

10. Hewamalage, H., et al. (2021). Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting: Current Status and Future Directions. *International Journal of Forecasting*. 37. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>.

References

1. SP 256.1325800.2016. «Elektroustanovki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Pravila proektirovaniia i montazha» (Prikaz Ministroia Rossii ot 29 avgusta 2016 g. No. 602/pr). – Moskva, 2016. – 125 s.

2. Razrabotka izmenenii v stroitelnyi svod pravil v chasti aktualizatsii udelnykh raschetnykh elektricheskikh nagruzok mnogokvartirnykh zhilykh domov / V.I. Soluianov, Iu.I. Soluianov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin // *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. – 2023. – T. 25. – No. 6. – S. 89-100.

3. Povyslenie effektivnosti raboty elektricheskikh setei za schet snizheniia nesimmetrii napriazheniia / V.M. Stepanov, I.M. Bazyl, A.Iu. Kliuchnikova // *Izvestiia TulGU. Tekhnicheskie nauki*. – 2021. – No. 12. – S. 8-11. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-8-12.

4. Pozhary i pozharnaia bezopasnost v 2021 godu: Statist. FGBU VNIPO MChS Rossii: sb. nauch. tr. – Balashikha, 2022. –114 s.

5. Gnatiuk V.I. Optimalnoe upravlenie elektropotrebleniem tekhnotsenoza metodami rangovogo

analiza / V.I. Gnatiuk // *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seria: Tekhnika i tekhnologii*. 2009. T. 2. No. 2. S. 177-193.

6. Kim, M., Jung, S., Kim, B., et al. (2022). Fault Detection Method via k-Nearest Neighbor Normalization and Weight Local Outlier Factor for Circulating Fluidized Bed Boiler with Multimode Process. *Energies*. 15. <https://doi.org/10.3390/en15176146>.

7. Smelkov G.N. Metody opredeleniia prichastnosti k pozharam avariinykh rezhimov v elektrotekhnicheskikh ustroystvakh / G.N. Smelkov, A.A. Aleksandrov, V.A. Pekhotikov. – Moskva: Stroiizdat, 1980. – 87 s.

8. Svid. 2022681111 o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM. Imitatsionnaia model termo-protsesta izolirovannogo provodnika / S.Sh. Tavarov, A.I. Sidorov, B.I. Kosimov – No. 2022680558, zaivl. 03.11.2022; zaregistr. 09.11.2022.

9. Grushka-Cockayne, Y., Jose, V.R. (2020). Combining Prediction Intervals in the M4 Competition. *International Journal of Forecasting*. 36 (1): 178-185, <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.04.015>.

10. Hewamalage, H., et al. (2021). Recurrent Neural Networks for Time Series Forecasting: Current Status and Future Directions. *International Journal of Forecasting*. 37. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2020.06.008>.



УДК 621.548:631.17

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-237-7-103-107

В.Ю. Васильев, Е.В. Титов

V.Yu. Vasilev, E.V. Titov

ПРИНЦИПЫ РАСШИРЕННОГО МИКРОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В АПК

PRINCIPLES OF EXTENDED MICROCLIMATIC FORECASTING OF WIND ENERGY RESOURCES IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Ключевые слова: ветровые энергоресурсы, микроклиматическое прогнозирование, ветроэнергетическая установка, удельная мощность ветрового потока, ветроэнергетический потенциал, ветрогенератор, ветроэнергетический ресурс, агропромышленный комплекс.

Для повышения качества электроснабжения удаленных и изолированных потребителей агропромышленного комплекса часто применяются ветроэнергетические установки. Эффективность их функционирования во

многом определяется точностью прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов. Количественной характеристикой ветроэнергетического ресурса считается среднегодовая удельная мощность ветрового потока. В соответствии с известными принципами прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов удельная мощность ветрового потока учитывает плотность воздуха, принимаемую за постоянное значение и соответствующую установленным нормальным условиям. Отклонение значений метеорологических параметров местности для реальных и нормальных условий приводит к изменению

плотности воздуха, что снижает точность оценки ветроэнергетического потенциала. Рассмотрены новые принципы расширенного микроклиматического прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов, позволяющие повысить точность оценки ветроэнергетического потенциала за счет учета динамики изменения атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Представлены результаты анализа зависимости среднегодовой удельной мощности ветрового потока от исследуемых микроклиматических параметров. Предложена учитывающая их влияние математическая модель удельной мощности ветрового потока. Рассмотрена оценка степени влияния атмосферного давления, относительной влажности и температуры воздуха на удельную мощность ветрового потока на примере города Рубцовска Алтайского края. Для повышения точности прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов использованы данные наблюдений метеостанций в течение последних 10 лет с установленным количеством учитываемых измерений. Сравнительная оценка рассчитанных значений в соответствии с известными подходами и предлагаемой математической моделью показала, что результаты расчета среднегодовой удельной мощности ветрового потока могут существенно различаться.

Keywords: *wind energy resources, microclimatic forecasting, wind power plant, specific power of wind flow, wind energy potential, wind generator, wind energy resource, agro-industrial complex.*

Wind power plants are often used to improve the quality of power supply to remote and isolated consumers of the agro-industrial complex. The efficiency of their operation is

largely determined by the accuracy of forecasting the state of wind energy resources. The average annual specific power of wind flow is considered to be a quantitative characteristic of wind energy resource. In accordance with the known principles of forecasting the state of wind energy resources, the specific power of wind flow takes into account the air density which is taken as a constant value and corresponds to the established normal conditions. Deviation of the values of meteorological parameters of the terrain for real and normal conditions leads to changes in air density which reduces the accuracy of wind energy potential estimation. New principles of extended microclimatic prognosis of wind energy resources are discussed; they allow increasing the accuracy of wind energy potential evaluation by taking into account the dynamics of changes in barometric pressure, air temperature and relative humidity. The results of analyzing the dependence of the average annual specific power of wind flow on the studied microclimatic parameters are presented. A mathematical model that takes into account their influence on the specific power of wind flow is proposed. The evaluation of the degree of influence of barometric pressure, relative humidity and air temperature on the specific power of wind flow by the example of the City of Rubtsovsk of the Altai Region is considered. To improve the accuracy of forecasting the state of wind power resources, the data of observations of meteorological stations during the recent ten years with a set number of counted measurements were used. The comparative evaluation of the calculated values in accordance with the known approaches and the proposed mathematical model showed that the results of calculation of the average annual specific power of wind flow may differ significantly.

Васильев Валерий Юрьевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: vasilevvaleryrf@yandex.ru.

Титов Евгений Владимирович, д.т.н., доцент, вед. науч. сотр., ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: 888tev888@mail.ru.

Vasilev Valeriy Yurevich, post-graduate student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: vasilevvaleryrf@yandex.ru.

Titov Evgeniy Vladimirovich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Leading Researcher, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: 888tev888@mail.ru.

Введение

В последнее время для повышения качества электроснабжения удаленных и изолированных потребителей агропромышленного комплекса (АПК) применяются ветроэнергетические установки (ВЭУ) [1]. Одним из условий эффективности их функционирования считается обеспечение высокой точности прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов, способствующей повышению рациональности использования ветрогенераторов [2, 3]. Однако при определении ветроэнергетического потенциала местности не учитывается степень влияния отдельных

метеорологических параметров на ветровые энергоресурсы, в частности атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха.

В соответствии с известными принципами прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов значение удельной мощности ветрового потока зависит от плотности воздуха, принимаемой за постоянное значение ($1,226 \text{ кг/м}^3$) [4-8] и соответствующей нормальным условиям (температуре воздуха 15°C , атмосферному давлению 760 мм рт. ст. и относительной влажности воздуха 0%) [8, 9]. В [10] обосновано, что при

изменении указанных метеорологических параметров может изменяться плотность воздуха. Однако приведенный подход значительно затрудняет оценку удельной мощности ветрового потока, поэтому разработка новых принципов прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов, учитывающих динамику изменения атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, позволит решить проблему эффективной оценки ветроэнергетического потенциала местности.

Целью исследования является разработка принципов расширенного микроклиматического прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов, для достижения которой необходимо создать математическую модель среднегодовой удельной мощности ветрового потока, учитывающую влияние атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, с последующей оценкой целесообразности расширения группы влияющих на состояние ветровых энергоресурсов метеорологических параметров.

Объекты и методы

Для достижения поставленной цели проведен анализ известных подходов к определению ветроэнергетического потенциала местности, и выявлена его основная характеристика – среднегодовая удельная мощность ветрового потока, определяемая по формуле [2-8]

$$N_{cgy} = \frac{\rho \cdot \sum_0^{v_{max}} (v^3 \cdot dF)}{2}, \quad (1)$$

где $\rho = 1,226$ – плотность воздуха, кг/м³;

$v^3 \cdot dF$ – куб скорости ветра с учетом ее годовой функции распределения, (м/с)³;

v_{max} – максимальное значение скорости ветра для рассматриваемой местности в течение года, м/с.

По результатам проведенного анализа разработана математическая модель удельной мощности ветрового потока, учитывающая влияние рассматриваемых метеорологических параметров. Для оценки степени влияния барометрического давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока использован табличный процессор «P7-Офис. Редактор таблиц». При вычислительных операциях учитывалась база данных ООО «Расписание Погоды», включаю-

щая результаты метеорологических наблюдений для Алтайского края.

Результаты исследований и их обсуждение.

В проведенных расчетах воздух рассматривался как влажный идеальный газ, относительная влажность которого в зависимости от рассматриваемой локации может изменяться от 0 до 100%. Состояние воздуха принято описывать с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона [9]:

$$P_{атм} V = \frac{m}{M} RT, \quad (2)$$

где $P_{атм}$ – атмосферное давление, Па;

V – объем воздуха, м³;

m – масса воздуха, кг;

M – молярная масса воздуха, кг/моль;

$R \approx 8,314$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·моль);

T – температура воздуха, К.

Плотность влажного воздуха определяется в соответствии с выражением [9]

$$\rho = \frac{P_C M_C + P_{II} M_{II}}{RT}, \quad (3)$$

где P_C и P_{II} – парциальное давление сухого воздуха и водяных паров соответственно, Па;

M_C и M_{II} – молярная масса сухого воздуха и водяных паров соответственно, кг/моль.

Известно [9], что парциальное давление насыщенных паров можно определить следующим образом [9]:

$$P_{НП} = 611,2 \cdot e^{\left(\frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+(T-273,15)} \right)}, \quad (4)$$

где α и β – поправочные коэффициенты.

Известно, что значения указанных коэффициентов α и β зависят от температуры воздуха [9]. Так, при температуре воздуха более 0°C ($T > 273,15$ К) $\alpha = 17,504$, $\beta = 241,2$; при температуре воздуха менее 0°C ($T < 273,15$ К) $\alpha = 22,489$, $\beta = 272,88$ [9]. В соответствии с (2) и (4), учитывая степень влияния барометрического давления, температуры и относительной влажности воздуха, удельная мощность ветрового потока определяется по формуле

$$N_{уд} = \frac{P_{атм} - 2,315 \cdot \varphi \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T-273,15)}{\beta + T - 273,15} \right)}}{573,8 \cdot T} \cdot v^3, \quad (5)$$

где φ – относительная влажность воздуха, %.

При этом среднегодовая удельная мощность ветрового потока устанавливается как среднее арифметическое значение удельной мощности

ветрового потока, определяемое для каждого измерения метеостанции:

$$N_{СГВ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_{амм,i} - 2,315 \cdot \varphi_i \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T_i - 273,15)}{\beta + T_i - 273,15}\right)}}{573,8 \cdot T_i} \cdot v_i^3}{n}, \quad (6)$$

где n – количество измерений метеостанции, необходимое для расчета удельной мощности ветрового потока;

$P_{атм,i}$ – i-тое значение атмосферного давления, Па;

φ_i – i-тое значение относительной влажности воздуха, %;

T_i – i-тое значение температуры воздуха, К;

v_i – i-тое значение скорости ветра, м/с.

Таблица

Результаты анализа данных метеостанций Алтайского края

Муниципальное образование	$N_{СГВ}$ (известные принципы), Вт
Волчихинский район	51,6
г. Змеиногорск	29,7
Ключевский район	50,4
Мамонтовский район	31,7
Поспелихинский район	36,3
Родинский район	80,4
г. Рубцовск	88,8
г. Славгород	56
Угловский район	31,7

По результатам проведенного анализа данных метеостанций Алтайского края (табл.) в соответствии с известными принципами определения среднегодовой удельной мощности ветрового потока наибольшее ее значение характерно для г. Рубцовска. Для повышения точности прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов рекомендуется использовать данные наблюдений метеостанций в течение последних 10 лет с установленным количеством учитываемых измерений (29200), в соответствии с чем уравнение (6) можно представить в виде:

$$N_{СГВ} = \frac{\sum_{i=1}^{29200} \frac{P_{амм,i} - 2,315 \cdot \varphi_i \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T_i - 273,15)}{\beta + T_i - 273,15}\right)}}{573,8 \cdot T_i} \cdot v_i^3}{29200}. \quad (7)$$

Сравнительная оценка рассчитанных значений в соответствии с известными подходами на

основе данных метеостанций Алтайского края, сведенных в таблицу (88,8 Вт), и предлагаемой математической моделью (90,84 Вт) показала, что результаты расчета среднегодовой удельной мощности ветрового потока для оцениваемой местности г. Рубцовска могут различаться на 2,3%.

Заключение

Разработанные принципы расширенного микроклиматического прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов, базирующиеся на предлагаемой математической модели среднегодовой удельной мощности ветрового потока, позволяют повысить точность оценки ветроэнергетического потенциала местности для обеспечения качественного электроснабжения удаленных и изолированных потребителей агропромышленного комплекса. Полученные результаты оценки целесообразности расширения группы, влияющих на состояние ветрового энергоресурса метеорологических параметров, в частности атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, подтвердили повышение точности прогнозирования его состояния.

Библиографический список

- Афоничев, Д. Н. Использование матричного преобразователя переменного напряжения в мобильной ветроэлектрической установке / Д. Н. Афоничев, С. Н. Пиляев, В. В. Васильев. – DOI 10.53914/issn2071-2243_2023_2_145. – Текст: непосредственный // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2 (77). – С. 145-156.
- Винников, А. В. К расчёту экономического потенциала ветровой энергетики и выбора ветроэлектрических установок / А. В. Винников, Е. А. Денисенко, А. О. Хицкова. – Текст: непосредственный // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 115. – С. 1311-1323.
- Singh R.R., Banerjee S., Manikandan R., et al. (2022). Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78253-78267, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193774.
- Юсупов, К. И. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике / К. И. Юсупова, С. Т. Тожибоев. – Текст: непосредственный //

Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2022. – № 12 (252). – С. 70-73.

5. Singh, K., Khan, M.G.M. & Ahmed, M.R. (2022). Wind Energy Resource Assessment for Cook Islands with Accurate Estimation of Weibull Parameters Using Frequentist and Bayesian Methods. *IEEE Access*. 10. 25935-25953. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3156933.

6. Abbas, G., Mirjat, B., Chandni, K., et al. (2022). A Parametric Approach to Compare the Wind Potential of Sanghar and Gwadar Wind Sites. *IEEE Access*. 10. 110889-110904. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215261.

7. Ma X., et al. (2022). Assessment Method of Offshore Wind Resource Based on Multi-Dimensional Indexes System. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.09260.

8. Журавлев, Г. Г. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области / Г. Г. Журавлев, Г. О. Задде. – Текст: непосредственный // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 376. – С. 175-181.

9. Бурцев, С. И. Влажный воздух. Состав и свойства: учебное пособие / С. И. Бурцев, Ю. Н. Цветков; М-во общ. и проф. образования РФ; С.-Петербург. гос. акад. холода и пищ. технологий. – Санкт-Петербург, 1998. – 145 с. – Текст: непосредственный.

10. Васильев, В. Ю. Влияние климатических условий на работу ветряных установок / В. Ю. Васильев. – DOI 10.52994/9785751333737_007. – Текст: непосредственный // Материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, с международным участием в г. Нерюнгри, посвященной 30-летию юбилею Технического института (филиала) СВФУ им. М. К. Аммосова, Нерюнгри, 28-29 октября 2022 года / редколлегия: А. В. Рукочин, Н. Н. Гриб, П. Ю. Кузнецов [и др.]. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, 2022. – С. 30-32.

References

1. Afonichev, D.N. Ispolzovanie matrichnogo preobrazovatel'ia peremennogo napriazheniia v mobilnoi vetroelektricheskoi ustanovke / D.N. Afonichev, S.N. Piliaev, V.V. Vasilev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 2 (77). – S. 145-156. DOI 10.53914/issn2071-2243_2023_2_145.

2. Vinnikov, A.V. K raschetu ekonomicheskogo potentsiala vetrovoi energetiki i vybora vetroelektricheskikh ustanovok / A.V. Vinnikov, E.A. Denisenko, A.O. Khitskova // Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – No. 115. – S. 1311-1323.

3. Singh R.R., Banerjee S., Manikandan R., et al. (2022). Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78253-78267, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3193774.

4. Iusupov K.I., Tozhiboev S.T. Obzor metodov prognozirovaniia v vetroenergetike / K.I. Iusupova, S.T. Tozhiboev // Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie. – 2022. – No. 12 (252). – S. 70-73.

5. Singh, K., Khan, M.G.M. & Ahmed, M.R. (2022). Wind Energy Resource Assessment for Cook Islands with Accurate Estimation of Weibull Parameters Using Frequentist and Bayesian Methods. *IEEE Access*. 10. 25935-25953. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3156933.

6. Abbas, G., Mirjat, B., Chandni, K., et al. (2022). A Parametric Approach to Compare the Wind Potential of Sanghar and Gwadar Wind Sites. *IEEE Access*. 10. 110889-110904. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215261.

7. Ma X., et al. (2022). Assessment Method of Offshore Wind Resource Based on Multi-Dimensional Indexes System. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.09260.

8. Zhuravlev G.G. Otsenka vetroenergeticheskogo potentsiala Kemerovskoi oblasti / G.G. Zhuravlev, G.O. Zadde // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2013. – No. 376. – S. 175-181.

9. Vlazhnyi vozdukh. Sostav i svoistva: ucheb. posobie / S.I. Burtsev, Iu.N. Tsvetkov; M-vo obshch. i prof. obrazovaniia RF. S.-Peterb. gos. akad. khodata i pishch. tekhnologii. – Sankt-Peterburg, 1998. – 145 s.

10. Vasilev, V.Iu. Vliianie klimaticheskikh uslovii na rabotu vetrianykh ustanovok / V. Iu. Vasilev // Materialy XXII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, s mezhdunarodnym uchastiem v g. Neriungru, posviashchennoi 30-letnemu iubileiu Tekhnicheskogo instituta (filiala) SVFU im. M.K. Ammosova. 28-29 oktiabria 2022 g. – Iakutsk: Izdatelskii dom SVFU, 2022. – S. 30-32. – DOI: 10.52994/9785751333737_007.