

## Оптимизация и многокритериальный выбор конфигурации гибридной автономной энергетической системы на основе программы nPro и метода TOPSIS

Шакиров Владислав Альбертович, Пионкевич Владимир Андреевич

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, Иркутск, *shakirovva@ex.istu.edu*

**Аннотация.** Электро- и теплоснабжение потребителей удаленных и труднодоступных территорий целесообразно во многих случаях осуществлять с использованием возобновляемых источников энергии. Проектирование оптимальной автономной энергетической системы сопряжено с рядом сложностей: стохастический характер потенциала возобновляемых источников энергии, многообразие технико-экономических параметров и технологических ограничений оборудования. Длительный жизненный цикл энергетической системы и многочисленность целей, преследуемых при ее создании или развитии, приводят к необходимости многокритериального рассмотрения задачи. В статье проведен обзор методов и программного обеспечения для выбора конфигураций энергетических систем, показана актуальность развития многокритериальных подходов. Предложен двухэтапный подход к многокритериальному выбору конфигурации автономной энергетической системы. На первом этапе используется программа nPro, обеспечивающая оптимизацию конфигураций различных энергетических систем, включающих ветровые энергетические установки, фотоэлектрические преобразователи, тепловые насосы, солнечные коллекторы, накопители электрической и тепловой энергии. На втором этапе проводится многокритериальная оценка сформированных энергетических систем методом TOPSIS. Для повышения обоснованности получаемых решений весовые коэффициенты критериев определяются на основе объективного оценивания методом энтропии, а также субъективным методом. Пример применения подхода рассматривается для удаленного населенного пункта Усть-Соболевка, расположенного в Приморском крае. В результате определены десять конфигураций для автономного электро- и теплоснабжения и проведена их многокритериальная оценка с учетом четырех критериев: капитальные затраты, нормированная стоимость производства электрической и тепловой энергии, выбросы диоксида углерода. Наиболее предпочтительная конфигурация характеризуется сравнительно низкими капитальными затратами и выбросами диоксида углерода, а также лучшими среди рассматриваемых вариантов оценками нормированной стоимости производства электрической и тепловой энергии.

**Ключевые слова:** автономная энергетическая система, возобновляемые источники энергии, оптимизация, моделирование

**Цитирование:** Шакиров В.А. Оптимизация и многокритериальный выбор конфигурации гибридной автономной энергетической системы на основе программы nPro и метода TOPSIS / В.А. Шакиров, В.А. Пионкевич // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2024. – № 4(36). – С. 98-111. – DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.010.

**Введение.** Гибридные энергетические системы с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) уже несколько десятилетий внедряются во всем мире для повышения эффективности и надежности энергоснабжения. Основной областью применения таких систем являются удаленные и труднодоступные районы, районы с уязвимой экологической обстановкой или районы с перспективой развития туризма. Повышение внимания к проблемам экологии и климата усиливают интерес к гибридным энергетическим системам.

В России более 60% территории находится в зоне децентрализованного электроснабжения. Многочисленные дизельные электростанции осуществляют электроснабжение потребителей, расположенных на этих территориях. Общее количество локальных объектов генерации, осуществляющих электроснабжение в децентрализованной зоне Дальневосточного федерального округа (ДФО) и Арктической зоне Российской Федерации, составляет 471 единицу, в том числе 459 дизельных, 12 газотурбинных и газопоршневых электростанций [1]. Высокая

стоимость доставки топлива, высокий износ оборудования дизельных электростанций определяют низкую эффективность электроснабжения. Экономически обоснованный тариф на производство электроэнергии на дизельном топливе на изолированных и труднодоступных территориях в среднем превышает 50 руб./кВт·ч [1, 2]. По данным Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации, объем перекрестного субсидирования для технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем в ДФО составляет в среднем 20 млрд. руб. в год [1].

Для повышения экономической эффективности электроснабжения проводится модернизация дизельных электростанций путем включения в их состав различных установок на основе ВИЭ. В России это направление особенно активно развивается в Республике Саха (Якутия), где уже введено более 20 автономных гибридных энергокомплексов, сочетающих дизельную и солнечную генерацию [3].

Выбор конфигурации или мощности компонентов гибридной энергетической системы представляет собой многокритериальную оптимизационную задачу, усложненную необходимостью учитывать ряд факторов [4]. Основным усложняющим фактором является стохастический характер потенциала возобновляемых энергоресурсов, что требует рассмотрения задачи с высокой временной детализацией, как правило, часовой, за длительный период времени. Это обеспечивает возможность учета различных сочетаний периодов с высоким и низким потенциалом ВИЭ для определения целесообразной емкости накопителей, резервных источников энергии. Другим усложняющим фактором является широкий спектр технологических ограничений основного оборудования, многообразные технико-экономические характеристики. Так, необходимо учитывать деградацию накопителей энергии, минимальный допустимый уровень разряда аккумуляторных батарей и работы генераторов, режимы работы источников тепловой энергии и другие. Дополнительно усложняет задачу необходимость учитывать при оптимизации не только экономические критерии, но и критерии воздействий на окружающую среду, критерии надежности электроснабжения, качества электроэнергии, социальные аспекты и другие. Набор критериев определяется районом размещения автономной энергосистемы, сложившимися и перспективными инфраструктурными, социально-экономическими и природными условиями.

К настоящему времени разработаны многочисленные методы, модели и программное обеспечение для оптимизации конфигурации автономных энергосистем, однако не в полной мере решены вопросы многокритериального выбора конфигурации. В статье рассматривается подход, основанный на использовании программы nPro и многокритериального метода TOPSIS.

**Обзор подходов к выбору конфигураций энергетических систем.** Проблеме выбора конфигурации гибридных энергосистем посвящены многочисленные работы. Основные исследования можно условно разделить на две группы. В первую группу входят исследования по оптимизации только систем, обеспечивающих потребителей электроэнергией на основе ВИЭ-генерации, генераторов на органическом топливе. Во вторую группу входят работы по оптимизации энергетических систем, обеспечивающих в общем случае электро-, тепло-, холодо- и газоснабжение потребителей с использованием нескольких видов энергоносителей.

В рамках первой группы исследований разработаны многочисленные подходы для оптимизации конфигураций гибридных энергокомплексов, работающих как изолированно от централизованной энергосистемы, так и совместно с ней. Для выбора конфигураций гибридных энергокомплексов используется специальное программное обеспечение, такое, как HOMER PRO [5], iHOGA[6], TRNSYS [7]. Многие исследования посвящены разработке альтернативных программных продуктов и моделей, использующих классические методы оптимизации и

эвристические подходы. Наиболее используемые классические методы: линейное программирование и смешанное целочисленное линейное программирование [8]. Наиболее широко применяемые эвристические методы и алгоритмы: роя частиц, светлячков, колонии муравьев и пчел, генетический алгоритм [8, 9]. В силу меньшей сложности задач первой группы к настоящему времени разработаны различные подходы по оптимизации с учетом многочисленных факторов: многокритериальности, неопределенности, климатических особенностей и других.

В рамках исследований второй группы разрабатываются более сложные мультиэнергетические системы, обеспечивающие в общем случае электро-, тепло-, холодо- и газоснабжение потребителей с использованием нескольких видов энергоносителей. Для создания таких систем и управления ими также разработаны многочисленные модели и методы, однако больший акцент в исследованиях сделан на технологические аспекты и технико-экономическую оценку эффективности [10]. Оптимизация конфигураций мультиэнергетических систем также выполняется с использованием специального программного обеспечения, обеспечивающего возможность рассмотрения нескольких видов энергии, такого, как TRNSYS [11], HOMER PRO [12], EnergyPlus [13], SpineOpt [14], nPro [15]. При этом значительно больший объем исследований включает разработку авторского программного обеспечения на основе классических методов оптимизации [16] или эвристических подходов [17]. Это связано с существенным ограничением существующего программного обеспечения (TRNSYS, HOMER PRO, EnergyPlus) в функциональном аспекте и в вариантах комбинаций различных технологий. Однако создаваемые модели и альтернативное программное обеспечение, хоть и устраняют отмеченные недостатки коммерческих платформ, но, в свою очередь, направлены на исследование узкого набора отдельных технологий. Необходимо отметить, что программа nPro обладает рядом преимуществ. Прежде всего программа имеет web-интерфейс, что позволяет избежать процедуры установки программного обеспечения. Такие процедуры могут быть сравнительно сложны. Например, SpineOpt имеет длительную многоэтапную и многокомпонентную установку с использованием командной строки. Другим преимуществом является широкий набор технологий для моделирования: ВИЭ-генерация на основе энергии солнца, ветра, биомассы; водородные технологии; тепловые насосы; накопители тепловой и электрической энергии. Программа позволяет рассматривать потребителей электрической, тепловой и холодной энергии.

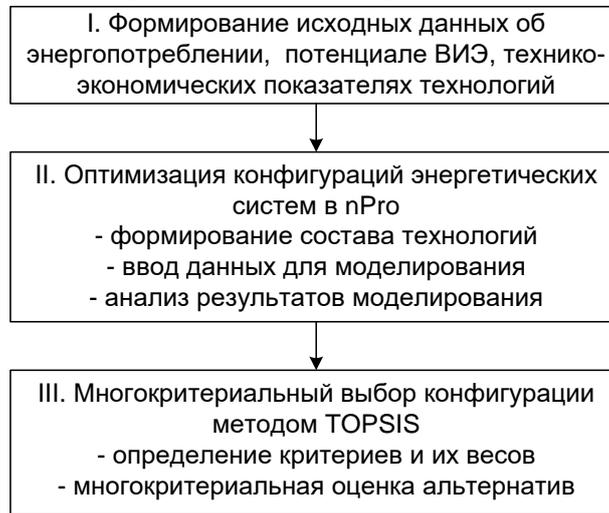
Для учета многокритериальности при разработке конфигурации гибридных энергетических систем можно выделить три подхода. В рамках первого подхода проводится многокритериальная оптимизация конфигурации энергетической системы на основе эвристических методов, таких, как многокритериальный рой частиц [18, 19], многокритериальный генетический алгоритм [20]. Второй подход заключается в формировании множества недоминируемых альтернатив на основе одного из эвристических методов, например NSGA-II. Далее применяется многокритериальный метод для выбора наиболее эффективной альтернативы из множества Парето. Третий подход заключается в создании избыточного количества конфигураций путем задания различных ограничений или изменением исходных условий и последующем многокритериальном выборе лучшего варианта. Для создания множества конфигураций часто применяется HOMER PRO, а для многокритериального сравнения методы аналитической иерархии, TOPSIS [21]. В рамках этих подходов в исследованиях рассматриваются преимущественно экономические (нормированная стоимость электроэнергии, капитальные затраты, чистые приведенные затраты) и экологические (выбросы диоксида углерода) критерии.

Для многокритериального выбора конфигураций мультиэнергетических систем используются методы аналитической иерархии, ELECTRE, PROMETHEE и другие [22]. Можно отметить малое количество исследований по многокритериальному выбору конфигураций мультиэнергетических систем в условиях неопределенности исходной информации и сценариев

развития территории. Методы и подходы, разработанные для более простых гибридных энергетических систем, еще не нашли широкого применения для мультиэнергетических систем.

Таким образом, выполненный обзор показывает, что перспективным направлением исследований являются развитие многокритериальных методов и моделей для оптимизации конфигураций мультиэнергетических систем.

**Модели и методы.** На рис. 1 представлены этапы предлагаемого подхода для оптимизации и многокритериального выбора автономной энергетической системы.



**Рис. 1.** Подход к оптимизации и многокритериальному выбору конфигураций гибридных автономных энергетических систем

На первом этапе проводится формирование исходных данных для моделирования. Формирование часовых графиков электрических нагрузок может осуществляться на основе руководящих указаний по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, городских электрических сетей [23, 24]. Расчет тепловых нагрузок выполняется на основе удельных отопительных и вентиляционных характеристик зданий, норм расхода горячей воды или по укрупненным показателям расхода теплоты на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение. Для моделирования установок на основе энергии солнца и ветра необходимы данные часового разрешения о поступлении на горизонтальную поверхность суммарной и длинноволновой солнечной радиации, данные о поступлении солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность, о температуре и скорости ветра. Такую информацию можно сформировать, используя, например, базу данных реанализа ERA-5 [25]. Также на этом этапе необходимо сформировать данные о технико-экономических показателях технологий: удельные капитальные и эксплуатационные затраты, коэффициент полезного действия, срок службы и другие.

На втором этапе проводится оптимизация конфигураций различных энергетических систем в программе nPro. Формирование множества вариантов для многокритериального сравнения осуществляется заданием ограничений на капитальные затраты или выбросы диоксида углерода.

На третьем этапе проводится многокритериальный выбор конфигурации с использованием метода TOPSIS. Основные этапы метода включают [26]:

- Формирование набора критериев, который зависит как от целей, преследуемых при многокритериальном выборе, так и от полученных оценок альтернатив. Так, например, если все конфигурации энергетических систем обеспечивают отсутствие выбросов диоксида углерода, то такой критерий может быть исключен из рассмотрения.
- Формирование матрицы решений  $(x_{ij})_{m \times n}$  с оценками  $x_{ij}$  альтернатив  $m$  по критериям  $n$ .
- Нормализация оценок с использованием формулы:

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

- Оценка весовых коэффициентов критериев  $w_j$ . В настоящее время для оценки весов используются два основных подхода – субъективный и объективный [27]. Оба подхода имеют преимущества и недостатки и могут комбинироваться. Субъективный подход основан на выявлении предпочтений лица, принимающего решения (ЛПР), в диалоговых процедурах. Объективный подход основан на анализе оценок альтернатив по критериям: чем больше интервал изменения оценок по критерию, тем больший вес имеет критерий. Одним из методов, реализующих такой подход, является метод энтропии [28, 29]. Энтропия оценивается по формуле:

$$E_j = \frac{-(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln(f_{ij}))}{\ln(m)}, \quad (2)$$

где

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}}. \quad (3)$$

Вес  $j$ -го критерия:

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{k=1}^n (1-E_k)}, \quad (4)$$

- Формирование взвешенной матрицы  $(t_{ij})_{m \times n}$  с нормализованными оценками:

$$t_{ij} = r_{ij} w_j \quad (5)$$

- Определение идеальной лучшей  $A_b$  и худшей альтернативы  $A_w$  проводится путем присвоения двум искусственным альтернативам лучших и худших оценок по критериям от всех реальных конфигураций энергетических систем.
- Определение расстояний от каждой  $i$  альтернативы до идеальной лучшей  $A_b$  и худшей  $A_w$  альтернатив:

$$d_{iw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{wj})^2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$d_{ib} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - t_{bj})^2}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

- Многокритериальная оценка альтернатив определяется по формуле:

$$s_i = \frac{d_{iw}}{d_{iw} + d_{ib}} \quad (8)$$

Альтернативы с большим значением  $s_i$  являются более предпочтительными с позиций рассматриваемых критериев.

**Применение подхода.** Предлагаемый подход к многокритериальному выбору конфигурации гибридной автономной энергетической системы применен на примере населенного пункта Усть-Соболевка, расположенного в Приморском крае.

Село Усть-Соболевка расположено на левом берегу реки Соболевка примерно в 1 км до впадения её в бухту Соболевка Японского моря. Расстояние от Усть-Соболевки до районного центра поселка городского типа Терней составляет около 170 км. Численность населения составляет 190 человек. В настоящее время электроснабжение поселка осуществляется от дизельной электростанции (ДЭС) мощностью 516 кВт. Максимум электрической нагрузки наблюдается зимой и составляет 100 кВт [30]. В схемах и программе развития электроэнергетики Приморского края 2019-2020 гг. рассматривались два варианта электроснабжения удаленных населенных пунктов, включая Усть-Соболевку – строительство линий электропередачи и подстанций для подключения к энергосистеме и развитие гибридных энергокомплексов.

На рис. 2 представлены принятые для моделирования графики электрических нагрузок для четырех сезонов. На рис. 3 показан часовой график тепловых нагрузок. На рис. 4 представлены данные о скорости ветра и солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность.

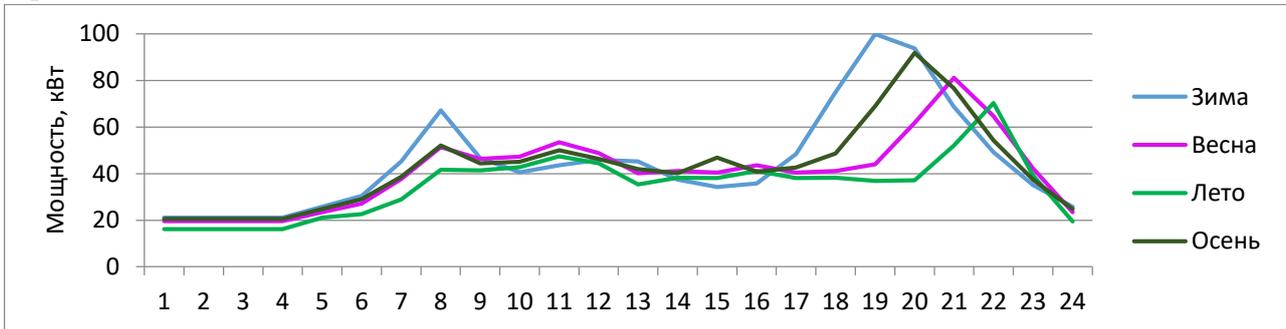


Рис. 2. Суточные графики электрических нагрузок с. Усть-Соболевка для 4-х сезонов

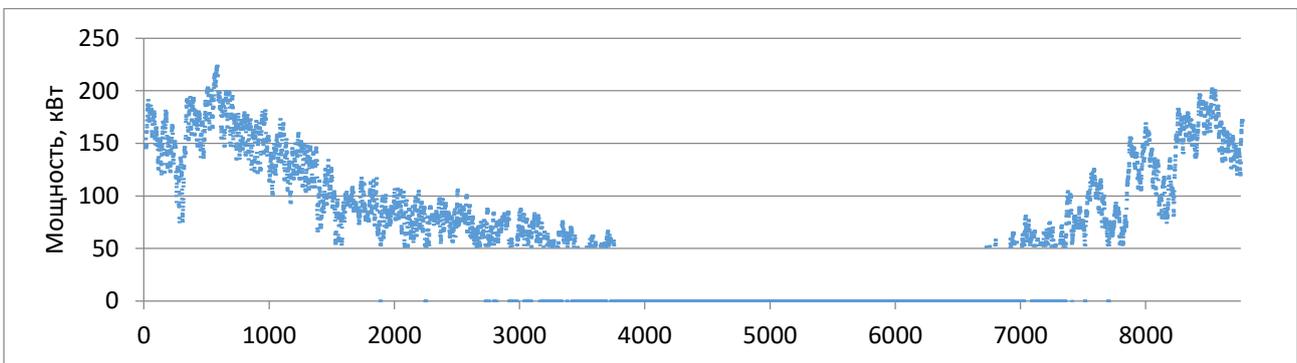


Рис. 3. Годовой график тепловых нагрузок с. Усть-Соболевка часовой детализации

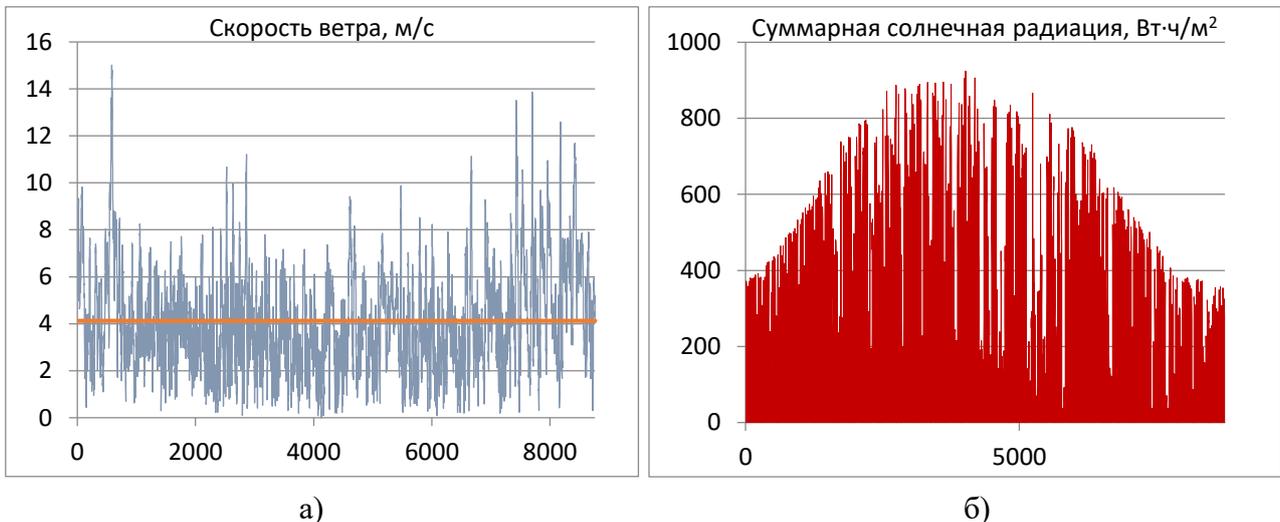


Рис. 4. Данные о потенциале ВИЭ а) скорость ветра на высоте 10 м б) суммарная солнечная радиация, поступающая на горизонтальную поверхность

На рис. 5 показана обобщенная структура энергетической системы с выбранными для моделирования технологиями.

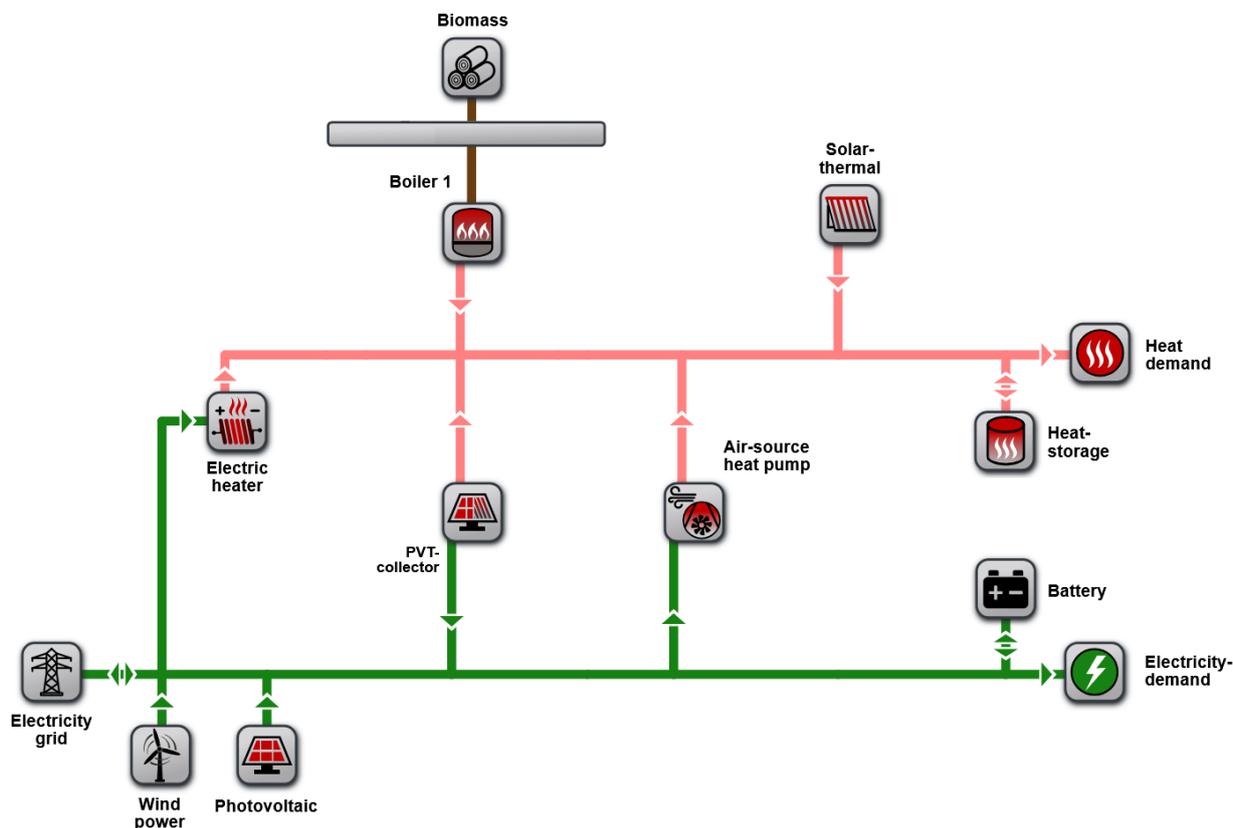


Рис. 5. Обобщенная структура энергетической системы

В сформированной структуре можно выделить технологии, используемые для выработки электрической энергии: ветроэнергетические установки (ВЭУ), фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), дизель-генераторные установки (ДГУ). Для моделирования ДГУ используется блок Electricity grid, так как такой элемент в nPro отсутствует, но возможность замены предусмотрена и описана в документации. Для выработки тепловой энергии используется электрический котел (КЭ), котел на биомассе (КБ), солнечный коллектор (СК). Гибридный солнечный коллектор (ГСК) позволяет вырабатывать и тепловую, и электрическую энергию. Воздушный тепловой насос (ВТН) вырабатывает тепловую энергию, используя электрическую энергию и низкопотенциальное тепло воздуха. В структурную схему также включены накопитель тепловой энергии (ТН) и аккумуляторные батареи (АКБ).

Элементы Heat-demand и Electricity demand содержат данные о часовой потребности в тепловой и электрической энергии.

Стоимостные показатели установок были приняты равными значениям по умолчанию, за исключением удельной стоимости ВЭУ, установленной 1500 евро/кВт. Также были приняты ограничения на объем сжигаемой биомассы – максимальная годовая выработка тепловой энергии котла 100 МВт·ч. Угол наклона солнечных панелей и коллекторов принят 42°. Коэффициент преобразования теплового насоса был рассчитан в зависимости от температуры наружного воздуха и требуемой температуры в подающем трубопроводе. Стоимость дизельного топлива принята 1 евро/кг. Удельные выбросы диоксида углерода при сжигании дизельного топлива приняты 454 г/кВт·ч.

**Результаты исследования.** В результате оптимизации в программе nPro было получено 10 конфигураций гибридных энергетических систем (таблица 1).

**Таблица 1.** Результаты оптимизации конфигураций энергетических систем в nPro, кВт

Конфигурация	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ДГУ	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-
ВТН	512	204	220	200	176	84	-	196	348	252
КЭ	-	136	129	137	147	187	463	-	-	-
ТН*	-	-	161	945	699	1417	1999	525	968	1728
ФЭП	-	-	-	214	183	-	584	131	362	
ВЭУ	-	-	-	-	133	135	129	87	288	242
ГСК	-	-	-	-	-	201	-	-	-	340
СК	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
КБ	-	-	-	-	-	-	-	139	107	114
АКБ*	-	-	-	-	-	-	-	-	645	654

\* единицы измерения кВт·ч

В качестве критериев для сравнения были выбраны капитальные затраты, нормированная стоимость производства электрической (LCOE) и тепловой энергии (LCON), выбросы CO<sub>2</sub>. Хотя капитальные затраты являются частью LCOE и LCON, их выделение в качестве отдельного критерия позволяет минимизировать этот важный показатель при оптимизации. Практика использования нескольких экономических показателей в многокритериальном анализе уже применялась в ряде исследований. Так, в исследовании [31] в дополнение к LCOE был выделен критерий капитальных затрат при оптимизации гибридной энергетической системы в удаленном районе. При таком подходе, изменяя веса критериев, можно получить решения с низкими LCOE и капитальными затратами одновременно. Если, например, используется только один критерий LCOE, то оптимизация может привести к решениям с высокими капитальными затратами, но низкими эксплуатационными и топливными расходами. В исследовании [32] капитальные затраты также выделены, как отдельный экономический критерий для оптимизации гибридных энергетических систем в удаленных и малоразвитых районах Ирана. Следует отметить, что важность показателя капитальных затрат особенно значима при принятии инвестиционных решений в удаленных районах с высокими рисками возврата инвестиций [33].

В таблице 2 представлены результаты оценки альтернатив по критериям.

**Таблица 2.** Оценки альтернатив по критериям

Конфигурация	Капитальные затраты, тыс. евро	LCOE, евро/кВт·ч	LCON, евро/кВт·ч	Выбросы CO <sub>2</sub> , тонн/год
1	563,20	0,192	0,316	251
2	235,28	0,161	0,265	271
3	255,79	0,161	0,265	265
4	486,71	0,14	0,23	171
5	624,27	0,133	0,219	127
6	604,78	0,134	0,221	137
7	918,95	0,159	0,262	121
8	520,19	0,118	0,195	121
9	1769,31	0,226	0,372	3,8
10	1661,85	0,213	0,351	4

Многокритериальная оценка альтернатив проводилась методом TOPSIS с оценкой весов критериев объективным методом энтропии по формулам (1)-(8) и субъективным методом. Следует отметить, что несколько конфигураций могут быть исключены из рассмотрения до многокритериальной оценки, так как они доминируемы другими альтернативами. Например, конфигурация 8 лучше конфигурации 6 по всем критериям.

В таблице 3 представлены результаты оценки весов критериев объективным и субъективным методами.

Таблица 3. Весовые коэффициенты критериев

Способ оценивания весов критериев	Критерии			
	Капитальные затраты, тыс. евро	LCOE, евро/кВт·ч	LCOH, евро/кВт·ч	Выбросы CO <sub>2</sub> , тонн/год
	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>	w <sub>3</sub>	w <sub>4</sub>
Объективный	0,402	0,042	0,042	0,513
Субъективный	0,3	0,3	0,3	0,1

При оценке объективным методом энтропии веса критериев LCOE и LCOH имеют крайне низкие значения, так как диапазон изменения этих показателей среди десяти конфигураций не такой большой. Так, LCOE меняется в пределах 0,118-0,226 евро/кВт·ч. В то же время капитальные затраты меняются в диапазоне 255,8-1769 тыс евро, а выбросы CO<sub>2</sub> 3,8-271 тонн/год. Однако метод энтропии не позволяет учесть ценность для ЛПП этих изменений. Так, для гибридных систем малой мощности выбросы диоксида углерода не имеют большого значения, даже с учетом, что этот показатель характеризует и другие выбросы загрязняющих веществ. В то же время LCOE и LCOH представляют собой стоимость производства электрической и тепловой энергии, при которой окупятся все затраты на проект с учетом дисконтирования. Фактически LCOE и LCOH характеризуют себестоимость производства энергии и экономическую эффективность конфигурации в перспективе рассматриваемого периода эксплуатации. В этой связи при оценке субъективным методом экономическим критериям был установлен вес 0,3. В таблице 4 показаны многокритериальные оценки конфигураций.

Таблица 4. Многокритериальные оценки конфигураций гибридных энергетических систем

Конфигурация	Объективный метод оценивания весов	Субъективный метод оценивания весов
1	0,42	0,61
2	0,46	0,74
3	0,46	0,74
4	0,56	0,78
5	0,62	0,75
6	0,60	0,75
7	0,56	0,57
8	<b>0,66</b>	<b>0,81</b>
9	0,54	0,21
10	0,56	0,24

В результате многокритериальной оценки наиболее предпочтительной является конфигурация 8. Эта конфигурация использует ДГУ, ВЭУ, ФЭП, тепловые насосы, котел на биомассе и накопители тепловой энергии.

Конфигурация 8 имеет лучшие оценки LCOE, LCOH, сравнительно низкие капитальные затраты и выбросы CO<sub>2</sub>. Следует отметить, что конфигурация имеет наибольшую многокритериальную оценку при двух способах оценивания весов, при этом остальные альтернативы имеют различное ранжирование. Использование двух подходов к оцениванию весов критериев позволяет учесть как объективные факторы, так и субъективные предпочтения ЛПП при многокритериальном анализе.

**Заключение.** Предложен двухэтапный подход к многокритериальному выбору автономной гибридной энергетической системы. В его основе лежит использование программы nPro

для оптимизации конфигураций и метод TOPSIS для многокритериального сравнения сформированных альтернатив. При многокритериальном анализе большую роль играют веса критериев. В предлагаемом подходе используется объективный метод энтропии и субъективный метод прямого назначения весов. Использование двух методов оценивания весов позволяет выделить наиболее перспективные альтернативы для более детального рассмотрения. Предложенный подход был применен для многокритериального выбора системы электро- и теплоснабжения удаленного населенного пункта. Оценки LCOE для сформированной автономной энергетической системы составили 0,118 евро/кВт·ч, LCON – 0,195 евро/кВт·ч. Выбранная конфигурация характеризуется высокой экономической и экологической эффективностью, отвечает предпочтениям ЛПП.

#### Список источников

1. Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2020. – 77 с.
2. Холкин Д. Новые бизнес-модели развития локальной энергетики / Д. Холкин, И. Чаусов, М. Губанов и др. // Энергетическая политика, 2024. – № 9 (200). – С. 32-43.
3. Шакиров В.А. Проблемы электроснабжения в коммунально-бытовом секторе арктической зоны Республики Саха (Якутия) / В.А. Шакиров, Т.Ф. Тугузова, Р.И. Музычук // Арктика: экология и экономика, 2020. – № 4 (40). – С. 106-116. – DOI:10.25283/2223-4594-2020-4-106-116.
4. Silinto B.F., C. van der Laag Yamu, Zuidema C., Faaij A. P. C. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on energy system models and spatial explicit modelling tools. *renewable and sustainable energy reviews*, 2025, vol. 207, pp. 114916, DOI:10.1016/j.rser.2024.114916.
5. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347.
6. Shamachurn H. Optimization of an off-grid domestic Hybrid energy system in suburban Paris using iHOGA software. *Renewable energy focus*, 2021, vol. 37, 36–49, DOI:10.1016/j.ref.2021.02.004.
7. Altun A.F., Kilic M. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. *Renewable energy*, 2020, vol. 157, pp. 424–443, DOI:10.1016/j.renene.2020.05.042.
8. Bansal A.K. Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: A review. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 369, pp. 133376, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133376.
9. Kushwaha P.K., Bhattacharjee C. Integrated techno-economic-enviro-socio design of the hybrid renewable energy system with suitable dispatch strategy for domestic and telecommunication load across India. *Journal of energy storage*, 2022, vol. 55, pp. 105340, DOI:10.1016/j.est.2022.105340.
10. Лукутин Б.В. Фотоэлектростанции с электрохимическим и тепловым накоплением энергии в Ираке / Б.В. Лукутин, К. Хамид // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 174-183.
11. Mazzeo D., Matera N., Oliveti G., Interaction between a Wind-PV-Battery-Heat pump trigeneration system and office building electric energy demand including vehicle charging, in: 2018 IEEE International conference on environment and electrical engineering and 2018. IEEE Industrial and commercial power systems europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2018, pp. 1–5, DOI:10.1109/EEEIC.2018.8493710.
12. Isa N.M., Das H.S., Tan C.W., Yatim A.H.M., Lau K.Y. A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy*, 2016, vol. 112, pp. 75-90. DOI:10.1016/j.energy.2016.06.056.
13. Kotowicz J., Uchman W. Analysis of the integrated energy system in residential scale: Photovoltaics, microgeneration and electrical energy storage. *Energy*, 2021, vol. 227, pp. 120469, DOI:10.1016/j.energy.2021.120469.
14. Ihlemann M. et al. SpineOpt: A flexible open-source energy system modelling framework, *Energy strategy reviews*, 2022, vol. 43, pp. 100902, DOI:10.1016/j.esr.2022.100902.
15. Wirtz M. nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. *Energy*, 2023, vol. 268, pp. 126575, DOI:10.1016/j.energy.2022.126575
16. Tatar S.M., Akulker H., Sildir H., Aydin E. Optimal design and operation of integrated microgrids under intermittent renewable energy sources coupled with green hydrogen and demand scenarios. *International journal of hydrogen energy*, 2022, vol. 47, pp. 27848-27865, DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.06.130

17. Wu X., Liao B., Su Y., Li S. Multi-objective and multi-algorithm operation optimization of integrated energy system considering ground source energy and solar energy. *International journal of electrical power & energy systems*, 2023, vol. 144, pp. 108529, DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108529
18. Fioriti D., Lutzemberger G., Poli D. et al. Coupling economic multi-objective optimization and multiple design options: A business-oriented approach to size an off-grid hybrid microgrid. *International journal of electrical power & energy systems*, 2021, vol. 127, pp. 106686, DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106686
19. Baghaee H.R., Mirsalim M., Gharehpetian G.B., Talebi H.A. Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 1022-1041, DOI:10.1016/j.energy.2016.09.007
20. Gönül Ö., Duman A.C., Güler Ö. Multi-objective optimal sizing and techno-economic analysis of on- and off-grid hybrid renewable energy systems for EV charging stations. *Sustainable Cities and Society*, 2024, vol. 115, pp. 105846, DOI:10.1016/j.scs.2024.105846.
21. Ukoba M.O., Diemuodeke O.E., Alghassab M., Njoku H.I., Imran M., Khan Z.A. Composite multi-criteria decision analysis for optimization of hybrid renewable energy systems for geopolitical zones in Nigeria. *Sustainability*, 2020, vol. 12. DOI:10.3390/su12145732
22. Usman M., Jonas D., Frey G. A methodology for multi-criteria assessment of renewable integrated energy supply options and alternative HVAC systems in a household. *Energy and buildings*, 2022, vol. 273, pp. 112397. DOI:10.1016/j.enbuild.2022.112397
23. РД 34.20.185-94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей.
24. РД 34.20.178. Методические указания по расчету электрических на грузок в сетях 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. Дата актуализации 12.02.2016. М.: Сельэнергопроект, 2016.
25. Masoud A. A. Hybrid wind-solar energy potential modeling using ERA5 and solar irradiation data in google Earth Engine. *Renewable energy*, 2024, vol. 232, pp. 121042, DOI: 10.1016/j.renene.2024.121042.
26. Chakraborty S., TOPSIS and modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision analytics journal*, 2022, vol. 2, pp. 100021, DOI: 10.1016/j.dajour.2021.100021.
27. Aydoğdu E., Güner E., Aldemir B., Aygün H. Complex spherical fuzzy TOPSIS based on entropy. *Expert systems with applications*, 2023, vol. 215, pp. 119331, DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119331.
28. Ponhan 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
29. Zou Z., Yun Y., Sun J. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of environmental sciences*, 2006, vol. 18, no. 5, pp. 1020–1023, DOI:10.1016/S1001-0742(06)60032-6
30. Схема и программа развития электроэнергетики Приморского края на 2020 - 2024 годы, утверждена распоряжением губернатора Приморского края от 31.01.2020 № 31-пр.
31. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347
32. Maleki Tehrani M., Akhtari M., Kasaeian A., Vaziri Rad M.A., Toopshekan A., Sadeghi Motlagh M. Techno-economic investigation of a hybrid biomass renewable energy system to achieve the goals of SDG-17 in deprived areas of Iran. *Energy conversion and management*, 2023, vol. 291, pp. 117319, DOI:10.1016/j.enconman.2023.117319
33. Bonamini G., Colombo E., Llorca N., Sanchez-Soriano J., Cost allocation for rural electrification using game theory: A case of distributed generation in rural India. *Energy for sustainable development*, 2019, vol. 50, pp. 139–152, DOI:10.1016/j.esd.2019.01.007

**Шакиров Владислав Альбертович.** Доцент, кандидат технических наук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, AuthorID: 534444, ORCID: 0000-0001-8629-9549, shakirovva@ex.istu.edu, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова 83.

**Пионкевич Владимир Андреевич.** Доцент, кандидат технических наук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, AuthorID: 810357, ORCID: 0000-0003-2002-415X, pionkevichva@ex.istu.edu, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова 83.

UDC 620.98:519.8

DOI:10.25729/ESI.2024.36.4.010

## Optimization and multi-criteria selection of the configuration of a hybrid autonomous energy system based on the nPro program and TOPSIS

Vladislav A. Shakirov, Vladimir A. Pionkevich

National research Irkutsk state technical university,

Russia, Irkutsk, *shakirovva@ex.istu.edu*

**Abstract.** In many cases, it is advisable to supply electricity and heat to consumers in remote and hard-to-reach areas using renewable energy sources. Designing an optimal autonomous energy system is associated with a number of difficulties: the stochastic nature of the potential of renewable energy sources, a variety of technical and economic parameters and technological limitations of the equipment. The long life cycle of an energy system and the multiplicity of goals pursued during its creation or development lead to the need for a multi-criteria consideration of the problem. The article provides an overview of methods and software for selecting configurations of energy systems, and shows the relevance of developing multi-criteria approaches. A two-stage approach to the multi-criteria selection of the configuration of an autonomous energy system is proposed. At the first stage, the nPro software tool is used, providing optimization of configurations of various energy systems, including wind turbines, photovoltaic converters, heat pumps, solar collectors, electric and thermal energy storage devices. At the second stage, a multi-criteria assessment of the formed energy systems is carried out using the TOPSIS method. To improve the validity of the solutions obtained, the weights of the criteria are determined based on an objective assessment using the entropy method, as well as a subjective method. An example of the approach application is considered for the remote settlement of Ust-Sobolevka, located in Primorsky Krai. As a result, ten configurations for autonomous electricity and heat supply were optimized and their multi-criteria assessment was carried out taking into account four criteria: capital costs, the levelized cost of electricity and heat, and carbon dioxide emissions. The most preferable configuration has relatively low capital costs and carbon dioxide emissions, as well as the best estimates of the levelized cost of electricity and heat among the options considered.

**Keywords:** energy system, renewable energy, optimization, modeling

### References

1. Ob"ekty generatsii v izolirovannykh i trudnodostupnykh territoriyakh v Rossii [Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas in Russia]. Analiticheskiy tsentr pri Pravitel'stve Rossiyskoy Federatsii [Analytical Center under the Government of the Russian Federation], 2020, 77 p.
2. Kholkin D., Chausov I., Gubanov M., Mel'nikov P., Kolomyts L. Novye biznes-modeli razvitiya lokal'noy energetiki [New business models for local energy development]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2024, no. 9 (200), pp. 32-43.
3. Shakirov V.A., Tuguzova T.F., Muzychuk R.I. Problems of power supply in the public utility sector of the arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). Arktika: Ekologiya i Ekonomika, 2020, no. 4(40). pp. 106-116, DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-106-116
4. Silinto B.F., C. van der Laag Yamu, Zuidema C., Faaij A. P. C. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: A review on energy system models and spatial explicit modelling tools. renewable and sustainable energy reviews, 2025, vol. 207, pp. 114916, DOI:10.1016/j.rser.2024.114916.
5. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. Journal of cleaner production, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347.
6. Shamachurn H. Optimization of an off-grid domestic Hybrid energy system in suburban Paris using iHOGA software. Renewable energy focus, 2021, vol. 37, 36–49, DOI:10.1016/j.ref.2021.02.004.
7. Altun A.F., Kilic M. Design and performance evaluation based on economics and environmental impact of a PV-wind-diesel and battery standalone power system for various climates in Turkey. Renewable energy, 2020, vol. 157, pp. 424–443, DOI:10.1016/j.renene.2020.05.042.
8. Bansal A.K. Sizing and forecasting techniques in photovoltaic-wind based hybrid renewable energy system: A review. Journal of cleaner production, 2022, vol. 369, pp. 133376, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.133376.
9. Kushwaha P.K., Bhattacharjee C. Integrated techno-economic-enviro-socio design of the hybrid renewable energy system with suitable dispatch strategy for domestic and telecommunication load across India. Journal of energy storage, 2022, vol. 55, pp. 105340, DOI:10.1016/j.est.2022.105340.

10. Lukutin B.V., Khamid K. Fotoelektrostantsii s elektrokhimicheskim i teplovym nakopleniyem energii v Irake [ Photovoltaic power plants with electrochemical and thermal energy storage in Iraq]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2021, vol. 332. no. 1. pp. 174-183.
11. Mazzeo D., Matera N., Oliveti G., Interaction between a Wind-PV-Battery-Heat pump trigeneration system and office building electric energy demand including vehicle charging, in: 2018 IEEE International conference on environment and electrical engineering and 2018. IEEE Industrial and commercial power systems europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2018, pp. 1–5, DOI:10.1109/EEEIC.2018.8493710.
12. Isa N.M., Das H.S., Tan C.W., Yatim A.H.M., Lau K.Y. A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital. *Energy*, 2016, vol. 112, pp. 75-90. DOI:10.1016/j.energy.2016.06.056.
13. Kotowicz J., Uchman W. Analysis of the integrated energy system in residential scale: Photovoltaics, microgeneration and electrical energy storage. *Energy*, 2021, vol. 227, pp. 120469, DOI:10.1016/j.energy.2021.120469.
14. Ihlemann M. et al. SpineOpt: A flexible open-source energy system modelling framework, *Energy strategy reviews*, 2022, vol. 43, pp. 100902, DOI:10.1016/j.esr.2022.100902.
15. Wirtz M. nPro: A web-based planning tool for designing district energy systems and thermal networks. *Energy*, 2023, vol. 268, pp. 126575, DOI:10.1016/j.energy.2022.126575
16. Tatar S.M., Akulker H., Sildir H., Aydin E. Optimal design and operation of integrated microgrids under intermittent renewable energy sources coupled with green hydrogen and demand scenarios. *International journal of hydrogen energy*, 2022, vol. 47, pp. 27848-27865, DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.06.130
17. Wu X., Liao B., Su Y., Li S. Multi-objective and multi-algorithm operation optimization of integrated energy system considering ground source energy and solar energy. *International journal of electrical power & energy systems*, 2023, vol. 144, pp. 108529, DOI:10.1016/j.ijepes.2022.108529
18. Fioriti D., Lutzemberger G., Poli D. et al. Coupling economic multi-objective optimization and multiple design options: A business-oriented approach to size an off-grid hybrid microgrid. *International journal of electrical power & energy systems*, 2021, vol. 127, pp. 106686, DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106686
19. Baghaee H.R., Mirsalim M., Gharehpetian G.B., Talebi H.A. Reliability/cost-based multi-objective Pareto optimal design of stand-alone wind/PV/FC generation microgrid system. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 1022-1041, DOI:10.1016/j.energy.2016.09.007
20. Gönül Ö., Duman A.C., Güler Ö. Multi-objective optimal sizing and techno-economic analysis of on- and off-grid hybrid renewable energy systems for EV charging stations. *Sustainable Cities and Society*, 2024, vol. 115, pp. 105846, DOI:10.1016/j.scs.2024.105846.
21. Ukoba M.O., Diemuodeke O.E., Alghassab M., Njoku H.I., Imran M., Khan Z.A. Composite multi-criteria decision analysis for optimization of hybrid renewable energy systems for geopolitical zones in Nigeria. *Sustainability*, 2020, vol. 12. DOI:10.3390/su12145732
22. Usman M., Jonas D., Frey G. A methodology for multi-criteria assessment of renewable integrated energy supply options and alternative HVAC systems in a household. *Energy and buildings*, 2022, vol. 273, pp. 112397. DOI:10.1016/j.enbuild.2022.112397
23. RD 34.20.185-94. *Instruktsiya po proektirovaniyu gorodskikh elektricheskikh setey* [Instructions for designing urban electrical networks].
24. RD 34.20.178. *Metodicheskie ukazaniya po raschetu elektricheskikh na gruzok v setyakh 0,38–110 kV sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya* [Guidelines for calculating electrical loads in 0.38–110 kV networks for agricultural purposes]. *Rukovodyashchie materialy po proektirovaniyu elektrosnabzheniya sel'skogo khozyaystva* [Guidelines for designing power supply for agriculture]. Date of update 12.02.2016. M., Sel'energoproekt [Selenergoproekt], 2016.
25. Masoud A. A. Hybrid wind-solar energy potential modeling using ERA5 and solar irradiation data in google Earth Engine. *Renewable energy*, 2024, vol. 232, pp. 121042, DOI: 10.1016/j.renene.2024.121042.
26. Chakraborty S., TOPSIS and modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision analytics journal*, 2022, vol. 2, pp. 100021, DOI: 10.1016/j.dajour.2021.100021.
27. Aydoğdu E., Güner E., Aldemir B., Aygün H. Complex spherical fuzzy TOPSIS based on entropy. *Expert systems with applications*, 2023, vol. 215, pp. 119331, DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119331.
28. Ponhan 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
29. Zou Z., Yun Y., Sun J. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of environmental sciences*, 2006, vol. 18, no. 5, pp. 1020–1023, DOI:10.1016/S1001-0742(06)60032-6

30. Skhema i programma razvitiya elektroenergetiki Primorskogo kraya na 2020 - 2024 gody, utverzhdena rasporyazheniyem gubernatora Primorskogo kraya ot 31.01.2020 № 31-rg. [The scheme and program for the development of the electric power industry of the Primorsky Territory for 2020 - 2024, approved by order of the governor of the Primorsky Territory dated January 31, 2020 no. 31-rg. ]
31. Kumar R., Channi H.K. A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis. *Journal of cleaner production*, 2022, vol. 349, pp. 131347, DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131347
32. Maleki Tehrani M., Akhtari M., Kasaeian A., Vaziri Rad M.A., Toopshekan A., Sadeghi Motlagh M. Techno-economic investigation of a hybrid biomass renewable energy system to achieve the goals of SDG-17 in deprived areas of Iran. *Energy conversion and management*, 2023, vol. 291, pp. 117319, DOI:10.1016/j.enconman.2023.117319
33. Bonamini G., Colombo E., Llorca N., Sanchez-Soriano J., Cost allocation for rural electrification using game theory: A case of distributed generation in rural India. *Energy for sustainable development*, 2019, vol. 50, pp. 139–152, DOI:10.1016/j.esd.2019.01.007

**Shakirov Vladislav Albertovich.** Associate professor, PhD, Irkutsk national research technical university, head of the department of power supply and electrical engineering, AuthorID: 534444, ORCID: 0000-0001-8629-9549, shakirovva@ex.istu.edu, 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83.

**Pionkevich Vladimir Andreevich.** Associate professor, PhD, Irkutsk national research technical university, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, AuthorID:810357, ORCID:0000-0003-2002-415X, pionkevichva@ex.istu.edu, 664074, Irkutsk, Lermontov st., 83.

Статья поступила в редакцию 18.11.2024; одобрена после рецензирования 13.12.2024; принята к публикации 28.11.2024.

The article was submitted 11/18/2024; approved after reviewing 12/13/2024; accepted for publication 11/28/2024.