iPolytech Journal 2024. Т. 28. № 4. С. 550-562 ISSN 2782-4004 (print)
2024;28(4):550-562 ISSN 2782-6341 (online)

ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья
УДК 621.311.24:621.548
EDN: YEVSMG
DOI: 10.21285/1814-3520-2024-4-550-562

Выбор состава включённого генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса

А.Г. Васьков[1]✉

[1]*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Резюме. Цель – разработка методики выбора состава включенного генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса, обеспечивающей оптимизацию его режима работы по критерию минимизации удельного расхода топлива на дизель-генераторных установках. При разработке программных средств применялся принцип решения в режиме реального времени задачи целочисленного нелинейного программирования, заключающейся в поиске минимума эксплуатационных издержек при работе комплекса. При этом учитывались ограничения на режим работы электротехнического оборудования. Для дизельной электростанции: мощность – не меньше минимально допустимой, равной 30% от номинальной мощности; распределение мощности между дизель-генераторными установками – с учетом индивидуальных расходных характеристик. Для системы накопления электрической энергии: допустимое изменение емкости – от 50 до 100%; скорость заряда/разряда ограничена величиной «1С». Для солнечной электростанции учитывалось изменение коэффициента полезного действия инвертора в зависимости от его загрузки, прогнозируемой на период 24 ч. В исследованиях использовалось натурное оборудование имитационного макета солнечно-дизельного комплекса, состоящего из двух дизель-генераторных установок 12 и 30 кВт, имитатора солнечной электростанции мощностью 6,6 кВт, системы накопления энергии, имитатора активной нагрузки мощностью до 50 кВт. Приведено описание алгоритмических основ работы автоматизированной системы управления, способствующей обеспечению энергетической эффективности эксплуатируемых солнечно-дизельных комплексов. Показано, что разработанная SCADA-система позволяет обеспечить моделирование любых режимов работы солнечно-дизельного комплекса в условиях, приближенных к реальным. Установлено, что в зависимости от условий функционирования солнечно-дизельного комплекса и параметров оборудования (количество дизель-генераторных установок и их номинальные мощности, емкость и мощность системы накопления электрической энергии, установленная мощность сетевой солнечной электростанции) повышение точности моделирования его режима работы может достигать 30%. Таким образом, полученные результаты моделирования режима работы солнечно-дизельного комплекса показывают возможность существенного уточнения оценок эксплуатационных параметров подобных энергетических объектов благодаря учету реальных энергетических характеристик дизель-генераторных установок.

Ключевые слова: солнечная электростанция, дизельная электростанция, солнечно-дизельный комплекс, прогнозирование, управление, оптимизация

Благодарности. Исследование проводилось в рамках проекта «Системы управления солнечно-дизельными комплексами» при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWF-2022-0006.

Для цитирования: Васьков А.Г. Выбор состава включённого генерирующего оборудования солнечно-дизельного комплекса // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 550–562. https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-550-562. EDN: YEVSMG.

POWER ENGINEERING

Original article

Selection of generating equipment for a solar-diesel complex

Aleksey G. Vaskov[1]✉

[1]*National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia*

Abstract. A methodology for selecting the composition of generating equipment included in a solar-diesel complex to optimize its operating mode by minimizing the specific fuel consumption of diesel generator units is described. Software developed according to the principle of real-time integer nonlinear programming is used to calculate the minimum operating costs during the operation of the complex. Various restrictions on the operating modes

© Васьков А.Г., 2024

of electrical equipment were taken into account. For a diesel power plant having a minimum capacity not less than 30% of the nominal capacity, the distribution of capacity between diesel generator units takes into account individual consumption characteristics. For an electrical energy storage system whose permissible change in capacity varies from 50 to 100%, the charge/discharge rate is limited to "1C". For the solar power plant, the change in inverter efficiency was taken into account depending on its load as predicted for a 24-hour period. The research used a model to simulate full-scale equipment of a solar-diesel complex comprising two diesel generator units of 12 and 30 kW, a solar power plant simulator having a capacity of 6.6 kW, an energy storage system, and an active load simulator with a capacity of up to 50 kW. An algorithmic description of the operational principles of an automated control system for ensuring the energy efficiency of solar-diesel complexes in operation is provided. The developed SCADA system is suitable for modeling the operating modes of a solar-diesel complex under conditions close to actual. Depending on the operating conditions of the solar-diesel complex and the equipment parameters (the number of diesel generator units and their nominal capacities, the capacity and power of the electrical energy storage system, as well as the installed capacity of the grid solar power plant), operating mode modeling accuracy can be increased by as much as 30%. Thus, the obtained results of modeling the operating mode of a solar-diesel complex demonstrate the possibility of significantly refining the estimates of the operating parameters of such energy facilities by taking into account the actual energy characteristics of diesel generator units.

Keywords: solar power plant, diesel power plant, solar-diesel complex, forecasting, control, optimization

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the project "Solar-diesel complex control systems" with the support of the grant from Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FSWF-2022-0006.

For citation: Vaskov A.G. Selection of generating equipment for a solar-diesel complex. *iPolytech Journal.* 2024;28(4):550-562. (In Russ.). https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-534-562. EDN: YEVSMG.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день на территории Российской Федерации находится в эксплуатации несколько десятков солнечно-дизельных комплексов (СДК), проектируются и строятся новые. Большинство из них расположено в изолированных и труднодоступных территориях[2]. Традиционным источником энергии в таких местах являются дизельные электростанции (ДЭС), применение которых сопряжено с рядом трудностей технического (высокий износ оборудования) и экономического (высокая стоимость дизельного топлива) характера. В связи с этим в состав изолированных энергетических систем внедряются солнечные электростанции (СЭС), позволяющие заместить некоторую долю ДЭС в общем энергетическом балансе.

С точки зрения проектирования и эксплуатации «СДК различной структуры и параметров можно разделить на три категории в соответствии с уровнем выработки электроэнергии солнечной электростанцией в локальной энергосистеме:

СДК с долей СЭС в годовой выработке электроэнергии до 20% и мощностью СЭС, не превышающей 50% от мощности локальной энергосистемы. Для таких СДК характерны следующие особенности: ДЭС находится в работе в течение всего рабочего цикла; отмечается относительно небольшое сокращение расхода топлива, что приводит к незначительным экологическим преимуществам и невысокой экономической эффективности; при этом в таком СДК отсутствует необходимость наличия центрального контроллера управления – управление режимом работы СДК реализуется на основе штатных возможностей контроллеров дизель-генераторных установок (ДГУ) и солнечных инверторов.

СДК с долей СЭС в годовой выработке электроэнергии от 20 до 50% и мощностью СЭС более 50% от мощности локальной энергосистемы. Для таких СДК характерны следующие особенности: ДЭС находится в работе в течение всего рабочего цикла; присутствует необходимость наличия простого контроллера управления и/или небольшого накопителя энергии для регулирования частоты и напряжения.

СДК с долей СЭС в годовой выработке электроэнергии более 50...80% и мощностью СЭС порядка 100...150% от мощности локальной энергосистемы и более. Для таких СДК характерны следующие особенности: ДЭС работает непостоянно; обязательно требуется система накопления энергии (СНЭ) для перераспределения электроэнергии, вырабатываемой СЭС; обязатель-

[2]Объекты генерации в изолированных и труднодоступных территориях в России. Режим доступа: https://ac.gov.ru/uploads/2-Publications/analitika/генерации_в_ИТТ.pdf (дата обращения: 19.04.2024).

на централизованная система управления СДК»[3].

Последняя категория СДК является наиболее «интересной» для реализации, т.к. позволяет получить наивысший экономический эффект и обеспечить относительно невысокий срок окупаемости проекта. Однако на сегодняшний день отсутствуют типовые решения в области создания необходимых для эффективной эксплуатации СДК централизованных систем управления.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования является разработка алгоритмических основ функционирования централизованной автоматизированной системы управления (АСУ) режимом работы СДК, осуществляющей в режиме реального времени выбор оптимального состава включенного генерирующего оборудования с учетом прогноза выработки электроэнергии на СЭС. Функциональными особенностями предлагаемой АСУ являются:

– функциональный блок краткосрочного (на сутки вперед с часовыми интервалами времени) прогнозирования солнечного излучения, который выполняется при использовании данных численного прогноза погоды;

– функциональный блок оптимизации состава, параметров и режимов функционирования солнечно-дизельного комплекса с учетом выбора наиболее энергетически эффективного состава работающих дизель-генераторных установок.

Разработанный экспериментальный аппаратно-программный комплекс должен обеспечить реализацию указанных функциональных блоков в условиях, приближенных к реальным.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования способов повышения энергетической эффективности СДК в 2022 г. Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ») создал молодежную лабораторию, сотрудниками которой являются студенты и аспиранты; лаборатория выполняет научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу, целью которой является разработка программного комплекса, осуществляющего быструю и надежную оптимизацию состава, параметров и режимов функционирования гибридного энергокомплекса в близких к реальным условиях эксплуатации. «Для апробации результатов работы в НИУ «МЭИ» используется учебно-экспериментальный имитационный макет солнечно-дизельного комплекса (далее – Макет).

Макет состоит из двух дизель-генераторных установок (электроагрегаты дизельные ПСМ АД12 мощностью 12 кВт и ПСМ АД30 мощностью 30 кВт), имитатора солнечной электростанции мощностью 6,6 кВт, подключенного к сети через сетевой трехфазный инвертор SMA SUNNY TRIPOWER 12000TL и системы накопления энергии на основе 12 стационарных, необслуживаемых, герметизированных аккумуляторов емкостью 200 А·ч каждый и трех батарейных инверторов Victron Quattro 48/10000/140-100/100. Функциональная схема Макета представлена на рис. 1, а основные технические характеристики[3] его элементов – в табл. 1».

В связи с большим разнообразием используемого в СДК оборудования для достижения независимости верхнего уровня АСУ от нижнего принято решение о создании логической «развязки» между этими двумя уровнями. Такая «развязка» реализована в формате микросервисной архитектуры, в парадигме которой разработан набор независимо функционирующих программных блоков, обменивающихся информацией через сервер базы данных. Таким образом, для верхнего уровня АСУ исполнительные механизмы представлены стандартным и неизменным набором технических параметров, значения которых могут быть получены на нижнем уровне в совершенно независимом режиме. При разработке АСУ для любого нового объекта этот подход будет требовать лишь модернизации исходных кодов микросервисов, обеспечивающих «общение» с оборудованием нижнего уровня, в то время

[3]Разработка методик прогнозирования солнечного излучения и оптимизации состава, параметров и режима функционирования солнечно-дизельного комплекса. Режим доступа: https://mpei.ru/Structure/Universe/IHRE/structure/heares/susdc/Documents/%D0%9E%D1%82%D1%87%D1%91%D1%82%20%D0%AD%D1%82%D0%B0%D0%BF%202.pdf (дата обращения: 19.04.2024).

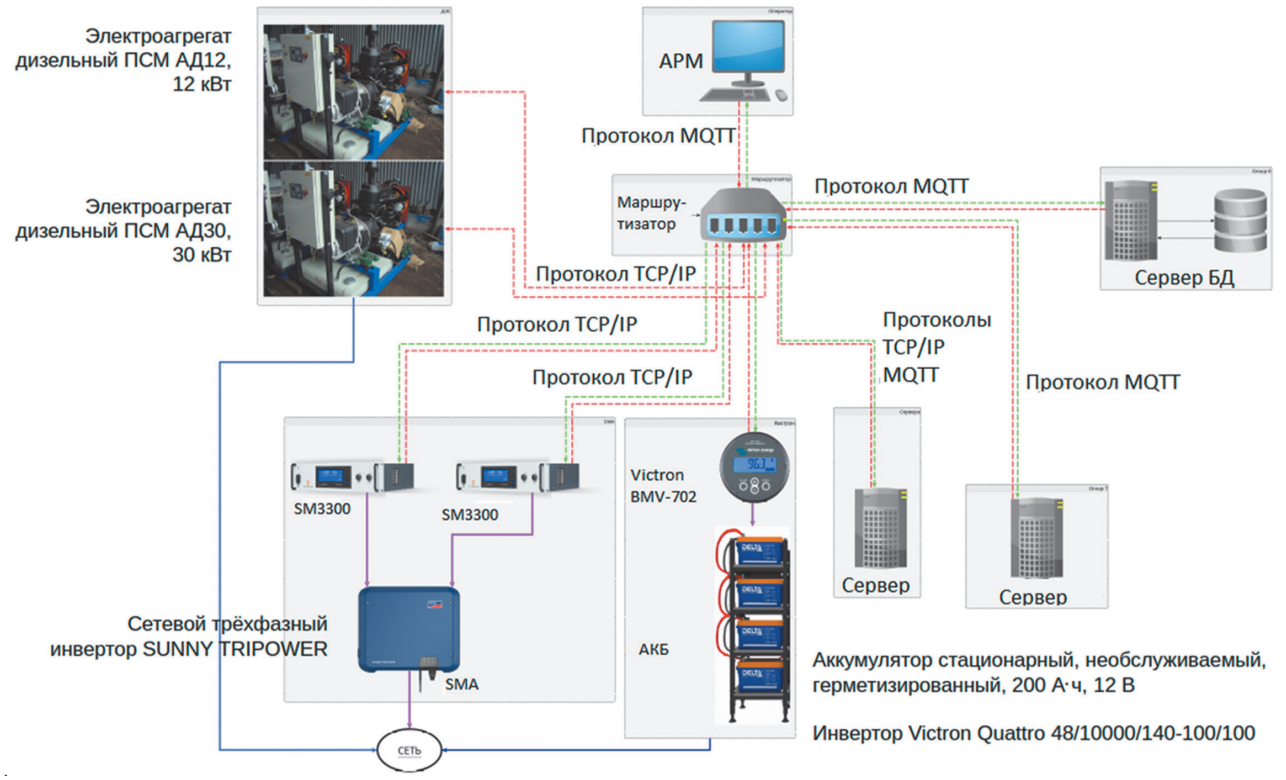

Рис. 1. *Функциональная схема имитационного Макета солнечно-дизельного комплекса*
Fig. 1. *Flowchart of the solar-diesel complex simulation Layout*

Таблица 1. Основные технические характеристики элементов Макета солнечно-дизельного комплекса
Table 1. Basic technical specifications of the solar-diesel complex Layout elements

Элемент СДК	Технические характеристики
ДГУ № 1	Номинальная мощность 12 кВт Минимально допустимая мощность 3,6 кВт (30%)
ДГУ № 2	Номинальная мощность 30 кВт Минимально допустимая мощность 9,0 кВт (30%)
Солнечный инвертор	Номинальная мощность 12 кВт
Батарейный инвертор	Номинальная мощность 30 кВт
Аккумуляторная батарея	Номинальная емкость 19,2 кВт·ч Минимально допустимый уровень заряда 50%

как система принятия решений останется универсальной.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана SCADA-система, предназначенная для управления Макетом. С использованием функционала данной разработанной системы перед проведением эксперимента задаются почасовые графики потребления энергии, величины прихода солнечного излучения (СИ) и температуры поверхности фотоэлектрического модуля в течение суток. Далее, с заранее установленным периодом времени эти наборы значений передаются на управляемое оборудование: нагрузочный модуль и имитатор солнечной электростанции. Таким образом, обеспечивается моделирование суточного изменения нагрузки и выработки электроэнергии солнечной электростанцией. Также функционал SCADA-системы позволяет производить пуск и остановку ДГУ, осуществлять мониторинг их состояния и остальных элементов Макета.

Особенности управления режимом работы Макета солнечно-дизельного комплекса, реализованные с помощью SCADA, описаны ниже.

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Основной алгоритмической идеей системы управления работой любой энергосистемы

является обеспечение качества энергии: поддержание частоты и величины напряжения на номинальном уровне [1, 2]. Но в случае изолированных энергетических систем, в которых очень сильно взаимное влияние источников энергии друг на друга и на потребителей (и наоборот), работа по ведению режима в формате реакции на уже произошедшие отклонения не позволяет обеспечить принятия оптимальных решений по выбору состава включенного генерирующего оборудования. Иными словами, обеспечивается качественное энергоснабжение, но не достигается максимального экономического эффекта.

Изменить этот подход возможно лишь добавлением в алгоритм работы системы управления СДК функционального модуля, обеспечивающего предварительное выполнение прогноза режима работы СДК на некоторый период времени вперед (как правило – на сутки вперед). Такой подход позволяет заблаговременно подготовить энергетическое оборудование к изменению мощности, включению или отключению.

Вторая функциональная особенность разработанной АСУ заключается в следующем. При распределении мощности между ДГУ чаще всего используется равномерное распределение, когда каждая из установок работает с такой же удельной загрузкой, что и остальные [3]. Теоретически неоднократно показано, что это решение дает оптимум с точки зрения минимизации расхода топлива только при одинаковых энергетических характеристиках ДГУ. Как показали исследования, проведенные на Макете, это не соответствует действительности, а значит, в алгоритме управления СДК необходима реализация процедуры поиска оптимальной загрузки ДГУ.

Ниже дано краткое описание используемых решений.

В основе процесса управления лежит известное требование о выполнении баланса мощности, выраженное следующим уравнением [4]:

$$P_{\text{нагр}}(t) = N_{\text{ДЭС}}(t) + N_{\text{СЭС}}(t) \pm N_{\text{СНЭ}}(t), \quad (1)$$

где $P_{\text{нагр}}(t)$ – совокупная мощность электроприемников (нагрузка), кВт; $N_{\text{СЭС}}(t)$ – мощность солнечной электростанции, определяется исходя из интенсивности солнечного излучения, кВт; $\pm N_{\text{СНЭ}}(t)$ – мощность заряда/разряда СНЭ, кВт, определяется исходя из соотношения мощности СЭС и нагрузки, а также с учетом уровня заряда аккумуляторных батарей (АКБ); $N_{\text{ДЭС}}(t)$ – мощность ДЭС, резервная мощность, кВт.

Важные особенности решения уравнения баланса мощности, учитываемые при управлении СДК, заключаются в следующем:

1. Считается, что значение потребляемой мощности $P_{\text{нагр}}(t)$ известно заранее из прогноза нагрузки.

2. Мощность СЭС $N_{\text{СЭС}}(t)$ определяется также заранее из имеющегося прогноза прихода солнечного излучения в соответствии с методиками, изложенными в [5–8].

3. Мощность заряда/разряда СНЭ $\pm N_{\text{СНЭ}}(t)$ определяется исходя из соотношения мощности СЭС и нагрузки, а также с учетом текущего уровня заряда АКБ $SOC(t)$ [9, 10].

4. Мощность ДЭС $N_{\text{ДЭС}}(t)$ как резервного источника энергии определяется в последнюю очередь и распределяется между используемыми ДГУ по критерию минимизации расхода топлива[4,5] [11–13].

Одним из основных элементов предлагаемой АСУ является модель прогнозирования режима работы СДК. Задача прогнозирования решается на ближайшие сутки с часовыми интервалами времени $\Delta t = 1$ ч.

Для решения этой регрессионной задачи, в которой предиктант – среднечасовая плотность потока солнечного излучения, а предикторы – различные геометрические и метеорологические параметры, так или иначе коррелирующие с прогнозируемой величиной, использована нейросетевая модель с архитектурой многослойного перцептрона. Обучающая выборка состоит из совмещенных данных наземных измерений интенсивности солнечной радиации и архива метеоданных со значениями общей облачности, относительной влажности, температуры воз-

[4]ГОСТ Р 55006-2012. Стационарные дизельные и газопоршневые электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Общие технические условия. Введ. 20.09.2012. М.: Стандартинформ, 2014.

[5]ГОСТ Р 55007-2012. Стационарные дизельные и газопоршневые электростанции с двигателями внутреннего сгорания. Энергоэффективность. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014.

духа для девяти географических точек на территории России.

Полученная математическая модель [14] имеет следующие величины ошибок прогнозирования: MAE = 123,3 Вт/м^2, RMSE = 177,9 Вт/м^2 и nRMSE = 16,1%, которые являются результатами тестирования модели на новых (не участвующих при обучении и тестировании модели) данных метеопрогноза (для г. Новочебоксарск метеопровайдер – «Расписание Погоды»[6]).

Указанный подход требует обязательного доступа к данным метеопрогноза, что в условиях реальной эксплуатации СДК не всегда возможно по различным причинам (например, из-за отсутствия интернет-связи, доступа к сайту метеопровайдера и т.п.). В качестве резервного способа получения прогноза прихода СИ используется прямое моделирование с помощью функционала верифицированной библиотеки PVLIB [15], предикторами в этом случае являются период времени, на который осуществляется прогноз, географические координаты места размещения СДК и заранее полученный и локально размещенный в базе данных АСУ ТП ряд актинометрических и метеорологических данных в формате TMY. Например, источником необходимых данных может являться сервис PVGIS[7], предоставляющий следующую информацию: температура воздуха на высоте два метра над поверхностью земли; относительная влажность; сумма суммарного солнечного излучения, падающего в горизонтальной плоскости; сумма прямого солнечного излучения, падающего в горизонтальной плоскости; сумма диффузного солнечного излучения, падающего в горизонтальной плоскости; скорость и направление ветра на высоте 10 м над поверхностью земли; атмосферное давление.

Процедура выбора состава включенного генерирующего оборудования позволяет определить состав включенных агрегатов и распределение мощности между ними, обеспечивает выполнение условия минимизации удельного расхода топлива на ДЭС, реализованного в виде микросервиса, итерационно работающего на базе программируемого логического контроллера Raspberry Pi.

При одинаковых энергетических характеристиках всех ДГУ, установленных на ДЭС, задача распределения мощности между ними решается просто – ДГУ загружаются равномерно. Это обеспечивает равенство удельных расходов топлива на каждой из включенных под нагрузку машин. При этом достигается максимальная энергетическая эффективность ДЭС в целом. Однако, как только возникает ситуация, в которой ДГУ имеют отличные друг от друга энергетические характеристики (модели используемых ДГУ изначально разные или сказалось влияние режимных и конструктивных факторов), задача поиска наиболее эффективного соотношения мощностей отдельных ДГУ усложняется.

Проведенные в НИУ «МЭИ» исследования показали, что различия между энергетическими характеристиками ДГУ даже одинаковых моделей могут достигать 12%. Необходимая информация была получена экспериментальным путем с использованием имеющегося в составе Макета измерительного оборудования. В процессе получения зависимостей расхода топлива от загрузки ДГУ трижды нагружались в диапазоне от 22 до 95% номинальной мощности, а полученные результаты были в итоге усреднены. Полученные зависимости представлены на рис. 2, дополнительно для сравнения на этом рисунке показаны «смоделированные различными расчетными способами энергетические характеристики[3] для данной модели ДГУ».

При поиске оптимальной стратегии диспетчеризации СДК основными параметрами, которые следует учитывать, являются эффективность и характеристики расхода топлива, наиболее сильно влияющие на экономические показатели проекта. Таким образом, выбранный состав включенного генерирующего оборудования должен обеспечивать минимизацию эксплуатационных издержек за весь рассматриваемый период времени [16, 17], а целевая функция оптимизации может быть записана следующим образом:

[6]Расписание погоды. Режим доступа: https://rp5.ru/ (дата обращения: 21.04.2024).

[7]Photovoltaic Geographical Information System. Режим доступа: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en (дата обращения: 21.04.2024).

$$minOPEX = \sum_{t=1}^{24}\left(Ц \cdot \sum_{i=1}^{n_{ДГУ}}\left[K_i \cdot N_{ДГУi}(t) + B_i\right]\right) \quad (2)$$

где t – номер расчетного интервала времени (продолжительность интервала принята равной 1 ч, расчетный период времени – 24 ч); $i = 1 \ldots n_{ДГУ}$ – порядковый номер ДГУ в составе ДЭС; Ц – цена за 1 л дизельного топлива, руб; $N_{ДГУi}(t)$ – рабочая мощность i-й ДГУ в текущем расчетном интервале времени, кВт; K_i и B_i – коэффициенты линеаризованной зависимости абсолютного расхода топлива i-й ДГУ от ее рабочей мощности $N_{ДГУi}(t)$, о.е.

Обычно производители указывают нормы расхода топлива в спецификации двигателя. Для ДЭС, состоящей из нескольких ДГУ, необходимо использовать индивидуальные характеристики расхода топлива. Пример таких характеристик для ДЭС, входящей в состав Макета, приведен на рис. 2.

Как видно из рис. 2, зависимость абсолютного расхода топлива Q от загрузки ДГУ $N_{ДГУ}$ имеет линейный характер: $Q = K \cdot N_{ДГУ} + B$, в соотношении коэффициенты K и B в первом приближении могут быть получены из спецификации производителя, а более точно – из анализа данных энергетических испытаний. Соответствующие коэффициенты кривой расхода топлива для обеих ДГУ Макета приведены в табл. 2.

При работе СДК должны соблюдаться следующие ограничения, формирующие задачу оптимизации:

1. В каждый расчетный интервал времени должно выполняться уравнение баланса мощности:

$$\sum_{i=1}^{n_{ДГУ}} N_{ДГУi}(t) + \sum_{j_1}^{n_{инв}} N_{PVi}(t) - \sum_{k=1}^{n_{бат.инв}} N_{СНЭk}^{зар}(t) + \sum_{k=1}^{n_{бат.инв}} N_{СНЭk}^{разр}(t) = P(t), \quad (3)$$

где $P(t) = P_{потр}(t) + P_{СН}(t)$ – прогнозная суммарная активная нагрузка, определяемая полезной нагрузкой потребителей энергии и собственными нуждами СДК, кВт; $N_{PVi}(t)$ – прогнозная мощность, вырабатываемая солнечной электростанцией, кВт; $N_{СНЭk}^{зар/разр}(t)$ –

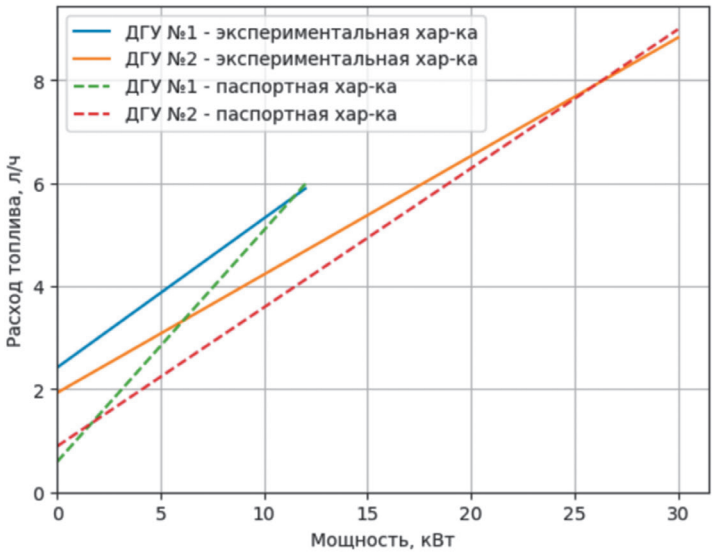

Рис. 2. *Кривые расхода топлива для дизель-генераторных установок Макета солнечно-дизельных комплексов*
Fig. 2. *Fuel consumption curves for diesel generator installations of the solar-diesel complex Layout*

Таблица 2. Коэффициенты кривой расхода топлива
Table 2. Coefficients of the fuel consumption curve

ДГУ	Паспортные данные		Экспериментальные данные	
	K, о.е.	B, о.е.	K, о.е.	B, о.е.
ДГУ 12 кВт	0,45	0,59	0,29	2,42
ДГУ 30 кВт	0,27	0,89	0,23	1,93

зарядная/разрядная мощность системы накопления энергии, кВт; $k = 1 \ldots n_{\text{инв}}$ – порядковый номер солнечного инвертора; $k = 1 \ldots n_{\text{бат.инв}}$ – порядковый номер батарейного инвертора.

2. Готовность к работе i-й ДГУ в течение всего расчетного периода Т:

$$a_{\text{ДГУ}i} \cdot N_{\text{ДГУ}i}(t) - N_{\text{ДГУ}i}(t) = 0, \quad (4)$$

где $a_{\text{ДГУ}i}$ – бинарный коэффициент доступности i-й ДГУ в момент времени t.

3. Производители дизельных генераторов рекомендуют избегать использования генераторов с мощностью менее 25–30% от их номинальной выходной мощности[10]. Работа дизель-генератора на более низкой выходной мощности снижает его эффективность и может привести к более частым работам по техническому обслуживанию из-за негативного воздействия на работу дизельного двигателя. Таким образом, рабочая мощность ДГУ в каждый момент времени должна быть больше минимально допустимой и меньше максимально-допустимой мощности:

$$N_{\text{ДГУ}i}^{min} \le N_{\text{ДГУ}i}(t) \le N_{\text{ДГУ}i}^{max}. \quad (5)$$

Это ограничение также может быть записано следующим образом – удельная загрузка i-й работающей ДГУ в момент времени t должна быть больше или равна $N_{\text{ДГУ}}^{\text{удmin}} = N_{\text{ДГУ}i}^{min}/N_{\text{ДГУ}i}^{max}$:

$$\begin{cases} u_{\text{ДГУ}i}(t) = 1 \\ N_{\text{ДГУ}i}(t)/N_{\text{ДГУ}}^{max} \ge N_{\text{ДГУ}}^{\text{удmin}}, \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{\text{ДГУ}i}(t)$ – бинарный коэффициент доступности i-й ДГУ в момент времени t (1 – ДГУ доступна; 0 – ДГУ недоступна).

4. Частые пуски и остановки генератора увеличивают износ дизельной генераторной установки. Таким образом, ограничение минимального времени включения и простоя дизельной генераторной установки благотворно влияет на минимизацию затрат на техническое обслуживание. Ограничения на минимальное время включения и простоя могут быть сформулированы описанным ниже образом [18].

Ограничение по частоте пусков и остановов ДГУ сформулировано на основе критерия минимизации затрат на пуски и остановы. Затраты на пуск i-й ДГУ:

$$SU_i(t) \ge SU_i \cdot \left(u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}\right), \quad (7)$$

где SU_i – затраты на пуск i-го дизель-генератора, руб.

Затраты на останов i-й ДГУ:

$$SD_i(t) \ge SD_i \cdot \left(u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}\right), \quad (8)$$

где SD_i – затраты на останов i-го дизель-генератора, руб.

5. В случае начала работы (запуска) i-я ДГУ должна последовательно работать не менее заданного числа часов:

$$\left[h_i^{up}(t-1) - T_i^{up}\right] \cdot \left(u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}\right) \ge 0, \quad (9)$$

где $h_i^{up}(t-1)$число последовательных часов в течение которых i-я ДГУ была в работе на момент окончания предыдущего расчетного интервала времени – (t-1)-го часа; T_i^{up} – минимально допустимое число последовательных часов работы i-й ДГУ.

Минимальное число последовательных часов простоя i-й ДГУ:

$$\begin{aligned} &\left[h_i^{down}(t-1) - T_i^{down}\right] \text{x} \\ &\text{x}\left(u_{\text{ДГУ}i} - u_{\text{ДГУ}i-1}\right) \ge 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $h_i^{down}(t-1)$ – число последовательных часов в течение которых i-я ДГУ простаивала на момент окончания предыдущего расчетного интервала времени – (t-1)-го часа; T_i^{down} – минимально допустимое число последовательных часов простоя i-й ДГУ.

6) Готовность к работе СНЭ:

$$a_{\text{СНЭ}k} \cdot N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар/разр}}(t) - N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар/разр}}(t) = 0, \quad (11)$$

где $a_{\text{СНЭ}k}$ – бинарный коэффициент доступности k-й СНЭ в момент времени t.

7) Поддержание уровня заряда СНЭ в допустимых пределах [4, 19, 20]:

$$\begin{aligned} &\left(1 - DOD_k^{min}\right) \le \eta_k^S \cdot SOC_k(t-1) + \\ &+ \frac{100 \cdot \Delta t}{C_k} \cdot \left(N_{\text{СНЭ}k}^{\text{зар}}(t)\eta_k^{\text{зар}} + \frac{N_{\text{СНЭ}k}^{\text{разр}}(t)}{\eta_k^{\text{разр}}}\right) \le \\ &\le SOC_k^{max}, \end{aligned} \quad (12)$$

[10]ГК ТСС: правильный выбор дизельной генераторной установки. Режим доступа: https://xn--80aaigboe2bzaiqsf7i.xn--p1ai/upload/articles/pdf/sphereoilandgas_2019-5_tss.pdf (дата обращения: 10.04.2024).

где η_k^S – коэффициент саморазряда k-й СНЭ, %; C_k – емкость k-й СНЭ, кВт·ч; DOD_k^{min} – минимально допустимая глубина разряда, %; SOC_k – уровень заряда k-й СНЭ, %; $\eta_k^{зар}$, $\eta_k^{разр}$ – КПД СНЭ при заряде и разряде АКБ, %.

8. Ограничение допустимой скорости (мощности) разряда/заряда k-й СНЭ:

$$N_{СНЭk}^{зар}(t) \le N_{СНЭk}^{зарmax};$$
$$N_{СНЭk}^{разр}(t) \le N_{СНЭk}^{разрmax}, \quad (13)$$

где $N_{СНЭk}^{зарmax}$, $N_{СНЭk}^{разрmax}$ – максимально-допустимые значения мощности заряда и разряда k-й СНЭ.

9. Невозможность одновременного разряда и заряда СНЭ:

$$N_{СНЭk}^{зар}(t) \cdot N_{СНЭk}^{разр}(t) = 0. \quad (14)$$

10. Готовность к работе j-го инвертора СЭС:

$$a_{СЭСj} \cdot N_{PVi}(t) - N_{PVi}(t) = 0, \quad (15)$$

где $a_{СЭСj}$ – бинарный коэффициент доступности j-го инвертора СЭС в момент времени t.

В связи с указанными техническими ограничениями на режимы работы оборудования СДК и видом целевой функции, задача выбора состава включенного генерирующего оборудования относится к задачам смешанного целочисленного нелинейного программирования (MINLP).

Для решения задач смешанного целочисленного нелинейного программирования может быть использовано достаточно большое количество программных продуктов. К свободно распространяемым решениям относится библиотека Pyomo для языка программирования Python, представляющая интерфейс ко многим решателям оптимизационных задач:

1. Couenne, IPOPT – свободно распространяемые решатели задач нелинейного программирования.

2. SNOPT, CONOPT – коммерческие решатели задач нелинейного программирования.

Основная цель оптимизации планирования заключается в нахождении набора диспетчерских решений, при которых эксплуатационные расходы на СДК минимизируются, и выполняются все ограничения. Для решения поставленной оптимизационной задачи использовался решатель Couenne.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы проиллюстрировать способ решения задачи прогнозирования оптимального режима работы СДК с использованием предложенной формулировки, был рассмотрен пример СДК, показанный на рис. 1, с параметрами, указанными в табл. 1.

В этом исследовании используются почасовые данные о солнечной радиации за четыре характерных дня в соответствии с данными TMY из геоинформационной системы PVGIS и данные об электрической нагрузке для типичного автономного потребителя, расположенного на территории Дальневосточного федерального округа.

Режим работы СДК за каждый «характерный» день был рассчитан двумя способами:

1) без выполнения оптимизации суточного плана работы и с использованием паспортных характеристик расхода топлива ДГУ;

2) с учетом реальных топливных характеристик ДГУ выполнялась оптимизация планового суточного режима работы.

Численные результаты расчетов приведены в табл. 3. Пример суточного режима работы СДК с указанием периодов работы

Таблица 3. Сравнительные результаты режимов работы солнечно-дизельного комплекса
Table 3. Comparative results of solar-diesel complex operating modes

День	Оптимизация режима работы СДК	Выработка энергии СЭС, кВт·ч в день	Выработка энергии ДЭС, кВт·ч в день	Расход топлива, л	δ, %
Характерный зимний день	нет	9,19	835,26	296,95	-3,65
	да	9,99	845,75	307,79	
Характерный день весенне-осеннего периода	нет	51,78	661,43	227,09	-14,51
	да	56,29	668,21	260,03	
Характерный летний день	нет	57,15	183,12	117,97	-30,24
	да	58,74	192,91	153,64	

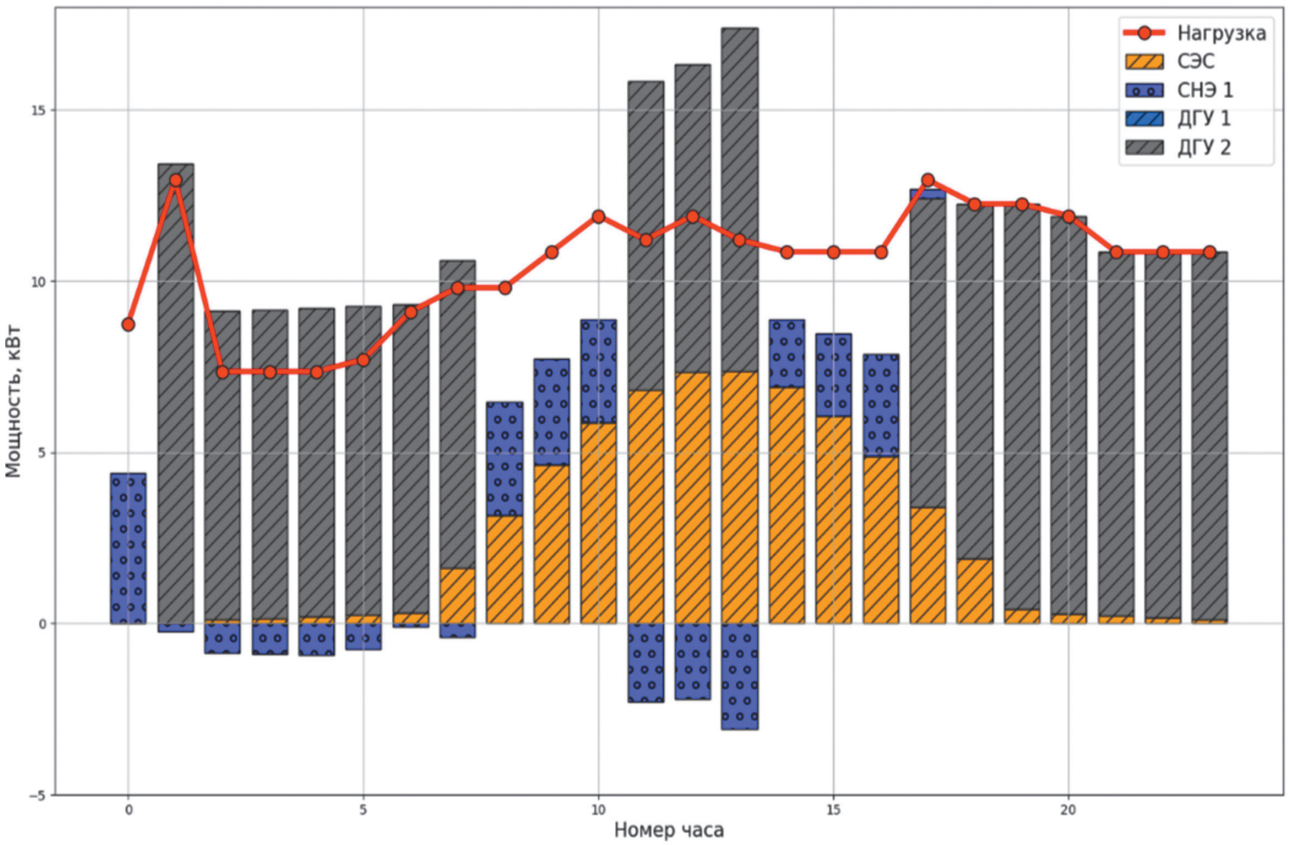

Рис. 3. *Пример суточного режима работы солнечно-дизельного комплекса*
Fig. 3. *An example of solar-diesel complex daily operating mode*

основного энергетического оборудования в графическом виде представлен на рис. 3.

Анализ приведенных в табл. 3 результатов моделирования суточного режима работы СДК показывает:

– за характерный зимний день расход топлива может быть уточнен на 3,65%;

– за характерный день весенне-осеннего периода расход топлива может быть уточнен на 14,51%;

– за характерный летний день расход топлива может быть уточнен на 30,24%.

Таким образом, при упрощенном методе управления режимом работы без проведения его предварительной оптимизации и без учета реальных энергетических характеристик ДГУ такой важнейший показатель работы, как расход топлива (напрямую влияющий на экономическую эффективность проекта СДК), может быть занижен на величину до одной трети, что даст инвестору неверное представление об экономической эффективности проекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ выбора состава включенного генерирующего оборудования СДК отличается от существующих тем, что учитывает прогноз солнечного излучения на весь период планирования, а также обеспечивает оптимальное распределение мощности между ДГУ дизельной электростанции с учетом их индивидуальных характеристик.

Анализ полученных результатов показал, что использование предложенного способа определения режима работы СДК приводит, соответственно, к уточнению эффективности на величину до 30%.

Список источников

1. Belila A., Benbouzid M., Berkouk E.-M., Amirat Y. On energy management control of a PV-diesel-ESS based microgrid in a stand-alone context // Energies. 2018. Vol. 11. Iss. 8. P. 2164. https://doi.org/10.3390/en11082164.
2. Mohamed M.M., Zoghby H.M.El., Sharaf S.M., Mosa M.A. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid // Journal of Energy Storage. 2022. Vol. 51. P. 104317. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104317.

3. Виноградов А.А. Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 2. С. 411–419. https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419. EDN: XOOCUH.
4. Djohra S., Aries N. Cost optimization of a wind-solar-diesel system with battery storage // Journal of Renewable Energies. 2022. Vol. 25. Iss. 1. P. 127–151. https://doi.org/10.54966/jreen.v25i1.1076.
5. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic array performance model. 2004. Режим доступа: https://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/043535.pdf (дата обращения: 30.09.2024).
6. Soto W., Klein S., Beckman W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance // Solar Energy. 2006. Vol 80. P. 78-88. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.06.010.
7. King D.L., Gonzalez S., Galbraith G.M., Boyson W.E. Performance model for grid-connected photovoltaic inverters. 2007. https://doi.org/10.2172/920449.
8. Diaf S., Diaf D., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system // Energy Policy. 2007. Vol. 35. Iss. 11. P. 5708–5718. https://doi.org/ 10.1016/j.enpol.2007.06.020.
9. Марьенков С.А. Применение технологии накопления электрической энергии для увеличения надежности системы электроснабжение на базе возобновляемых источников электрической энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-2. С. 103–107. https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.094.
10. Булатов Р.В., Насыров Р.Р., Бурмейстер М.В. Применение систем накопления электроэнергии для повышения коэффициента использования установленной мощности электростанций на базе возобновляемых источников энергии в составе электрических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 6. С. 74–80. EDN: XKDFJJ.
11. Елистратов В.В., Конищев М.А., Денисов Р.С., Богун И.В. Арктическая ветродизельная электростанция с интеллектуальной системой автоматического управления // Электричество. 2022. № 2. С. 29–37. https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-2-29-37. EDN ZWLNQR.
12. Карамов Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9. С. 133–140. EDN: UJWFLH.
13. Рыбаков В.В., Пешехонов Н.Е., Воронин А.Е. К вопросу повышения эффективности функционирования дизельных электростанций // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 9. С. 488–494. EDN: VLBIYU.
14. Narynbaev A.F., Kremer V.A., Vaskov A.G. Evaluating day-ahead solar radiation forecasts from ICON, GFS, and MeteoFrance global NWP models // Applied Solar Energy. 2024. Vol. 60. No. 3. P. 491–500. https://doi.org/10.3103/S0003701X24600152.
15. Holmgren W.F., Hansen C.W., Mikofski M.A. Pvlib python: a python package for modeling solar energy systems // The Journal of Open Source Software. 2018. No. 3. P. 884. https://doi.org/10.21105/joss.00884.
16. Лаврик А.Ю., Жуковский Ю.Л., Лаврик А.Ю., Булдыско А.Д. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 10–17. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
17. Kusakana K. Daily operation cost minimization of photovoltaic-diesel-battery hybrid systems using different control strategies // IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Yokohama, 9–12 November 2015). Yokohama: IEEE, 2015. P. 003609–003613. https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392661.
18. Orero S.O., Irving M.R. Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 1997. Vol. 19. Iss. 1. P. 45–55. https://doi.org/10.1016/S0142-0615(96)00028-2.
19. Sidorov D., Muftahov I., Tomin N., Karamov D., Panasetsky D., Dreglea A. A dynamic analysis of energy storage with renewable and diesel generation using Volterra equations // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2020. Vol. 16. Iss. 5. P. 3451–3459. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2932453.
20. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimising system weight // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 119. P. 279–288. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.050.

References

1. Belila A., Benbouzid M., Berkouk E.-M., Amirat Y. On energy management control of a PV-diesel-ESS based microgrid in a stand-alone context. *Energies.* 2018;11(8):2164. https://doi.org/10.3390/en11082164.
2. Mohamed M.M., Zoghby H.M.El., Sharaf S.M., Mosa M.A. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid. *Journal of Energy Storage*. 2022;51:104317. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104317.
3. Vinogradov A.A. Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallelly operating generators for the power factor of loading of each generator. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo*

i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2018;10(2):411-419. (In Russ.). https://doi.org/10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419. EDN: XOOCUH.
4. Djohra S., Aries N. Cost optimization of a wind-solar-diesel system with battery storage. *Journal of Renewable Energies*. 2022;25(1):127-151. https://doi.org/10.54966/jreen.v25i1.1076.
5. King D.L., Boyson W.E., Kratochvil J.A. Photovoltaic array performance model. Available from: https://energy.sandia.gov/wp-content/gallery/uploads/043535.pdf [Accessed 30th September 2024].
6. Soto W., Klein S., Beckman W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*. 2006;80:78-88. https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2005.06.010.
7. King D.L., Gonzalez S., Galbraith G.M., Boyson W.E. Performance model for grid-connected photovoltaic inverters. 2007. https://doi.org/10.2172/920449.
8. Diaf S., Diaf D., Belhamel M., Haddadi M., Louche A. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*. 2007;35(11):5708-5718. https://doi.org/ 10.1016/j.enpol.2007.06.020.
9. Marenkov S.A. Applying of electrical energy storage technologies to increase the reliability of power system based on renewable energy sources. *International Research Journal*. 2016;6-2:103-107. (In Russ.). https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.48.094.
10. Bulatov R.V., Nasyrov R.R., Burmeyster M.V. Application of energy storage systems for the purpose of improving the installed capacity utilization factor of power plants based on renewable energy sources within electric systems. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2021;6:74-80. (In Russ.). EDN: XKDFJJ.
11. Elistratov V.V., Konishchev M.A., Denisov R.S., Bogun I.V. An Arctic wind-diesel power plant with an intelligent automatic control system. *Elektrichestvo*. 2022;2:29-37. (In Russ.). https://doi.org/10.24160/0013-5380-2022-2-29-37. EDN ZWLNQR.
12. Karamov D.N. Mathematical modeling of an autonomous power supply system using renewable energy sources. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;9:133-140. (In Russ.). EDN: UJWFLH.
13. Rybakov V.V., Peshekhonov N.E., Voronin A.E. On the issue of improving the efficiency of diesel power plants. *Proceedings of the Tula State University.* 2020;9:488-494. (In Russ.). EDN: VLBIYU.
14. Narynbaev A.F., Kremer V.A., Vaskov A.G. Evaluating day-ahead solar radiation forecasts from ICON, GFS, and MeteoFrance global NWP models. *Applied Solar Energy*. 2024;60(3):491-500. https://doi.org/10.3103/S0003701X24600152.
15. Holmgren W.F., Hansen C.W., Mikofski M.A. Pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. *The Journal of Open Source Software*. 2018;3:884. https://doi.org/10.21105/joss.00884.
16. Lavrik A.Y., Zhukovsky Y.L., Lavrik A.Y., Buldysko A.D. Fatures of the optimal composition of a wind-solar power plant with diesel generators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):10-17. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
17. Kusakana K. Daily operation cost minimization of photovoltaic-diesel-battery hybrid systems using different control strategies. In: *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 9–12 November 2015, Yokohama. Yokohama: IEEE; 2015, p. 003609-003613. https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392661.
18. Orero S.O., Irving M.R. Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 1997;19(1):45-55. https://doi.org/10.1016/S0142-0615(96)00028-2.
19. Sidorov D., Muftahov I., Tomin N., Karamov D., Panasetsky D., Dreglea A. A dynamic analysis of energy storage with renewable and diesel generation using Volterra equations. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2020;16(5):3451-3459. https://doi.org/10.1109/TII.2019.2932453.
20. Cristóbal-Monreal I.R., Dufo-López R. Optimisation of photovoltaic–diesel–battery stand-alone systems minimising system weight. *Energy Conversion and Management*. 2016;119:279-288. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.050.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Васьков Алексей Геннадьевич,
к.т.н.,
доцент кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1, Россия
✉ VaskovAG@mpei.ru
https://orcid.org/0000-0003-4664-8008

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Aleksey G. Vaskov,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Hydropower and Renewable Energy Sources,
National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow
111250, Russia
✉ VaskovAG@mpei.ru
https://orcid.org/0000-0003-4664-8008

Заявленный вклад автора

Автор выполнил аналитическую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 10.11.2024 г.; принята к публикации 13.11.2024 г.

Author contribution

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Information about the article

The article was submitted 20.10.2024; approved after reviewing 10.11.2024; accepted for publication 13.11.2024.