

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.548

Валерий Юрьевич Васильев

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», старший преподаватель кафедры электрификации производства и быта, Россия, Барнаул, e-mail: vasilevvaleryrf@yandex.ru

Борис Сергеевич Компанец

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», кандидат технических наук, заведующий кафедрой электрификации производства и быта, Россия, Барнаул, e-mail: kompbs@mail.ru

Елизавета Максимовна Антонова

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», студент, Россия, Барнаул, e-mail: elizabetha25@yandex.ru

Многофакторная математическая модель оценки энергетического потенциала ветроэнергетической установки

Авторское резюме

Состояние вопроса. Высокие темпы роста технического развития общества способствуют повышению уровня потребления электроэнергии, что является одной из причин снижения качества электроэнергии в энергетической системе. Повышение потребляемой мощности приводит к росту пиковых нагрузок и усилению суточных колебаний потребления электроэнергии. В таких условиях возникают колебания напряжений, вызывающие рост тока и падения напряжения в электрической сети, тем самым ухудшая качество поставляемой электроэнергии. Децентрализованная энергетика позволяет приблизить источник генерируемой мощности к потребителю, тем самым снижая сопротивление линий электроснабжения и, как следствие, величину падения напряжения на данном участке, что приводит к повышению качества электроэнергии. Одним из возможных способов реализации децентрализованной энергетика является использование альтернативных источников энергии, в том числе ветроэнергетических установок. Эффективность работы ветрогенераторов зависит от точности оценки их энергетического потенциала. Однако известные подходы к расчетам электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками, могут быть неточными из-за отсутствия учета влияния расширенной группы метеорологических параметров на мощность ветрового потока, что и обуславливает актуальность развития методов моделирования энергетического потенциала ветроэнергетических установок. Целью настоящего исследования является разработка многофакторной математической модели оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок, позволяющей повысить точность прогнозирования вырабатываемой электроэнергии при исследовании работы ветроэнергетических установок с учетом динамики атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха в процессе генерации электроэнергии.

Материалы и методы. Для разработки многофакторной математической модели оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок проведено теоретическое исследование зависимости количества электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, от динамики расширенной группы метеорологических параметров. Для подтверждения адекватности предлагаемой математической модели проведены экспериментальные исследования зависимости количества электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, от изменения атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Путем сравнительного анализа проведена

оценка целесообразности применения полученных результатов. Для сбора и обработки полученных данных использован пакет программ «Р-7 Оффис».

Результаты. Разработана многофакторная математическая модель оценки энергетического потенциала ветроэнергетической установки. Проведено исследование зависимости количества электроэнергии от изменения атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Проведена оценка целесообразности применения результатов исследования при проведении расчетов электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками. Установлено, что предложенная модель позволяет повысить точность расчетов электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, на величину до 2 %.

Выводы. Предложенная математическая модель позволит повысить точность прогнозирования вырабатываемой электроэнергии при исследовании работы ветроэнергетической установки с учетом динамики расширенной группы метеорологических параметров. Результаты исследования могут быть использованы для создания более точных прогнозов генерации электроэнергии при помощи ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: децентрализованная энергетика, ветроэнергетическая установка, математическое моделирование ветроэнергетической установки, ветроэнергетический потенциал, расчет выработки электроэнергии

Valery Yurievich Vasilev

Polzunov Altai State Technical University, Senior Lecturer of Residential and Industrial Electrification Department, Russia, Barnaul, e-mail: vasilevvaleryf@yandex.ru.

Boris Sergeevich Kompaneets

Polzunov Altai State Technical University, Candidate of Engineer Science (PhD), Head of Residential and Industrial Electrification Department, Russia, Barnaul, e-mail: kompbs@mail.ru.

Elizaveta Maksimovna Antonova

Polzunov Altai State Technical University, Student, Russia, Barnaul, e-mail: elizabetha25@yandex.ru.

Multifactor mathematical model for assessing the energy potential of a wind power plant

Abstract

Background. High growth rates of technological development of the society contribute to the increase of the level of electricity consumption, which is one of the reasons for the decrease of the quality of electricity in the energy system. An increase of power consumption leads to an increase of peak loads and an increase of daily fluctuations of electricity consumption. Under such conditions, voltage fluctuations occur, causing an increase of current and voltage drops in the electrical network, thereby deteriorating the quality of the supplied electricity. Decentralized energy allows the source of generated power to be brought closer to the consumer, thereby reducing the resistance of the power supply lines and, as a result, the voltage drop in a given section. It leads to the improvement of the quality of electricity. One of the practicable methods to implement decentralized energy is the use of alternative energy sources, including wind turbine. The efficiency of wind turbines depends on the accuracy of assessment of their energy potential. However, the known approaches to calculate electricity generated by wind turbines can be inaccurate due to the fact that an extended group of meteorological parameters on the power of the wind flow are not considered. Thus, it determines the relevance of the development of methods for modeling the energy potential of wind turbines. The purpose of this study is to develop a multifactor mathematical model for assessing the energy potential of wind power plants. It allows us to increase the accuracy of forecasting the generated electricity when studying wind power plant operation taking into account the dynamics of atmospheric pressure, temperature and relative humidity of the air in the process of power generation.

Materials and methods. The authors have carried out a theoretical study of the dependence of the amount of electrical energy generated by a wind turbine on the dynamics of an extended group of meteorological parameters to develop a multifactor mathematical model for evaluating the energy potential of wind power plants. Experimental studies of the dependence of the amount of electricity generated by a wind turbine on the dynamics of atmospheric pressure, temperature and relative humidity of the air have been carried out to confirm the adequacy of the proposed mathematical model. The applicability of the results of the study has been evaluated by means of comparative analysis. The software package "R-7 Office" has been used to collect and process the obtained data

Results. A multifactor mathematical model for evaluating the energy potential of a wind power plant has been developed. A study of the dependence of the amount of electrical energy on changes in atmospheric pressure, temperature and relative humidity has been conducted. An assessment of the feasibility of the research results when calculating the electricity generated by wind turbines has been made. It has been established that the proposed model allows us to increase in the accuracy of calculations of electricity generated by a wind generator by up to 2%.

Conclusions. The proposed mathematical model will improve the accuracy of forecasting the generated electricity when studying the operation of a wind turbines, taking into account the dynamics of an extended group of meteorological parameters. The results of the study can be used to make more accurate forecasts of electricity generation by wind turbines.

Key words: decentralized energy, wind turbine, mathematical modeling of a wind turbine, wind energy potential, calculation of electricity generation

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.2.043-048

Введение. Высокие темпы технического развития общества способствуют повышению уровня потребления электроэнергии, что связано с увеличением роли электрооборудования в производственных и бытовых процессах. Повышение потребляемой мощности приводит к росту пиковых нагрузок и усилению суточных колебаний потребления электроэнергии. В таких условиях возникают колебания напряжения, вызывающие рост тока и падения напряжения в электрической сети, ухудшая качество поставляемой электроэнергии. Децентрализованная энергетика позволяет приблизить источник генерируемой мощности к потребителю, снижая сопротивление линий электроснабжения и, как следствие, величину падения напряжения на данном участке, что приводит к повышению качества электроэнергии.

В последние годы наблюдается тенденция развития децентрализованной энергетики, в том числе основанной на использовании ветроэнергетических ресурсов [1]. Так, например, согласно данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии за период 2018–2023 гг., совокупная мощность ветровых электростанций во всем мире выросла примерно в 2 раза и составляет более 1 млн МВт. Высокие темпы развития ветропарков обуславливают перспективность совершенствования технологий использования энергии ветра, способствующих рациональной работе ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Одним из ключевых аспектов повышения эффективности и оптимизации параметров ВЭУ является точная оценка их энергетического потенциала [2–3]. Как известно, количество вырабатываемой электроэнергии напрямую зависит от мощности ветрового потока. Математические модели, используемые для анализа энергетического потенциала ВЭУ, позволяют исследовать работу ветроэнергетических установок в усредненной атмосфере, соответствующей постоянным значениям атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха [4–9]. Однако значение указанной группы метеорологических параметров может изменяться во времени, тем самым оказывая значительное влияние на мощность ветрового потока [3, 10]. Как следствие, возникают случаи недооценки или переоценки ветроэнергетического потенциала ВЭУ, что непосредственно влияет на ее производительность и экономическую целесообразность использования ветрогенератора [3].

Ниже предлагается многофакторная математическая модель оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок, позволяющая повысить точность прогнозирования вырабатываемой электроэнергии при исследовании работы ВЭУ с учетом динамики атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха в процессе генерации электроэнергии.

Методы исследования. В литературе, посвященной вопросу моделирования энергетического потенциала ветроэнергетических установок [2–9], предлагается следующее выражение для определения количества электроэнергии, вырабатываемого ВЭУ:

$$W_{\text{ВЭУизв}} = \frac{\rho_{\text{ср}} v_{\text{ср}}^3}{2} S \eta \xi \cdot 8760, \quad (1)$$

где $v_{\text{ср}}$ – среднегодовая скорость ветра, м/с; S – площадь поперечного сечения ветроколеса, м²; $\rho_{\text{ср}}$ – средняя плотность воздуха, кг/м³; η – КПД генератора; ξ – коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ).

В уравнении (1) используется значение плотности воздуха, характерное для среднего состояния атмосферы. Однако, согласно [3, 10], плотность воздуха меняется в течение времени, что может значительно влиять на значение электрической мощности, генерируемой ветроэнергетической установкой, вычисляемой по формуле [10]

$$N = \frac{P_{\text{атм}} - 2,315 \varphi e^{\left(\frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+T-273,15}\right)}}{573,8 T} v^3, \quad (2)$$

где $P_{\text{атм}}$ – мгновенное значение атмосферного давления, Па; T – температура окружающего воздуха, К; φ – относительная влажность воздуха, %.

Так как количество вырабатываемой электроэнергии напрямую зависит от мощности ветрового потока [2–9], то для разработки математической модели энергетического потенциала ветроэнергетической установки использованы принципы расширенного микроклиматического прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов [10]. Таким образом, при оценке энергетического потенциала ВЭУ учитывается динамический характер мощности ветрового потока, обусловленный изменением атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха во времени [10]. С учетом вышеизложенного многофакторную математическую модель энергетического потенциала ветроэнергетической установки можно представить в следующем виде:

$$W(t) = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{P_{\text{атм}} - 2,315 \varphi e^{\left(\frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+T-273,15}\right)}}{573,8 T} v^3 S \eta \xi \right) dt. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет произвести расчет электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой, за любой период времени при известных функциях распределения метеорологических параметров. Составляемые базы метеоданных, используемые для

определения ветроэнергетического потенциала, представляют собой средние значения атмосферного давления, скорости ветра, температуры и относительной влажности воздуха за определенный период времени, в результате чего функция распределения значений метеорологических величин является дискретной. Так как для определения количества электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой, используются дискретные климатические величины, измеряемые за равные промежутки времени, то многофакторную математическую модель оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок можно представить следующим образом:

$$W_{ВЭУМН} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{атм.i} - 2,315 \varphi_i e^{\left(\frac{\alpha(T_i - 273,15)}{\beta + T_i - 273,15} \right)}}{573,8 T_i} v_i^3 S \eta \xi t \right). \quad (4)$$

Для подтверждения адекватности предлагаемой математической модели реализованы экспериментальные исследования зависимости электроэнергии, генерируемой ВЭУ, от атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Для проведения опытов разработана установка, включающая в себя источник потока ветра, концентратор воздуха, устройство для регулирования микроклиматических параметров, ветрогенератор и группу измерительных приборов (рис. 1).

Для определения количества электроэнергии, вырабатываемой экспериментальной ВЭУ, к ветрогенератору была подключена регулируемая нагрузка, а также проводился дальнейший контроль потребляемой ею электроэнергии (рис. 2).

Сбор и обработка полученных данных, дальнейшие расчеты и построение графиков произведены при помощи табличного процессора «Р-7 Оффис. Редактор таблиц».

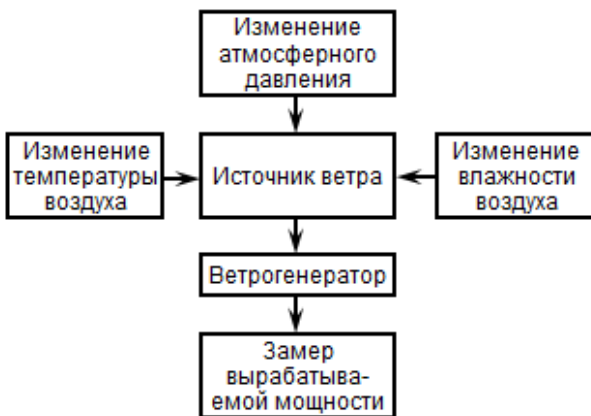


Рис. 1. Схема экспериментального исследования

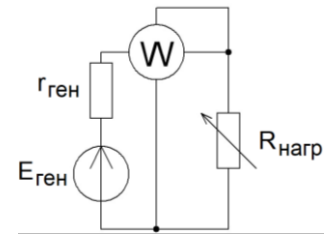


Рис. 2. Электрическая схема экспериментальной установки

Результаты исследования. Во время проведения экспериментальных исследований осуществлены контроль метеорологических параметров и поддержание постоянства их значений. Для оценки энергетического потенциала экспериментальной установки произведен расчет генерируемой электроэнергии при помощи известных методов ($W_{изв}$) и многофакторной математической модели оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок ($W_{мн}$). При расчете использованы сводные данные о значениях метеорологических параметров, фиксируемых во время проведения опытов (табл. 1).

Таблица 1. Сводные данные опытов

№ опыта	φ , %	T , C	$P_{атм}$, мм рт. ст.	v , м/с
1	38	21	741	14
2	40	23	739	14
3	36	23	741	14
4	31	22	747	14
5	62	19	749	14
6	34	24	745	14
7	37	24	747	14
8	46	23	743	14
9	57	26	752	14
10	59	24	749	14

Согласно известным подходам к оценке энергетического потенциала ветроэнергетических установок для расчетов электроэнергии, генерируемой этими установками, использована плотность воздуха, соответствующая среднестатистическому состоянию атмосферы, равная $1,165 \text{ кг/м}^3$. В то же время при применении многофакторной математической модели оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок среднестатистическое значение плотности воздуха в течение эксперимента варьировалось от $1,155$ до $1,185 \text{ кг/м}^3$.

Дальнейшая обработка результатов эксперимента показала, что с изменением значений метеорологических параметров изменяется количество электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ. Результаты исследования отражены в табл. 2 и на рис. 3. Среднее значение электро-

энергии, вырабатываемой за время проведения опытов, определено следующим образом:

$$W_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} W_i}{10}, \quad (5)$$

где W_i – количество электроэнергии, вырабатываемое во время i -го эксперимента, Вт·ч.

Таблица 2. Сводные данные результатов экспериментального исследования

№ опыта	$W_{\text{эксп}}$, Вт·ч	$W_{\text{мн}}$, Вт·ч	$W_{\text{изв}}$, Вт·ч
1	461,3	461,7	460
2	457,8	457	460
3	458,2	458,5	460
4	461,3	462,1	460
5	471,2	469,2	460
6	461,8	459,4	460
7	456,1	455,5	460
8	460,9	459,2	460
9	460,2	459,1	460
10	460,4	460,6	460

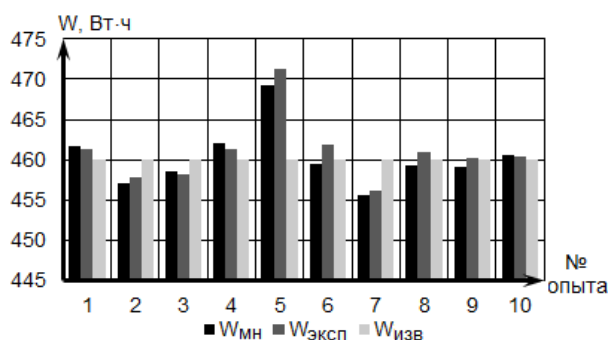


Рис. 3. Зависимость вырабатываемой электроэнергии от метеорологических параметров

Относительная разница расчетных значений и экспериментальных определена по выражению

$$\Delta W = \frac{|W_{\text{расч}} - W_{\text{эксп}}|}{W_{\text{эксп}}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $W_{\text{расч}}$ – расчетное значение электроэнергии, Вт; $W_{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение электроэнергии.

Результаты вычисления отклонения значений количества электроэнергии, рассчитанных с использованием многофакторной математической модели ($\Delta W_{\text{мн}}$) и общеизвестных подходов ($\Delta W_{\text{изв}}$), от экспериментальных значений количества электроэнергии, вырабатываемой опытной установкой, отражены в табл. 3.

Среднее значение отклонения расчетных данных определено по формуле

$$\Delta W_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta W_i}{10}, \quad (7)$$

где ΔW_i – отклонение значений количества электроэнергии, вырабатываемого во время i -го эксперимента, Вт·ч.

Таблица 3. Отклонение расчетных значений электроэнергии от экспериментальных

№ опыта	$\Delta W_{\text{мн}}$, Вт·ч	$\Delta W_{\text{изв}}$, Вт·ч
1	0,09	0,28
2	0,17	0,48
3	0,07	0,39
4	0,17	0,28
5	0,42	2,38
6	0,52	0,39
7	0,13	0,86
8	0,37	0,20
9	0,24	0,04
10	0,04	0,09
$\Delta W_{\text{ср}}$	0,22	0,54

Согласно полученным данным, относительная разница между расчетными и экспериментальными значениями электроэнергии варьируется от 0,04 до 0,52 %. При этом аналогичная величина при использовании известных подходов изменяется от 0,09 до 2,43 %. Среднее отклонение значений электроэнергии за время экспериментальных исследований с использованием разработанной математической модели и известных подходов составило соответственно 0,22 и 0,54 %.

Выводы. Анализ полученных данных показывает, что применение многофакторной математической модели оценки энергетического потенциала ветроэнергетической установки позволяет повысить точность расчетов количества электрической энергии, генерируемой ВЭУ, на величину до 2 %, что подтверждает целесообразность использования предлагаемой модели при прогнозировании работы ветрогенераторов. Преимуществом рассмотренной многофакторной математической модели оценки энергетического потенциала ветроэнергетической установки является отражение динамики метеорологических параметров при работе ветрогенераторов, что не учитывается известными подходами к оценке ветроэнергетических ресурсов местности и прогнозированию количества электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет повысить точность прогнозирования вырабатываемой электроэнергии при проведении исследования работы ВЭУ благодаря учету динамики атмосферного

давления, температуры и относительной влажности воздуха в процессе генерации электроэнергии.

Список литературы

1. **Нефедова Л.В., Соловьев Д.А., Дегтярев К.С.** Солнечная и ветровая энергетика в стратегии низкоуглеродного развития России: состояние и перспективы // *Электрические станции*. – 2024. – № 6(1115). – С. 30–37.
2. **Гайнуллина Л.Р., Хассан Алхадж Ф.** О влиянии неопределенностей на прогнозы ветрового ресурса и выработки электроэнергии // *Вестник ИГЭУ*. – 2024. – Вып. 3. – С. 55–63. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.055-063.
3. **Vasilev V.Yu., Kompaneets B.S.** Assessment of Meteorological Parameters Group Impact on the Wind Energy Resources of an Area // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, Russian Federation, 2023. – P. 136–140. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139031.
4. **Нефедова Л.В., Киселева С.В.** Ветроэнергетический потенциал изолированных районов Камчатки // *Энергетическая политика*. – 2022. – № 7(173). – С. 80–89. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_7173_80.
5. **Манусов В.З., Хасанзода Н.** Оценка мощности ветроэнергетических установок на основе нечеткой модели ветрового потока и его вероятностных характеристик // *Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации*. – 2019. – № 1(42). – С. 73–82. – DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-73-82.
6. **Assessment Method of Offshore Wind Resource Based on Multi-dimensional Indexes System / Ma Xiaomei, Liu Yongqian, Jie Yan, et al.** // *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. – January 2024. – Vol. 10, No. 1. – P. 76–87. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.09260.
7. **Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach / R.R. Singh, S. Banerjee, R. Manikandan, et al.** // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 78253–78267. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3193774.
8. **A Parametric Approach to Compare the Wind Potential of Sanghar and Gwadar Wind Sites // G. Abbas, B. Ali, K. Chandni, et al.** // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – P. 110889–110904. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215261.
9. **Юсупов К.И., Тожибоев С.Т.** Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. – 2022. – № 12(252). – С. 70–73.

10. **Васильев В.Ю., Титов Е.В.** Принципы расширенного микроклиматического прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов в АПК // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2024. – № 7(237). – С. 103–107. – DOI: 10.53083/1996-4277-2024-237-7-103-107.

References

1. Nefedova, L.V., Solov'ev, D.A., Degtyarev, K.S. *Elektricheskie stantsii*, 2024, no. 6(1115), pp. 30–37.
2. Gaynullina, L.R., Khassan Alkhadz F. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 3, pp. 55–63. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.055-063.
3. Vasilev, V.Yu., Kompaneets, B.S. Assessment of Meteorological Parameters Group Impact on the Wind Energy Resources of an Area. *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 136–140. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139031.
4. Nefedova, L.V., Kiseleva, S.V. *Energeticheskaya politika*, 2022, no. 7(173), pp. 80–89. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_7173_80.
5. Manusov, V.Z., Khasanzoda, N. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*, 2019, no. 1(42), pp. 73–82. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-73-82.
6. Ma Xiaomei, Liu Yongqian, Jie Yan, Shuang Han, Li Li, Hang Meng, Muhammet Deveci, Konstanze Kölle, Umit Cali. Assessment Method of Offshore Wind Resource Based on Multi-dimensional Indexes System. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, January 2024, vol. 10, no. 1, pp. 76–87. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.09260.
7. Singh, R.R., Banerjee, S., Manikandan, R., Kotecha, K., Indragandhi, V., Vairavasundaram, S. Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 78253–78267. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3193774.
8. Abbas, G., Ali, B., Chandni, K., Koondhar, M.A., Chandio, S., Mirsaedi, S. A Parametric Approach to Compare the Wind Potential of Sanghar and Gwadar Wind Sites. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 110889–110904. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215261.
9. Yusupov, K.I., Tozhiboev, S.T. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2022, no. 12(252), pp. 70–73.
10. Vasil'ev, V.Yu., Titov, E.V. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2024, no. 7(237), pp. 103–107. DOI: 10.53083/1996-4277-2024-237-7-103-107.