

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

С.Г. Обухов, А. Ибрагим

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия*

Статья посвящена разработке методики и программного приложения для оптимизации состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Приведено описание предлагаемой методики и математических моделей основных компонентов гибридных систем: фотоэлектрической станции, ветроэнергетической установки, аккумуляторной батареи и дизель-генераторной установки. Отличительной особенностью предлагаемой методики является использование для прогнозирования солнечной радиации оригинальной модели на базе данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства. Это позволяет ее использовать для прогнозирования 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, что обеспечивает повышение достоверности прогнозирования выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой на суточных временных интервалах. Для решения оптимизационной задачи используется эволюционный алгоритм роя частиц, который обеспечивает надежное и эффективное определение глобального экстремума целевой функции при различных критериях оптимизации и ограничениях. Рассмотрен практический пример применения методики для выбора оптимального состава оборудования гибридной энергетической системы с различной конфигурацией оборудования, территориально размещенной в районе города Владивостока. Методика реализована в виде программного приложения в популярном математическом комплексе MATLAB, что обеспечивает удобство ее практического применения.

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

Введение

Одной из наиболее востребованных и активно развивающихся технологий производства электрической энергии в настоящее время являются гибридные энергетические системы с возобновляемыми источниками энергии (hybrid renewable energy systems – HRES) [1, 2].

Первоочередной областью практического применения HRES является электроснабжение потребителей, территориально расположенных в труднодоступных районах, удаленных от центральной электрической сети. Огромные территории с плохо развитой транспортной инфраструктурой и низкая плотность населения определяют хорошие перспективы практического применения HRES в России. По оценкам Минэнерго РФ потенциал для малой генерации насчитывает около 100 тыс. небольших изолированных поселений по всей территории России, в том числе в ряде районов Крайнего Севера и Дальнего Востока, где обеспечить централизованное энергоснабжение невозможно по техническим и экономическим причинам [3]. Велик потенциал развития малой

генерации на объектах инфраструктуры Северного морского пути, объектов Министерства обороны РФ, Министерства природных ресурсов и др. Это энергоснабжение метеорологических станций, маяков, военной техники, судового оборудования, объектов сотовой связи, рыбацких хозяйств, кемпингов, технологических потребителей нефте- и газопроводов [4].

В общем случае в составе HRES могут использоваться генерирующие источники различной физической природы, однако наибольшее распространение получили HRES на основе фотоэлектрических (photovoltaic – PV) и ветроэнергетических установок (wind turbines – WT) [5]. Объясняется это тем, что энергия ветра и солнечного излучения являются наиболее доступными видами энергии, энергетические установки на их основе выпускаются на широкий диапазон мощностей и их можно максимально приблизить к потребителям электроэнергии, что особенно важно для автономной энергетики. Для сглаживания баланса мощностей в составе большинства автономных HRES применяются накопители энергии на основе

аккумуляторных батарей (battery bank – BB) и/или топливных элементов (fuel cell – FC), в качестве гарантированного источника питания чаще всего применяются дизель-генераторные установки (DG).

HRES могут значительно различаться по установленной мощности, типу и количеству генерирующих источников, архитектуре построения, алгоритмам управления режимами и т. п. [1, 5, 6]. При этом неизменной и важной задачей проектирования любой HRES является выбор состава основного энергетического оборудования, при котором будут обеспечены необходимая надежность энергетической системы и хорошие технико-экономические показатели. Стохастический характер первичных энергоносителей и нелинейность характеристик генерирующих источников определяют высокую сложность решения данной проблемы, которая с математической точки зрения формулируется как оптимизационная задача.

Решению задач оптимизации состава оборудования HRES в последнее время посвящено большое количество научных работ, авторы которых используют разнообразные критерии и алгоритмы оптимизации, применяют и разрабатывают различные модели компонентов HRES [7, 8]. Проведенный обзор современных научных работ, посвященных оптимизации состава оборудования HRES, показал, что основными проблемами решения данной задачи являются достоверное прогнозирование мощности, генерируемой установками возобновляемой энергетики, и выбор алгоритма решения оптимизационной задачи, обеспечивающего надежное определение экстремума целевой функции при заданных ограничениях с минимальными временными затратами. Применение разнообразных приемов и способов достижения цели исследований свидетельствует о том, что на сегодняшний день научная проблема оптимизации состава оборудования HRES остается актуальной и не имеет законченного решения.

Цель настоящей работы состояла в разработке методики оптимизации состава оборудования HRES, обеспечивающей ее практическое применение для выбора оборудования энергетических систем, территориально расположенных в любом регионе России. Необходимость создания такой методики отмечается авторами работ [9, 10], посвященных решению аналогичных научно-исследовательских задач. Отличительной особенностью разработанной методики является использование для прогнозирования солнечной радиации оригинальной модели на базе данных Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration – NASA) [11] и применение функции обратного распределения Вейбулла для прогнозирования суточного хода скорости ветра.

Предлагаемая методика построена на основе алгоритма роя частиц (particle swarm optimization –

PSO), который является одним из самых распространенных для решения задач оптимизации HRES [12–14]. Результаты сравнения алгоритма PSO с другими видами алгоритмов при решении задач оптимизации состава оборудования HRES доказывают его высокую производительность [2, 15–17], а также надежное функционирование при использовании различных целевых функций и ограничений [18].

В качестве основного инструмента при проведении исследований использовался программный комплекс MATLAB, в котором и реализована математическая модель оптимизационной задачи.

Формирование временных рядов данных

Так как режимы работы HRES определяются соотношением мощностей, генерируемой источниками энергии и потребляемой нагрузкой, для их моделирования необходимо сформировать временные ряды климатических данных и графика нагрузки потребителя. Климатические ряды данных формируются на основе географических координат размещения HRES и данных многолетних наблюдений ближайшей метеостанции, для построения графика электрических нагрузок используются имеющиеся данные об объекте электрообеспечения.

В настоящей работе для построения временного ряда солнечной радиации $G(t)$ используется комбинированная модель, в которой часть параметров рассчитывается по аналитическим выражениям, а часть определяется с помощью эмпирических коэффициентов, полученных из базы данных NASA [11] для заданной в расчетах географической точки размещения солнечной батареи (СБ). Суммарная солнечная радиация, поступающая на поверхность СБ, определяется по выражению

$$G = (G_H - G_{DH}) \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + G_{DH} \cdot \left[A_i \cdot \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} + (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] + G_H \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (1)$$

где G_H , G_{DH} – значения суммарной и рассеянной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность, соответственно, Вт/м²; θ – угол между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней, рад; θ_z – зенитный угол Солнца, рад; ρ – альbedo земной поверхности; β – угол наклона приемной площадки к горизонтальной плоскости, рад; A_i – показатель анизотропии, который определяется по уравнению

$$A_i = \frac{G_H - G_{DH}}{G_0}, \quad (2)$$

где $G_0 = 1367$ Вт/м² – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность.

Используемая в настоящих исследованиях модель солнечной радиации подробно описана в работе [11]. Особенностью модели является использование в качестве исходных данных численных значений индекса прозрачности атмосферы и альbedo поверхности, полученных из базы данных NASA. Это позволяет использовать модель для прогнозирования основных характеристик солнечного излучения в любой географической точке России, в том числе и для территорий, по которым отсутствуют результаты регулярных актинометрических наблюдений.

Для построения временного ряда скоростей ветра $V(t)$ экспериментальные данные о скорости ветра аппроксимируются стандартной функцией распределения Вейбулла:

$$F(V) = 1 - e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k}, \quad (3)$$

где c – параметр масштаба; k – параметр формы; $F(V)$ – функция интегральной повторяемости скорости ветра.

С помощью известных методов статистической обработки экспериментальных данных, подробно представленных в [19], предварительно определяются значения коэффициентов c и k для каждого месяца года, и на их основе формируется временной ряд скоростей ветра для необходимого промежутка времени согласно распределению

$$V(t) = c \cdot \left[-\ln(1 - F(V)) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

Результаты предварительно проведенных исследований показали, что использование функции обратного распределения Вейбулла (4) позволяет значительно повысить достоверность прогнозирования выработки электроэнергии WT на суточных временных интервалах.

Для построения временного ряда температуры воздуха $T(t)$ используется модель суточного хода температуры [20], согласно которой

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

где \bar{T} – среднесуточная температура воздуха, °C; ΔT – суточная амплитуда температуры воздуха, °C; $t_{\text{пер}}$ – период изменения температуры воздуха, ч; t_{max} – местное время максимума температуры, ч; $t_{\text{мест}}$ – локальное (местное) солнечное время, ч.

Модель суточного хода температуры применима для любого дня года и любого населенного пункта, а ее применение обосновано тем, что изменения температуры в северных широтах имеют явно выраженный суточный ход, учет которого позволяет повысить точность прогнозирования выработки электроэнергии PV.

Для построения временного ряда графика электрических нагрузок используется вероятностно-статистическая модель электрических нагрузок децентрализованного потребителя [21]:

$$P_{\text{load}}(t) = \bar{P}_{ik} \cdot k_{sk} \pm \beta \cdot \sigma(P_{ik}), \quad (6)$$

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

Используемая в данной работе вероятностно-статистическая модель позволяет получить достаточно точный детальный прогноз режимов потребления электрической энергии для конкретного объекта электроснабжения со специфическими для него особенностями.

Временные ряды данных формируются на первом этапе исследований, сохраняются в виде .mat файлов и используются в дальнейшем для моделирования рабочих режимов HRES. Такая организация вычислений позволяет значительно снизить требования к вычислительным ресурсам компьютера, а также обеспечивает возможность решения оптимизационной задачи с различными критериями оптимизации и ограничениями.

Модели компонентов

Для решения задач оптимизации состава оборудования HRES преимущественно используются упрощенные «энергетические» модели компонентов, однозначно связывающие их выходные энергетические характеристики с внешними факторами и входными воздействиями [12, 14, 17].

В настоящей работе для определения выходной электрической мощности СБ используется следующее выражение [20]:

$$P_{PV} = C_{FF} \cdot N_{FM} \cdot \eta_{\text{conv}} \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G) / T_{FM}, \text{ Вт}, \quad (7)$$

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, Вт/м²; T_{FM} – текущая температура ФМ, К.

Численные значения коэффициента C_{FF} определяются по уравнению

$$C_{FF} = \frac{FF \cdot T_{\text{ref}}}{G_{\text{ref}}} \times \frac{[I_{SC} + k_I(T_{FM} - T_{\text{ref}})] \cdot [V_{OC} + k_V(T_{FM} - T_{\text{ref}})]}{\ln(10^6 \cdot G_{\text{ref}})}, \quad (8)$$

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:

$$FF = I_{MPP} \cdot V_{MPP} / I_{SC} \cdot V_{OC}, \quad (9)$$

где I_{MPP} , V_{MPP} – паспортные значения тока и на-

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

Для определения температуры поверхности ФМ используется эмпирическое выражение, полученное по результатам статистической обработки экспериментальных данных, полученных в условиях эксплуатации кремниевых ФМ в Сибири [20]:

$$T_{FM} = T + 0,0283 \cdot G - 0,0058 \cdot G \cdot V + 0,0005 \cdot G \cdot V^2, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

где T – температура окружающего воздуха, $^\circ\text{C}$; V – скорость ветра, м/с; G – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м².

Нужно отметить, что многие авторы в своих исследованиях принимают температуру поверхности ФМ, равной температуре окружающего воздуха, что обуславливает заметное снижение точности расчетов при определении выходной электрической мощности СБ. Результаты эксплуатации фотоэлектрических станций показывают, что превышение температуры ФМ над температурой внешней среды при высоких значениях солнечной инсоляции может достигать 30 $^\circ\text{C}$, поэтому учет реальной температуры ФМ в эксплуатационных условиях позволяет существенно повысить достоверность результатов при определении выходной мощности СБ P_{PV} .

Выходная электрическая мощность WT определяется скоростью ветра, набегающего на ветроколесо, и рабочей характеристикой, заявленной ее производителем. В настоящей работе для определения выходной мощности WT используется пространственная «кубическая» аппроксимация рабочей характеристики [12, 14]:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_{in} \\ \left(\frac{V^3 - V_{in}^3}{V_{rat}^3 - V_{in}^3} \right) \cdot P_{WT_{rat}} & V_{in} < V < V_{rat} \\ P_{WT_{rat}} & V_{rat} < V < V_{up} \\ 0 & V > V_{up} \end{cases}, \quad (11)$$

где $P_{WT_{rat}}$ – номинальная мощность ветроэнергетической установки, Вт; V – скорость ветра, м/с; V_{in} – стартовая скорость ветра, м/с; V_{up} – предельная скорость ветра, м/с; V_{rat} – номинальная скорость ветра, м/с.

Если высота башни WT отличается от 10 м, на которой регистрируют параметры ветрового потока большинство метеостанций, для пересчета скорости ветра используется следующее эмпирическое выражение [13]:

$$V_h = V_{10} \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) / \ln\left(\frac{10}{z_0}\right), \quad (12)$$

где V_{10} – значение скорости ветра, измеренное на высоте 10 метров; V_h – значение скорости ветра на уровне ступицы ветроколеса; z_0 – шероховатость земной поверхности.

Математическая модель аккумуляторной батареи описывает два её возможных состояния: фазу заряда и фазу разряда. В фазе заряда ВВ уровень заряда (state of charge – SOC, Вт·ч) определяется по уравнению [14]

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma) + \left[P_{PV}(t) \cdot \eta_{PV} + P_{WT}(t) \cdot \eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \eta_{ch} \cdot \Delta t. \quad (13)$$

В фазе разряда ВВ уровень остаточного заряда определяется следующим образом:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t - \Delta t) \cdot (1 - \sigma) + \left[P_{PV}(t) \cdot \eta_{PV} + P_{WT}(t) \cdot \eta_{WT} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \frac{1}{\eta_{dis}} \cdot \Delta t, \quad (14)$$

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

При определении SOC для устройств хранения энергии необходимо выполнение следующих ограничений:

$$\text{SOC}_{min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{max}, \quad (15)$$

где SOC_{min} и SOC_{max} – минимальное и максимальное значение уровня заряда ВВ соответственно, Вт·ч.

Максимальное значение SOC_{max} , как правило, соответствует номинальной емкости устройства накопления энергии, нижний предел SOC_{min} определяется максимально допустимой глубиной разряда батареи (depth of discharge – DOD, %/100):

$$\text{SOC}_{min} = (1 - \text{DOD}) \cdot \text{SOC}_{max}. \quad (16)$$

Величина DOD зависит от типа ВВ и определяет срок службы устройств хранения энергии, так как с увеличением DOD значительно снижается количество рабочих циклов ВВ. Кроме того, необходимо учитывать, что аккумуляторные батареи имеют ограничение по максимальному зарядному току (или максимальной зарядной мощности $P_{ch,max}$), допустимое значение которого указывается в технической спецификации конкретной модели ВВ.

Характерной особенностью режимов DG, работающих в составе изолированных энергетических систем, являются режимы работы на резко переменную нагрузку, что обуславливает изменение в широком диапазоне величины удельного расхода топлива. Для определения удельного расхода топлива при частичных нагрузках DG в настоящих исследованиях используется следующее эмпирическое выражение, предложенное авторами работы [22]:

$$g = g_{rat} \cdot \frac{a + b \cdot k_{DG}}{c \cdot k_{DG} + 10^{-6}}, \quad (17)$$

где g_{rat} – удельный расход топлива при номинальной нагрузке, л/ч; a , b , c – постоянные коэффициенты, численные значения которых приняты в соответствии с рекомендациями [22]; k_{DG} – коэффициент загрузки DG.

Альтернативные источники энергии

Система контроля и управления

В качестве объекта анализа в данной работе рассматривается HRES со смешанной архитектурой построения [1], часто применяемая для энергетических систем небольшой мощности (рис. 1).

При таком построении HRES генерирующие установки возобновляемой энергетики подключаются через собственные преобразователи к сборной шине постоянного тока (DC), которая используется для регулирования баланса мощности. К этой же шине через реверсивный преобразователь подключается ВВ. Сборная шина переменного тока (AC) используется для подключения к ней нагрузки (Load) и DG. Если в ВВ имеется достаточный запас энергии, нагрузка получает питание от PV и WT через автономный инвертор напряжения. При снижении остаточной емкости ВВ ниже допустимого предела система управления форми-

рует управляющий сигнал на включение DG, который обеспечивает электроснабжение потребителей, а ВВ в этом режиме заряжается от PV и WT. Основные принципы управления режимами HRES поясняет рис. 2, на котором схематично представлена логика работы системы управления режимами заряда/разряда ВВ.

Целевая функция и ограничения

В данной работе в качестве критерия оптимизации используется показатель стоимости жизненного цикла (life cycle cost – LCC) или общие затраты на энергетическую систему в течение всего ее срока службы:

$$LCC = C_{cap} + Main, \quad (18)$$

где C_{cap} – общие капитальные затраты на проект, долл.; $Main$ – стоимость технического обслуживания, долл.

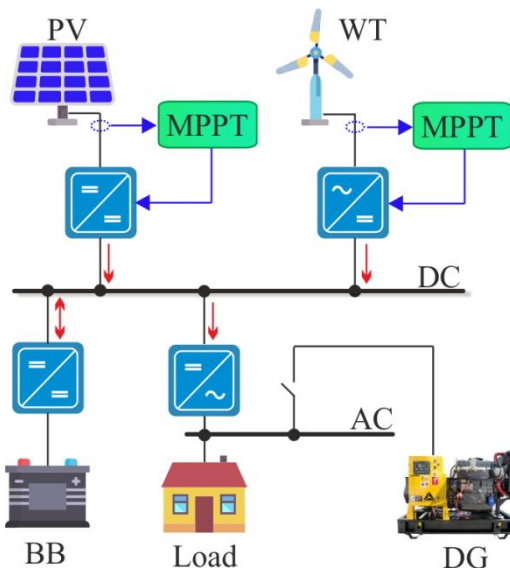


Рис. 1. Схема построения гибридной энергетической системы

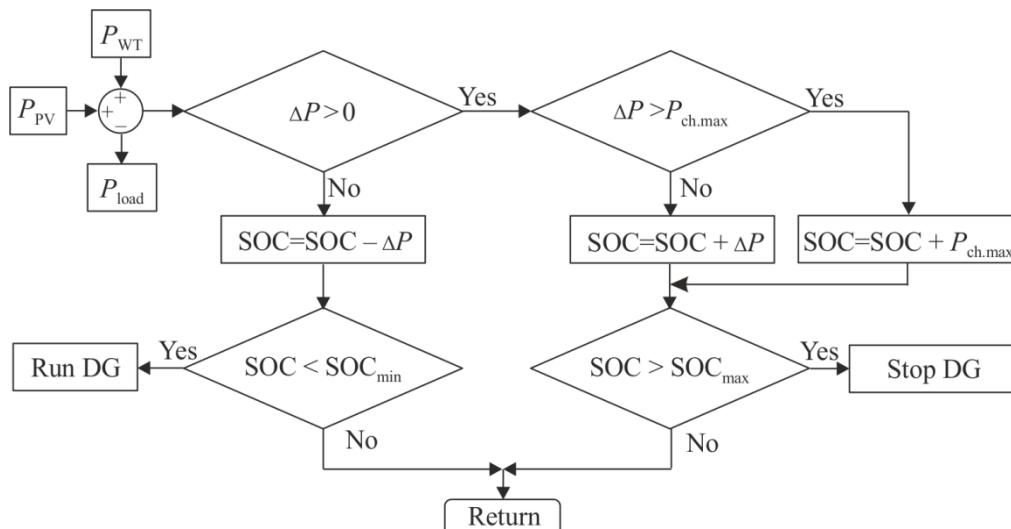


Рис. 2. Блок-схема системы управления гибридной энергетической системой

Так как капитальные вложения в проект производятся одновременно в начале его реализации, а затраты на обслуживание в течение всего жизненного цикла, капитальные затраты необходимо привести к виду ежегодных капитальных вложений. Для этого используют коэффициент возврата капитала (capital recovery factor – CRF), который определяется по формуле

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^T}{(1+i)^T - 1}, \quad (19)$$

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

С учетом того, что срок службы отдельных компонентов HRES может быть разным, их необходимо привести к условиям единовременного платежа. В большинстве практических случаев наименьший срок службы из всех компонентов энергетической системы имеют аккумуляторные батареи. Например, если значение жизненного цикла HRES принято равным $T = 20$ лет, а срок службы ВВ составляет 5 лет, для определения приведенной стоимости ВВ $C_{ВВ}$ необходимо использовать следующее выражение

$$C_{ВВ} = C_{ВВ,0} \cdot \left(1 + \frac{1}{(1+i)^5} + \frac{1}{(1+i)^{10}} + \frac{1}{(1+i)^{15}} \right), \quad (20)$$

где $C_{ВВ,0}$ – первоначальная цена ВВ, долл.

Для дизель-генераторных установок, срок службы которых определяется по количеству моточасов до капитального ремонта, приведенная стоимость рассчитывается по аналогичной (20) формуле после определения их срока службы по уравнению

$$T_{DG} = \frac{H_{OV}}{H_F}, \text{ лет}, \quad (21)$$

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

Для HRES в конфигурации PV-WT-BB-DG суммарные приведенные капитальные затраты определяются по уравнению

$$C_{ар} = CRF \times$$

$$\times (N_{WT} \cdot C_{WT} + N_{PV} \cdot C_{PV} + N_{BB} \cdot C_{BB} + C_{DG} + C_{inv}), \quad (22)$$

где N_{WT} , C_{WT} – количество и стоимость WT; N_{PV} , C_{PV} – количество и стоимость PV; N_{BB} , C_{BB} – количество и приведенная стоимость ВВ; C_{DG} – приведенная стоимость DG; C_{inv} – приведенная стоимость инвертора.

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

$$\begin{aligned} Main &= N_{WT} \cdot M_{WT} + N_{PV} \cdot M_{PV} + \\ &+ N_{BB} \cdot M_{BB} + M_{DG} + M_{fuel}, \end{aligned} \quad (23)$$

где M_{WT} , M_{PV} , M_{BB} , M_{DG} – ежегодные затраты на техническое обслуживание WT, PV, ВВ и DG; M_{fuel} – затраты на дизельное топливо, рассчитанные по результатам моделирования.

В качестве технических ограничений используются требования к надежности, которые в данной работе задаются в виде численного значения требуемого показателя вероятности потери питания (loss of power supply probability – LPSP*). Для обеспечения требуемого уровня надежности HRES должно выполняться следующее условие

$$LPSP \leq LPSP^*, \quad (24)$$

где LPSP – расчетная величина вероятности потери питания, которая определяется в результате моделирования режимов HRES по уравнению

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T P_{load}(t)}, \quad (25)$$

где $LPS(t)$ соответствует энергии, потребленной нагрузкой на временных интервалах, в которых остаточная емкость ВВ ниже минимально допустимого значения:

$$\begin{aligned} LPS(t) &= \frac{P_{load}(t)}{\eta_{inv}} - P_{PV}(t) - P_{WT}(t) - \\ &- |SOC(t-1) \cdot (1-\sigma) - SOC_{min}| \cdot \eta_{ch}. \end{aligned} \quad (26)$$

Горизонт моделирования режимов HRES в данной работе принят в один год, соответственно в уравнении (25) $T = 8760$.

Для оптимизационной задачи ограничениями также являются минимальное и максимальное количество ФМ в СБ N_{PV} , количество ветроэнергетических установок N_{WT} , число аккумуляторов в аккумуляторной батарее N_{BB} . Для конфигурации HRES с DG минимальное количество энергетического оборудования принимается равным нулю, для HRES без гарантированного источника питания минимальная емкость ВВ $Q_{ВВ}$ (кВт·ч) определяется с учетом требований к автономности, которая выражается в числе часов питания $T_{ВВ}$ (ч) потребителей от ВВ при отсутствии генерации от возобновляемых источников, допустимой глубины разряда DOD батарей, общей эффективности системы хранения энергии:

$$Q_{ВВ} \geq \frac{E_L \cdot T_{ВВ}}{24 \cdot DOD \cdot \eta_{ch} \cdot \eta_{inv}}, \quad (27)$$

где E_L – значение среднесуточной величины энергии (кВт·ч), 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 [23]. 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 .

Альтернативные источники энергии

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 большее распространение получил модифицированный алгоритм, предложенный Юхи Ши и Расселом Эберхартом в 1998 году [24], в котором в отличие от классического используется дополнительный коэффициент инерции w , который определяет градиент изменения скорости частиц. Модифицированный алгоритм PSO описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= v_i^k \cdot w + c_1 \cdot r_1 \cdot [Ppbest_i - x_i^k] + \\ &+ c_2 \cdot r_2 \cdot [Pgbest - x_i^k]; \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^{k+1}; \\ i &= 1, 2, \dots, N; \\ k &= 1, 2, \dots, k_{\max}, \end{aligned} \quad (28)$$

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 роя; k_{\max} – максимальное число итераций.

В данной работе используются численные значения и законы изменения коэффициентов инерции и ускорения, установленные в работе [25]. Число

частиц роя и максимальное число итераций алгоритма 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 оптимизации

Для апробации предлагаемой методики рассмотрен пример выбора состава оборудования HRES, предназначенной для электроснабжения изолированного потребителя с максимальной мощностью нагрузки 10 кВт, территориально расположенного в районе г. Владивостока ($43^\circ 6' \text{ с.ш.}, 135^\circ 42' \text{ в.д.}$). Сформированные временные климатические ряды и годовой график нагрузки потребителя представлены на рис. 3.

Для построения временного ряда солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность в г. Владивосток, использовались данные NASA за 22-летний период наблюдений, временные ряды скорости ветра и температуры воздуха построены по данным сайта «Расписание погоды» [26] за 15-летний период наблюдений по метеостанции № 31960. График электрических нагрузок построен на основе типового графика нагрузок коммунально-бытового потребителя, коэффициент сезонности изменяется от 0,7 в летние месяцы до 1 в зимние месяцы года. На каждом из графиков, представленных на рис. 3, наложены суточные тренды изменения соответствующих параметров для дня 9 мая.

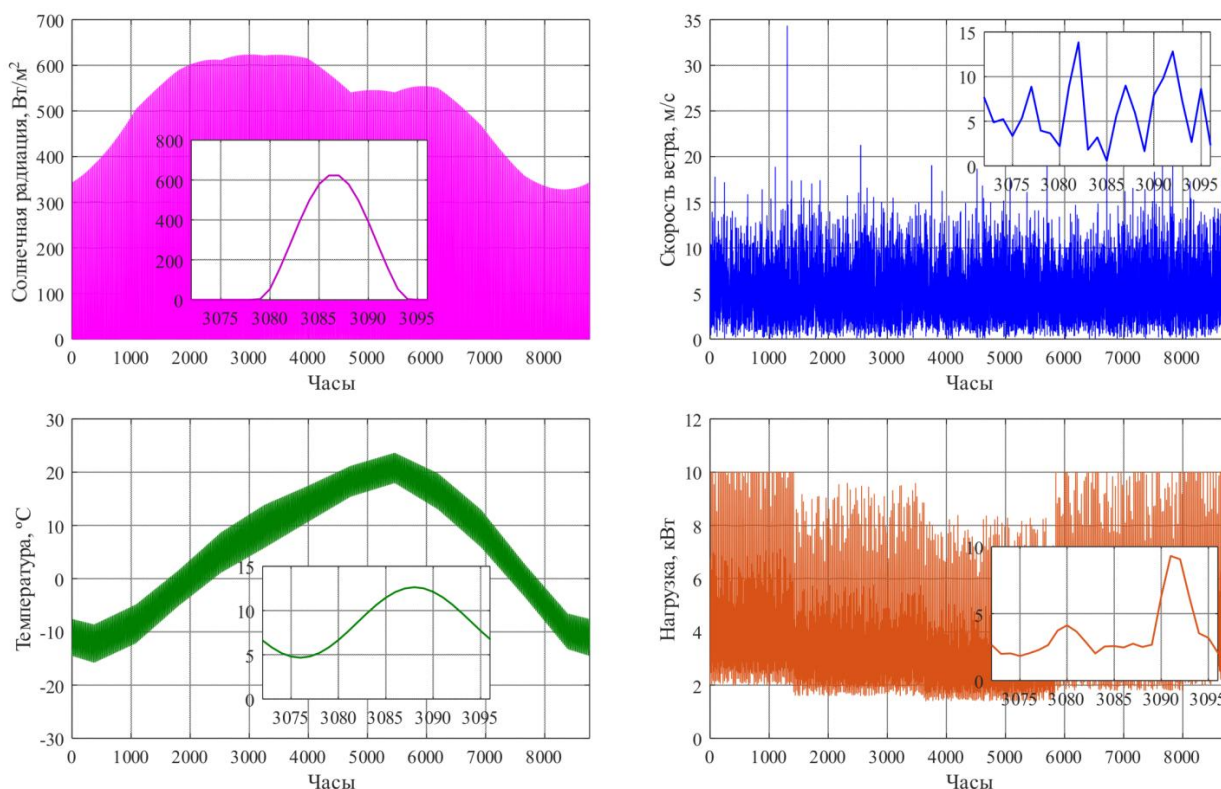


Рис. 3. Временные ряды климатических данных и график нагрузки потребителя

В качестве основного энергетического оборудования HRES использовались следующие виды компонентов: фотоэлектрические модули поликристаллического типа Kyocera Solar KD320GX-LPB, ветроэнергетическая установка AeolosH2KW, аккумуляторы HOPPECKE 8 OPzS 800, дизель-генераторная установка Perkins 403D-15G, автономные инверторы Victron Phoenix3000 суммарной мощностью 12 кВт. Технические характеристики компонентов приняты в соответствии с данными технической спецификации их производителей, экономические показатели определены по данным работ [15, 27, 28]. Основные технико-экономические характеристики основного оборудования HRES представлены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 экономические характеристики оборудования включают затраты на монтажные, пусконаладочные работы и соответствующие преобразователи для PV, WT и BB. Процентная ставка в расчетах принята равной $i = 7\%$, срок жизненного цикла проекта $T = 20$ лет. Солнечная батарея установлена неподвижно под углом 43° к поверхности и ориентирована на юг, расход дизельного топлива при номинальной нагрузке DG составляет 3,67 литра, стоимость топлива принята равной \$0,67/литр. Допустимая глубина разряда аккумуляторных батарей принята равной $DOD = 70\%$, максимальная зарядная мощность $P_{ch,max} = 0,2 \cdot SOC_{max}$.

Искомые переменными оптимизационной задачи является число единиц оборудования HRES: количество фотоэлектрических модулей N_{PV} , ветроэнергетических установок N_{WT} и аккумуляторов N_{BB} в аккумуляторной батарее. Критерием оптимизации является минимальная стоимость жизненного цикла $LCC = \min$. Задачи исследований состояли в определении оптимального состава оборудования HRES различных конфигураций.

В табл. 2 представлены результаты решения задач оптимизации состава оборудования HRES с гарантированным источником питания в виде DG.

Результаты исследований показывают, что при принятых в данной работе технико-экономических характеристиках оборудования минимальные общие затраты на энергетическую систему в течение всего ее срока службы соответствуют конфигурации с применением фотоэлектрических и ветроэнергетических установок. В сравнении с энергетической системой, построенной на базе одного DG, стоимость жизненного цикла такой системы уменьшается практически в 1,4 раза. Структура затрат на лучшую конфигурацию HRES с DG показана на рис. 4.

Важными достоинствами DG-PV-WT-BB конфигурации HRES являются высокая надежность и хорошие экологические характеристики, обеспечиваемые на счет значительного сокращения часов работы DG: расчетное число моточасов DG в данной конфигурации составляет 742 часа в год, при общем расходе топлива 1123 литра. Временные диаграммы рабочих режимов оборудования HRES на 48-часовом временном интервале (для дней 22–23 февраля), построенные по результатам моделирования, показаны на рис. 5. Для наглядного отображения всех переменных на одном графике для показателя SOC использовался масштабирующий коэффициент 1/4.

Анализ временных диаграмм, представленных на рис. 5, показывает, что режимы работы HRES полностью соответствуют принципам управления, описанным выше. Возможность построения и изучения временных диаграмм для произвольных интервалов времени является важным достоинством предлагаемой методики. Применение данной опции позволяет использовать разработанное программное обеспечение не только для оптимизации

Таблица 1

Технико-экономические характеристики оборудования

Показатель	Оборудование				
	Kyocera Solar KD320GX-LPB	Aeolos H2KW	HOPPECKE 8OPzS 800	Perkins 403D-15G	Victron Phoenix3000
Номинальная мощность (емкость)	320 Вт	2 кВт	1,6 кВт·ч	12 кВт	12 кВт
Капитальные затраты, долл. США	800	4200	360	10 000	8600
Затраты на обслуживание, долл. США	8	170	3,6	0,33/ч	0
Срок службы	20 лет	20 лет	5 лет	15 000 ч	10 лет

Таблица 2

Оптимальный состав оборудования HRES с гарантированным источником питания

Конфигурация HRES	Количество единиц оборудования				LCC, долл. США
	N_{PV}	N_{WT}	N_{BB}	N_{DG}	
DG	0	0	0	1	20 046
DG-PV-BB	86	0	73	1	17 044
DG-WT-BB	0	14	40	1	16 310
DG-PV-WT-BB	39	8	38	1	14 428

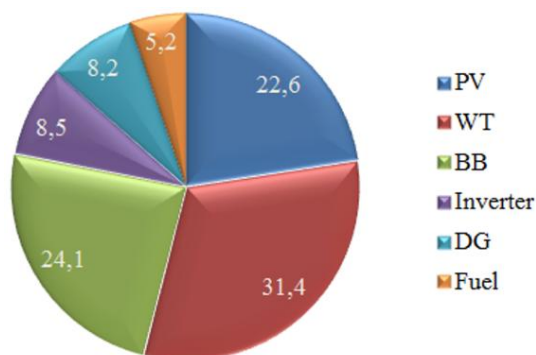


Рис. 4. Структура общих затрат на гибридную энергетическую систему

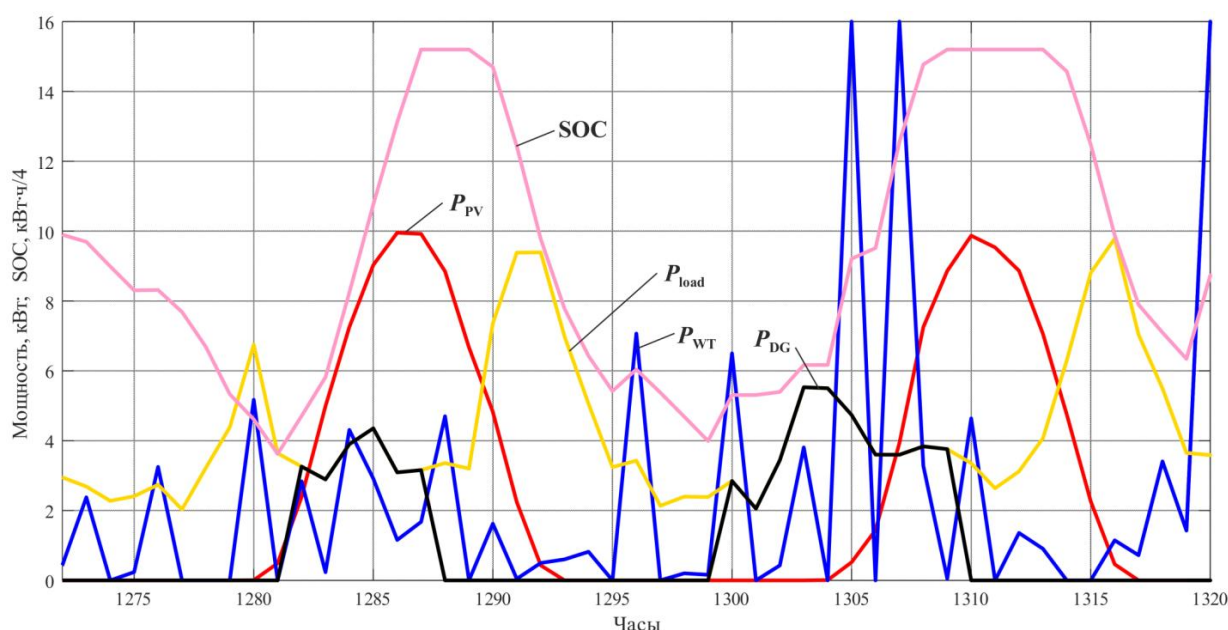


Рис. 5. Временные диаграммы режимов работы гибридной энергетической системы

Таблица 3

Оптимальный состав оборудования HRES без гарантированного источника питания

LPSP*, %	Количество единиц оборудования				LCC, долл. США
	N_{PV}	N_{WT}	N_{BB}	N_{DG}	
2	51	9	39	0	14 146
1	53	9	42	0	14 588
0	79	4	63	0	15 846

состава оборудования HRES произвольной конфигурации, но и разработки эффективных алгоритмов контроля и управления режимами.

Результаты решения задач оптимизации состава оборудования HRES без DG представлены в табл. 3. Результаты получены для различных значений показателя вероятности потери питания LPSP*.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что конфигурации HRES без гарантированного источника питания являются конкурентоспособными по величине LCC с конфигурациями HRES, представленными в табл. 2. Соответственно, данные конфигурации являются перспектив-

ными для применения в энергетических системах, предназначенных для электроснабжения потребителей, не требующих высокого уровня надежности.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что предлагаемая методика может быть использована для выбора оптимального состава оборудования HRES различных конфигураций. Методика реализована в виде программного приложения в популярном математическом комплексе MATLAB, что обеспечивает удобство ее практического применения. В отличие от известных спе-

циализированных прикладных программ, применяемых для оптимизации состава оборудования HRES [29], предложенная методика является гиб-

кой и позволяет использовать для решения оптимизационной задачи различные критерии оптимизации и ограничения.

Литература

1. Chauhan, A. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control / A. Chauhan, R.P. Saini // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 38. – P. 99–120. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.079
2. 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
3. Сайт Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». – <https://energy.hse.ru/distributed> (дата обращения: 10.05.2020).
4. Люкайтис, В.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии / В.Ю. Люкайтис, С.Ю. Глушков // *Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы*. – 2019. – Т. 2, вып. 2. – С. 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
5. Badwawi, R. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System / R. Badwawi, M. Abusara, T. Mallick // *Smart Science*. – 2015. – Vol. 3, no. 3. – P. 127–138. DOI: 10.6493/SmartSci.2015.324
6. Mohammed, Y.S. Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues / Y.S. Mohammed, M.W. Mustafa, N. Bashir // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 35. – P. 527–539. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.022
7. Singh, S. A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems / S. Singh, M. Singh, S.C. Kaushik // *International Journal of Green Energy*. – 2016. – Vol. 13, no. 15. – P. 1564–1578. DOI: 10.1080/15435075.2016.1207079
8. Saharia, B.J. A review of algorithms for control and optimization for energy management of hybrid renewable energy systems / B.J. Saharia, H. Brahma, N. Sarmah // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2018. – Vol. 10 (053502). – P. 1–33. DOI: 10.1063/1.5032146
9. Елистратов, В.В. Автономное энергоснабжение территорий России энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии / В.В. Елистратов // *Энергетический вестник*. – 2016. – № 21. – С. 42–49.
10. Денисов, К.С. Решение задачи комплексного энергоснабжения автономного потребителя с целью уменьшения экономических затрат / К.С. Денисов, В.И. Велькин, А.Н. Тырсин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 84–92. DOI: 10.14529/power190309
11. Обухов, С.Г. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*. – 2017. – № 16-18. – С. 43–56. DOI: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056
12. 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
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 (1664). – P. 1–17. DOI: 10.3390/en10101664
14. Eriksson, E.L.V. Optimization of renewable hybrid energy systems e A multi-objective approach / E.L.V. Eriksson, E.M. Gray // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 133. – P. 971–999. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.053
15. Maleki, A. Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms / A. Maleki, F. Pourfayaz // *Solar Energy*. – 2015. – Vol. 115. – P. 471–483. DOI: 10.1016/j.solener.2015.03.004
16. 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
17. Rouhani, A. A Comprehensive Method for Optimum Sizing of Hybrid Energy Systems using Intelligence Evolutionary Algorithms / A. Rouhani, H. Kord, M. Mehrabi // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2013. – Vol. 6, no. 6. – P. 4702–4712. DOI: 10.17485/ijst/2013/v6i6/33924
18. Phommixay, S. Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization / S. Phommixay, M.L. Doumbia, D.L. St-Pierre // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. – 2020. – Vol. 11. – P. 73–89. DOI: 10.1007/s40095-019-00332-1
19. Обухов, С.Г. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности / С.Г. Обухов, М.А. Сурков, З.П. Хошнау // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2011. – № 2. – С. 25–30.

20. Обухов, С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2017. – Т. 328, № 6. – С. 38–51.
21. Обухов, С.Г. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами / С.Г. Обухов, З.П. Хошина // *Электрические станции.* – 2012. – №. 11. – С. 43–47.
22. 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.
23. Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // *Proceedings International Conference on Neural Networks.* – 1995. – Vol. 4. – P. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968
24. Shi, Y. A modified particle swarm optimizer / Y. Shi, R. Eberhart // *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings.* – 1998. – P. 69–73. DOI: 10.1109/ICEC.1998.699146
25. 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
26. Сайт «Расписание погоды». – <https://rp5.ru/> (дата обращения: 10.05.2020).
27. 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
28. Maleki, A. Modeling and optimum design of an off-grid PV/WT/FC/diesel hybrid system considering different fuel prices / A. Maleki // *International Journal of Low-Carbon Technologies.* – 2018. – Vol. 13, no. 2. – P. 140–147. DOI: 10.1093/ijlct/cty006
29. Sinha, S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems / S. Sinha, S.S.Chandel // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2014. – Vol. 32. – P. 192–205. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035

Обухов Сергей Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; serob99@mail.ru.

Ибрагим Ахмед, аспирант Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; ibragim@tpu.ru.

Поступила в редакцию 12 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/power200206

OPTIMIZATION OF EQUIPMENT COMPOSITION OF HYBRID ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

S.G. Obukhov, serob99@mail.ru,

A. Ibrahim, ibragim@tpu.ru

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

The article develops of a methodology and a software application to optimize the equipment composition of hybrid energy systems with renewable energy sources. The paper describes the proposed methodology and the mathematical models of the main components of hybrid systems: a photovoltaic station, a wind power plant, a battery and a diesel generator set. A distinctive feature of the proposed method is an original model used to forecast the solar radiation based on the data of the National Aeronautics and Space Administration. This allows it to be used for predicting the main characteristics of solar radiation in any location of Russia, including the territories with no regular actinometric observations data. The reverse Weibull distribution function is used to predict the daily course of the wind speed, which provides an increase in the reliability of predicting the generation of electricity by the wind power plant at daily time intervals. An evolutionary particle swarm algorithm is utilized to solve the optimization problem, which provides for a reliable and efficient definition of the global

extremum of the objective function under various optimization criteria and constraints. A practical example of the proposed methodology use in selecting the optimal composition of the equipment of a hybrid energy system with a different equipment configuration is considered for an area located in the Vladivostok city. The proposed technique is implemented as a software application in the popular mathematical complex MATLAB, which ensures the convenience of its practical application.

Keywords: hybrid power system, renewable energy, optimization of equipment composition, particle swarm optimization algorithm.

References

1. 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
2. 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
3. Web-Site of National Research University “High School of Economics”. Available at: <https://energy.hse.ru/distributed> (accessed 10.05.2020).
4. Ljukajtis V.Ju., Glushkov S.Ju. [Autonomous energy complexes, hybrid structures using renewable energy sources], *Silovoe i jenergeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy* [Power and energy equipment. Autonomous systems], 2019, vol. 2, no. 2, pp. 111–120. (in Russ.) DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
5. Badwawi R., Abusara M., Mallick T. A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System. *Smart Science*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 127–138. DOI: 10.6493/SmartSci.2015.324
6. Mohammed Y.S., Mustafa M.W., Bashir N. Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 35, pp. 527–539. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.022
7. 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
8. 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
9. Elistratov V.V. [Autonomous energy supply of Russian territories with energy complexes based on renewable energy sources]. *Jenergeticheskij vestnik* [Energy Vestnik], 2016, no. 21, pp. 42–49. (in Russ.)
10. Denisov K.S., Velkin V.I., Tyrsin A.N. Integrated Cost-Effective Power Supply to Off-Grid Consumers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 84–92. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190309
11. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Mathematical Model of Solar Radiation Incident on an Arbitrarily Oriented Surface for Any Region in Russia. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017, no. 16–18, pp. 43–56. (in Russ.) DOI: 10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056
12. 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
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(1664), pp. 1–17. DOI: 10.3390/en10101664
14. Eriksson E.L.V., Gray E.M. Optimization of renewable hybrid energy systems e A multi-objective approach. *Renewable Energy*, 2019, vol. 133, pp. 971–999. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.053
15. 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
16. 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
17. 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
18. 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

19. Obukhov S.G., Surkov M.A., Hoshnau Z.P. [Method for selecting low-power wind power plants], *Jelektro. Jelektrotehnika, Jelektrojenergetika, Jelektrotehnicheskaja promyshlennost'* [Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical industry], 2011, no. 2, pp. 5–30. (in Russ.)
20. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of operation of autonomus photovoltaic plant under actual operating condition. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 6, pp. 38–51. (in Russ.)
21. Obukhov S.G., Hoshnau Z.P. [Prediction of electric energy consumption by autonomous energy systems], *Jelektricheskie stancii* [Power Technology and Engineering], 2012, no. 11, pp. 43–47. (in Russ.)
22. 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)*, 2005, pp. 1–8.
23. 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
24. 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
25. 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
26. Web-Site “Weather schedule”. Available at: <https://rp5.ru/> (accessed 10.05.2020).
27. 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
28. 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
29. 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

Received 12 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Обухов, С.Г. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии / С.Г. Обухов, А. Ибрагим // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 64–76. DOI: 10.14529/power200206

FOR CITATION

Obukhov S.G., Ibrahim A. Optimization of Equipment Composition of Hybrid Energy Systems with Renewable Energy Sources. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 64–76. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200206
