

Математические, информационные и интеллектуальные технологии в энергетике

УДК: 621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.010

Выбор компонентов гибридного энергокомплекса для удаленных районов с использованием методов многокритериальной оценки

Погодаева Инесса Николаевна¹, Шакиров Владислав Альбертович²

¹Братский государственный университет, Россия, Братск, *m.inessa13@yandex.ru*

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

Аннотация. Проблема энергоснабжения районов, удаленных от энергосистемы, сохраняет актуальность и находит свое решение преимущественно в модернизации дизельных электростанций и построении гибридных энергокомплексов с возобновляемыми источниками энергии. Жизненный цикл гибридных энергокомплексов составляет несколько десятков лет, поэтому при проектировании должны быть учтены все основные цели – экономическая и техническая эффективность, минимизация воздействий на окружающую среду, надежность. Многокритериальность проблемы требует привлечения лиц, принимающих решения, для выражения предпочтений относительно важности показателей эффективности различных вариантов энергокомплекса. Стохастический характер возобновляемой генерации, многообразие режимных ограничений приводят к необходимости использования специального программного обеспечения для моделирования режимов с часовым разрешением. В статье рассматривается подход к многокритериальному выбору гибридного энергокомплекса из множества альтернатив, формируемых в программе HOMER PRO, с использованием трех методов: TOPSIS и PROMETHEE I, II. Методы имеют отличия в процедурах оценки альтернатив и этим обеспечивают повышение обоснованности выбора. Численный пример рассмотрен для поселка Усть-Соболевка в Приморском крае. Варианты гибридного энергокомплекса формируются с использованием технологий дизельной генерации, ветроэнергетических установок, фотоэлектрических преобразователей, микро-гидроэлектростанций и накопителей энергии. В исследовании рассматриваются три сценария развития района с различными оценками важности критериев.

Ключевые слова: гибридный энергокомплекс, многокритериальный анализ, электростанция, моделирование, возобновляемые источники энергии, TOPSIS, PROMETHEE

Цитирование: Погодаева И.Н. Выбор компонентов гибридного энергокомплекса для удаленных районов с использованием методов многокритериальной оценки / И.Н. Погодаева, В.А. Шакиров // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 2(34). – С. 99-111. – DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.010.

Введение. Развитие технологий использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на протяжении десятилетий не теряет актуальности во всем мире. Большая часть возобновляемой энергии, которую в перспективе можно использовать, приходится на солнечную – более 62%. За последние 10 лет суммарная установленная мощность электростанций, работающих на возобновляемых источниках энергии, выросла в 2,15 раза¹ [1]. Многие страны нацеливают свою энергетическую политику таким образом, чтобы доля ВИЭ в общем энергетическом балансе с каждым годом возрастала. Достижение углеродной нейтральности в энергетической сфере является одним из важных приоритетов.

В России в последние годы развиваются механизмы поддержки возобновляемой энергетики, вводимой для функционирования как на оптовом, так и на розничных рынках электроэнергии. Благодаря программе реализации договоров о предоставлении мощности построены 70 солнечных электростанций (СЭС), 25 ветряных электростанций (ВЭС), 5 малых гидроэлектростанций [2]. В 2023 году введены в эксплуатацию 340,3 МВт объектов ВИЭ, в том числе: на оптовом рынке: ВЭС – 252 МВт; малых гидроэлектростанций – 40,9 МВт; на

¹ МЭА (2023 г.), World Energy Outlook 2023, МЭА, Париж, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

розничных рынках электроэнергетики: СЭС – 44,1 МВт; микрогидроэлектростанций ГЭС (мГЭС) – 3,3 МВт [2].

В России создаются условия для внедрения передовых технологий на основе ВИЭ в удаленных от энергосистемы районах. Привлечение инвестиций осуществляется путем заключения энергосервисных контрактов, в рамках которых проводится модернизация дизельных электростанций и создание гибридных энергокомплексов (ГЭК) с установками на основе возобновляемых источников энергии. Это позволяет существенно снижать расход дорогостоящего дизельного топлива, уменьшать воздействие на окружающую среду.

При выборе компонентов ГЭК требуется рассмотрение множества альтернативных технологий с учетом их технико-экономических характеристик и природно-климатических условий территории. Выбор компонентов ГЭК усложняется необходимостью рассмотрения нескольких критериев эффективности, как на стадии планирования, так и на стадии функционирования энергокомплекса.

В научной литературе теме ГЭК посвящены многочисленные исследования. В работе [3] дан обзор основных подходов к оптимизации параметров ГЭК. В работе [4] рассмотрены подходы к оптимизации состава ГЭК с углубленным рассмотрением эвристических подходов и их комбинаций. В исследовании [5] проводится сравнение трех эвристических алгоритмов оптимизации для выбора состава ГЭК. Оптимальные параметры системы выбираются по трем критериям: нормированная стоимость производства энергии (LCOE), недоотпуск электроэнергии потребителям, величина произведенной избыточной энергии. В работе [6] предлагается комплексное использование ВИЭ для островов Греции с целью покрытия потребностей населения в водоснабжении. Оптимизация проводится для двух сценариев функционирования системы ГЭК на основе авторегрессии второго порядка и модели авторегрессии скользящего среднего. В исследовании [7] представлен подход к управлению функционированием ГЭК с применением искусственной нейронной сети и эвристического алгоритма каракатиц. В работе [8] представлены анализ и моделирование ГЭК для сельскохозяйственного комплекса во Вьетнаме с целью покрытия потребности в энергии для полива, освещения, механизации и других сельскохозяйственных процессов. Моделирование выполнено в программном комплексе HOMER PRO. Авторы исследования [9] предлагают многокритериальный подход к проектированию ГЭК с учетом трех критериев: вероятность дефицита мощности, величина избыточно произведенной энергии и разница между генерируемой мощностью и емкостью накопителей энергии. Результаты исследования показывают, что реализация многокритериальной оптимизации приводит к более практичным и надежным результатам. Исследование [10] рассматривает три ГЭК с разными источниками энергии. Для предотвращения излишнего использования батарей и увеличения срока службы оборудования рассматриваются различные стратегии управления энергокомплексом. Для проведения многокритериального анализа используются девять показателей оценки технологий, экономики и окружающей среды. Результаты исследования показывают, что системные модели, стратегия управления питанием и комплексные показатели эффективности могут служить основой для моделирования ГЭК. В исследовании [11] предложена методика выбора оборудования ГЭК на основе многокритериального анализа. В исследовании использовались пять показателей для оценки различных вариантов решения, включая стоимость ресурсов, объем инвестиций, сокращение выбросов парниковых газов, долю ВИЭ и влияние на используемые земли.

Одним из ключевых исследований по выбору состава ГЭК выступает работа [12] с широким обзором исследований и анализом более 500 статей о ГЭК за период с 1995 по 2020 год. В статье выполнено категорирование исследований по географическому расположению, конфигурации и компонентам, используемым методам.

На основе анализа зарубежных источников можно сделать вывод о целесообразности применения многокритериального подхода к выбору состава оборудования ГЭК. Такой подход позволяет учитывать и сравнивать различные варианты по экономическим, техническим, экологическим и социальным критериям.

В статье будет предложена методика выбора компонентов ГЭК с использованием программы HOMER PRO и трех методов многокритериального анализа – TOPSIS, PROMETHEE 1 и 2. Применение нескольких методов позволяет выделить наиболее эффективные конфигурации ГЭК, показывающие эффективность независимо от способа формализации задачи и выражения предпочтений лица, принимающего решения. Применение методики рассматривается на примере создания ГЭК в удаленном районе Приморского края.

Методика проведения исследования. Выбор компонентов ГЭК на основе многокритериального анализа включает в себя несколько этапов (рисунок 1).

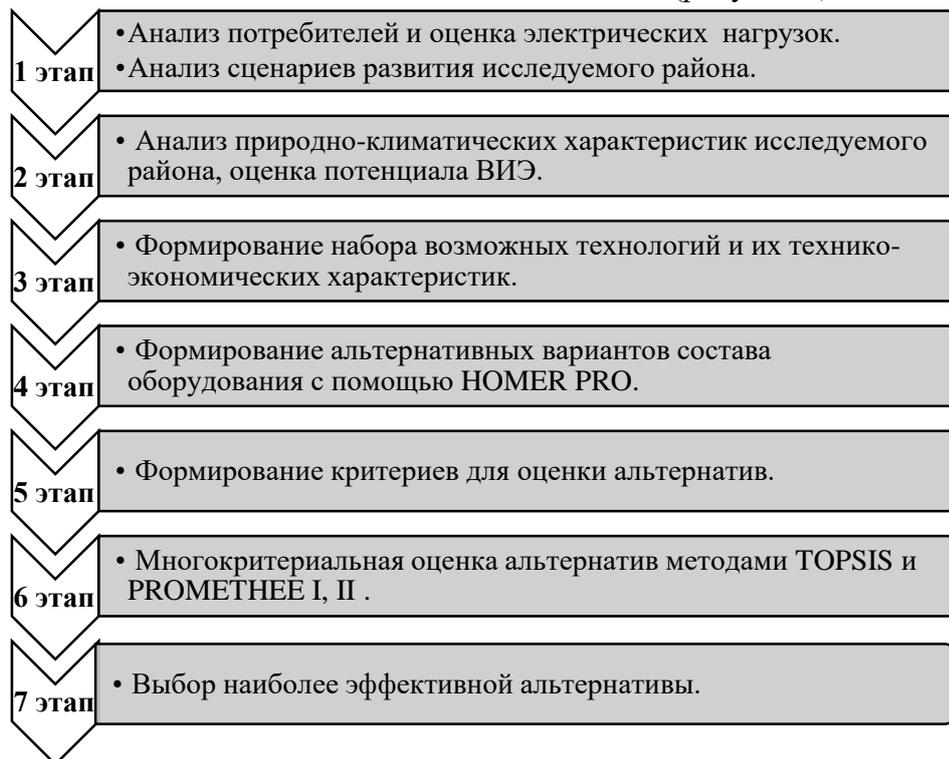


Рис. 1. Этапы методики многокритериального выбора компонентов ГЭК

На первом этапе выполняется анализ потребителей, режимов их работы, требований к надежности электроснабжения. Проводится оценка годового графика электрических нагрузок с часовым разрешением.

На втором этапе проводится анализ природно-климатических характеристик исследуемого района. Выполняется оценка гелиоэнергетического, ветроэнергетического, гидроэнергетического потенциала, а также топливных ресурсов. В результате оценки может быть сделан вывод о наборе рассматриваемых технологий в составе ГЭК.

На третьем этапе формируется набор возможных технологий и их технико-экономических характеристик. К таким характеристикам относят удельные капитальные вложения, затраты на обслуживание и эксплуатацию оборудования, затраты на замену оборудования, удельный расход топлива дизельных генераторов и другие.

На четвертом этапе создаются альтернативные варианты состава оборудования с помощью HOMER PRO. HOMER PRO – это программный продукт, который предназначен для анализа и оптимизации ГЭК. HOMER Pro осуществляет однокритериальную оптимизацию по показателю суммарных дисконтированных затрат за период жизненного цикла проекта. В

связи с этим в ряде исследований, например, [8] были предложены подходы к многокритериальному выбору конфигурации ГЭК из множества, формируемого HOMER Pro.

На пятом этапе формируются критерии для оценки альтернатив. Обзор исследований показал, что основные рассматриваемые критерии для выбора компонентов ГЭК: LCOE, объем выбросов CO₂, доля ВИЭ в общей генерации электроэнергии. Одним из основных критериев практически во всех исследованиях является LCOE.

LCOE (Levelized Cost of Energy) 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 [13]:

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

где IC_t – капитальные вложения в t -ый год, млн руб.; C_{ft} – затраты на топливо с учетом доставки в t -ый год, млн руб.; C_{omt} – затраты на обслуживание и ремонт основного оборудования, млн руб.; W_t – производство электроэнергии за t -ый год, млн. кВт·ч, n – жизненный цикл системы; dr – ставка дисконтирования.

На шестом этапе (рис. 1) проводится многокритериальная оценка альтернатив методами TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) и PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations) I и II модификаций.

Перед использованием этих методов необходимо определить веса для каждого критерия. Веса отражают относительную важность каждого критерия в принятии решения. Веса можно определить с помощью экспертных оценок или с помощью математических методов, таких как АНР (Analytic Hierarchy Process) [14].

Математически метод TOPSIS реализуется по следующим этапам [15]:

Нормализация оценок по критериям:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (2)$$

где x_{ij} – оценка альтернативы i по критерию j ; m – количество альтернатив.

Определение взвешенной матрицы нормированных решений с учетом весов критериев, элементы которой определяются как:

$$u_{ij} = w_j \times n_{ij}, i = 1 \dots m; j = 1 \dots n \quad (3)$$

где w_j – вес j -го критерия; n_{ij} – нормализованное значение оценки альтернативы i по критерию j ; n – количество критериев.

Определение идеального позитивного (ИПР) и негативного (ИНР) решений:

$$A^+ = ((\max_i u_i / j \in L), (\min_i u_i / j \in C)) \quad (4)$$

$$A^- = ((\min_i u_i / j \in L), (\max_i u_i / j \in C)) \quad (5)$$

где L соответствует критериям выгоды, C – критериям затрат.

Выполняются расчеты:

1) расчет расстояний альтернатив до ИПР и ИНР:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - A_j^+)^2}, j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_{ij} - A_j^-)^2}, j = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

2) определение интегрального показателя (коэффициента близости) (8) для каждой сравниваемой альтернативы:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (8)$$

PROMETHEE I и PROMETHEE II – это две основные вариации метода PROMETHEE.

PROMETHEE I создает частичное упорядочение, что означает, что не всегда удается определить однозначно, какая альтернатива предпочтительнее, поскольку могут быть ситуации несравнимости.

PROMETHEE II является методом полного ранжирования альтернатив. Особенностью PROMETHEE II является устранение неопределенностей, которые возникали в PROMETHEE I, предоставляя полное ранжирование альтернатив.

Основные этапы PROMETHEE можно изложить так [16]:

- 1) определение критериев и их весов;
- 2) выбор функции предпочтения для каждого критерия;
- 3) расчет относительных индексов предпочтения для всех пар альтернатив по каждому критерию по одной из формул:

$$\pi(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f_j(a, b), \quad (9)$$

$$\pi(a, b) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n w_j f_j(a, b), \quad (10)$$

- 4) вычисление совокупного индекса предпочтения для каждой пары альтернатив с использованием весов критериев;
- 5) вычисление положительного (11) и отрицательного (12) потоков предпочтения для каждой альтернативы:

$$\varphi^+(a) = \sum_{b \in A} \pi(a, b), \quad (11)$$

$$\varphi^-(a) = \sum_{b \in A} \pi(b, a), \quad (12)$$

величина $\varphi^+(a)$ показывает, как альтернатива a соотносится с уступающими ей альтернативами, $\varphi^-(a)$ – как превосходящие a альтернативы соотносятся с ней;

- 6) расчет чистого потока предпочтения для PROMETHEE II и формирование полного ранжирования альтернатив.

$$\varphi(a) = \varphi^+(a) - \varphi^-(a). \quad (13)$$

На заключительном этапе проводится выбор наиболее эффективной альтернативы. Процедура сводится к выбору такой конфигурации ГЭК, которая имеет высокую оценку или ранг по результатам трех методов.

Результаты и обсуждение. Применение методики рассматривается на примере разработки ГЭК для электроснабжения поселения Усть-Соболевка, расположенного в Приморском крае. Село Усть-Соболевка стоит на левом берегу реки Соболевка примерно в 1 км до впадения её в бухту Соболевка Японского моря. В связи с удаленностью села от энергосистемы для обеспечения энергией населения Усть-Соболевки используются дизельные генераторы.

Следует отметить, что населенный пункт имеет высокий потенциал для развития экотуризма, поэтому при рассмотрении задачи создания ГЭК необходимо учитывать не только технические и экономические факторы, но и экологические и социальные аспекты (рисунок 1 – этап 1, этап 2).

На основе анализа перспективного электропотребления были рассчитаны электрические нагрузки потребителей села Усть-Соболевка. На рис. 2 показаны суточные графики нагрузок для каждого месяца, сформированные в HOMER PRO.

HOMER PRO позволяет сформировать данные показателей потенциала ВИЭ на основе специальных климатических баз данных. На рис. 3-6 показаны данные солнечной радиации, скорости ветра, температуры воздуха.

Технико-экономические характеристики (рис. 1, этап 3) рассматриваемого при оптимизации ГЭК оборудования представлены в таблице 1.

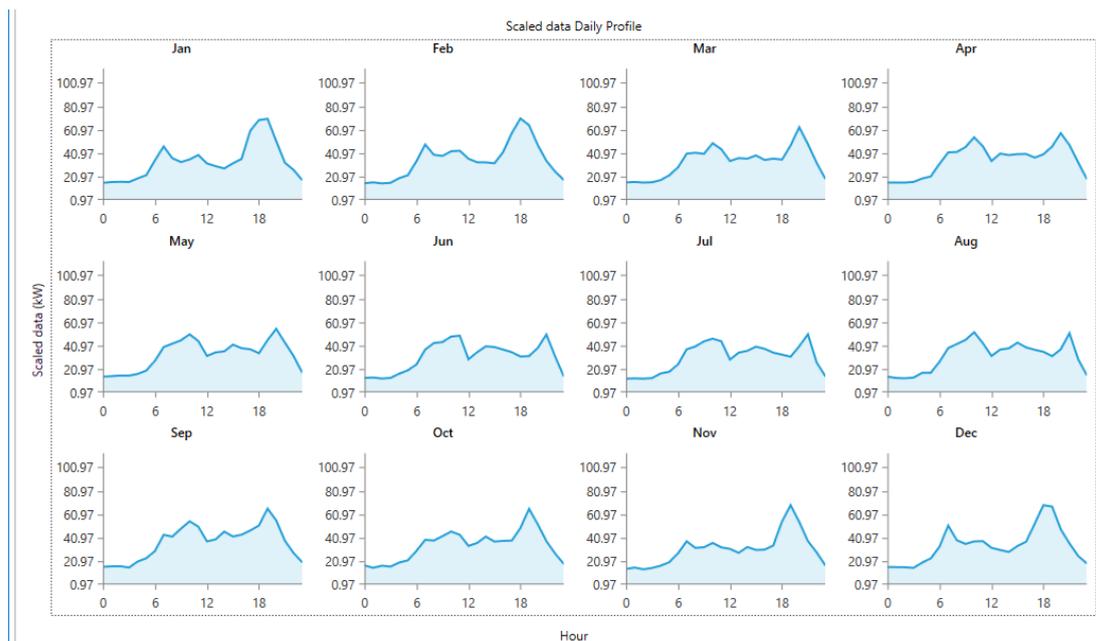


Рис. 2. Суточные графики электрических нагрузок в HOMER PRO

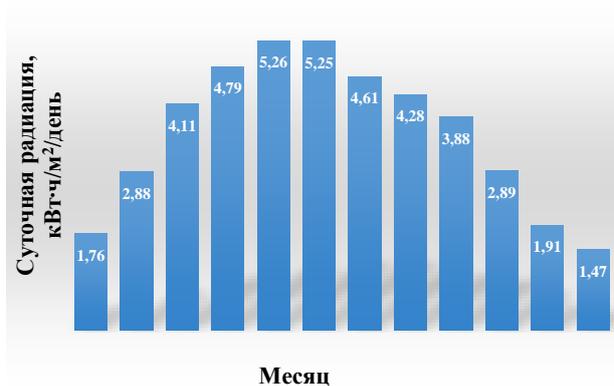


Рис.3. Среднемесячные значения суммарной солнечной радиации

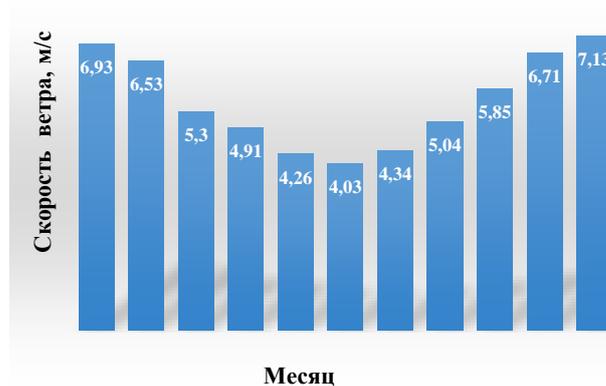


Рис.4. Среднемесячные значения скорости ветра

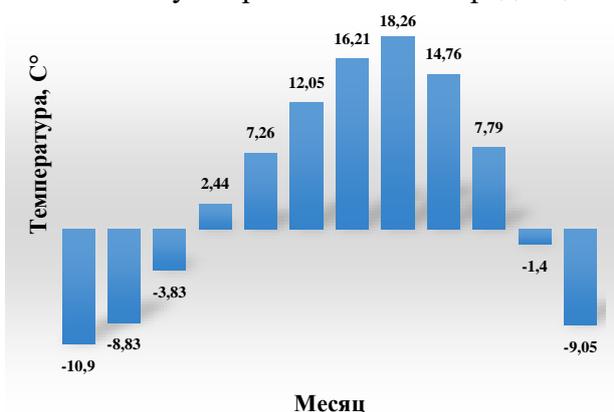


Рис.5. Среднемесячные значения температуры воздуха

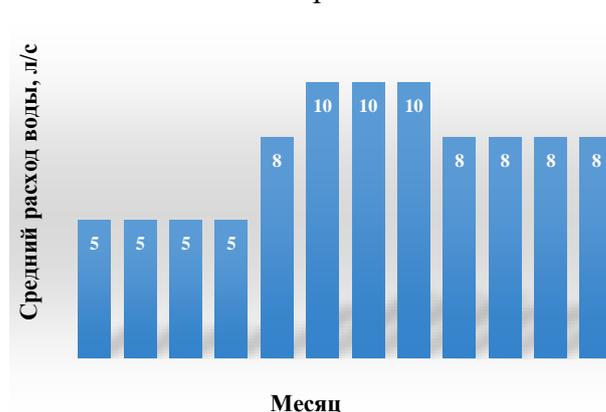


Рис.6. Среднемесячные значения скорости течения реки Соболевка

В ходе исследования с использованием программы HOMER PRO были выделены 20 альтернативных конфигураций ГЭЖ (рис. 1, этап 4). Каждая конфигурация представлена определенным набором оборудования и имеет оценки по критериям (таблица 2). Экономическую эффективность конфигурации отражают капитальные затраты и LCOE.

Выбросы CO₂ характеризуют воздействие ГЭК на климат и экологию. Количество запусков ДГУ отражает техническую эффективность конфигурации, так как большое количество запусков ведет к большому числу переходных режимов с возможным значительным отклонением параметров. Доля энергии ВИЭ характеризует социальную эффективность варианта ГЭК.

Таблица 1. Техничко-экономические характеристики оборудования

1. ДГУ – дизель-генераторная установка, модель «Generic Small Genset»		
1.1	Удельные капитальные затраты, долл./кВт	475
1.2	Затраты на замену, долл./кВт	450
1.3	Стоимость эксплуатации и обслуживания, долл./кВт·ч	0,031
1.4	Срок службы, ч.	15000
1.5	Цена на дизельное топливо, долл./л	0,875
2. ФЭП – солнечные панели, модель «Generic flat plate»		
2.1	Удельные капитальные затраты, долл./кВт	1400
2.2	Затраты на замену, долл./ кВт	1260
2.3	Стоимость эксплуатации и обслуживания, долл./кВт/год	14
3. ВЭУ – ветроэнергетическая установка, модель «Generic 10 kW»		
3.1	Удельные капитальные затраты, долл./кВт	3000
3.2	Затраты на замену, долл./кВт	2700
3.3	Стоимость эксплуатации и обслуживания, долл./кВт/год	60
4. АКБ – аккумуляторные батареи, модель «Generic 1 kWh Li-ion»		
4.1	Удельные капитальные затраты, долл./кВт·ч	250
4.2	Затраты на замену, долл./кВт·ч	225
4.3	Стоимость эксплуатации и обслуживания, долл./кВт·ч/год	5
5. ПБ – преобразователь, модель «Leonic MTP-413F 25kW»		
5.1	Удельные капитальные затраты, долл./кВт	250
5.2	Затраты на замену, долл./кВт	250
5.3	Стоимость эксплуатации и обслуживания, долл./ кВт/год	2
6. МГЭС – микрогидроэлектростанция, модель «10 kW Generic Hyd10».		
6.1	Удельные капитальные затраты, долл./кВт	2500
6.2	Затраты на замену, долл./кВт	2000
6.3	Стоимость эксплуатации и обслуживания, долл./ кВт/год	240

Для исследования качества решений, получаемых с помощью методики многокритериального выбора, были разработаны три сценария. Сценарии отличаются различным вниманием к экономическим, социальным, экологическим и техническим аспектам проблемы. Соответственно в каждом из сценариев назначены различные веса критериев. В первом сценарии максимальный вес назначен критериям «Капитальные вложения» и «ЛСОЕ», во втором сценарии наибольший вес дан экологическим и социальным критериям (эмиссия CO₂, доля ВИЭ), а в третьем сценарии все критерии имеют одинаковый вес. Веса критериев для сценариев представлены в таблице 3.

Далее с помощью методов TOPSIS и PROMETHEE конфигурации были оценены, проведено их ранжирование (рис. 1, этап 6). Результаты оценки альтернатив методом TOPSIS (значения коэффициента близости (8)), показаны на рис. 7. В таблице 4 показаны данные лучших альтернатив для трех сценариев. На рис. 8 представлены результаты применения метода PROMETHEE II. Результаты расчета методами PROMETHEE II представлены в таблице 5.

Таблица 2. Оценки альтернатив по критериям

Альтернатива	Капитальные вложения, тыс. долл.	LCOE, долл/кВт·ч	Выбросы CO ₂ тонны/год	Количество запусков ДГУ в год	Доля энергии от ВИЭ, %
1	503,95	0,218	24,58	350	91,7
2	503,45	0,233	41,91	95	82,4
3	554,01	0,248	32,43	322	88,9
4	576,11	0,266	41,15	255	85,5
5	256,51	0,277	127,43	882	46,2
6	890,81	0,311	0	0	100
7	291,16	0,324	154,31	715	34,8
8	114,97	0,343	212,42	618	9,74
9	1006,35	0,36	0	0	100
10	125,49	0,392	246,98	522	0
11	1079,54	0,395	0	0	100
12	1257,83	0,464	0	0	100
13	83,44	0,51	270,65	4	7,16
14	104,90	0,513	266,35	8	9,20
15	51,21	0,515	284,03	4	0,79
16	81,21	0,516	275,27	8	4,95
17	95,99	0,524	280,35	1	2,55
18	119,24	0,527	274,73	1	5,24
19	77,50	0,533	291,91	1	0
20	47,50	0,534	302,44	1	0

Таблица 3. Веса критериев при различных сценариях

Капитальные вложения	LCOE	Выбросы CO ₂	Количество запусков ДГУ	Доля энергии от ВИЭ
Сценарий 1, ориентированный на обеспечение экономической эффективности				
0,4	0,3	0,05	0,2	0,05
Сценарий 2, направленный на обеспечение социальной и экологической эффективности				
0,1	0,2	0,35	0,05	0,3
Сценарий 3 – равный вес всех критериев				
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

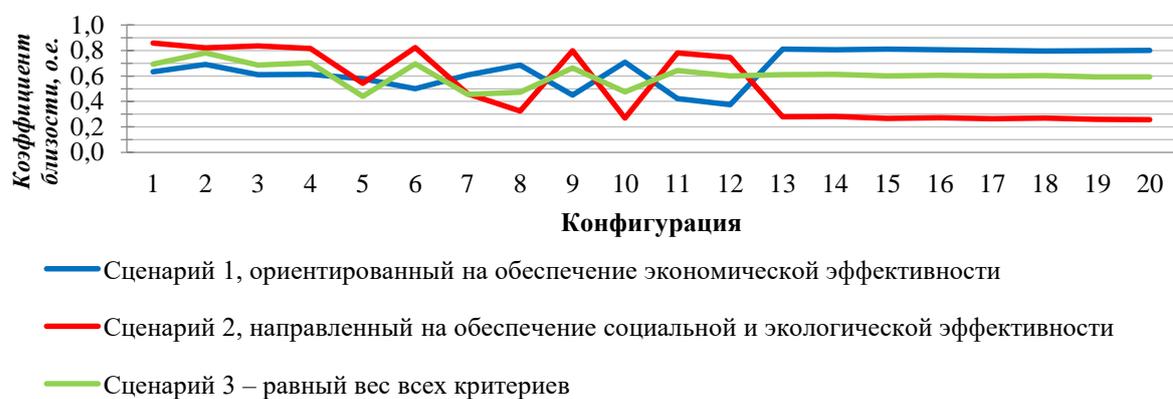


Рис. 7. Многокритериальные оценки конфигураций ГЭК, полученные методом TOPSIS

Таблица 4. Результаты выбора альтернатив методом TOPSIS

ФЭП	АКБ	ВЭУ	ПБ	ДГУ	МГЭС	Капитальные вложения, тыс. долл.	LCOE, долл./кВт·ч	Выбросы CO ₂ , тонн/год	Количество запусков ДГУ за год	Доля энергии от ВИЭ, %
Сценарий 1 – «экономическая эффективность» – Конфигурация 15										
0	0	0	4,84	100	3,92	51,21	0,515	284,03	4	0,795
Сценарий 2 «социальная и экологическая эффективность» – Конфигурация 1										
164	510	4	85,6	75	3,92	503,95	0,218	24,58	350	91,7
Сценарий 3 «баланс» – Конфигурация 2										
228	711	0	104	50	3,92	503,45	0,233	41,91	95	82,4



Рис. 8. Многокритериальные оценки рассматриваемых конфигураций ГЭК методом PROMETHEE II

Таблица 5. Результаты расчета методом PROMETHEE I и PROMETHEE II

ФЭП	АКБ	ВЭУ	ПБ	ДГУ	МГЭС	Капитальные вложения, тыс. долл.	LCOE, долл./кВт·ч	Выбросы CO ₂ , тонн/год	Количество запусков ДГУ за год	Доля энергии от ВИЭ, %
Сценарий 1 – «экономическая эффективность» – Конфигурация 2										
228	711	0	104	50	3,92	503,45	0,233	41,91	95	82,4
Сценарий 2 «социальная и экологическая эффективность» – Конфигурация 1										
164	510	4	85,6	75	3,92	503,95	0,218	24,58	350	91,7
Сценарий 3 «баланс» – Конфигурация 2										
228	711	0	104	50	3,92	503,45	0,233	41,91	95	82,4

Результаты проведенного многокритериального анализа методами TOPSIS, PROMETHEE I и II представлены в таблице 6.

Результаты проведенного исследования методами многокритериального анализа показали, что лидирующие конфигурации во всех сценариях имеют некоторые расхождения. Это является следствием разных подходов к оценке альтернатив в методах. Например, на многокритериальную оценку каждой альтернативы методом PROMETHEE большое влияние оказывает количество проигравших ей или превосходящих ее альтернатив. На это, в свою очередь, сильно влияют функции предпочтения критериев. Для TOPSIS этот фактор не имеет такого выраженного значения. С другой стороны, TOPSIS оценивает расстояние в пространстве критериев от каждой альтернативы до идеального худшего и лучшего решений. Применение разных методов дает возможность выделить альтернативы, имеющие высокие оценки независимо от подходов к многокритериальному сравнению.

Таблица 6. Результаты многокритериального выбора наиболее эффективных альтернатив

Рейтинг конфигураций		1	2	3
		Конфигурация	Конфигурация	Конфигурация
TOPSIS	Экономическая эффективность	15	13	16
	Социальная и экологическая эффективность	1	3	6
	Равенство весов коэффициентов	2	4	6
PROMETHEE I	Экономическая эффективность	2	1	3
	Социальная и экологическая эффективность	1	3	2
	Равенство весов коэффициентов	2	3	1
PROMETHEE II	Экономическая эффективность	2	5	4
	Социальная и экологическая эффективность	1	3	2
	Равенство весов коэффициентов	2	4	6

Заключение. Применение ВИЭ в дополнение к объектам традиционной генерации, как в зоне централизованного электроснабжения, так и на изолированных и труднодоступных территориях Крайнего Севера, Дальнего Востока и Арктической зоны является все более распространенным. Этот тренд свидетельствует о переходе к новому технико-экономическому укладу, который создаст возможности для социально-экономического роста и повышения качества жизни населения. Для возможности учета разнообразных технических, экономических и социальных факторов в статье предложена методика выбора компонентов ГЭК с применением методов многокритериальной оценки TOPSIS и PROMETHEE.

В предлагаемой методике в качестве основы для формирования альтернатив используется программа HOMER PRO, которая оптимизирует состав ГЭК только на основе экономического критерия. Используя различные ограничения, HOMER PRO позволяет формировать множества разнообразных конфигураций ГЭК, отличающиеся по различным аспектам. Сравнение таких конфигураций и выбор лучшей альтернативы предлагается осуществлять с использованием трех методов. Эти методы имеют различные подходы к оценке альтернатив, что дает возможность повысить обоснованность выбираемых конфигураций ГЭК.

Исследование качества решений, получаемых с помощью предложенного подхода, проводилось для села Усть-Соболевка Приморского края. С использованием HOMER PRO были сформированы 20 альтернатив, существенно отличающихся технико-экономическими показателями. Сравнение альтернатив, выполненное для трех сценариев, показало некоторые отличия в оценках методами TOPSIS и PROMETHEE I, II. Выделенные предлагаемым образом

конфигурации ГЭК представляют наибольший интерес для дальнейшего углубленного сравнения.

Методы многокритериального анализа являются эффективным инструментом для принятия решений при моделировании ГЭК, так как позволяют учитывать различные факторы с учетом их важности для лица, принимающего решение.

Список источников

1. World energy outlook 2023, МЭА, Париж. – URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Лицензия: CC BY 4.0 (отчет), CC BY NC SA 4.0 (Приложение А)
2. Ежеквартальный информационный обзор рынка ВИЭ в России IV квартал 2023 года (октябрь - декабрь 2023г.), – URL: <https://treda.ru/products/quarterly-reviews/review-1552>.
3. Pranav M.S., Karunanithi K., Akhil M. et al. Hybrid renewable energy sources (HRES). International conference on intelligent computing, instrumentation and control technologies (ICICICT), Kerala State, Kannur, India, IEEE, 2017, pp. 162–165, DOI:10.1109/ICICICT1.2017.8342553.
4. Bouaouda A, Sayouti Y. Hybrid meta-heuristic algorithms for optimal sizing of hybrid renewable energy system: a review of the state-of-the-art. Archives of computational methods in engineering, 2022, vol. 29(6), pp. 4049-4083, DOI: 10.1007/s11831-022-09730-x.
5. Diab Ah., Hamdy S., Mohamed S.Ih., Kuznetsov O.N. et al. Application of different optimization algorithms for optimal sizing of pv/wind/diesel/battery storage stand-alone hybrid microgrid. IEEE access, 2019, 99 p., DOI:10.1109/ACCESS.2019.2936656.
6. Agapitidou A.A., Skroufouta S., Baltas E. Methodology for the development of hybrid renewable energy systems (HRES) with pumped storage and hydrogen production on Lemnos Island. Earth 3, 2022, pp. 537-556, DOI:10.3390/earth3020032.
7. Vijayaragavan M., Darly S. Power flow management of grid connected HRES system using a CFANN technique. International journal of electronics, 2021, DOI:10.1080/00207217.2020.1831080.
8. Sharma K.K., Gupta A., Kumar R. et al. Economic evaluation of a hybrid renewable energy system (HRES) using hybrid optimization model for electric renewable (HOMER) software—a case study of rural India. International journal of low-carbon technologies, 2021, vol. 16, iss. 3, pp. 814-821, DOI:10.1093/ijlct/ctab012.
9. Bakhtiari H., Naghizadeh R.A. Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen storage with ϵ -constraint method. IET Renewable power generation, 2018, 12(8), pp 883–892, DOI:10.1049/iet-rpg.2017.0706
10. Li Z., Wang Y., Xie J. et al. Hybrid multi-criteria decision-making evaluation of multiple renewable energy systems considering the hysteresis band principle. International journal of hydrogen energy, 2024, vol. 49(Part D), pp. 450-462, DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.09.059.
11. Polikarpova Ilze & Lauka, Dace & Blumberga, Dagnija & Vigants, Edgars. Multi-criteria analysis to select renewable energy solution for district heating system. Environmental and climate technologies, 2019, pp.101-109, DOI:10.2478/rtuect-2019-0082.
12. Mazzeo D., Matera N., Pierangelo De L., Baglivo C. et al. Giuseppe Worldwide geographical mapping and optimization of stand-alone and grid-connected hybrid renewable system techno-economic performance across Karpen-Geiger climates. Applied energy, 2020, 276, 115507, DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115507.
13. Шакиров В.А. Оценка экономической целесообразности подключения удаленных потребителей восточной Арктики к энергосистеме / В.А. Шакиров, И.Ю. Иванова, Р.А. Иванов // Арктика: экология и экономика, 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 19-33. – DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-19-33.
14. Assari A., Mahesh T.M., Assari E. Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method. Indian journal of science and technology, 2012, vol. 5, iss. 3, pp. 2289-2294.
15. Погодаева И.Н. Многокритериальный выбор состава оборудования гибридного энергокомплекса для удаленных районов / И.Н. Погодаева // ЭНЕРГОСТАРТ. Материалы VI Международной молодежной научно-практической конференции, 17-22 ноября 2023 г., Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2023.
16. Маленкова И.Н. Многокритериальный анализ вариантов строительства электростанций методом PROMETHEE / И.Н. Маленкова, В.А. Шакиров // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки, 2016. – № 1. – С. 41-50.

Погодаева Инесса Николаевна. Аспирант, Братский государственный университет, ORCID: 0000-0003-3176-2422, m.inessa13@yandex.ru, 665709, г. Братск, ул. Макаренко 40, БрГУ.

Шакиров Владислав Альбертович. Старший научный сотрудник отдела комплексных и региональных проблем энергетики ИСЭМ СО РАН, ORCID: 0000-0001-8629-9549, shakirovva@iex.istu.edu.

UDC 621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.34.2.010

Selection of components of a hybrid energy complex for remote areas using multi-criteria assessment methods

Inessa N. Pogodaeva¹, Vladislav A. Shakirov²

¹Bratsk State University, Russia, Bratsk, *m.inessa13@yandex.ru*

²Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. The problem of energy supply to areas remote from the power grid remains relevant and is solved mainly in the modernization of diesel power plants and the construction of hybrid energy complexes with renewable energy sources. The life cycle of hybrid energy complexes is several decades, so the design must take into account all the main goals - economic and technical efficiency, minimizing environmental impacts, reliability. The multi-criteria nature of the problem requires the involvement of a decision maker to express preferences regarding the importance of performance indicators of various options for the energy complex. The stochastic nature of renewable generation and the variety of operating restrictions lead to the need to use special software for simulating operating conditions with hourly resolution. The article discusses an approach to multi-criteria selection of a hybrid energy complex from a variety of alternatives generated in the HOMER PRO program, using three methods: TOPSIS and PROMETHEE I, II. The methods have differences in the procedures for evaluating alternatives and thereby increase the validity of the choice. A numerical example is considered for the Ust-Soboleka. Hybrid energy complexes are formed using diesel generation technologies, wind power plants, photovoltaic converters, micro-hydroelectric power plants and energy storage devices. The study examines three scenarios for the development of the region, which entails differences in assessments of the importance of the criteria.

Keywords: hybrid energy complex, multi-criteria analysis, power plant, modeling, renewable energy sources, TOPSIS, PROMETHEE

References

1. World Energy Outlook 2023, IEA. Paris, available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, License: CC BY 4.0 (report), CC BY NC SA 4.0 (Appendix A)
2. Yezhekvar'tal'nyy informatsionnyy obzor rynka VIE v Rossii IV kvartal 2023 goda (oktyabr' - dekabr' 2023g.) [Quarterly information review of the renewable energy market in Russia, IV quarter of 2023 (October - December 2023)]. Available at: <https://rreda.ru/products/quarterly-reviews/review-1552>
3. Pranav M.S., Karunanithi K., Akhil M. et al. Hybrid renewable energy sources (HRES). International conference on intelligent computing, instrumentation and control technologies (ICICICT), Kerala State, Kannur, India, IEEE, 2017, pp. 162–165, DOI:10.1109/ICICICT1.2017.8342553.
4. Bouaouda A, Sayouti Y. Hybrid meta-heuristic algorithms for optimal sizing of hybrid renewable energy system: a review of the state-of-the-art. Archives of computational methods in engineering, 2022, vol. 29(6), pp. 4049-4083, DOI: 10.1007/s11831-022-09730-x.
5. Diab Ah., Hamdy S., Mohamed S.Ih., Kuznetsov O.N. et al. Application of different optimization algorithms for optimal sizing of pv/wind/diesel/battery storage stand-alone hybrid microgrid. IEEE access, 2019, 99 p., DOI:10.1109/ACCESS.2019.2936656.
6. Agapitidou A.A., Skroufouta S., Baltas E. Methodology for the development of hybrid renewable energy systems (HRES) with pumped storage and hydrogen production on Lemnos Island. Earth 3, 2022, pp. 537-556, DOI:10.3390/earth3020032.
7. Vijayaragavan M., Darly S. Power flow management of grid connected HRES system using a CFANN technique. International journal of electronics, 2021, DOI:10.1080/00207217.2020.1831080.
8. Sharma K.K., Gupta A., Kumar R. et al. Economic evaluation of a hybrid renewable energy system (HRES) using hybrid optimization model for electric renewable (HOMER) software—a case study of rural India. International journal of low-carbon technologies, 2021, vol. 16, iss. 3, pp. 814-821, DOI:10.1093/ijlct/ctab012.
9. Bakhtiari H., Naghizadeh R.A. Multi-criteria optimal sizing of hybrid renewable energy systems including wind, photovoltaic, battery, and hydrogen storage with ϵ -constraint method. IET Renewable power generation, 2018, 12(8), pp 883–892, DOI:10.1049/iet-rpg.2017.0706
10. Li Z., Wang Y., Xie J. et al. Hybrid multi-criteria decision-making evaluation of multiple renewable energy systems considering the hysteresis band principle. International journal of hydrogen energy, 2024, vol. 49(Part D), pp. 450-462, DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.09.059.

11. Polikarpova Ilze & Lauka, Dace & Blumberga, Dagnija & Vigants, Edgars. Multi-criteria analysis to select renewable energy solution for district heating system. *Environmental and climate technologies*, 2019, pp.101-109, DOI:10.2478/rtuct-2019-0082.
12. Mazzeo D., Matera N., Pierangelo De L., Baglivo C. et al. Giuseppe Worldwide geographical mapping and optimization of stand-alone and grid-connected hybrid renewable system techno-economic performance across Kappen-Geiger climates. *Applied energy*, 2020, 276, 115507, DOI:10.1016/j.apenergy.2020.115507.
13. Shakirov V. A., Ivanova I. Yu., Ivanov R. A. Otsenka ekonomicheskoy tselesoobraznosti podklyucheniya udalennykh potrebiteley vostochnoy Arktiki k energosisteme [Assessment of the economic feasibility of connecting remote consumers of the Eastern Arctic to the energy system]. *Arktika, ekologiya i ekonomika [Arctic, ecology and economics]*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 19-33, DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-19-33.
14. Assari A., Mahesh T.M., Assari E. Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method. *Indian journal of science and technology*, 2012, vol. 5, iss. 3, pp. 2289-2294.
15. Pogodaeva I.N. Mnogokriterial'nyy vybor sostava oborudovaniya gibridnogo energokompleksa dlya udalennykh rayonov [Multi-criteria selection of the equipment composition of a hybrid energy complex for remote areas]. *ENERGOSTART. Materialy VI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 17-22 noyabrya 2023 g., Kuzbas. gos. tekhn. un-t im. T. F. Gorbacheva, Kemerovo, 2023, [ENERGOSTART. Materials of the VI international youth scientific and practical conference, November 17-22, 2023, Kuzbass. state tech. University named after T. F. Gorbachev, Kemerovo, 2023.]*
16. Malenkova I.N., Shakirov V.A. Mnogokriterial'nyy analiz variantov stroitel'stva elektrostantsiy metodom PROMETHEE [Multicriteria analysis of options for constructing power plants using the PROMETHEE method]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Yestestvennyye i inzhenernyye nauki [Proceedings of Bratsk State University. Series Natural and engineering sciences]*, 2016, no. 1, pp. 41-50.

Pogodaeva Inessa Nikolaevna. Postgraduate student, Bratsk state university, ORCID: 0000-0003-3176-2422, m.inessa13@yandex.ru, 665709, Irkutsk region, Bratsk, st. Makarenko 40, BrGU.

Shakirov Vladislav Albertovich. Senior Researcher of the Department of Complex and Regional Energy Problems of the Institute of electrical and electrical energy SB RAS, ORCID: 0000-0001-8629-9549, shakirovva@iex.istu.edu.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 12.04.2024; принята к публикации 06.06.2024.

The article was submitted 03/20/2024; approved after reviewing 04/12/2024; accepted for publication 06/06/2024.