

ОБОСНОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПОДХОДОВ К РАСЧЕТУ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

SUBSTANTIATION OF THE DEVELOPMENT
OF APPROACHES TO CALCULATION OF WIND POWER PLANTS

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

В последние годы ветроэнергетика является одним из перспективных решений проблемы обеспечения качественной электроэнергией объектов агропромышленного комплекса. Однако для эффективного использования ветроэнергетических установок необходимо наиболее точно определять режимы работы ветрогенераторов. Анализ известных подходов к расчету ветроэнергетических установок показал, что к основным параметрам, характеризующим режимы работы ветрогенераторов, относятся начальная (стартовая), номинальная и максимальная скорости ветра. В то же время вращение ветроколеса осуществляется за счет воздействия на него ветрового напора определенной мощности. Исследования показывают, что расширенная группа микроклиматических параметров, включающая в себя скорость ветра, атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха, в совокупности оказывает значимое влияние на удельную мощность ветрового потока. Таким образом, действующие подходы к расчету ветроэнергетических установок не позволяют достаточно точно оценить воздействие ветра на ветроколесо, в результате чего снижается точность определения режимов работы ветрогенератора. Рассматривается проблема повышения точности определения режимов работы ветроэнергетических установок. Предлагается использование в качестве параметров, характеризующих режимы работы ветрогенератора, следующие величины: стартовую, номинальную и максимальную удельные мощности ветрового потока. На примере г. Славгорода Алтайского края рассмотрена оценка точности определения режимов работы ветрогенератора. Сравнительная оценка показала, что при неизменном значении скорости ветра удельная мощность ветрового потока может значительно отличаться, что доказывает целесообразность использования

удельной мощности ветрового потока в качестве показателей, характеризующих режимы работы ветроэнергетических установок.

Keywords: wind power plant, wind energy resources, specific power of wind flow, wind energy potential, wind generator, agro-industrial complex, power supply.

In recent years, wind energy is one of the promising solutions to the problem of providing quality electricity to agro-industrial complex. However, for the effective use of wind power plants it is necessary to accurately determine the modes of operation of wind turbines. The analysis of known approaches to the calculation of wind power plants has shown that the main parameters characterizing the operating modes of wind turbines include the initial (starting) wind speed, nominal wind speed and maximum wind speed. At the same time, the rotation of the wind wheel is carried out due to the impact of wind with a certain power on it. Studies show that an extended group of microclimatic factors, including wind speed, atmospheric pressure, temperature and relative humidity, together have a significant effect on the specific power of the wind flow. Thus, the current approaches to the calculation of wind power plants do not allow a sufficiently accurate assessment of the impact of wind on wind wheels, resulting in a decrease in the accuracy of determining the operating modes of the wind generator. This paper discusses the problem of improving the accuracy of determining the operating modes of wind power plants. It is proposed to use the following values as parameters characterizing the operation modes of a wind generator: starting, nominal and maximum specific power of wind flow. Using the example of the City of Slavgorod of the Altai Region, the estimation of accuracy of determination of wind generator operation modes is discussed. The comparative evaluation showed that at the constant value of wind speed the specific power of wind flow may significantly differ; that proved the expediency of using the specific power of wind flow as indicators that characterized the operating modes of wind power plants.

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 настоящее время одним из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии, которая может быть успешно применена для качественного электроснабжения объектов агропромышленного комплекса (АПК), является ветроэнергетика. Однако для эффективной работы ветроэнергетических установок (ВЭУ) необходима высокая точность определения режимов работы ветрогенераторов. Согласно существующим подходам к расчету ветроэнергетических установок, применяемым для электроснабжения потребителей в АПК, режимы работы ВЭУ характеризуются следующими величинами: стартовая скорость ветра (v_0), номинальная скорость ветра ($v_{ном}$) и максимальная скорость ветра ($v_{макс}$) [1-5].

Однако вращение ветроколеса осуществляется при воздействии на него ветра с определенной мощностью. В то же время, как показывают исследования, мощность ветрового потока, используемая ветроэнергетическими установками для выработки электроэнергии, зависит не только от скорости ветра, но и от атмосферного давления, относительной влажности и температуры воздуха [6-7]. Таким образом, действующие подходы к расчету ветроэнергетических установок не позволяют достаточно точно оценить воздействие ветра на ветроколесо, в результате чего снижается точность определения режимов работы ветрогенератора.

Целью исследования является обоснование развития подходов к определению параметров ВЭУ, характеризующих ее режимы работы.

Объекты и методы

Для достижения поставленной цели исследованы подходы к определению параметров ветроэнергетических установок, характеризующие их режимы работы. На основании полученных результатов предложен вариант развития подходов к определению параметров ВЭУ.

Для оценки целесообразности развития подхода к определению характеристик ветроэнергетических установок применен сравнительный анализ, основанный на базе данных ООО «Расписание Погоды» метеорологических параметров города Рубцовска Алтайского края. В качестве примера ВЭУ была использована ветроустановка 2,5KW-48V LOW WIND с тремя фиксированными лопастями.

Результаты исследований и их обсуждение

Как известно, удельная мощность ветрового потока определяется следующим выражением [1-5]

$$N_{y\partial} = \frac{\rho \cdot v^3}{2}, \quad (1)$$

где v – скорость ветра, м/с;

ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Плотность воздуха, как и скорость ветра, может быть динамической величиной, что не учитывается общепринятыми подходами при анализе потенциала ветроэнергетических ресурсов. Плотность воздуха можно определить следующим образом [6]:

$$\rho = \frac{P_C M_C + P_{II} M_{II}}{RT}, \quad (2)$$

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;

T – температура воздуха, К.

Также известно, что парциальное давление насыщенных паров определяется по формуле [6]

$$P_{HII} = 611,2 \cdot e^{\left(\frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+(T-273,15)} \right)}, \quad (3)$$

где α и β – поправочные коэффициенты.

В соответствии с уравнениями (1-3) мощность электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой, можно рассчитать следующим образом

$$N_{y\partial} = \frac{P_{амм} - 2,315 \cdot \varphi \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T-273,15)}{\beta+T-273,15} \right)}}{573,8 \cdot T} \cdot v^3. \quad (4)$$

Как видно из выражения (4), удельная мощность ветрового потока зависит от расширенной группы микроклиматических параметров, включающей в себя скорость ветра, атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха. Таким образом, использование скорости ветра в качестве характеристики, описывающей режимы работы ветрогенератора, не позволяет учитывать совокупное влияние нескольких метеорологических параметров на мощность, с которой ветер вращает ветроколесо.

Решением данной проблемы может стать использование удельной мощности ветрового потока в качестве такой характеристики. Для подтверждения данной гипотезы произведена оцен-

ка точности определения режимов работы ветрогенератора. Сравнительная оценка дана на основе базе данных о замерах метеорологических параметров в городе Рубцовске Алтайского края, а также ветроэнергетической установки 2,5KW-48V LOW WIND с тремя фиксированными лопастями, имеющей следующие характеристики: $v_0 = 2,5$ м/с; $v_{ном} = 10$ м/с; $v_{макс} = 25$ м/с. При этом были введены допущения, связанные с особенностью составления баз данных метеорологических замеров:

1) так как база данных содержит только целочисленные значения скорости ветра, то значение стартовой скорости ВЭУ принимается равным 3 м/с;

2) так как максимальное зафиксированное в базе данных значение скорости ветра $v = 16$ м/с, то расчеты для параметра «максимальная скорость ветра» не производились.

Для оценки точности расчетов режимов работы ветрогенераторов определены удельные мощности ветрового потока для минимального и максимального значения удельной мощности ветрового потока при скорости ветра, соответствующей определенным режимам работы ветрогенератора (табл.).

Таблица

Результаты сравнительного анализа

Параметр	N_{min} , Вт	N_{max} , Вт	ΔN , %
Начальная скорость ветра	14,904	20,709	38,95
Номинальная скорость ветра	556	690,5	24,19

Сравнительная оценка показала, что при одном и том же значении скорости ветра результаты расчета удельной мощности ветрового потока могут отличаться до 38,9%. Следовательно, использование удельной мощности ветрового потока в качестве параметров, характеризующих режимы работы ВЭУ, может способствовать значительному увеличению точности оценки режимов работы ветрогенераторов и, как следствие, повышению эффективности использования ветроэнергетических установок.

Заключение

Предлагаемый вариант развития подходов к определению параметров ветрогенератора, характеризующих режимы работы ВЭУ, позволяет с большей точностью рассчитывать режимы работы ветрогенератора. Полученные результаты сравнительной оценки удельной мощности вет-

рового потока подтвердили целесообразность использования удельной мощности ветрового потока в качестве основных параметров ветроэнергетической установки.

Библиографический список

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.: ил.; 27 см; – ISBN 5-89565-005-8. – Текст: непосредственный.

7. Vasilev, V., Kompaneets, B. (2023). Assessment of Meteorological Parameters Group Impact on the Wind Energy Resources of an Area. *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 136-140. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139031.

References

1. Afonichev, D.N. Ispolzovanie matrichnogo preobrazovatelia 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. 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.

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

4. 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.

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

6. Vlazhnyi vozdukh. Sostav i svoistva: ucheb. posobie / S.I. Burtsev, Iu.N. Tsvetkov; M-vo obshch. i prof. obrazovaniia RF. S.-Peterb. gos. akad. khododa i pishch. tekhnologii. – Sankt-Peterburg, – 1998. – 145 s.: il.; 27 sm.; ISBN 5-89565-005-8.

7. Vasilev, V., Kompaneets, B. (2023). Assessment of Meteorological Parameters Group Impact on the Wind Energy Resources of an Area. *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 136-140. DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139031.



УДК 361.362.333-047.58

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-238-8-110-120

С.В. Леканов, С.Ф. Сороченко
S.V. Lekanov, S.F. Sorochenko

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-ВОЗДУШНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

SIMULATION OF OPERATION PROCESSES OF CENTRIFUGAL-AIR SEPARATOR FOR POST-HARVEST GRAIN HANDLING

Ключевые слова: зерновой ворох, центробежно-воздушный сепаратор, аспирационная система, кольцевой аспирационный канал, осадочная камера, структурная схема, функциональная схема, моделирование, скорость воздушного потока, приложение KompasFlow.

Представлена структурная и функциональная схемы центробежно-воздушного сепаратора, позволяющие построить математическую модель процесса сепарирования зерновой смеси. Разрабатываемый сепаратор состоит из приемного патрубка, цилиндрического корпуса с воздухозаборными окнами, конуса-сборника, осадочной камеры с заслонкой и механизмом грубой регулировки скорости воздушного потока, выпускного клапана, патрубка вывода легких примесей, патрубка выгрузки очищенного зерна и привода. Внутри цилиндрического корпуса расположен кольцевой пневмосепарирующий канал, образованный коническим отражателем и разбрасывающей тарелкой. Конический отражатель имеет в нижней части обратный конус, а в верхней части – цилиндр с регулировочным стаканом и

механизмом регулировки. Пневмосепарирующий канал соединён через аспирационный канал с осадочной камерой, осадочная камера – с вентилятором с помощью патрубка, который соединен с циклоном посредством аспирационного патрубка. Определены начальные и граничные условия математической модели технологического процесса работы центробежно-воздушного сепаратора. Показаны результаты численного моделирования в приложении KompasFlow. Представлены результаты регулирования скорости воздушного потока. Проведен анализ результатов исследования и определены особенности применения приложения KompasFlow для исследования воздушного потока в центробежно-воздушном сепараторе. Выявлен диапазон расхода воздуха для работы на пшенице и влияние изменения параметров на скорость входа воздушного потока в циклон. Определены пути дальнейшего совершенствования данного типа воздушного сепаратора и возможности технологических регулировок для работы на большом спектре сельскохозяйственных культур. Представлены варианты использования предложенного центробежно-воздушного сепаратора в различных