

Научная статья

УДК 621.311.236

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-10-16

Бельский Алексей Анатольевич*, Емельянов Евгений Александрович

Санкт-Петербургский горный университет

*E-mail: s225028@stud.spmi.ru

МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВТОНОМНОГО ГИБРИДНОГО ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА



Информация о статье

Поступила:

01 декабря 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

14 декабря 2023 г.

Принята к печати:

19 декабря 2023 г.

Опубликована:

21 декабря 2023 г.

Ключевые слова:

автономный гибридный комплекс, оптимизация состава, дизельная электростанция, дизель-генераторная установка, оценка жизненного цикла

Аннотация.

Дизельная электростанция является одним из наиболее часто встречающихся компонентов в составе автономных гибридных комплексов на основе возобновляемых источников энергии. Основным параметром дизельной электростанции является расход топлива, значение которого влияет напрямую на эксплуатационные затраты, а также косвенно на оптимальные значения установленной мощности других компонентов гибридного комплекса. Типовой подход к расчету расхода дизельного топлива, который используется в большинстве научных работ, не учитывает влияние номинальной мощности дизель-генераторных установок на удельный расход топлива. В работе выполнена оценка жизненного цикла дизельной электростанции в составе автономного гибридного комплекса с ветроэлектрической установкой. Предложена авторская модель расчета расхода дизельного топлива с учетом технических (паспортных) данных дизель-генераторных установок и их текущей загрузки в составе дизельной электростанции. На основе данных реанализа скорости ветра и реальных данных нагрузки поселка Гыда (Ямало-Ненецкий автономный округ) проведено имитационное моделирование, по итогам которого определено расхождение результатов между авторской и типовой моделями, что на длительных промежутках времени приводит к значительному расхождению при экономической оценке работы комплекса.

Для цитирования: Бельский А.А., Емельянов Е.А. Модель дизельной электростанции при оценке жизненного цикла автономного гибридного ветроэлектрического комплекса // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 6 (170). С. 10-16. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-10-16, EDN: DUZAPU

Актуальная для России проблема электроснабжения удаленных потребителей может быть решена за счет внедрения автономных гибридных комплексов (АГК) на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1]. Проектированию АГК посвящено множество научных работ, однако нет единого мнения касательно его оптимального состава [2]. Наиболее распространенной темой последних исследований является применение эвристических алгоритмов и методов искусственного интеллекта для повышения эффективности проектирования АГК [3-4]. Несмотря на наличие современных программных комплексов и алгоритмов, позволяющих оценить значительное количество параметров гибридных систем [5-6], некоторые компоненты си-

стемы все еще представлены в упрощенном варианте [7].

Типовая модель расхода дизельного топлива

Одними из основных элементов АГК на базе ВИЭ являются дизель-генераторные установки (ДГУ), входящие в состав дизельной электростанции (ДЭС) [8-9], которая позволяет повысить надежность системы электроснабжения и обеспечивает потребителя в периоды дефицита энергии от ВИЭ [10]. В современных работах для оценки расхода дизельного топлива (ДТ) используется типовой подход, основанный на формуле (1) [11-13]:

$$F(t) = a \cdot P_R + b \cdot P_{dg}(t) \quad (1)$$

где $F(t)$ – расход ДТ за интервал времени t , л/ч; a , b – эмпирические коэффициенты, связывающие расход ДТ и загрузку ДГУ, л/кВт·ч; P_R и $P_{dg}(t)$ – номинальная и текущая мощности ДГУ соответственно, кВт.

В работе [14] предлагается использовать для ДГУ мощностью больше 20 кВт коэффициенты a и b , равные 0,0184 и 0,2088 соответственно. В работе [15] принимаются значения 0,085 и 0,246 для коэффициентов a и b как «типовые».

В работе [16] сначала выбирают модельный ряд ДГУ, затем с помощью линейной аппроксимации

Таблица 1. Технические (паспортные) параметры ДЭС [19].

Table 1. Technical (nameplate) parameters of DG.

Модель ДГУ	Номинальная мощность, кВт	Расход топлива при загрузке, л/ч		
		50%	75%	100%
АД-80	80	14.1	20.0	26.0
АД-100	100	16.8	24.1	31.4
АД-150	150	23.0	33.4	44.1
АД-160	160	24.3	35.5	46.9
АД-180	180	27.1	39.6	52.3
АД-200	200	29.3	42.6	56.1
АД-220	220	31.9	46.5	61.4
АД-240	240	34.8	50.7	66.9
АД-250	250	35.9	52.4	69.0
АД-275	275	40.0	58.1	76.4
АД-300	300	43.2	63.0	82.9
АД-315	315	45.2	65.9	86.9
АД-320	320	45.9	66.9	88.2
АД-350	350	49.5	72.4	95.7
АД-360	360	50.8	74.3	98.3
АД-400	400	55.6	81.6	108.1

паспортных данных получают значения коэффициентов a и b , а после определяют состав ДЭС.

Из формулы (1) получено выражение (2) для расчета удельного расхода ДТ:

$$F_{уд} = \frac{F(t)}{P_{dg}(t)} = a \cdot \frac{P_R}{P_{dg}(t)} + b = a \cdot \frac{1}{L(t)} + b \quad (2)$$

где $L(t)$ – текущая нагрузка ДГУ относительно номинальной мощности от 0 до 1.

Исходя из формулы (2), удельный расход ДТ не зависит от номинальной мощности ДГУ. В реальности удельный расход ДТ снижается по мере увеличения номинальной мощности ДГУ, что видно на Рис. 1. Таким образом, применение формулы (1) для расчета расхода ДТ не позволяет определить оптимальный с точки зрения расхода ДТ состав ДЭС.

Точность оценки расхода ДТ напрямую влияет на оптимальный состав всего АГК. Завышение рас-

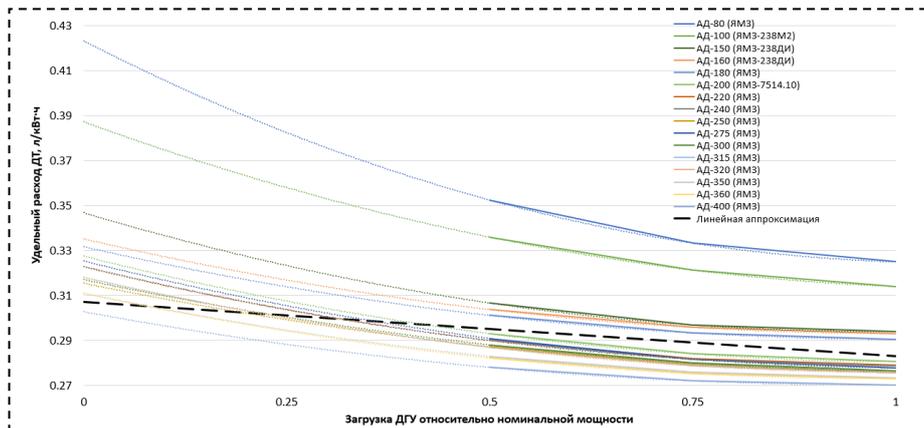


Рис. 1. График удельного расхода ДТ (материал авторов)

Fig. 1. Graph of specific diesel fuel consumption

хода ДТ приводит к выводу о необходимости повышения мощности ветроэлектрической станции (ВЭС) и/или емкости системы накопления энергии (СНЭ), занижение расхода ДТ ставит под вопрос необходимость внедрения СНЭ [17-18].

Авторская модель расхода дизельного топлива

В работе предлагается авторская математическая модель для оценки расхода ДТ, основанная на аппроксимации технических (паспортных) параметров ДГУ и учитывающая их номинальную мощность при расчете удельного расхода ДТ.

Авторская модель строится на основе паспортных данных ДЭС с двигателями Ярославского моторного завода (ЯМЗ) мощностью от 80 до 400 кВт с 8 и более цилиндрами, расположенными V-образно. В Таблице 1 представлены технические параметры рассматриваемых ДГУ.

На Рис. 1 изображены графики зависимости удельного расхода ДТ для каждой модели из Таблицы 1. Значения удельного расхода при загрузке относительно номинальной мощности от 0 до 0,5 получены квадратичной аппроксимацией методом наименьших квадратов.

Черной штрихпунктирной линией изображен удельный расход ДТ, полученный в соответствии с типовыми расчетами линейной аппроксимацией удельных расходов всех моделей (коэффициенты a и b соответственно равны 0,0121 и 0,2716).

Квадратичная аппроксимация позволяет уменьшить среднюю ошибку аппроксимации. Авторская модель представляет удельный расход топлива в виде (3):

$$F_{уд} = k_1 \cdot L^2(t) + k_2 \cdot L(t) + k_3 \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, полученные при аппроксимации методом наименьших квадратов.

На следующем этапе коэффициенты, полученные для каждой модели, аппроксимируются по номинальной мощности. Наименьшая средняя ошибка соответствует гиперболической аппроксимации.

Коэффициенты k_1, k_2, k_3 определяются формулами (4-6):

$$k_1 = k_{11} + \frac{k_{12}}{P_R} \quad (4)$$

$$k_2 = k_{21} + \frac{k_{22}}{P_R} \quad (5)$$

$$k_3 = k_{31} + \frac{k_{32}}{P_R} \quad (6)$$

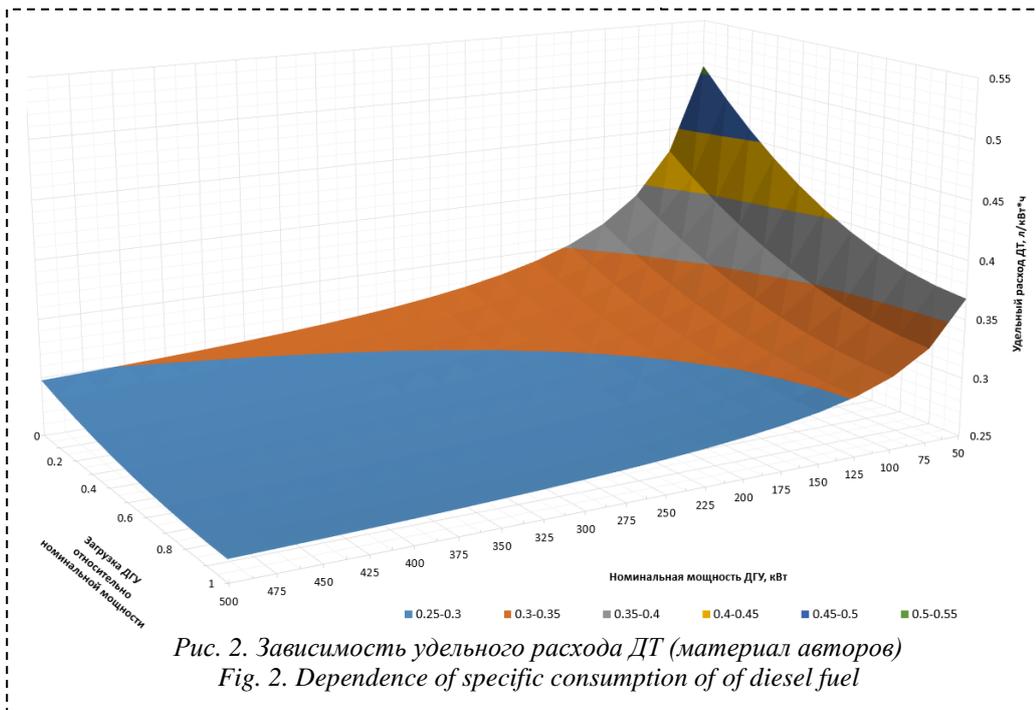


Рис. 2. Зависимость удельного расхода ДТ (материал авторов)
Fig. 2. Dependence of specific consumption of of diesel fuel

расход ДТ.

Имитационное моделирование

Для оценки расхода авторского и типового подходов проводится моделирование работы АГК.

На основе записей журнала работы ДЭС из 36 суточных графиков нагрузки с 2-часовыми интервалами поселка Гыда (Ямало-Ненецкий автономный округ), представленных на Рис. 3, методом интерполяции получен годовой график нагрузки, представленный в виде

Значения коэффициентов, полученных при гиперболической аппроксимации, указаны в Таблице 2.

На Рис. 2 изображена зависимость удельного расхода ДТ от номинальной мощности ДГУ и ее загрузки относительно номинальной мощности.

Рис. 2 показывает, что наибольшее влияние значения номинальной мощности на удельный расход ДТ происходит в диапазоне до 150 кВт, а загрузка ДГУ для установок с большой номинальной мощностью имеет минимальное влияние на удельный

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации (материал авторов)

Table 2. Coefficients of approximation

Коэффициенты	Значение
k_{11}	0.0185
k_{21}	-0.0361
k_{31}	0.2745
k_{12}	5.3978
k_{22}	-11.4831
k_{32}	11.6284

Таблица 3. Параметры комплекса и нагрузки (материал авторов)

Table 3. Complex and load parameters

Параметры	Значения параметров	
	Вариант 1	Вариант 2
Мощность ВЭС	1300 кВт	260 кВт
Мощность ДЭС	1800 кВт	380 кВт
Макс. нагрузка	1300 кВт	260 кВт
Мин. нагрузка	200 кВт	40 кВт
Высота башни ВЭУ	55 м	
Мин. скорость ветра ВЭУ	3,5 м/с	
Макс. скорость ветра ВЭУ	25 м/с	
Ном. скорость ветра ВЭУ	14 м/с	

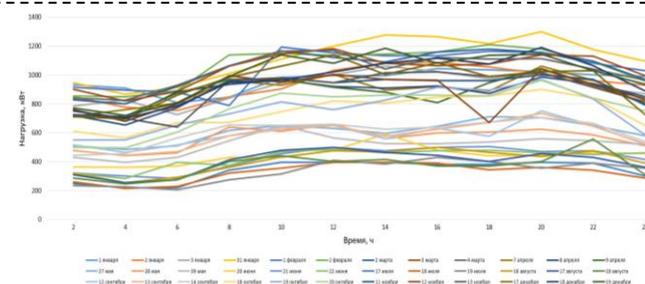


Рис. 3. Суточные графики нагрузки (материал авторов)
Fig. 3. Daily load schedules

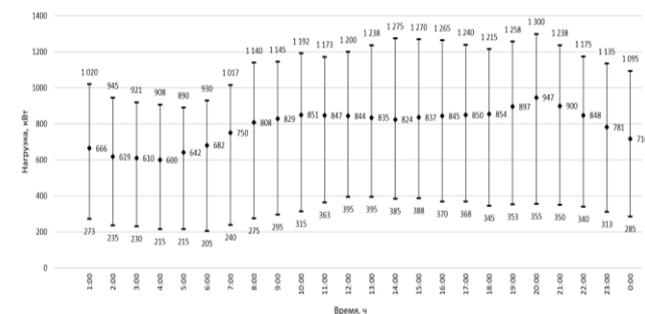


Рис. 4. Годовой набор данных нагрузки (материал авторов)
Fig. 4. Annual load dataset

диаграммы размаха на Рис. 4.

Нижние границы диаграммы соответствуют минимальным значениям нагрузки в летний период, верхние – максимальным значениям нагрузки в зимний период. Медианные значения для каждого часа в сутках указаны ромбом.

Для моделирования используются часовые данные скорости ветра NASA MERRA 2, популярность и точность которых обоснована в работах [20-21].

Таблица 4. Результаты моделирования (материал авторов)

Table 4. Modeling results

№	Мощность ДЭС, кВт	Номинальная мощность ДГУ в составе ДЭС	Расход ДТ при типовом расчете	Расход ДТ по авторской модели	Расхождение результатов относительно авторской модели	
					-60 тонн	-6.7%
Вариант 1	1800	300, 300, 300, 300, 300, 300	950.9 тонн	890.9 тонн	-60 тонн	-6.7%
Вариант 2	380	80, 100, 100, 100	191.4 тонн	201.4 тонн	10 тонн	5%

На основе значений скорости ветра рассчитывается генерация ВЭС [22], которая сравнивается с нагрузкой. В часы дефицита энергии включается ДЭС [23].

Моделирование проводится для 2 вариантов комплекса: работающего на реальную нагрузку 1300 кВт и работающего на нагрузку в 5 раз меньше (260 кВт). Параметры моделируемых комплексов приведены в Таблице 3.

Результаты моделирования приведены в Таблице 4. Для 1-го варианта комплекса расхождение результатов расхода ДТ составило -6,7% (-60 тонн), а для 2-го 5% (10 тонн).

Использование типового подхода, не учитывающего номинальные мощности ДГУ при расчете удельного расхода ДТ, приводит к завышенным значениям расхода ДТ для ДЭС большой мощности.

Для ДЭС малой мощности ситуация противоположна, полученные по типовому подходу значения занижены относительно авторской модели.

При средней стоимости ДТ 75 руб./л [24] разница в экономической оценке для 1-го варианта составит 5,4 млн рублей.

Учитывая, что основными критериями параметрического синтеза гибридных комплексов являются экономические показатели [25-26], завышение эксплуатационных расходов на ДЭС приведет к ошибкам на стадии проектирования, а также не позволит определить оптимальный с точки зрения расхода ДТ состав ДЭС.

Заключение

1. Обоснована актуальность проблемы повышения точности расчета расхода дизельного топлива.

2. Предложена авторская модель расчета расхода топлива для дизельной электростанции, учитывающая номинальную мощность дизель-генераторных установок.

3. Получен график нагрузки для непромышленного децентрализованного потребителя, основанный на реальных данных из журнала работы дизельной электростанции.

4. По результатам имитационного моделирования определена степень расхождения результатов расхода дизельного топлива при использовании типовой и авторской моделей, которая в среднем равна 7%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aberilla J. M. [et al.] Design and environmental sustainability assessment of smallscale off-grid energy systems for remote rural communities // *Applied Energy*. 2020. V. 258. P. 114004.

2. Ogunjuigbe A. S. O., Ayodele T. R., Akinola O. A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building // *Applied Energy*. 2016. V. 171. P. 153-171.

3. Fathy A., Kaaniche K., Alanazi T. M. Recent approach based social spider optimizer for optimal sizing of hybrid PV/wind/battery/diesel integrated microgrid in aljouf region // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 57630-57645.

4. Шклярский Я. Э., Батуева Д. Е. Разработка алгоритма выбора режимов работы комплекса электроснабжения с ветродизельной электростанцией // *Записки Горного института*. 2022. Т. 253. С. 115-126.

5. Lu J. [et al.] Multi-objective optimal design of stand-alone hybrid energy system using entropy weight method based on HOMER // *Energies*. 2017. V. 10. №. 10. P. 1664.

6. Непша Ф. С., Варнавский К. А., Воронин В. А., Заславский И. С., Ливен А. С. Перспективы применения генерации на возобновляемых источниках энергии на угледобывающих предприятиях // *Записки Горного института*. 2023. Том 261. С. 455-469.

7. Бельский А. А., Емельянов Е. А. Анализ степени влияния учета характеристик литий-ионных аккумуляторов на оценку жизненного цикла гибридного комплекса с ветроэлектрической установкой // *Горное оборудование и электромеханика*. 2023. №. 3. С. 13-21.

8. Yang Z. [et al.] Robust multi-objective optimal design of islanded hybrid system with renewable and diesel sources/stationary and mobile energy storage systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Т. 148. С. 111295.

9. Ogunjuigbe A. S. O., Ayodele T. R., Akinola O. A. Оптимальное распределение и размер гибридной энергетической системы PV/Wind/Split-diesel/Battery для минимизации стоимости жизненного цикла, выбросов углерода и энергии сброса удаленного жилого здания // *Прикладная энергетика*. 2016. Т. 171. С. 153-171.

10. Elkadeem M. R. [et al.] Techno-economic design and assessment of grid-isolated hybrid renewable energy system for agriculture sector // 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2019. С. 1562-1568.

11. Olatomiwa L. [et al.] Hybrid renewable energy supply for rural healthcare facilities: Подход к качественному оказанию медицинской помощи // *Устойчивые энергетические технологии и оценки*. 2018. Т. 30. С. 121-138.

12. Jahangiri M., Haghani A., Mostafaeipour A., Khosravi A., Raеisi H.A. Оценка солнечно-ветровых электростанций в Афганистане: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 99:169–190.

13. Baghdadi F. et al. Техничко-экономическое обоснование и анализ преобразования энергии автономной гибридной системы возобновляемых источников энергии // *Energy Conversion and Management*. 2015. Т. 105. С. 471–479.

14. Suhane P. [et al.] Sizing and performance analysis of standalone wind-photovoltaic based hybrid energy system using ant colony optimization // *IET Renewable Power Generation*. 2016. 10 (7). P. 964–972.

15. Lujano-Rojas J. M. [et al.] Optimum load management strategy for wind/diesel/battery hybrid power systems // *Renewable Energy*. 2012. Т. 44. С. 288–295.

16. Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // *Energies*. 2021. V. 14. №. 16. P. 5059.

17. Абрамович Б. Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // *Записки горного института*. 2018. Т. 229. С. 31–40.

18. Лаврик А. Ю., Жуковский Ю. Л., Максимов Н. А. Определение оптимального состава резервируемой гибридной ветро-солнечной электростанции // *Промышленная энергетика*. 2019. №10. С. 47–53.

19. Каталог продукции «Дизель компания» - Электронный ресурс URL:

<https://www.comd.ru/catalog/> (Дата обращения: 1.12.2023)

20. Ramon J. [et al.] What global reanalysis best represents near-surface winds? // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2019. V. 145. №. 724. p. 3236–3251.

21. Yu J. [et al.] Evaluation of near-surface wind speed changes during 1979 to 2011 over China based on five reanalysis datasets // *Atmosphere*. 2019. V. 10. № 12. P. 804.

22. Rajanna S., Saini, R. P. Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area // *Energy*. 2016. 111. P. 803–817.

23. Лаврик А. Ю. [и др.] Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. Т. 22. №. 1. С. 10–17.

24. Петроп Плюс: стоимость дизельного топлива – Электронный ресурс URL: <https://www.petroplus.ru/fuelindex/yamalo-nenetskiy-avtonomny-okrug/diesel/> (Дата обрращения: 1.12.2023)

25. Al-Falahi M. D. A., Jayasinghe S. D. G., Enshaei H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system // *Energy conversion and management*. 2017. V. 143. P. 252–274.

26. Kaabeche A., Ibtouen R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system // *Solar Energy*. 2014. V. 103. P. 171–182.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Бельский Алексей Анатольевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2), e-mail: s225028@stud.spmi.ru

Емельянов Евгений Александрович, аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2)

Заявленный вклад авторов:

Бельский А.А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Емельянов Е.А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-10-16

Aleksey A. Belskiy*, **Evgeniy A. Emelyanov**

St. Petersburg Mining University

*E-mail: s225028@stud.spmi.ru

DIESEL POWER PLANT MODEL IN LIFE CYCLE ASSESSMENT OF AUTONOMOUS HYBRID WIND POWER SYSTEM



Article info

Received:

01 December 2023

Accepted for publication:

14 December 2023

Accepted:

19 December 2023

Published:

21 December 2023

Keywords: autonomous hybrid complex, optimization of composition, diesel power plant, diesel-generator set, life cycle assessment.

Abstract.

Diesel power plant is one of the most common components of autonomous hybrid complexes based on renewable energy sources. The main parameter of a diesel power plant is fuel consumption, the value of which affects directly the operating costs, as well as indirectly on the optimal values of installed capacity of other components of the hybrid complex. The typical approach to the calculation of diesel fuel consumption, which is used in most scientific works does not take into account the influence of the nominal capacity of diesel-generator sets on the specific fuel consumption. In this paper the life cycle of a diesel power plant in the composition of an autonomous hybrid complex with a wind turbine is evaluated. The author's model of calculation of diesel fuel consumption taking into account technical (passport) data of diesel-generator units and their current load in the diesel power plant is proposed. On the basis of the wind speed reanalysis data and real load data of Gyda settlement (Yamalo-Nenets Autonomous District) simulation modeling is carried out, according to the results of which the divergence of results between the author's and typical models is determined, which at long time intervals leads to a significant difference in the economic evaluation of the complex operation.

For citation: Belskiy A.A., Emelyanov E.A. Diesel power plant model in life cycle assessment of autonomous hybrid wind power system. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2023; 6(170):10-16 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-6-10-16, EDN: DUZAPU

REFERENCES

1. Aberilla J. M. [et al.] Design and environmental sustainability assessment of small-scale off-grid energy systems for remote rural communities. *Applied Energy*. 2020; 258:114004.
2. Ogunjuyigbe A.S.O., Ayodele T.R., Akinola O.A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Applied Energy*. 2016; 171:153-171.
3. Fathy A., Kaaniche K., Alanazi T.M. Recent approach based social spider optimizer for optimal sizing of hybrid PV/wind/battery/diesel integrated microgrid in aljouf region. *IEEE Access*. 2020; 8:57630–57645.
4. Shklyarskiy Ya.E., Batueva D.E. Development of the algorithm for selecting the operating modes of the power supply complex with a wind-diesel power plant. *Notes of the Mining Institute*. 2022; 253:115–126.
5. Lu J. [et al.] Multi-objective optimal design of stand-alone hybrid energy system using entropy weight method based on HOMER. *Energies*. 2017; 10(10):1664.
6. Nepsha F.S., Varnavskiy K.A., Voronin V.A., Zaslavskiy I.S., Lieven A.S. Prospects for the application of generation on renewable energy sources at coal-mining enterprises. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2023; 261:455–469.
7. Belskiy A.A., Emelyanov E.A. Analysis of the effect of implication of accounting the characteristics of lithium-ion accumulators on evaluation of life cycle of hybrid complex with windroelectric installation. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2023; 3:13–21.
8. Yang Z. [et al.] Robust multi-objective optimal design of islanded hybrid system with renewable and diesel sources/stationary and mobile energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021; 148:111295.
9. Ogunjuyigbe A. S. O., Ayodele T. R., Akinola O. A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Applied Energy*. 2016; 171:153–171.
10. Elkadeem M. R. [et al.] Techno-economic design and assessment of grid-isolated hybrid renewable energy system for agriculture sector. *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE. 2019. Pp. 1562–1568.
11. Olatomiwa L. [et al.] Hybrid renewable energy supply for rural healthcare facilities: An approach to quality healthcare delivery. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2018; 30:121–138.
12. Jahangiri M., Haghani A., Mostafaeipour A., Khosravi A., Raeisi H.A. Assessment of solar-wind power plants in Afghanistan: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 99:169–190.
13. Baghdadi F. [et al.] Feasibility study and energy conversion analysis of stand-alone hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management*. 2015; 105:471–479.
14. Suhane P. [et al.] Sizing and performance analysis of standalone wind-photovoltaic based hybrid en-

ergy system using ant colony optimization. *IET Renewable Power Generation*. 2016; 10 (7):964–972.

15. Lujano-Rojas J. M. [et al.] Optimum load management strategy for wind/diesel/battery hybrid power systems. *Renewable Energy*. 2012; 44:288–295.

16. Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*. 2021; 14(16):5059.

17. Abramovich B.N. System of uninterrupted power supply of mining enterprises. *Notes of the Mining Institute*. 2018; 229:31–40.

18. Lavrik A.Yu., Zhukovsky Yu. L., Maksimov N. A. Determination of the optimal composition of the redundant hybrid wind-solar power plant. *Industrial Energy*. 2019;10:47–53.

19. Product catalog "Diesel Company" – Electronic resource URL: <https://www.comd.ru/catalog/> (Date of reference: 1.12.2023)

20. Ramon J. [et al.] What global reanalysis best represents near-surface winds? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2019; 145(724):3236–3251.

21. Yu J. [et al.] Evaluation of near-surface wind speed changes during 1979 to 2011 over China based

on five reanalysis datasets. *Atmosphere*. 2019; 10(12):804.

22. Rajanna S., Saini R.P. Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area. *Energy*. 2016; 111:803–817.

23. Lavrik A.Yu. [et al.] Peculiarities of the Optimum Composition Selection of the Wind-Solar Power Station with Diesel Generators. *News of higher educational institutions. Problems of power engineering*. – 2020; 22(1):10–17.

24. Petrop Plus: cost of diesel fuel - Electronic resource URL: <https://www.petroplus.ru/fuelindex/yamalo-nenetskiy-avtonomniy-okrug/diesel/> (Rite Date: 1.12.2023)

25. Al-Falahi M.D.A., Jayasinghe S.D.G., Enshaei H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy conversion and management*. 2017; 143:252–274.

26. Kaabeche A., Ibtouen R. Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system. *Solar Energy*. 2014; 103; 171–182.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Aleksey A. Belskiy, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, St. Petersburg Mining University, (199106, Russia, St. Petersburg, 21st Line, 2), e-mail: s225028@stud.spmi.ru

Evgeniy A. Emelyanov, Postgraduate student, St. Petersburg Mining University, (199106, Russia, St. Petersburg, 21st Line, 2)

Contribution of the authors:

Belskiy A.A. – formulation of a research task; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of research; writing text, data collection and analysis; conclusions; writing text.

Emelyanov E.A. – formulation of a research task; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of research; writing text, data collection and analysis; conclusions; writing text.

Author have read and approved the final manuscript.

