

УДК 621.311.1

Сергей Геннадьевич Обухов

ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск, e-mail: serob@tpu.ru

Галина Николаевна Климова

ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск, e-mail: gariki@tpu.ru

Ахмед Ибрагим

ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск, e-mail: ibragim @tpu.ru

Методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из перспективных способов повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей, территориально расположенных в районах, удаленных от центральной электрической сети, является применение гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Первоочередной задачей проектирования таких систем является выбор состава генерирующего оборудования, обеспечивающего оптимальные технико-экономические показатели электроэнергетической системы. Стохастический характер генерации и нелинейность характеристик энергетических установок обуславливают высокую сложность решения данной проблемы, которая с математической точки зрения формулируется как оптимизационная задача. Точное и надежное решение данной оптимизационной задачи обеспечивает повышение эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии и является актуальной задачей современной энергетики.

Материалы и методы. Для построения временных климатических рядов и графиков электрических нагрузок использованы вероятностно-статистические методы и модели анализа экспериментальных данных, при исследовании рабочих режимов электроэнергетической системы применено имитационное моделирование в системе MatLab, для решения оптимизационной задачи использован эволюционный алгоритм роя частиц. В составе методики используется оригинальная модель солнечной радиации, обеспечивающая прогнозирование основных характеристик солнечного излучения в любой географической точке России, в том числе и для территорий, по которым отсутствуют результаты регулярных актинометрических наблюдений. Для прогнозирования суточного хода скорости ветра используется функция обратного распределения Вейбулла, обеспечивающая повышение достоверности прогнозирования выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой на суточных временных интервалах.

Результаты. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии. Применение в составе методики модуля оптимизации на основе алгоритма роя частиц обеспечивает надежное и точное определение экстремума целевой функции, что, в свою очередь, обеспечивает повышение эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии.

Выводы. Методика апробирована на практических примерах оптимизации состава оборудования электроэнергетических систем различных конфигураций и доказала свою эффективность. Методика реализована в виде программного приложения, что обеспечивает удобство ее практического применения. Полученные результаты могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием и эксплуатацией электроэнергетических систем с использованием генерирующих установок возобновляемой энергетики.

Ключевые слова: гибридные электроэнергетические системы, возобновляемые источники энергии, оптимизация состава оборудования, алгоритм роя частиц

Sergey Gennadyevich Obukhov

National Research Tomsk Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Electric Power and Electrical Engineering Department of School of Energy & Power Engineering, Russia, Tomsk, e-mail: serob@tpu.ru

Galina Nikolaevna Klimova

National Research Tomsk Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Electric Power and Electrical Engineering Department of School of Energy & Power Engineering, Russia, Tomsk, e-mail: gariki@tpu.ru

Ahmed Ibrahim

National Research Tomsk Polytechnic University, Postgraduate student of the Electric Power and Electrical Engineering Department of School of Energy & Power Engineering, Russia, Tomsk, e-mail: ibragim@tpu.ru

Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources

Abstract

Background. One of the promising ways to improve the reliability and efficiency of power supply for customers in the areas remote from central electrical grid is the use of hybrid power systems with renewable energy sources. The primary task of designing such systems is the unit commitment of the generating equipment that provides the optimal technical and economic indexes of the electric power system. The stochastic nature of generation and nonlinearity of the characteristics of power plants cause a high complexity of solving this problem, which, from a mathematical point of view, is formulated as an optimization problem. An accurate and reliable solution of this optimization problem increases the efficiency of design and operation of hybrid electric power systems with renewable energy sources. And it is a vital task of modern power industry.

Materials and methods. A probabilistic-statistical methods and models for the analysis of experimental data are used to construct climatic time series and graphs of electrical loads. In addition, to study the operating modes of the electric power system the MatLab system is used for the simulation and modeling, and an evolutionary particle swarm algorithm is used to solve the optimization problem. The original model of solar radiation is used as a part of this methodology. This model provides forecasting the key characteristics of solar radiation in any geographical point of Russia including the areas that have no results of routine actinometric observation. Weibull distribution function is used to forecast daily variations of wind speed. It enhances the validity of forecasting of electricity generation of wind-driven power plant at daily time interval.

Results. As a result of the research, a method of optimum unit commitment has been developed for the equipment of electric power systems based on renewable energy sources. The use of the particle swarm algorithm as a part of the methodology provides reliable and accurate determination of the extremum of the objective function, which increases the efficiency of design and operation of hybrid electric power systems with renewable energy sources.

Conclusions. The method has been tested on practical examples of optimum unit commitment for the equipment of electric power systems of various configurations and has proven its effectiveness. The technique is implemented as a software application, which ensures the convenience of its practical application. The obtained results can be used by companies involved in the design and operation of electric power systems using renewable energy generating units.

Key words: hybrid power system, renewable energy sources, optimum unit commitment, particle swarm algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.025-038

Введение. Одним из приоритетных направлений развития современной энергетики является активное внедрение экологически чистых технологий производства электрической энергии. К таким технологиям относятся гибридные системы электроснабжения (ГСЭС) с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Наиболее перспективная область практического применения ГСЭС – системы электроснабжения потребителей небольшой мощности, тер-

риториально расположенные в труднодоступных районах, удаленных от центральной электрической сети. По оценкам Минэнерго РФ, ГСЭС могут быть востребованы более чем в 100 тыс. небольших изолированных поселениях по всей территории России, в том числе в ряде районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, в которых географически, технически и экономически невозможно организовать централизованное энергоснабжение [1].

Первоочередная задача проектирования ГСЭС – выбор состава основного генерирующего оборудования, обеспечивающего оптимальные технико-экономические показатели проектируемой энергетической системы. Высокая степень сложности решения данной задачи обусловлена стохастическим характером генерации и нелинейностью характеристик энергетических установок на основе ВИЭ. В общем случае в составе ГСЭС могут использоваться разные типы генерирующих источников, но преимущественно применяются: фотоэлектрические (ФЭУ) и ветроэнергетические (ВЭУ) установки, накопители энергии на основе аккумуляторных батарей (АБ) и/или топливных элементов (ТЭ), а в качестве гарантированного источника питания дизель-генераторные установки (ДГ).

Решению задач оптимизации состава оборудования ГСЭС с ВИЭ в последнее время посвящено большое количество научных работ, авторы которых используют разнообразные критерии и алгоритмы оптимизации. В качестве технических критериев чаще всего используются: вероятность потери питания (loss of power supply probability – LPSP), вероятность потери нагрузки (loss of load probability – LLS), недоотпуск электроэнергии потребителю (expected energy not supplied – EENS). В качестве экономических критериев наибольшее распространение получили: стоимость жизненного цикла (life cycle cost – LCC), выровненная стоимость электроэнергии (levelized cost of energy – LCOE), чистая текущая стоимость (net present cost – NPC). В большинстве случаев технические критерии используются в качестве ограничений по надежности проектируемых энергетических систем, а экономические критерии применяются в качестве критериев целевой функции оптимизации.

Например, авторы работ [2, 3] используют LPSP и LCC критерии для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ систем, предназначенных для электроснабжения автономных потребителей в отдаленных районах Ирана. LPSP и NPC критерии применяют для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/ТЭ системы, расположенной в юго-восточном регионе Мексики [4]. Экономические критерии LCOE и NPC используются для выбора оптимального состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ систем при электрификации сельских поселений в трех автономных

округах Колумбии [5] и деревни в Бенине (Африка) [6]. Для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ системы в районе Альмора (Индия) применяют LLS и EENS критерии [7], в [8] выбор состава оборудования ФЭУ/ВЭУ системы с гидроаккумулирующей электростанцией в провинции Сычуань (Китай) выполнен с помощью LCOE и LPSP критериев. Эти же критерии использовались для оптимизации ФЭУ/ВЭУ/АБ/ТЭ системы в районе города Шираз на юге Ирана [9], критерий LCC заложен в основу оптимизации ФЭУ/ВЭУ/ТЭ/ДГ системы в районе города Рафсанджан (Иран) [10]. Для оптимизации состава оборудования ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ системы в районе города Дахран (Саудовская Аравия) применяют LCC критерий совместно с EENS критерием [11]. Для повышения достоверности полученных результатов некоторые авторы применяют многоцелевую оптимизацию, используя в качестве дополнительных критериев экологические и социально-политические факторы: выбросы CO₂, площадь отчуждения земли, уровень автономности, стоимость топлива и др. [12–15].

Большим разнообразием характеризуются и применяемые алгоритмы оптимизации состава оборудования ГСЭС, подробный обзор которых приведен в [16, 17]. В последние годы для оптимизации ГСЭС все чаще апробируются эволюционные алгоритмы, из которых наибольшее распространение получили генетические алгоритмы [4, 9, 18], алгоритм поиска кукушки [7, 18] и алгоритм роя частиц (particle swarm optimization – PSO) [2, 8, 13, 14]. Распространение получают и сравнительно новые виды эволюционных алгоритмов: имитации отжига [10], молниеносного поиска [11], преподавания и обучения [12] и другие [3].

Упростить решение задачи оптимизации состава оборудования ГСЭС позволяет применение специализированного программного обеспечения, из которого наиболее распространенными являются программные комплексы HOMER, HOGA, HYBRID2 и некоторые другие [16]. Программные комплексы помогают выполнить сравнительный анализ ГСЭС различных конфигураций, содержат обширную базу технико-экономических характеристик энергетического оборудования, используют современные алгоритмы оптимизации. Подробный обзор прикладного программного обеспечения для моделирования режимов и

оптимизации состава оборудования ГСЭС сделан в [19], примеры практического применения программных комплексов для оптимизации ГСЭС различных конфигураций приведены в [5, 6, 16]. Следует отметить, что практическое применение данных программных продуктов в России ограничивается их стоимостью и плохой адаптацией к вводу исходных данных временных рядов скоростей ветра и солнечной радиации для большинства регионов России. Связано это с небольшим количеством метеостанций на территории нашей страны [20].

Проведенный обзор современных научных работ, посвященных оптимизации состава оборудования ГСЭС с ВИЭ показал, что основными проблемами, на которых сосредоточены усилия ученых, являются достоверное прогнозирование мощности, генерируемой установками возобновляемой энергетики, и выбор алгоритма решения оптимизационной задачи, обеспечивающего надежное определение экстремума целевой функции при заданных ограничениях. Применение разнообразных приемов и способов решения данной задачи свидетельствует о том, что на сегодняшний день научная проблема оптимизации состава оборудования ГСЭС является актуальной и не имеет законченного решения.

Цель нашего исследования состояла в повышении эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Для достижения поставленной цели решается задача разработки методики оптимизации состава оборудования ГСЭС в целях ее применения при проектировании изолированных электроэнергетических систем, территориально расположенных в любом регионе России.

Методы исследования. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования ГСЭС с ВИЭ, упрощенная блок-схема которой показана на рис. 1.

Оптимизация состава оборудования ГСЭС с ВИЭ выполняется за три последовательных этапа. На первом этапе расчетов формируются временные ряды климатических данных (солнечной радиации, скорости ветра и температуры воздуха) и график электрических нагрузок потребителя электроэнергии. Основой формирования временных климатических рядов являются географические координаты раз-

мещения ГСЭС и данные многолетних метеорологических наблюдений. Построение графиков электрических нагрузок осуществляется с использованием вероятностно-статистической модели электрических нагрузок децентрализованного потребителя [21]. Исходными данными для выполнения первого этапа программы являются данные метеорологических сайтов и базы данных Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA) [22]. В [22] используются временные ряды продолжительностью в один год с дискретизацией в один час, которые преимущественно применяются для решения задач оптимизации ГСЭС.

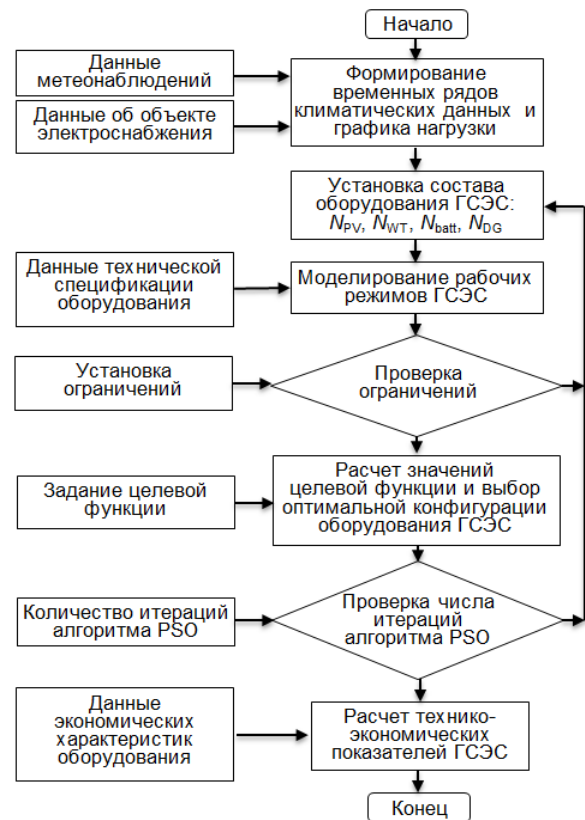


Рис. 1. Блок-схема методики оптимизации состава оборудования гибридных электроэнергетических систем

На втором этапе расчетов выполняется моделирование рабочих режимов ГСЭС, в результате которого определяются технические показатели проектируемой электроэнергетической системы. Имитационная модель ГСЭС с ВИЭ реализуется в программном комплексе MatLab/Simulink. Исходными данными для выполнения этого этапа расчетов служат основные технические характеристики энергетического обо-

рудования ГСЭС, установленные по данным их технической спецификации.

Оптимизация состава оборудования ГСЭС выполняется на заключительном третьем этапе расчетов. Оптимизационная задача решается с использованием специализированного программного модуля, реализованного в виде библиотеки программ-функций MatLab. Программный модуль построен на основе алгоритма PSO, широко распространенного при решении задач оптимизации ГСЭС. Результаты сравнения алгоритма PSO с другими видами алгоритмов при решении задач оптимизации состава оборудования ГСЭС доказывают его высокую производительность [3, 4, 9, 23], а также надежное функционирование при использовании различных целевых функций и ограничений [24]. Исходными данными для выполнения этого этапа расчетов являются экономические характеристики оборудования и заданные критерии оптимизации и ограничения.

Формирование временных рядов.

Временной ряд солнечной радиации $G(t)$ строится с помощью комбинированной модели, в которой расчет одной части параметров производится по аналитическим выражениям, а другая часть параметров определяется с использованием эмпирических коэффициентов, полученных из базы данных NASA SSE [25] для заданной в расчетах географической точки размещения солнечной батареи (СБ). Данная модель солнечной радиации подробно описана в [22]. Ее особенностью является использование в качестве исходных данных численных значений индекса прозрачности атмосферы и альбедо поверхности, полученных из базы данных NASA SSE. Это позволяет применять модель для прогнозирования основных характеристик солнечного излучения в любой географической точке, в том числе и для территорий, по которым отсутствуют результаты регулярных актинометрических наблюдений.

Экспериментальные данные наблюдений о скорости ветра $V(t)$ аппроксимируются стандартной функцией распределения Вейбулла:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, \quad (1)$$

где c – параметр масштаба; k – параметр формы; $F(V)$ – функция интегральной повторяемости скорости ветра, которая характеризует долю времени (вероятности

того, что скорость ветра равна или ниже, чем V).

С помощью известных методов статистической обработки экспериментальных данных рассчитываются значения коэффициентов c и k для каждого месяца года [26], и на их основе формируется временной ряд скоростей ветра для необходимого интервала времени согласно распределению

$$V(t) = c \left[-\ln(1 - F(V)) \right]^{\frac{1}{k}}. \quad (2)$$

Результаты предварительно проведенных исследований показали, что функция обратного распределения Вейбулла (2) значительно повышает достоверность прогнозирования выработки электроэнергии ВЭУ на суточных интервалах времени.

Временной ряд температуры воздуха $T(t)$ строится на основе математической модели, учитывающей суточный ход температуры [27]:

$$T(t) = \bar{T} + 0,5\Delta T \cdot \cos\left[2\pi(t_{loc} - t_{max})/t_{per}\right], \quad (3)$$

где \bar{T} – среднесуточная температура воздуха; ΔT – суточная амплитуда температуры воздуха; t_{per} – период изменения температуры воздуха; t_{max} – местное время максимума температуры; t_{loc} – локальное (местное) солнечное время.

Временной ряд графика электрических нагрузок формируется на основе вероятностно-статистической модели, позволяющей получить детальный прогноз режимов потребления электрической энергии для конкретного объекта электрообеспечения со специфическими для него особенностями [21]:

$$P_{load}(t) = \bar{P}_{ik} k_{Sk} \pm \beta \cdot \sigma(P_{ik}), \quad (4)$$

где $P_{load}(t)$ – расчетная активная электрическая нагрузка; \bar{P}_{ik} – математическое ожидание активной нагрузки i -го часа k -го сезона (определяется по статистическим графикам); k_{Sk} – коэффициент сезонности; $\sigma(P_{ik})$ – среднее квадратичное отклонение; β – коэффициент надежности расчета (при вероятности 0,975 $\beta = 2$).

Моделирование режимов. Для моделирования режимов ГСЭС с ВИЭ используются упрощенные «энергетические» модели компонентов, однозначно связывающие их выходные энергетические характеристики с внешними факторами и входными воздействиями. Предлагаемая методика позволяет оптимизировать со-

став оборудования ГСЭС произвольной конфигурации, однако в качестве объекта исследований рассматривается ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ система, в связи с чем приводится описание математических моделей только этих компонентов.

Математическая модель СБ, оснащенной контроллером максимальной мощности, описывается следующим уравнением [27]:

$$P_{PV} = C_{FF} N_{FM} \eta_{conv} G \ln(10^6 \cdot G) / T_{FM}, \quad (5)$$

где N_{FM} – число фотоэлектрических модулей (ФМ) в СБ; C_{FF} – постоянный коэффициент СБ; η_{conv} – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; G – текущий уровень солнечной радиации; T_{FM} – текущая температура ФМ.

Численные значения коэффициента C_{FF} определяются по уравнению

$$C_{FF} = \frac{FF \cdot T_{ref}}{G_{ref}} \times \frac{[I_{SC} + k_I(T_{FM} - T_{ref})] [V_{OC} + k_V(T_{FM} - T_{ref})]}{\ln(10^6 \cdot G_{ref})}, \quad (6)$$

где FF – коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФМ; T_{ref} , G_{ref} – значения температуры и освещенности ФМ при стандартных условиях; k_I , k_V – температурные коэффициенты тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ соответственно.

Коэффициент заполнения ВАХ ФМ определяется по данным их технической спецификации:

$$FF = I_{MPP} V_{MPP} / I_{SC} V_{OC}, \quad (7)$$

где I_{MPP} , V_{MPP} – паспортные значения тока и напряжения ФМ в точке максимальной мощности; I_{SC} , V_{OC} – паспортные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода ФМ при стандартных условиях тестирования.

Для моделирования выходной электрической мощности ВЭУ применяется математическая модель, построенная на основе «кубической» аппроксимации ее рабочей характеристики [8, 28]:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_{in}, \\ \left(\frac{V^3 - V_{in}^3}{V_{rat}^3 - V_{in}^3} \right) \cdot P_{WT\text{rat}} & V_{in} < V < V_{rat}, \\ P_{WT\text{rat}} & V_{rat} < V < V_{up}, \\ 0 & V > V_{up}, \end{cases} \quad (8)$$

где $P_{WT\text{rat}}$ – номинальная мощность ВЭУ; V – скорость ветра; V_{in} – стартовая скорость ветра; V_{up} – предельная скорость ветра; V_{rat} – номинальная скорость ветра.

Математическая модель аккумуляторной батареи описывает два ее возможных состояния: фазу заряда и фазу разряда. В фазе заряда АБ уровень заряда (state of charge – SOC) определяется по уравнению [28]

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) (1 - \sigma) + \left[P_{PV}(t) \eta_{PV} + P_{WT}(t) \eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \eta_{ch} \Delta t. \quad (9)$$

В фазе разряда АБ уровень остаточного заряда определяется следующим образом:

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) (1 - \sigma) + \left[P_{PV}(t) \eta_{PV} + P_{WT}(t) \eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \frac{1}{\eta_{dis}} \Delta t, \quad (10)$$

где σ – скорость саморазряда батареи за время Δt ; η_{PV} , η_{WT} , η_{inv} – коэффициенты полезного действия преобразователей ФЭУ, ВЭУ и выходного инвертора соответственно; η_{ch} , η_{dis} – эффективность батареи во время фазы заряда и разряда соответственно.

В условиях эксплуатации АБ величина SOC ограничена нижним SOC_{min} и верхним SOC_{max} пределами, которые определяют минимальное и максимальное значения уровня заряда АБ:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}. \quad (11)$$

Максимальное значение SOC_{max} , как правило, соответствует номинальной емкости АБ, нижний предел SOC_{min} определяется максимально допустимой глубиной разряда батареи (depth of discharge – DOD), который зависит от типа АБ и определяет срок службы устройств хранения энергии:

$$SOC_{min} = (1 - DOD) SOC_{max}. \quad (12)$$

Моделирование режимов АБ производится с учетом ограничения по максимальному зарядному току (или максимальной зарядной мощности $P_{ch,max}$), допустимое значение которого определяется по технической спецификации конкретной модели АБ.

ДГ в составе изолированных энергетических систем вынуждены работать на резко переменную нагрузку, что обуслов-

ливают изменение в широком диапазоне величины удельного расхода топлива. Для определения удельного расхода топлива при частичных нагрузках ДГ используется следующее эмпирическое выражение [29]:

$$g = g_{rat} \frac{a + bk_{DG}}{ck_{DG} + 10^{-6}}, \quad (13)$$

где g_{rat} – удельный расход топлива при номинальной нагрузке; a , b , c – постоянные коэффициенты, численные значения которых приняты в соответствии с рекомендациями [29]; k_{DG} – коэффициент загрузки ДГ.

Оптимизационная задача. Разработанная методика позволяет использовать в качестве аргументов целевой функции различные критерии оптимизации, в том числе и несколько критериев одновременно. В качестве критерия оптимизации принята выровненная стоимость электроэнергии $LCOE$, которая определяется по уравнению

$$LCOE = \frac{LCC}{E_{year}}, \quad (14)$$

где LCC – приведенная стоимость жизненного цикла; E_{year} – годовой объем электроэнергии, полученный потребителем от ГСЭС с ВИЭ.

Стоимость жизненного цикла, или общие затраты на электроэнергетическую систему в течение всего ее срока службы, определяются по уравнению

$$LCC = Cap + Main, \quad (15)$$

где Cap – общие капитальные затраты на проект; $Main$ – стоимость технического обслуживания.

Фактор времени при распределении капитальных затрат в течение всего жизненного цикла объекта учитывается с помощью коэффициента возврата капитала (capital recovery factor – CRF):

$$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}, \quad (16)$$

где i – процентная банковская ставка; T – общий срок службы энергетической системы.

Сроки службы отдельных компонентов ГСЭС могут значительно различаться, поэтому их необходимо привести к условиям единовременного платежа. Например, если в составе ГСЭС используется АБ с гарантированным сроком службы 5 лет, а значение жизненного цикла системы принято равным $T = 20$ лет, приведенная сто-

имость АБ C_{batt} определяется по следующему выражению:

$$C_{batt} = C_{batt0} \left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} \right), \quad (17)$$

где C_{batt0} – первоначальная цена АБ.

Срок службы дизель-генераторных установок измеряется количеством моточасов до капитального ремонта, поэтому их приведенная стоимость рассчитывается по аналогичной (17) формуле после определения их срока службы по уравнению

$$T_{DG} = \frac{H_{OV}}{H_F}, \quad (18)$$

где H_F – количество часов работы ДГ в год, рассчитанное по результатам моделирования; H_{OV} – количество моточасов до капитального ремонта, заявленное производителем ДГ.

Для ГСЭС в конфигурации ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ суммарные приведенные капитальные затраты определяются по уравнению

$$Cap = CRF \left(N_{WT} C_{WT} + N_{PV} C_{PV} + N_{batt} C_{batt} + C_{DG} + C_{inv} \right), \quad (19)$$

где N_{WT} , C_{WT} – количество и стоимость ВЭУ соответственно; N_{PV} , C_{PV} – количество и стоимость ФМ; N_{batt} , C_{batt} – количество и приведенная стоимость АБ; C_{DG} – приведенная стоимость ДГ; C_{inv} – приведенная стоимость инвертора.

Пренебрегая затратами на обслуживание инвертора, суммарные затраты на техническое обслуживание ГСЭС определяются по уравнению

$$Main = N_{WT} M_{WT} + N_{PV} M_{PV} + N_{batt} M_{batt} + M_{DG} + M_{fuel}, \quad (20)$$

где M_{WT} , M_{PV} , M_{batt} , M_{DG} – ежегодные затраты на техническое обслуживание ВЭУ, ФЭУ, АБ и ДГ; M_{fuel} – затраты на дизельное топливо, расход которого определяется по результатам моделирования режимов.

Искомые переменными оптимизационной задачи являются: количество ФМ в СБ N_{PV} ; количество ветроэнергетических установок N_{WT} ; число аккумуляторов в аккумуляторной батарее N_{batt} , при которых обеспечивается минимальное значение $LCOE$. В зависимости от рассматриваемой конфигурации ГСЭС для искомым переменных могут быть установлены дополнительные ограничения.

Для конфигурации ГСЭС с ДГ минимальное количество энергетического оборудования принимается равным нулю, для ГСЭС без гарантированного источника питания минимальная емкость АБ $Q_{batt.min}$ (кВт·ч) определяется с учетом требований к автономности, которая выражается в числе часов питания T_{batt} потребителей от АБ при отсутствии генерации от возобновляемых источников, допустимой глубины разряда DOD батарей, общей эффективности системы хранения энергии:

$$Q_{batt.min} \geq \frac{E_L T_{batt}}{24 \cdot DOD \eta_{ch} \eta_{inv}}, \quad (21)$$

где E_L – значение среднесуточной величины энергии, потребляемой нагрузкой в месяц года с самым высоким значением коэффициента сезонности k_{Sk} .

Алгоритм роя частиц. Алгоритм PSO был разработан Джеймсом Кеннеди и Расселом Эберхартом в 1995 году и представляет собой метод оптимизации нелинейных функций, основанный на природном поведении стай птиц [30]. Идея алгоритма заключается в непрерывном перемещении частиц в возможном пространстве решений, при этом текущее состояние частицы характеризуется двумя переменными: координатой x_i^k и скоростью перемещения v_i^k . В процессе расчета направление и вектор скорости каждой из частиц изменяются в соответствии со сведениями о найденных на предыдущей итерации оптимумах: $Ppbest_i$ – оптимальное значение целевой функции из всех точек, в которых побывала данная частица; $Pgbest$ – оптимальное значение целевой функции, найденное всеми частицами.

В практических приложениях чаще применяется модифицированный алгоритм, предложенный Юхи Ши и Расселом Эберхартом [31], в котором, в отличие от классического, используется дополнительный коэффициент инерции w , который определяет градиент изменения скорости частиц. Модифицированный алгоритм PSO описывается следующей системой уравнений:

$$v_i^{k+1} = v_i^k w + c_1 r_1 [Ppbest_i - x_i^k] + c_2 r_2 [Pgbest - x_i^k], \quad (22)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, k_{max},$$

где c_1, c_2 – константы ускорения; r_1, r_2 – случайные функции в диапазоне $[0,1]$; i – порядковый номер частицы; k – значение текущей итерации; N – число частиц; k_{max} – максимальное число итераций.

Нами используются численные значения и законы изменения коэффициентов инерции и ускорения, определенные в [32]. Число частиц и максимальное число итераций выбираются в соответствии с размерностью решаемой задачи. Предварительно проведенные вычислительные эксперименты показали, что для рассматриваемого ниже примера рациональными значениями являются: $N = 80$; $k_{max} = 100$.

Результаты исследования. Апробация разработанной методики выполнена на практическом примере выбора оптимального состава оборудования ГСЭС, территориально расположенной в районе г. Владивосток ($43^\circ 6'$ с.ш., $135^\circ 42'$ в.д.) и предназначенной для электроснабжения изолированного потребителя с зимним максимумом нагрузки 10 кВт. Выбор данного района размещения ГСЭС обоснован тем, что данный российский регион характеризуется относительно высокими значениями энергетического потенциала ветра и солнечного излучения, что определяет хорошие перспективы применения установок ВИЭ. Для обеспечения необходимого уровня надежности проектируемая ГСЭС должна иметь в своем составе гарантированный источник питания, задача исследований заключалась в сравнительном анализе возможных конфигураций построения электроэнергетической системы с применением установок ВИЭ.

Интегральные показатели временных рядов данных, полученные по результатам статистической обработки данных многолетних метеонаблюдений, приведены в табл. 1, сформированные на их основе временные ряды показаны на рис. 2.

Для построения временного ряда солнечной радиации использовались данные NASA [25] за 22-летний период наблюдений, временные ряды скорости ветра и температуры воздуха построены по данным сайта «Расписание погоды»³ за 15-летний период наблюдений по метеостанции № 31960. График нагрузок построен на основе типового графика электростанции.

³ Сайт «Расписание погоды». – <https://rp5.ru/> ((дата обращения: 20.06.2020).

трических нагрузок коммунально-бытового потребителя.

Основные технико-экономические характеристики генерирующего оборудования проектируемой ГСЭС представлены в табл. 2. Технические характеристики обо-

дования определены по данным их технической спецификации, экономические показатели установлены по данным [3, 5, 10]. Для перевода стоимости оборудования в отечественную валюту использовался курс 70 руб/\$.

Таблица 1. Интегральные показатели временных рядов данных

Показатель	Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июн.	Июл.	Авг.	Сен.	Окт.	Ноя.	Дек.	
Индекс прозрачности	0,64	0,66	0,6	0,52	0,48	0,46	0,41	0,44	0,52	0,56	0,56	0,6	
Альbedo поверхности	0,19	0,21	0,16	0,12	0,12	0,16	0,14	0,14	0,13	0,11	0,12	0,16	
Средняя скорость ветра, м/с	6,1	5,8	5,7	5,8	5,7	5,4	5,3	5,2	4,9	5,6	6	6	
Параметры распределения Вейбулла	c	6,186	5,462	5,807	5,911	9,033	5,482	5,734	4,451	5,154	5,849	6,122	6,012
	k	1,913	1,533	1,691	1,717	1,791	1,825	1,647	1,739	1,731	1,75	1,775	1,756
Средняя температура, °С	-12,2	-8,5	-1,9	4,9	9,8	14,0	18,3	20,8	16,4	9,4	-0,3	-9,9	
Суточная амплитуда температуры, °С	7,1	7,2	6,6	7,5	8	6,7	5,7	5,6	6,7	7	6,1	6,6	
Коэффициент сезонности нагрузки	1	1	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	1	

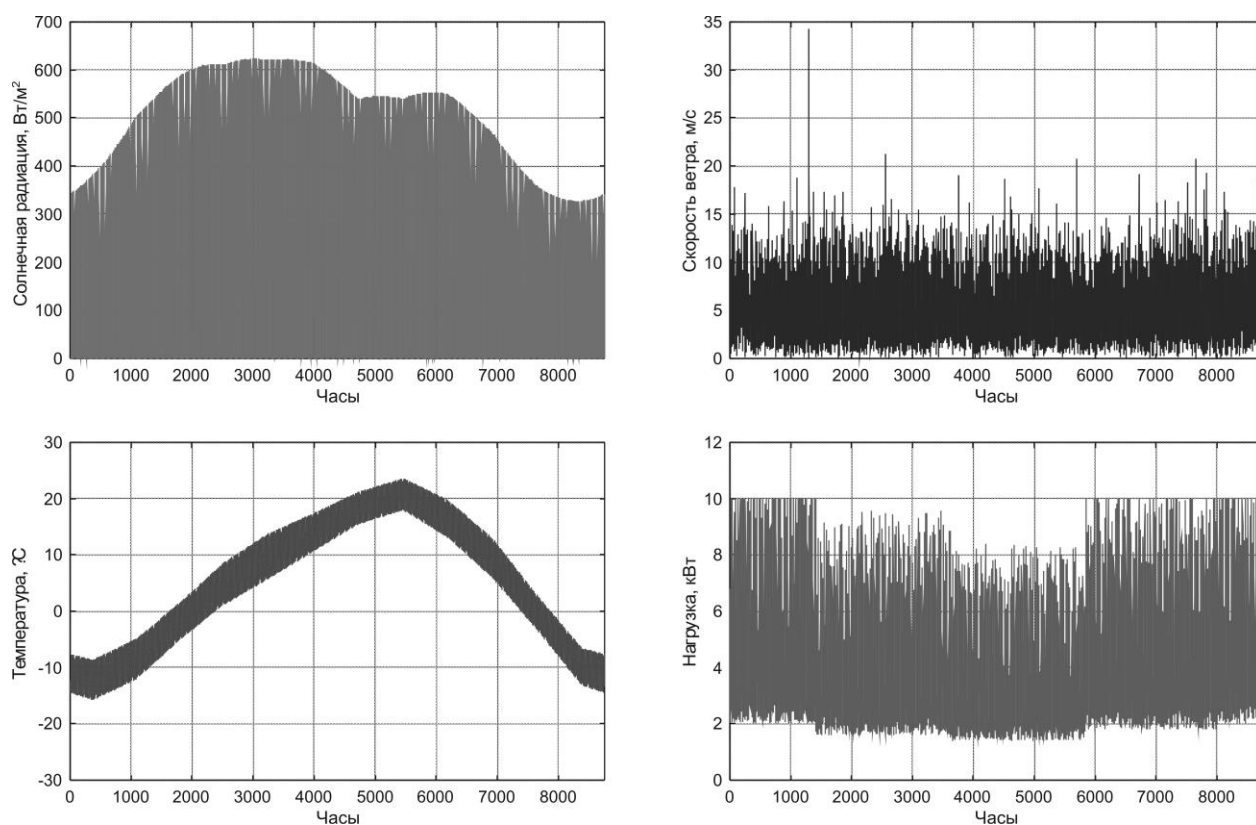


Рис. 2. Временные ряды климатических данных и график нагрузки потребителя

Таблица 2. Основные технико-экономические характеристики генерирующего оборудования

Показатель	Оборудование				
	ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB	ВЭУ Aeolos H2KW	АБ НОРПЕКЕ 8OPzS 800	ДГ Perkins 403D-15G	инверторы Victron Phoenix3000
Номинальная мощность (емкость)	320 Вт	2 кВт	1,6 кВт·ч	12 кВт	12 кВт
Капитальные затраты, тыс. руб.	56	294	25,2	700	602
Затраты на обслуживание, тыс. руб.	0,56	11,9	0,25	23,1 руб/ч	0
Срок службы	20 лет	20 лет	5 лет	15000 час	10 лет

Экономические характеристики генерирующего оборудования, приведенные в табл. 2, включают затраты на монтажные и пусконаладочные работы, а также соответствующие преобразователи для ФЭУ, ВЭУ и АБ. Процентная ставка в расчетах принята равной $i = 7\%$, срок жизненного цикла системы составляет $T = 20$ лет. Солнечная батарея установлена под углом 43° к поверхности и ориентирована на юг, абсолютный расход дизельного топлива ДГ при номинальной нагрузке составляет 3,67 литра, допустимая глубина разряда АБ принята равной 70% , максимальная зарядная мощность $P_{ch,max} = 0,2 \cdot SOC_{max}$.

Для проектируемой ГСЭС с ВИЭ выбрана смешанная архитектура построения с двумя сборными шинами постоянного (DC) и переменного (AC) тока, получившая наибольшее распространение для построения электроэнергетических систем небольшой мощности [33] (рис. 3).

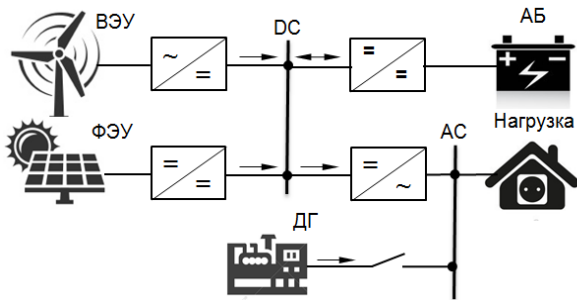


Рис. 3. Схема построения гибридной электроэнергетической системы

При таком построении ГСЭС генерирующие установки ВИЭ подключаются через индивидуальные преобразователи к шине DC, на которой производится регулирование баланса мощности. Шина AC используется для подключения к ней нагрузки и ДГ. Если в АБ имеется достаточный запас энергии, нагрузка получает питание от ФЭУ и ВЭУ через автономный инвертор напряжения. При снижении остаточной емкости АБ ниже установленного предела система управления формирует управляющий сигнал на включение ДГ, который обеспечивает электроснабжение потребителей, а АБ в этом режиме заряжается от установок ВИЭ.

Важным достоинством ГСЭС с ВИЭ является экономия дизельного топлива, стоимость которого с учетом доставки в отдаленные, труднодоступные районы может быть очень высокой. Стоимость ди-

зельного топлива была принята равной 46,9 руб/л.

В табл. 3 представлены результаты решения задачи оптимизации состава оборудования ГСЭС различных конфигураций.

Таблица 3. Оптимальный состав оборудования ГСЭС в различных конфигурациях

Конфигурация ГСЭС	Количество единиц оборудования				LCOE, руб/кВт·ч
	N_{PV}	N_{WT}	N_{batt}	N_{DG}	
ДГ	0	0	0	1	41,4
ДГ-ФЭУ-АБ	86	0	73	1	37,7
ДГ-ВЭУ-АБ	0	14	40	1	36,1
ДГ-ФЭУ-ВЭУ-АБ	39	8	38	1	31,9

В базовом варианте построения ГСЭС на основе одного рабочего ДГ суммарный расход топлива составляет 13990 литров при годовом объеме потребляемой энергии 31690 кВт·ч. Включение в состав ГСЭС установок ВИЭ обеспечивает значительное снижение моточасов работы ДГ, чем достигается сохранение их эксплуатационного ресурса и экономия дизельного топлива.

Результаты проведенных исследований показывают, что при принятых технико-экономических характеристиках генерирующего оборудования минимальная выровненная себестоимость электроэнергии соответствует конфигурации с одновременным применением ФЭУ и ВЭУ. Расчетное годовое число моточасов ДГ в данной конфигурации составляет 742 часа при годовом расходе топлива 1123 литра. В сравнении с базовым вариантом ГСЭС, стоимость электроэнергии в такой электроэнергетической системе уменьшается практически в 1,3 раза. Сравнительные диаграммы затрат для базовой и предложенной конфигурации ГСЭС показаны на рис. 4.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что ГСЭС с ВИЭ являются конкурентоспособными наряду с традиционными системами электроснабжения изолированных потребителей, преимущественно базирующимися на базе дизель-генераторных установок. Объясняется это тем, что в рассматриваемом регионе обеспечивается относительно высокий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) установок возобновляемой энергетики: расчетные зна-

чения КИУМ составляют около 19 % для ВЭУ и 17 % для ФЭУ.

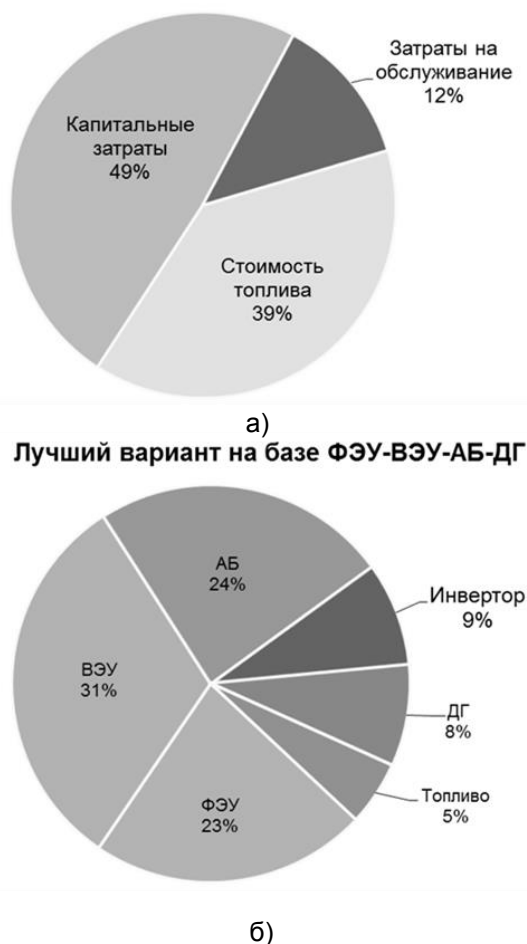


Рис. 4. Структура общих затрат на электроэнергетическую систему: а – базовый вариант на основе ДГ; б – вариант на базе ФЭУ/ВЭУ/АБ/ДГ

Выводы. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии, реализованная в виде программного приложения. Предлагаемая методика может быть использована для выбора оптимального состава оборудования ГСЭС различных конфигураций, территориально расположенных в любом регионе России, в том числе и в районах, для которых отсутствуют результаты актинометрических наблюдений. Входящий в состав методики модуль оптимизации на основе алгоритма роя частиц обеспечивает надежное и точное определение экстремума целевой функции, чем обеспечивается повышение эффективности проектирования и функционирования гибридных электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками энергии.

Список литературы

1. Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. – 2019. – Т. 2, вып. 2. – С. 111–120. doi: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
2. Askarzadeh A., Coelho L.S. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran // Solar Energy. – 2015. – Vol. 112. – P. 383–396. doi: 10.1016/j.solener.2014.12.013
3. Maleki A., Pourfayaz F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms // Solar Energy. – 2015. – Vol. 115. – P. 471–483. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.004
4. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico / V.M. Sanchez, A.U. Chavez-Ramirez, S.M. Duron-Torres, et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Vol. 39, No. 29. – P. 16646–16665. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.034
5. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia / A.H. Mamaghani, S.A.A. Escandon, B. Najafi, et al. // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 97. – P. 293–305. doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086
6. Odou O.D.T., Bhandari R., Adamou R. Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 145. – P. 1266–1279. doi: 10.1016/j.renene.2019.06.032
7. Sanajaoba S., Fernandez E. Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 96. – P. 1–10. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.069
8. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system / X. Xu, W. Hu, D. Cao, et al. // Renewable Energy. – 2020. – Vol. 147, part 1. – P. 1418–1431. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099
9. Rouhani A.A., Kord H., Mehrabi M. Comprehensive Method for Optimum Sizing of Hybrid Energy Systems using Intelligence Evolutionary Algorithms // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 6, No. 6. – P. 4702–4712. doi: 10.17485/ijst/2013/v6i6/33924
10. Maleki A. Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2018. – Vol. 13, No. 2. – P. 140–147. doi: 10.1093/ijlct/cty006

11. **Hamanah W.M., Abido M.A., Alhems L.M.** Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 45. – P. 1871–1883. doi: 10.1007/s13369-019-04292-w
12. **Cho J.H., Chun M.G., Hong W.P.** Structure Optimization of Stand-Alone Renewable Power Systems Based on Multi Object Function // *Energies*. – 2016. – Vol. 9, No. 8. – P. 1–19. doi: 10.3390/en9080649
13. **Multi-Objective** Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER / J. Lu, W. Wang, Y. Zhang, S. Cheng // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, No. 10. – P. 1–17. doi: 10.3390/en10101664
14. **Sharafi M., ELMekawy T.Y.** Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach // *Renewable Energy*. – 2014. – Vol. 68. – P. 67–79. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.011
15. **Multi-objective** optimal design of hybrid renewable energy system under multiple scenarios / R. Wang, J. Xiong, M. He, et al. // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 151. – P. 226–237. doi: 10.1016/j.renene.2019.11.015
16. **Singh S., Singh M., Kaushik S.C.** A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems // *International Journal of Green Energy*. – 2016. – Vol. 13, No. 15. – P. 1564–1578. doi: 10.1080/15435075.2016.1207079
17. **Saharia B.J., Brahma H., Sarmah N.** A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2018. – Vol. 10(053502). – P. 1–33. doi: 10.1063/1.5032146
18. **Singh S.S., Fernandez E.** Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system // *Energy*. – 2018. – Vol. 143. – P. 719–731. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.053
19. **Sinha S., Chandel S.S.** Review of software tools for hybrid renewable energy systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 32. – P. 192–205. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.035
20. **Елистратов В.В.** Автономное энерго-снабжение территорий России энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии // *Энергетический вестник*. – 2016. – № 21. – С. 42–49.
21. **Обухов С.Г., Хошнау З.П.** Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами // *Электрические станции*. – 2012. – № 11. – С. 43–47.
22. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ)*. – 2017. – № 16–18. – С. 43–56. doi: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056
23. **Stand-alone** hybrid energy systems for remote area power generation / A. Razmjoo, R. Shirmohammadi, A. Davarpanah, et al. // *Energy Reports*. – 2019. – Vol. 5. – P. 231–241. doi: 10.1016/j.egy.2019.01.010
24. **Phommixay S., Doumbia M.L., St-Pierre D.L.** Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. – 2020. – Vol. 11. – P. 73–89. doi: 10.1007/s40095-019-00332-1
25. **The NASA** Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. – <https://power.larc.nasa.gov/#dataaccess> – (Дата обращения: 20.06.2020).
26. **Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П.** Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2011. – № 2. – С. 25–30.
27. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 38–51.
28. **Eriksson E.L.V., Gray E.M.** Optimization of renewable hybrid energy systems – A multi-objective approach // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 133. – P. 971–999. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.053
29. **Optimization** of the Operation of Isolated Industrial Diesel Stations / C.F. Matt, L.S.R. Vieira, G.F.W. Soares, L.P.T. de Faria // *6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO6)*. – Rio de Janeiro, 2005. – P. 1–8.
30. **Kennedy J., Eberhart R.** Particle swarm optimization // *Proceedings International Conference on Neural Networks*. – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968
31. **Shi Y., Eberhart R.** A modified particle swarm optimizer // *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*. – 1998. – P. 69–73. doi: 10.1109/ICEC.1998.699146
32. **Optimal** performance of dynamic particle swarm optimization based maximum power trackers for stand-alone PV system under partial shading conditions / S. Obukhov, A. Ibrahim, A.A.Z. Diab, et al. // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 20770–20785. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966430
33. **Chauhan A., Saini R.P.** A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // *Renewable and*

References

1. Lyukaytis, V.Yu., Glushkov, S.Yu. Avtonomnye energokompleksy, gibridnye konstruksii s primeneniem vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Autonomous energy complexes, hybrid structures using renewable energy sources]. *Silovoe i energeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy*, 2019, vol. 2, issue 2, pp. 111–120. (in Russ.) doi: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
2. Askarzadeh, A., Coelho, L.S. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran. *Solar Energy*, 2015, vol. 112, pp. 383–396. doi: 10.1016/j.solener.2014.12.013
3. Maleki, A., Pourfayaz, F. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms. *Solar Energy*, 2015, vol. 115, pp. 471–483. doi: 10.1016/j.solener.2015.03.004
4. Sanchez, V.M., Chavez-Ramirez, A.U., Duron-Torres, S.M., Hernandez, J., Arriaga, L.G., Ramirez, J.M. Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, vol. 39, no. 29, pp. 16646–16665. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.06.034
5. Mamaghani, A.H., Escandon, S.A.A., Najafi, B., Shirazi, A., Rinald, F. Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia. *Renewable Energy*, 2016, vol. 97, pp. 293–305. doi: 10.1016/j.renene.2016.05.086
6. Odou, O.D.T., Bhandari, R., Adamou, R. Hybrid off-grid renewable power system for sustainable rural electrification in Benin. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 1266–1279. doi: 10.1016/j.renene.2019.06.032
7. Sanajaoba, S., Fernandez, E. Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System. *Renewable Energy*, 2016, vol. 96, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.renene.2016.04.069
8. Xu, X., Hu, W., Cao, D., Huang, Q., Chen, C., Chen, Z. Optimized sizing of a standalone PV-wind-hydropower station with pumped-storage installation hybrid energy system. *Renewable Energy*, 2020, vol. 147, part 1, pp. 1418–1431. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.099
9. Rouhani, A., Kord, H., Mehrabi, M. A Comprehensive Method for Optimum Sizing of Hybrid Energy Systems using Intelligence Evolutionary Algorithms. *Indian Journal of Science and Technology*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 4702–4712. doi: 10.17485/ijst/2013/v6i6/33924
10. Maleki, A. Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 140–147. doi: 10.1093/ijlct/cty006
11. Hamanah, W.M., Abido, M.A., Alhems, L.M. Optimum Sizing of Hybrid PV, Wind, Battery and Diesel System Using Lightning Search Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, vol. 45, pp. 1871–1883. doi: 10.1007/s13369-019-04292-w
12. Cho, J.H., Chun, M.G., Hong, W.P. Structure Optimization of Stand-Alone Renewable Power Systems Based on Multi Object Function. *Energies*, 2016, vol. 9, no. 8, pp. 1–19. doi: 10.3390/en9080649
13. Lu, J., Wang, W., Zhang, Y., Cheng, S. Multi-Objective Optimal Design of Stand-Alone Hybrid Energy System Using Entropy Weight Method Based on HOMER. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 10, pp. 1–17. doi: 10.3390/en10101664
14. Sharafi, M. ELMekkawy, T.Y. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach. *Renewable Energy*, 2014, vol. 68, pp. 67–79. doi: 10.1016/j.renene.2014.01.011
15. Wang, R., Xiong, J., He, M., Gao, L., Wang, L. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy system under multiple scenarios. *Renewable Energy*, 2020, vol. 151, pp. 226–237. doi: 10.1016/j.renene.2019.11.015
16. Singh, S., Singh, M., Kaushik, S.C. A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems. *International Journal of Green Energy*, 2016, vol. 13, no. 15, pp. 1564–1578. doi: 10.1080/15435075.2016.1207079
17. Saharia, B.J., Brahma, H., Sarmah, N. A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2018, vol. 10(053502), pp. 1–33. doi: 10.1063/1.5032146
18. Singh, S.S., Fernandez, E. Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system. *Energy*, 2018, vol. 143, pp. 719–731. doi: 10.1016/j.energy.2017.11.053
19. Sinha, S., Chandel, S.S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 32, pp. 192–205. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.035
20. Elistratov, V.V. Avtonomnoe energosnabzhenie territoriy Rossii energokompleksami na baze vozobnovlyaemykh istochnikov energii [Autonomous energy supply of Russian territories with energy complexes based on renewable energy sources]. *Energeticheskii vestnik*, 2016, no. 21, pp. 42–49. (in Russ.)
21. Obukhov, S.G., Hoshnau, Z.P. Prognozirovaniye rezhimov potrebleniya elektricheskoy energii avtonomnymi

energeticheskimi sistemami [Prediction of modes of electric energy consumption with autonomous energy systems]. *Elektricheskie stantsii*, 2012, no. 11, pp. 43–47. (in Russ.)

22. Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. Matematicheskaya model' prikhoda solnechnoy radiatsii na proizvol'no-orientirovannuyu poverkhnost' dlya lyubogo regiona Rossii [Mathematical Model of Solar Radiation Incident on an Arbitrarily Oriented Surface for Any Region in Russia]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE)*, 2017, no. 16–18, pp. 43–56. (In Russ.) doi: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056

23. Razmjoo, A., Shirmohammadi, R., Davarpanah, A., Pourfayaz, F., Aslani, A. Stand-alone hybrid energy systems for remote area power generation. *Energy Reports*, 2019, vol. 5, pp. 231–241. doi: 10.1016/j.egy.2019.01.010

24. Phommixay, S., Doumbia, M.L., St-Pierre, D.L. Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2020, vol. 11, pp. 73–89. doi: 10.1007/s40095-019-00332-1

25. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. – <https://power.larc.nasa.gov/#dataaccess>

26. Obukhov, S.G., Surkov, M.A., Khoshnau, Z.P. Metodika vybora vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti [Method for selecting low-power wind power plants]. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*, 2011, no. 2, pp. 5–30. (in Russ.)

27. Obukhov, S.G., Plotnikov, I.A. Imitatsionnaya model' rezhimov raboty avtonomnoy fotoelektricheskoy stantsii s uchetom real'nykh usloviy ekspluatatsii [Simulation model of operation of autonomus photovoltaic plant under actual

operating condition]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurosov*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. (in Russ.)

28. Eriksson, E.L.V., Gray, E.M. Optimization of renewable hybrid energy systems – A multi-objective approach. *Renewable Energy*, 2019, vol. 133, pp. 971–999. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.053

29. Matt, C.F., Vieira, L.S.R., Soares, G.F.W., de Faria, L.P.T. Optimization of the Operation of Isolated Industrial Diesel Stations. 6th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO6). Rio de Janeiro, 2005, pp. 1–8.

30. Kennedy, J., Eberhart, R. Particle swarm optimization. *Proceedings International Conference on Neural Networks*, 1995, vol. 4, pp. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968

31. Shi, Y., Eberhart, R. A modified particle swarm optimizer. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*, 1998, pp. 69–73. doi: 10.1109/ICEC.1998.699146

32. Obukhov, S., Ibrahim, A., Diab, A.A.Z., Al-Sumaiti, A.S., Aboelsaud, R. Optimal performance of dynamic particle swarm optimization based maximum power trackers for stand-alone PV system under partial shading conditions. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 20770–20785. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966430

33. Chauhan, A., Saini, R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 38, pp. 99–120. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.079