибридных энергокомплексов, на нижнем уровне – почасовое моделирование процесса функционирования гибридных энергокомплексов для детальной оценки каждой конфигурации по критериям. Наиболее предпочтительное решение из полученного множества Парето-оптимальных альтернатив определено методом многокритериального выбора. Методическое обеспечение двухуровневого подхода в связи с многообразием алгоритмов и методов неоднозначно. В ранее выполненном исследовании показана эффективность алгоритма NSGA-II для верхнего уровня.

**Результаты.** Для моделирования функционирования гибридных энергокомплексов на нижнем уровне проведено сравнение имитационного моделирования и линейной оптимизации, также проведено сравнение подходов к оценке весов критериев для многокритериального метода TOPSIS, используемого для выбора лучшей альтернативы из Парето-оптимального множества. Обосновывается целесообразность применения имитационного моделирования на нижнем уровне двухуровневого подхода. Осуществлен анализ методов энтропии, CRITIC и прямого назначения весов лицом, принимающим решение. Выполнен анализ результатов многокритериальной оценки с использованием объективных и субъективных методов назначения весов критериев. Проведено исследование решений, получаемых на основе предложенного подхода, на примере выбора состава оборудования в изолированном энергорайоне «Новиково» Сахалинской области. Анализ чувствительности многокритериальных оценок по методу TOPSIS подтвердил устойчивость решений к малым изменениям структуры предпочтений лица, принимающего решения.

**Выводы.** При многокритериальной оптимизации и выборе состава оборудования гибридного энергокомплекса большое значение имеет определение методов как для формирования множества Парето с использованием двухуровневого подхода, так и для окончательного выбора альтернативы из этого множества. Для гибридных энергокомплексов с аккумуляторами, солнечными панелями, ветроэнергетическими установками и дизель-генераторами использование имитационного моделирования предпочтительнее линейного программирования. Для назначения весов могут привлекаться объективные методы, такие как CRITIC и метод энтропии, однако они не могут полностью заменить субъективные методы назначения весов, которые отражают предпочтения лица, принимающего решения.

**Ключевые слова:** гибридные энергетические комплексы, двухуровневый подход, эвристические алгоритмы многокритериальной оптимизации, имитационное моделирование, линейное программирование, метод TOPSIS, метод CRITIC, метод энтропии

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ИСЭМ СО РАН (№ FWEU-2026-0014) программы фундаментальных исследований РФ на 2026–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13. ЦКП.21.0038).

The study is carried out within the framework of the state assignment project of the Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. FWEU-2026-0014) of the fundamental research program of the Russian Federation for 2026–2030 using the resources of the “High-Temperature Circuit” Collective Use Center (Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. 13. ЦКП.21.0038).

**Yana Dmitrievna Severina**

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Post graduate Student, Russia, Irkutsk, e-mail: yan.sewerina2910@yandex.ru

**Vladislav Albertovich Shakirov**

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Senior Researcher of Complex and Regional Problems in Energy Department № 60, Russia, Irkutsk, e-mail: shakirov@isem.irk.ru

## Methods to support a two-level multi-criteria framework for sizing hybrid renewable energy systems

### Abstract

**Background.** The use of hybrid renewable energy systems (HRES) based on diesel power plants supplemented with generating plants based on renewable energy sources is an effective way to improve the efficiency and reliability of electricity supply to decentralized consumers. Designing of HRES associated with the need to solve an optimization problem, when it is necessary to determine the optimal equipment configuration and their installed capacities in the context of multi-criteria.

**Materials and methods.** In the study, for multi-criteria optimization of HRES sizing a two-level approach is used. The top-level involves the formation of a set of Pareto-optimal alternatives – configurations of the HRES. At the bottom-level, an hourly simulation of the HRES operation is performed to assess each configuration according to the criteria. The most preferred configuration of the obtained set of Pareto-optimal alternatives is determined by the multi-criteria choice method. The methodological foundation of the two-level approach is ambiguous due to the variety of algorithms and methods. Previous research has demonstrated the efficiency of the NSGA-II algorithm for the top-level.

**Results.** The present study compares simulation modeling and linear optimization for simulating the operation of HRES at the bottom-level. A comparison of approaches to estimate criterion weights for the TOPSIS multi-criteria method, used to select the best alternative from the Pareto-optimal set, is also conducted. This study substantiates the expediency of using simulation modeling at the lower level of a two-level approach, based on a comparative analysis with the linear programming method. The Entropy method, the CRITIC method, and direct weight assignment by a decision-maker have been analyzed. The analysis of the multi-criteria evaluation results has been performed using both objective and subjective methods to assign criterion weights. A study of the solutions obtained on the basis of the proposed approach has been carried out using the example of the “Novikovo” of the Sakhalin region. The sensitivity analysis of multi-criteria estimates using the TOPSIS method has confirmed the sustainability of the solution to small changes in the preferences of a decision maker.

**Conclusions.** For multi-criteria optimization and decision making of the HRES sizing, the choice of methods for both generating the Pareto set using a two-level approach and for the final alternative selection from this set is of great importance. A comparative analysis of methods for the bottom-level showed that for a HRES with batteries, photovoltaic panels, wind turbines, and diesel generators, the use of simulation modeling is preferable to linear programming. Objective methods, such as CRITIC and entropy method, can be used for weighting; however, they cannot fully replace subjective weighting methods that reflect the preferences of the decision-maker.

**Key words:** hybrid energy systems, two-level approach, heuristic algorithms for multi-criteria optimization, simulation modeling, linear programming, TOPSIS method, CRITIC method, entropy method

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2026.3.042-051

**Введение.** В настоящее время значительная часть территории России не охвачена централизованным электроснабжением в связи с низким уровнем развития энергетической и транспортной инфраструктуры. Применение гибридных энергокомплексов (ГЭК), сочетающих дизельные генераторы, установки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и накопители энергии, позволяет повысить надежность и эффективность электроснабжения удаленных потребителей.

Создание ГЭК сопряжено с решением оптимизационной задачи, в рамках которой требуется определить рациональный состав и мощность генерирующего оборудования, емкость накопителей энергии в условиях многокритериальности. Задача усложняется наличием фактора неопределенности, который связан со

стохастическим характером генерации ВИЭ и электрических нагрузок потребителей, а также неточной структурой предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР).

В большинстве исследований для решения многокритериальной оптимизационной задачи выбора состава оборудования ГЭК используется двухуровневый подход [1]. На рис. 1 представлена схема двухуровневой многокритериальной оптимизации и выбора состава оборудования ГЭК. На верхнем уровне формируется множество Парето-оптимальных вариантов конфигураций ГЭК, которые превосходят друг друга по одному или нескольким критериям. Нижний уровень требуется для получения оценок по части критериев на основе детализированного почасового моделирования процесса функционирования каждой конфигурации ГЭК. Полученное

на основе такого подхода множество Парето может включать очень большое количество альтернатив. Для выбора наиболее предпочтительного решения применяются методы многокритериального анализа, которые используют дополнительную информацию от ЛПП о важности критериев [2, 3] (рис. 1, этапы 3, 4).

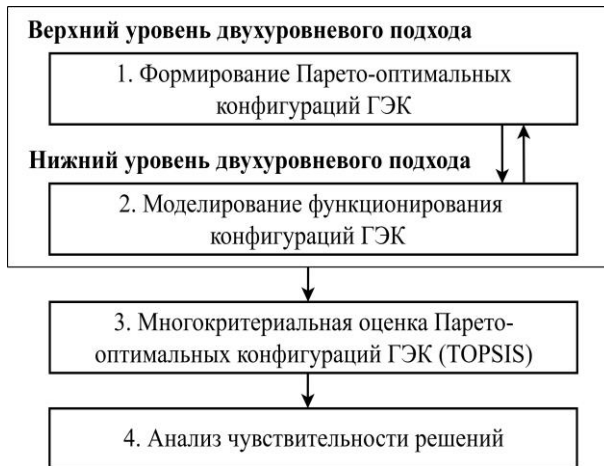


Рис. 1. Схема многокритериальной оптимизации и выбора состава оборудования ГЭК

Применение двухуровневого подхода для анализа конфигураций ГЭК сопряжено с проблемой выбора методов и моделей для каждого уровня, поскольку все они обладают как достоинствами, так и недостатками.

В [4] выполнено сопоставление эффективности эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для верхнего уровня на основе специально разработанной программы для ЭВМ [5]. В настоящем исследовании поставлены две цели:

1) сравнение основных подходов, применяемых для оценивания конфигураций ГЭК на нижнем уровне, – имитационного моделирования и линейного программирования;

2) сравнение объективных и субъективных методов определения весов критериев при выборе конфигурации ГЭК.

**Методы и модели двухуровневого подхода.** Применение двухуровневого подхода рассматривается на примере выбора состава оборудования ГЭК в изолированном энергорайоне «Новиково», расположенном на территории Тонино-Анивского полуострова в Сахалинской области. При создании ГЭК в целях оптимизации состава оборудования и процесса его функционирования рассматривались следующие источники энергии: ветровая (ВЭС) и солнечная (СЭС) электростанции (исследуемая территория располагает высоким ветроэнергетическим и гелиоэнергетическим потенциалом); аккумуляторные

батареи (АКБ) для накопления избыточной энергии ВИЭ и дизель-генераторные установки (ДГУ) для повышения надежности электроснабжения потребителей.

В рамках двухуровневого подхода на верхнем уровне проводится формирование множества Парето-оптимальных конфигураций ГЭК с использованием эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации. Для этого применяется генетический алгоритм с недоминируемой сортировкой NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm), который был реализован в среде Python с использованием библиотеки Pymoo [6]. Обоснование выбора этого алгоритма выполнено в [4]. Генетический алгоритм NSGA-II итеративно формирует популяции, представляющие собой множества конфигураций ГЭК, проводит их оценку и селекцию. В качестве оптимизируемых параметров используются установленные мощности ВЭС и СЭС, номинальная емкость АКБ. В каждой конфигурации значение установленной мощности ДГУ одинаково и равно значению максимума нагрузки энергорайона «Новиково», которое составляет 370 кВт.

На нижнем уровне производится моделирование каждой конфигурации ГЭК с почасовой детализацией, что позволяет получить график покрытия электрических нагрузок и оценить каждый вариант по ряду критериев. Для этого в исследованиях используются имитационные модели или модели на основе линейного (LP) или смешанного целочисленного (MILP) программирования [7, 8].

Для выбора оптимальной модели нижнего уровня было проведено сравнение имитационной модели и модели на основе LP.

На рис. 2 представлена имитационная модель функционирования ГЭК энергорайона «Новиково», реализованная в среде Python [9]. Моделирование осуществляется для каждой из конфигураций ГЭК в течение 8760 ч с почасовым шагом. Имитационная модель функционирует по заданному алгоритму на основе правил: нагрузка в первую очередь покрывается за счет генерации ВЭС и СЭС; избыток генерации ВИЭ направляется на заряд АКБ при условии, что состояние заряда (SOC – State of Charge) АКБ позволяет накопить энергию. Если АКБ полностью заряжена, то в системе наблюдается избыток генерации. При низкой выработке ВИЭ нагрузка покрывается за счет разряда АКБ, и лишь при недостатке энергии ВИЭ и АКБ – выработкой ДГУ. На рис. 3 в качестве примера представлен график покрытия электрических нагрузок гибридным энергокомплексом для интервала 100 ч.

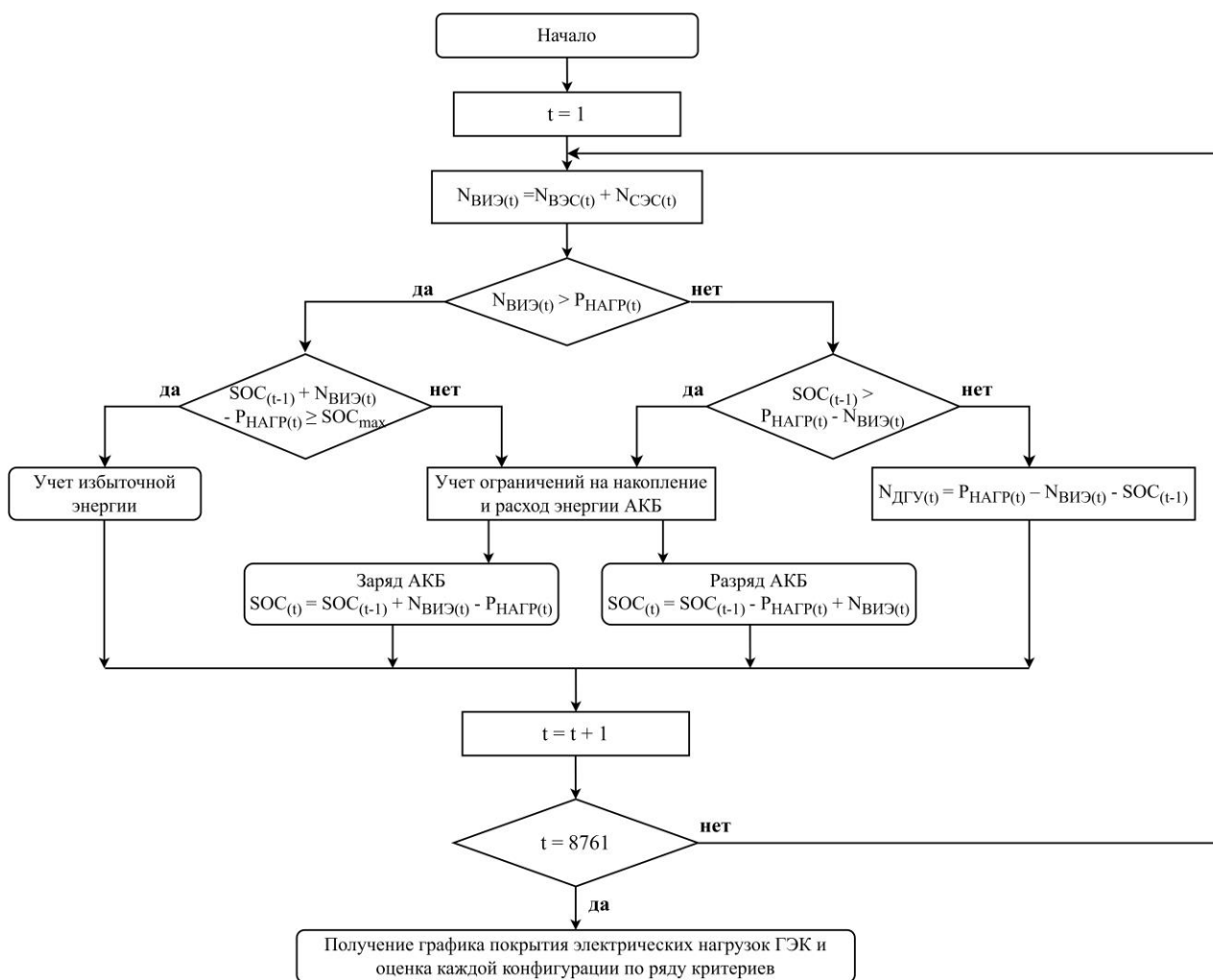


Рис. 2. Имитационная модель процесса функционирования ГЭК «Новиково»

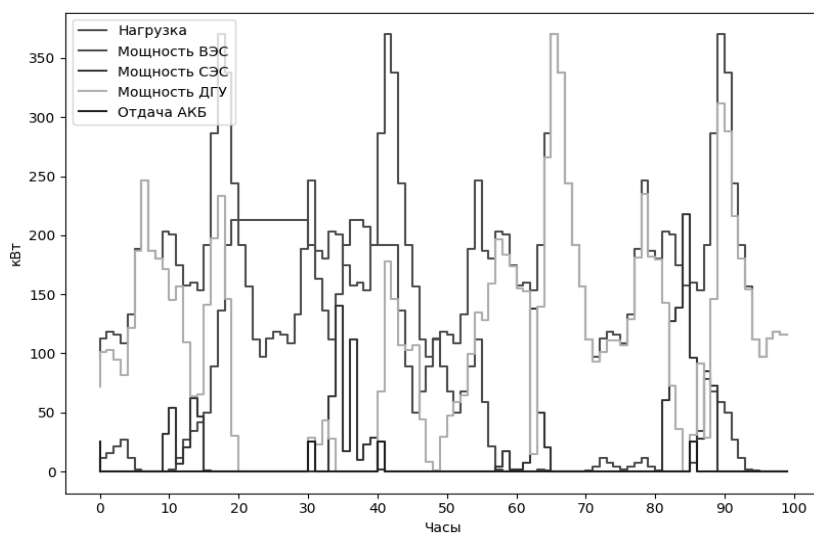


Рис. 3. График покрытия электрических нагрузок

Модель на основе LP была реализована в среде Python с использованием библиотеки Puomo и решателя GLPK [9]. Оптимизация функционирования проводилась для тех же конфигураций множества Парето. В данной модели были

заданы целевая функция в виде минимизации суммарных дисконтированных затрат и система ограничений. Ограничения учитывают балансы мощности и электроэнергии, максимальную и минимальную мощность оборудования, максимальный

и минимальный заряд аккумуляторных батарей. Основными ограничениями являются следующие:

1. В каждый момент времени  $t$  должен выполняться баланс активной мощности:

$$N_{ВЭС}(t) + N_{СЭС}(t) + N_{ДГУ}(t) + N_{АКБ}(t) = P_{нагр}(t), \quad (1)$$

где  $N_{ВЭС}(t)$  – мощность ВЭС, кВт;  $N_{СЭС}(t)$  – мощность СЭС, кВт;  $N_{ДГУ}(t)$  – мощность ДГУ, кВт;  $N_{АКБ}(t)$  – мощность разряда или заряда АКБ, кВт;  $P_{нагр}(t)$  – мощность нагрузки, кВт.

2. Принимается условие, что в начальный момент времени ( $t = 1$ ) АКБ заряжен полностью:

$$W_{АКБ}^{SOC}(t) = W_{АКБ}^{ном}, \quad (2)$$

где  $W_{АКБ}^{ном}$  – номинальная емкость АКБ, кВт·ч.

3. Состояние заряда АКБ в другие часы:

$$W_{АКБ}^{SOC}(t) = W_{АКБ}^{SOC}(t-1) + N_{АКБ}^{зар}(t-1) \cdot t - N_{АКБ}^{разр}(t-1) \cdot t, \quad (3)$$

где  $W_{АКБ}^{SOC}(t-1)$  – состояние заряда АКБ предыдущего часа, кВт·ч;  $N_{АКБ}^{зар}(t-1)$  и  $N_{АКБ}^{разр}(t-1)$  – величина заряда и разряда АКБ в предыдущий час, кВт.

4. Невозможность одновременного заряда и разряда АКБ учитывается условием

$$N_{АКБ}^{зар}(t) \cdot N_{АКБ}^{разр}(t) = 0. \quad (4)$$

5. Ограничение на величину разряда АКБ:

$$N_{АКБ}^{разр}(t) \cdot t \leq W_{АКБ}^{SOC}(t) - W_{АКБ}^{min}, \quad (5)$$

где  $W_{АКБ}^{min}$  – минимальное состояние заряда АКБ, которое принято равным 30 % от номинальной емкости АКБ, кВт·ч.

6. Ограничение на величину заряда АКБ:

$$N_{АКБ}^{зар}(t) \cdot t \leq W_{АКБ}^{ном} - W_{АКБ}^{SOC}(t). \quad (6)$$

7. В любой момент времени состояние заряда АКБ не превышает номинальную емкость:

$$W_{АКБ}^{SOC}(t) \leq W_{АКБ}^{ном}. \quad (7)$$

Проведенное на нижнем уровне детальное моделирование функционирования на основе имитационной или оптимизационной модели позволяет точно провести расчет критериев для верхнего уровня:

1) нормированной стоимости электроэнергии LCOE (Levelized Cost of Energy), долл/кВт·ч:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n (I_t + M_t + F_t) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^n E_t \cdot (1+r)^{-t}}, \quad (8)$$

где  $I_t$  – капитальные затраты в год  $t$ , долл.;  $M_t$  – эксплуатационные затраты в год  $t$ , долл.;  $F_t$  – затраты на топливо в год  $t$ , долл.;  $E_t$  – производство электроэнергии в год  $t$ , кВт·ч;  $r$  – ставка дисконтирования, принятая равной 10 %;  $n$  – срок эксплуатации ГЭК, принятый равным 25 лет.

2) расхода дизельного топлива, т:

$$B_{д.т} = \sum_{t=1}^{8760} \epsilon_{у.т} \cdot 10^{-6} \cdot W_{ДЭС}(t), \quad (9)$$

где  $\epsilon_{у.т}$  – удельный расход топлива, г/кВт·ч;  $W_{ДЭС}(t)$  – выработка ДЭС в  $t$ -й час, кВт·ч.

Удельный расход дизельного топлива определяется по сформированным характеристикам в зависимости от номинальной мощности ДГУ и уровня ее загрузки;

3) доли избыточной энергии – EEF (Excess energy fraction), %:

$$EEF = \frac{\sum_{t=1}^{8760} (N_{сумм}(t) - P_{нагр}(t))}{\sum_{t=1}^{8760} P_{нагр}(t)} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $N_{сумм}(t)$  – суммарная мощность генерации в  $t$ -й час, кВт;  $P_{нагр}(t)$  – нагрузка потребителей в  $t$ -й час, кВт.

**Метод многокритериального анализа TOPSIS.** В результате применения двухуровневого подхода формируется множество Парето-оптимальных альтернатив, которое может включать несколько сотен или тысяч вариантов состава оборудования ГЭК. Для выбора рационального варианта конфигурации ГЭК во многих исследованиях применяется метод многокритериального анализа TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), который позволяет анализировать большое количество альтернатив и ранжировать их на основе сравнения близости каждой из них к идеальному решению. Основные этапы данного метода включают [10]:

1) создание оценочной матрицы  $(x_{ij})_{m \times n}$ , состоящей из  $m$  альтернатив,  $n$  критериев и их оценок  $x_{ij}$  для альтернатив;

2) нормализацию оценочной матрицы  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ :

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (11)$$

3) умножение нормализованной матрицы на весовые коэффициенты критериев:

$$t_{ij} = r_{ij} \cdot w_j, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где  $w_j = \frac{W_j}{\sum_{k=1}^n W_k}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  – весовой коэффициент критерия. Сумма всех значений весовых коэффициентов критериев равна единице:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1;$$

4) определение идеальной лучшей ( $A_b$ ) и идеальной худшей альтернативы ( $A_w$ ):

$$A_b = \left\{ \begin{array}{l} \langle \min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_- \rangle, \\ \langle \max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_+ \rangle \end{array} \right\} \equiv \{t_{bj} | j = 1, 2, \dots, n\}; \quad (13)$$

$$A_w = \left\{ \begin{array}{l} \langle \max(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_- \rangle, \\ \langle \min(t_{ij} | i = 1, 2, \dots, m) | j \in J_+ \rangle \end{array} \right\} \equiv \{t_{wj} | j = 1, 2, \dots, n\}, \quad (14)$$

где  $J_+ = \{j = 1, 2, \dots, n | j\}$  – идеальная лучшая альтернатива с лучшими оценками по сравнению с остальными;  $J_- = \{j = 1, 2, \dots, n | j\}$  – идеальная худшая альтернатива с худшими оценками по сравнению с остальными;

5) нахождение расстояния от выбранной альтернативы до идеальной лучшей и идеальной худшей альтернативы:

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (15)$$

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (16)$$

где  $d_{ib}$  и  $d_{iw}$  – расстояние до самой лучшей и самой худшей альтернативы соответственно;

6) вычисление многокритериальной оценки по методу TOPSIS  $s_{iw}$  относительно самой худшей альтернативы:

$$s_{iw} = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}}, \quad 0 \leq s_{iw} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (17)$$

где  $s_{iw} = 1$ , если альтернатива имеет самые лучшие значения критериев;  $s_{iw} = 0$ , если альтернатива имеет самые худшие значения критериев;

7) ранжирование альтернатив в соответствии со значениями  $s_{iw}$  по убыванию. Лучшей является альтернатива с наивысшей оценкой по методу TOPSIS  $s_{iw}$ .

#### **Методы определения весов критериев.**

Для того чтобы использовать метод TOPSIS, необходимо определить структуру предпочтений ЛПР, которая представляет собой набор критериев, у каждого из которых задан вес, т.е. численная характеристика, показывающая важность каждого критерия.

Веса могут быть заданы субъективно, т.е. ЛПР на свое усмотрение определяет важность критериев с учетом того, что их сумма должна быть равна единице. Чем выше вес критерия, тем больший приоритет он имеет при выборе решения.

**Метод энтропии.** Веса критериев можно задать объективно и с использованием метода энтропии, основные этапы которого включают [11]:

1) создание оценочной матрицы  $(x_{ij})_{m \times n}$ ;

2) нормализацию оценочной матрицы

$$R = (r_{ij})_{m \times n};$$

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{k=1}^m x_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (18)$$

3) расчет энтропии для каждого нормализованного значения критерия  $r_{ij}$  (значение энтропии характеризует количество информации критерия):

$$E_j = \frac{-\left(\sum_{i=1}^m r_{ij} \cdot \ln(r_{ij})\right)}{\ln(m)}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (19)$$

4) определение весовых коэффициентов для каждого критерия  $w_j$ :

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{k=1}^n (1 - E_k)}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (20)$$

где  $(1 - E_j)$  – степень различия между максимальным значением энтропии 1 и фактическим значением  $E_j$ .

Таким образом, основная идея метода энтропии заключается в том, что чем больше разброс (дисперсия) между значениями критериев альтернатив, тем больше информации  $E_j$  несет в себе данный критерий и тем выше значение его веса.

**Метод CRITIC.** Для объективного определения весов критериев может быть использован метод CRITIC, который не только сравнивает степень изменчивости значений критериев между альтернативами, как метод энтропии, но и измеряет степень корреляции между парами критериев, т.е. определяет, находятся ли эти критерии в конфликте. Основные этапы данного метода включают [12]:

1) создание оценочной матрицы  $(x_{ij})_{m \times n}$ ;

2) нормализацию оценочной матрицы  $R = (r_{ij})_{m \times n}$  с учетом того, поиск какого, минимального или максимального, значения критериев осуществляется:

$$r_{ij} = \frac{(\max x_{ij} - x_{ij})}{(\max x_{ij} - \min x_{ij})}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (21)$$

$$r_{ij} = \frac{(x_{ij} - \min x_{ij})}{(\max x_{ij} - \min x_{ij})}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, \quad (22)$$

где  $\max x_{ij}$  и  $\min x_{ij}$  – максимальное и минимальное значения критериев всех альтернатив соответственно;

3) расчет стандартного отклонения  $\sigma_j$  каждого критерия для измерения степени различия между значениями критериев альтернатив:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_{ij} - \mu_{ij})^2}{m}}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, \quad (23)$$

где  $\mu_j$  – математическое ожидание для критерия, которое находится как среднее значение по формуле

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ij}}{m}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; \quad (24)$$

4) составление матрицы корреляции с использованием коэффициента корреляции Пирсона  $k_{xy}$  для определения взаимосвязи между всеми парами критериев:

$$k_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (25)$$

где  $x_i$  –  $i$ -е значение одного критерия;  $y_i$  –  $i$ -е значение другого критерия;  $\bar{x}, \bar{y}$  – средние значения для рассматриваемой пары критериев;

5) оценку степени конфликтности критериев  $\varphi_j$ :

$$\varphi_j = \sum_{j=1}^n (1 - k_{xy}), j = 1, 2, \dots, n, x \neq y; \quad (26)$$

6) вычисление объема информации (меры важности) для каждого критерия  $C_j$ :

$$C_j = \sigma_j \cdot \varphi_j, j = 1, 2, \dots, n; \quad (27)$$

7) определение весовых коэффициентов для каждого критерия  $w_j$ :

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^n C_k}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (28)$$

Таким образом, чем выше конфликтность  $\varphi_j$  и стандартное отклонение  $\sigma_j$  критерия, тем больше информационное содержание  $C_j$  и, следовательно, выше итоговый вес  $w_j$  этого критерия.

Поскольку метод энтропии и метод CRITIC имеют различия в нормализации значений критериев и расчете их весов, рассматривалось использование двух этих методов для

определения весовых коэффициентов критериев (8)–(10).

**Результаты исследования.** В исследовании для многокритериального выбора состава оборудования ГЭК использовался двухуровневый подход (см. рис. 1, этапы 1, 2). На верхнем уровне алгоритмом NSGA-II было получено множество Парето-оптимальных альтернатив – 100 конфигураций ГЭК (рис. 4).

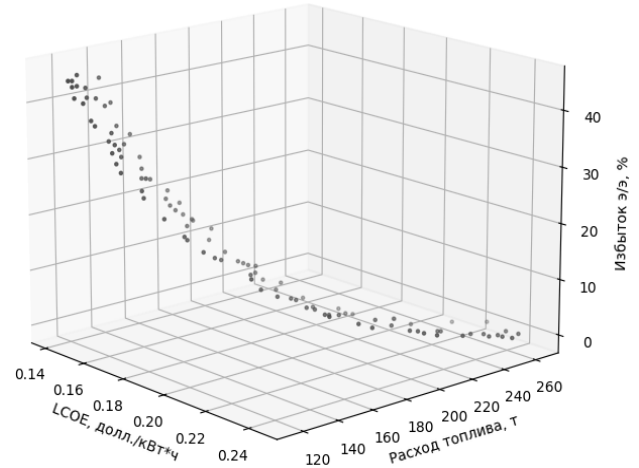


Рис. 4. Множество Парето конфигураций ГЭК, полученное NSGA-II

Далее проводилось сравнение эффективности использования имитационной и оптимизационной моделей для нижнего уровня. Результаты моделирования показали, что оценки по критериям для всех 100 конфигураций, полученные на основе имитационной и оптимизационной модели, одинаковы. В качестве примера на рис. 5 приведены значения критериев (8)–(10) при использовании двух моделей для первых 20 конфигураций.

Основное различие моделей на нижнем уровне проявилось в вычислительной эффективности: имитационная модель выполнила все расчеты за 3 мин 4 с, в то время как LP-модели потребовалось 4 ч 6 мин на персональном компьютере с процессором AMD Ryzen 3 3200U.

На основании результатов сравнительного анализа можно сделать вывод, что на нижнем уровне двухуровневого подхода целесообразно использовать имитационную модель, поскольку она требует меньших вычислительных ресурсов, обладает гибкой структурой для учета технологических особенностей источников и имеет высокую детализацию процессов с возможностью выбора шага моделирования. Необходимо, однако, отметить, что при расширении состава генерирующих установок и накопителей в составе ГЭК или рассмотрении объединения нескольких ГЭК имитационная модель может стать слишком сложной для формализации из-за большого количества условий.

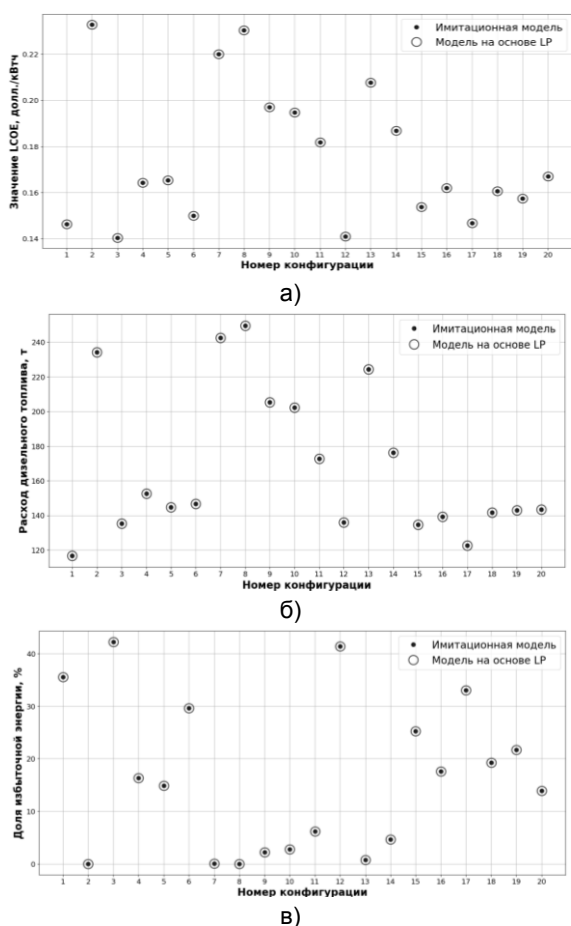


Рис. 5. Значения оценок по критериям, полученные при использовании имитационной модели и модели на основе LP: а – LCOE; б – расход дизельного топлива; в – доля избыточной энергии в процентах

Для окончательного выбора конфигурации ГЭК была проведена многокритериальная оценка всех альтернатив множества Парето с использованием метода TOPSIS. При этом веса критериев были заданы тремя способами: объективными – с использованием методов энтропии и CRITIC, а также субъективным способом.

В табл. 1 показаны диапазоны изменения оценок по критериям для альтернатив из множества Парето.

Таблица 1. Диапазоны изменения оценок по критериям

Критерий	Худшая оценка	Лучшая оценка
1. LCOE, долл/кВт·ч	0,232	0,141
2. Вд.т., т	254,36	116,76
3. EEF, %	42,23	0

Результаты оценки весов, полученные субъективным и объективными способами, представлены в табл. 2.

Таким образом, чем больше разброс оценок по критерию среди альтернатив, тем больший вес ему присваивают объективные методы (энтропии и CRITIC). Но не всегда критерий с

большим диапазоном изменений значений находится в приоритете у ЛПР при поиске решения, поэтому объективные методы не заменяют мнения ЛПР, а только лишь дополняют его, позволяя оценить ситуацию с другой стороны на основе исходных данных.

Таблица 2. Значения весов критериев

Способ	Веса критериев		
	LCOE	Вд.т.	EEF
1. Субъективный способ	0,7	0,1	0,2
2. Метод энтропии	0,03	0,056	0,914
3. Метод CRITIC	0,274	0,264	0,462

Если полученные объективными методами веса соответствуют структуре предпочтений ЛПР, то они принимаются для дальнейшего многокритериального анализа альтернатив. Если же значения весов критериев не соответствуют структуре предпочтений, то ЛПР может определить их значения, взяв за основу объективно определенные значения весов и впоследствии увеличить или уменьшить их либо задать собственные значения весов.

Для многокритериального выбора наиболее предпочтительной альтернативы (см. рис. 1, этап 3) были приняты веса, определенные субъективно, поскольку необходимо найти конфигурацию ГЭК, при которой значение LCOE будет минимальным, при этом будут достигаться приемлемые значения расхода топлива и доли избыточной энергии. Для этого необходимо, чтобы у данного критерия был наибольший вес среди остальных.

С использованием назначенных весов критериев (см. табл. 2) была проведена многокритериальная оценка Парето-оптимальных конфигураций ГЭК. Наиболее предпочтительный вариант конфигурации ГЭК определяется по самой высокой оценке TOPSIS (табл. 3).

Таблица 3. Наиболее предпочтительный вариант конфигурации ГЭК

Веса критериев: $W_{LCOE} = 0,7$ ; $W_{Вд.т.} = 0,1$ ; $W_{EEF} = 0,2$			
Конфигурация ГЭК			
$P_{уст.ВЭС}$ , кВт	$P_{уст.СЭС}$ , кВт	$P_{ном.АКБ}$ , кВт·ч	$P_{уст.ДГУ}$ , кВт
213	284	32	370
Оценки по критериям			
LCOE, долл/кВт·ч	Вд.т., т	EEF, %	
0,181	185,87	8,01	

В завершение исследования был проведен анализ чувствительности многокритериальных оценок по методу TOPSIS к малым изменениям структуры предпочтений ЛПР (см. рис. 1, этап 4). При этом учитывалось, что увеличение веса одного из критериев ведет к снижению весов остальных критериев. Результаты анализа чувствительности представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты анализа чувствительности

№	Конфигурация ГЭК				Значения критериев			Многокритериальная оценка по методу TOPSIS $S_w$
	$P_{уст.ВЭС}$ , кВт	$P_{уст.СЭС}$ , кВт	$P_{ном.АКБ}$ , кВт·ч	$P_{уст.ДГУ}$ , кВт	$LCOE$ , долл/кВт·ч	$W_{д.т.}$ , т	$EEF$ , %	
Веса критериев: $w_{LCOE} = 0,65$ ; $w_{W_{д.т.}} = 0,125$ ; $w_{EEF} = 0,225$								
2	185	287	119	370	0,186	187,64	6,66	0,718
1	<b>213</b>	<b>284</b>	<b>32</b>	<b>370</b>	<b>0,181</b>	<b>185,87</b>	<b>8,01</b>	<b>0,717</b>
3	158	328	45	370	0,185	192,02	7,43	0,701
4	290	203	112	370	0,181	181,59	9,56	0,593
5	314	194	122	370	0,179	179,41	10,91	0,471
Веса критериев: $w_{LCOE} = 0,6$ ; $w_{W_{д.т.}} = 0,15$ ; $w_{EEF} = 0,25$								
2	185	287	119	370	0,186	187,64	6,66	0,751
1	<b>213</b>	<b>284</b>	<b>32</b>	<b>370</b>	<b>0,181</b>	<b>185,87</b>	<b>8,01</b>	<b>0,739</b>
3	158	328	45	370	0,185	192,02	7,43	0,732
4	290	203	112	370	0,181	181,59	9,56	0,606
5	314	194	122	370	0,179	179,41	10,91	0,474
Веса критериев: $w_{LCOE} = 0,75$ ; $w_{W_{д.т.}} = 0,05$ ; $w_{EEF} = 0,2$								
1	<b>213</b>	<b>284</b>	<b>32</b>	<b>370</b>	<b>0,181</b>	<b>185,87</b>	<b>8,01</b>	<b>0,679</b>
2	185	287	119	370	0,186	187,64	6,66	0,667
3	158	328	45	370	0,185	192,02	7,43	0,655
4	290	203	112	370	0,181	181,59	9,56	0,569
5	314	194	122	370	0,179	179,41	10,91	0,463

*\*жирным цветом отмечена выбранная наиболее предпочтительная конфигурация ГЭК*

Анализ чувствительности был произведен для 10 альтернатив, имеющих наиболее высокие многокритериальные оценки по методу TOPSIS. Если намеченное наиболее предпочтительное решение остается в пределах трех первых альтернатив при изменении значений весов критериев, то решение устойчиво и может быть выбрано окончательно. Если же многокритериальная оценка существенно меняется при малых изменениях весов критериев, то лучше выбрать другое Парето-оптимальное решение, которое в меньшей степени изменяет свою позицию. Поскольку выбранное решение №1 остается в пределах первых двух позиций при изменении весов критериев, то оно может считаться наиболее предпочтительным при заданной структуре предпочтений. Также в качестве другого потенциального решения может быть рассмотрена альтернатива №2, поскольку при изменении весов ее многокритериальная оценка по методу TOPSIS улучшается.

**Выводы.** В результате исследования предложено методическое обеспечение двухуровневой многокритериальной оптимизации и выбора состава оборудования ГЭК с дизельными генераторами, солнечными панелями, ветроэнергетическими установками и накопителями энергии. Сравнительный анализ моделей нижнего уровня показал, что для простых конфигураций ГЭК имитационная модель и модель на основе LP демонстрируют идентичные результаты при оценке критериев. При этом имитационной модели требуется существенно меньше вычислительных ресурсов для анализа функционирования ГЭК в течение года с почасовой детализацией. Основным ограничением для применения имитационной модели является сложность описания условий функционирования оборудования ГЭК, так как с увеличением состава

оборудования повышается неоднозначность в приоритете использования генерирующих установок и накопителей. Данный недостаток не является критичным при выборе состава оборудования гибридных энергокомплексов с СЭС, ВЭС и АКБ в связи с ограниченным набором технологий и полной неоднозначностью в приоритете их использования.

Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов критериев показал, что в результате применения метода энтропии наибольший вес присвоен критерию «доля избыточной энергии EEF» ( $w_{EEF} = 0,914$ ), в то время как метод CRITIC, учитывающий не только вариативность данных, но и конфликтность между критериями, обеспечил более сбалансированное распределение весов. Данные методы отдают повышенный приоритет критериям с большим диапазоном изменения оценок. Однако это не всегда соотносится со структурой предпочтений ЛПП. Таким образом, данные методы могут применяться для определения весов критериев, но в качестве дополнительных.

Применение двухуровневого подхода и метода TOPSIS в энергорайоне «Новиково» показало, что выбранные методы и модели обеспечивают высокую детализацию и вычислительную эффективность при выборе состава оборудования ГЭК. Полученное решение адекватно субъективно заданным предпочтениям ЛПП. Анализ чувствительности подтвердил устойчивость выбранного решения к малым изменениям в структуре предпочтений ЛПП. Таким образом, двухуровневый подход к определению состава оборудования ГЭК и выбранные методы позволяют эффективно определить рациональное решение, обеспечивающее компромисс в оценках экономической и технической эффективности.

## Список литературы

1. **Hybrid Renewable Energy Systems – A Review of Optimization Approaches and Future Challenges** / A. Giedraityte, S. Rimkevicius, M. Marciukaitis, et al. // *Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 15. DOI: 10.3390/app15041744.
2. **Design and analysis of solar hybrid combined cooling, heating and power system: A bi-level optimization model** / X.-Y. Ren, L.-L. Li, B.-X. Ji, J.-Q. Liu // *Energy*. – 2024. – Vol. 292. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130362.
3. **Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS** / C. Xu, Y. Ke, Y. Li, et al. // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 215. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112892.
4. **Северина Я.Д., Шакиров В.А.** Оценка эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 3(39). – С. 88–103.
5. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025685864 Российская Федерация. Оценка эвристических алгоритмов многокритериальной оптимизации для выбора состава оборудования гибридных энергокомплексов ParetoMetrics V. 1.00: № 2025685511: заявл. 25.09.2025: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.09.2025 г. / Я.Д. Северина, В.А. Шакиров; правообладатель ИСЭМ СО РАН.
6. **NSGA-II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm** // Multi-objective Optimization in Python / Pymoo. URL: <https://pymoo.org/algorithms/moo/nsga2.html>
7. **Optimal sizing of a Hybrid Renewable Energy System: Importance of data selection with highly variable renewable energy sources** / J. Alberizzi, J. Meléndez-Frigola, M. Rossi, M. Renzi // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 223. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113303.
8. **Alberizzi J., 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. – Vol. 6. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.012.
9. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664949 Российская Федерация. Оптимизация состава оборудования и функционирования гибридного энергокомплекса HybridOpt V. 1.00: № 2025664067: заявл. 9.06.2025: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 9.06.2025 г. // Я.Д. Северина, В.А. Шакиров; правообладатель ИСЭМ СО РАН.
10. **TOPSIS** [Электронный ресурс] // Википедия: Свободная энциклопедия. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>
11. **Ponhanand K., Sureeyatanapas P.** A comparison between subjective and objective weighting approaches for multi-criteria decision making: A case of industrial location selection // *Engineering and Applied Science Research*. – 2022. – Vol. 49(6). – P. 763–771. DOI: 10.14456/easr.2022.74.
12. **Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L.** Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method // *Computers Ops Res.* – 1995. – Vol. 22, No. 7. – P. 763–770.

## References

1. Giedraityte, A., Rimkevicius, S., Marciukaitis, M., Radziukynas, V., Bakas, R. Hybrid Renewable Energy Systems – A Review of Optimization Approaches and Future Challenges. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15. DOI: 10.3390/app15041744.
2. Ren, X.-Y., Li, L.-L., Ji, B.-X., Liu, J.-Q. Design and analysis of solar hybrid combined cooling, heating and power system: A bi-level optimization model. *Energy*, 2024, vol. 292. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130362.
3. Xu, C., Ke, Y., Li, Y., Chu, H., Wu, Y. Data-driven configuration optimization of an off-grid wind/PV/hydrogen system based on modified NSGA-II and CRITIC-TOPSIS. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 215. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.112892.
4. Severina, Ya.D., Shakirov, V.A. Otsenka evristicheskikh algoritmov mnogokriterial'noy optimizatsii dlya vybora sostava oborudovaniya gibridnykh energokompleksov [Evaluation of heuristic algorithms of multi-criteria optimization for sizing of hybrid renewable energy systems]. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2025, no. 3(39), pp. 88–103. DOI: 10.25729/ESI.2025.39.3.008.
5. Severina, Ya.D., Shakirov, V.A. Otsenka evristicheskikh algoritmov mnogokriterial'noy optimizatsii dlya vybora sostava oborudovaniya gibridnykh energokompleksov ParetoMetrics V. 1.00 [Evaluation of heuristic algorithms for multi-criteria optimization for sizing of hybrid renewable energy systems ParetoMetrics V. 1.00]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM in Russia [Certificate of State Registration of the Computer Program of the Russian Federation]. No. 2025685864, 2025.
6. NSGA-II: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm. Multi-objective Optimization in Python/Pymoo. URL: <https://pymoo.org/algorithms/moo/nsga2.html>
7. Alberizzi, J., Meléndez-Frigola, J., Rossi, M., Renzi, M. Optimal sizing of a Hybrid Renewable Energy System: Importance of data selection with highly variable renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113303.
8. Alberizzi, J., 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, vol. 6. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.012.
9. Severina, Ya.D., Shakirov, V.A. Optimizatsiya sostava oborudovaniya i funktsionirovaniya gibridnogo energokompleksa HybridOpt V. 1.00 [Optimization of the sizing and operation of hybrid renewable energy systems HybridOpt V. 1.00]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM in Russia [Certificate of State Registration of the Computer Program of the Russian Federation]. No. 2025664949, 2025.
10. TOPSIS. Wikipedia: The free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>
11. Ponhanand, K., Sureeyatanapas, P. A comparison between subjective and objective weighting approaches for multi-criteria decision making: A case of industrial location selection. *Engineering and Applied Science Research*, 2022, vol. 49(6), pp. 763–771. DOI: 10.14456/easr.2022.74.
12. Diakoulaki, D., Mavrotas, G., Papayannakis, L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the critic method. *Computers Ops Res.*, 1995, vol. 22, no. 7, pp. 763–770.