

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-74-79

Оптимальное управление ветроэнергостановкой на основе учета изменения направления ветра

В. И. Буяльский, кандидат технических наук, государственное автономное образовательное учреждение профессионального образования города Севастополя «Институт развития и образования»,
Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

Произведено обоснование актуальности способа эффективного автоматизированного управления ветроэлектрической установкой на основе учета изменения направления ветра при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, направленного на минимизацию времени переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины, что способствует обеспечению повышения стабильности скорости вращения ветроколеса и улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветроэнергостановок в условиях неполной информации о характеристиках скорости ветра и электрической нагрузки, существенно изменяющихся во времени.

Сделан обзор основных исследований, влияния изменения направления ветра на работу ветроэлектрических установок. Выполнено описание математической зависимости угловой скорости ветроколеса от скорости и направления ветра, угла положения лопасти.

На основе проведенного анализа управления ветроэлектрическим агрегатом с заблаговременной установкой лопастей на требуемый угол в соответствии с оценкой времени включения двигателя привода питча и учета изменения направления ветра с целью минимизации времени переходного процесса регулирования угловой скорости ветротурбины, что способствует повышению стабильности скорости вращения ротора ветроколеса в условиях неполной информации о характеристиках скорости и направления ветра, электрической нагрузки, существенно изменяющихся во времени, установлен критерий разграничения времени доступа к устройству изменения положения лопастей со стороны предложенного и основного методов выработки управляющих воздействий.

Разработан программный модуль автоматизации управления ветроэнергетической установкой, обеспечивающий своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям с учетом изменения направления ветра при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, из которого следует, что эффективность применения предложенного управления для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий может быть наиболее осуществимо при номинальной скорости ветра 13 м/с.

Ключевые слова: оптимизация, ветротурбина, направление ветра, компьютерная программа, автоматизация, система управления.

Введение

Существующая технология преобразования энергии ветра в электроэнергию влияет на эффективность ветроэнергостановок. Широко используемые методы управления ветроэнергетической установкой в условиях быстро изменяющихся ветровых нагрузок не обеспечивают должной стабильности частоты вращения ротора, что снижает надежность ветроэлектрических агрегатов, повышает собственное производимой ветроэнергетическими установками электроэнергии потребление, а также негативно влияет на эффективность использования энергии ветра. Решение этих проблем возможно лишь при наличии эффективного автоматизированного управления ветроэнергетической установкой [1–12].

Целью выполненных исследований является обеспечение своевременной подготовки системы к внешним возмущающим воздействиям с учетом изменения направления ветра и программной реализации, что способствует поддержанию скорости вращения ветротурбины на заданном уровне при разных режимах эксплуатации.

Установление математической зависимости угловой скорости ветроколеса от скорости ветра, направления ветра, и угла положения лопасти

Горизонтально-осевые ветроэнергостановки обеспечивают устойчивую генерацию мощности при наличии необходимого ветрового потока и при отсутствии изменения направления ветра [13].

Мощность на валу в результате изменения скорости и направления ветра (рис. 1) будет равна:

$$P = C_p \frac{\rho}{2} V_0^3 F \cos^3 \varphi, \quad (1)$$

где C_p – коэффициент использования мощности ветра; ρ – плотность воздуха; V_0 – скорость ветра; F – площадь ометаемой поверхности; φ – угол изменения направления ветра; V_{1t} – тангенциальная составляющая вектора скорости ветра после изменения направления; V_{1n} – нормальная составляющая скорости ветра после изменения направления.

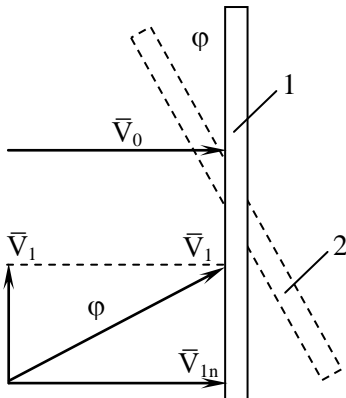


Рис. 1. Изменение направления ветра:
1 – начальное положение ветроколеса;
2 – положение ветроколеса при новой ориентации

Fig. 1. Change of a direction of a wind:
1 – initial position of wind wheel;
2 – position of wind wheel at new orientation

Наличие свободного узла рыскания будет разворачивать ветроколесо на ветер, в результате турбина займет новое положение (рис. 1), перпендикулярное новому направлению ветра. Таким образом, в процессе разворота угол φ между направлением ветра и осью вращения ветротурбины будет уменьшаться, а мощность на валу увеличиваться.

В то же время, согласно [14], мощность на валу ветроэнергостанции функционально зависит от угловой скорости ротора ветротурбины $P = f(\Omega)$. Следовательно, для обеспечения стабильности мощности, снимаемой с ветроколеса необходимо установить зависимость угловой скорости ветроколеса от скорости ветра, направления ветра и угла положения лопасти.

Уравнение связи скорости вращения ветроколеса, скорости ветра и угла установки лопасти имеет следующий вид:

$$\Omega = 119 \frac{Ze}{rib(1-e^2)} \frac{V}{\alpha}, \text{ рад/с}, \quad (2)$$

где Ω – угловая скорость; Z – коэффициента быстросходности ветротурбины; V – скорость ветра; α – угол положения лопасти; r – длина лопасти; i – количество лопастей ветротурбины; b – ширина лопасти; e – коэффициент торможения.

Угол положения лопасти α в соответствии с (2) определится как:

$$\alpha = 119 \frac{Ze}{rib(1-e^2)} \frac{V}{\Omega}, \text{ град}. \quad (3)$$

Тогда в соответствии с (1) математическая зависимость угловой скорости ротора ветроколеса от скорости и направления ветра, угла положения лопасти будет иметь вид:

$$\Omega = 119 \frac{Ze}{rib(1-e^2)} \frac{V}{\alpha} \cos \varphi, \text{ рад/с}. \quad (4)$$

При установившемся режиме скорость и направлении ветра угол положения лопасти α соответствуют номинальной угловой скорости ротора ветроколеса (рис. 2).

Изменение направления ветра в сторону вращения ветроколеса в единицу времени (рис. 2) приведет к увеличению подъемной силы лопасти, а в случае изменения вектора метеопараметра в противоположную сторону подъемная сила лопасти будет уменьшаться, что негативно влияет на стабильность угловой скорости ветротурбины.

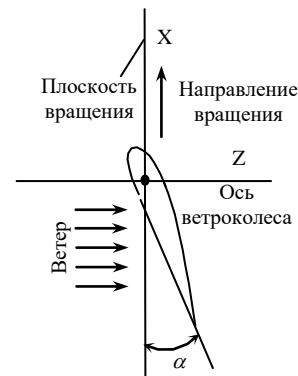


Рис. 2. Изменение подъемной силы лопасти

Fig. 2. Change of elevating force of blade

Таким образом, для учета влияния изменения скорости ветра, направления ветра и угла положения лопасти на стабильность угловой скорости ротора ветроколеса формула (4) примет вид:

$$\Omega = 119 \frac{Ze}{rib(1-e^2)} \frac{V + V \sin \varphi}{\alpha}, \text{ рад/с}. \quad (5)$$

Зависимость угловой скорости ротора ветроколеса от изменения направления ветра $\varphi = 30^\circ$ с последующей установкой турбины на ветер

$\varphi = 0^\circ$ в соответствии с (5) показана на рис. 3, где $\Omega = 7,52$ рад/с, $Z = 5$, $\alpha = 55^\circ$, $V = 13$ м/с, $r = 8,5$ м, $i = 3$, $b = 0,68$ м, $e = 0,6$. Длительность протекания процесса во времени имеет условный характер.

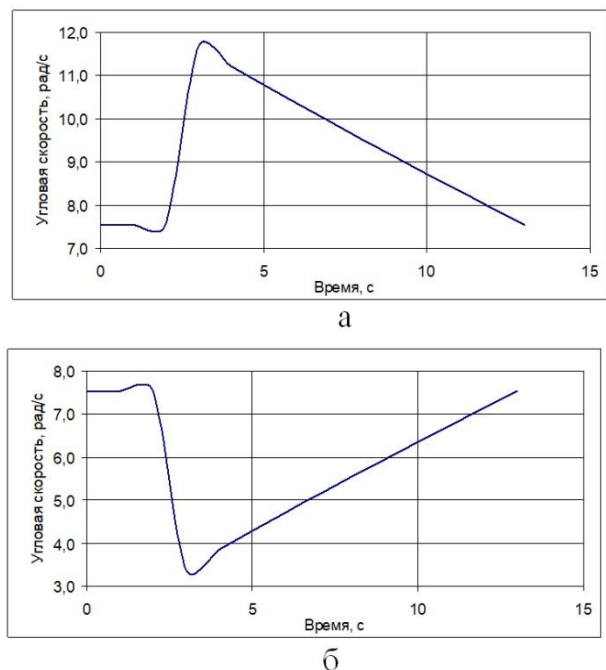


Рис. 3. Зависимость угловой скорости ротора ветроколеса от изменения направления ветра на $\pm 30^\circ$
Fig. 3. Dependence of angular speed of a rotor wind wheel from change of a direction of a wind on $\pm 30^\circ$

Из графиков видно, что при изменении направления ветра $\varphi = 30^\circ$ (рис. 3, а) угловая скорость увеличивается, а при $\varphi = -30^\circ$ (рис. 3, б) уменьшается. Изменение амплитуды скорости вращения ветроколеса составляет 50 %.

Комбинированный метод управления ветроэлектрической установкой с программной реализацией

Согласно [15] в условиях быстро изменяющихся ветровой энергии и электрических нагрузок обеспечение должной стабильности частоты вращения ротора ветротурбины возможно за счет заблаговременной установки положения лопастей на требуемый угол в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии. Отрезок времени упреждения скорости ветра и электрической нагрузки, обеспечивающий оптимальный коридор для вариации результатов оценки времени включения двигателя привода питча, составляет $\Delta t = 10$ с, обусловленный минимальным време-

нем запаздывания $t_{\text{зап}} = 9$ с, которое приводит к увеличению переходного процесса и колебаниям угловой скорости при изменении скорости ветра $\Delta V = 2$ м/с в большую сторону ($\Delta V > 0$).

Положительное изменение отсчета угла направления ветра приводит к увеличению угловой скорости ротора ветроколеса (рис. 3, а), следовательно, является актуальной заблаговременная установка положения лопастей на требуемый угол в соответствии с изменением направления ветра.

Принимая во внимание, что положительное изменение отсчета угла направления ветра находится в пределах от 0 до 90° , а рабочий диапазон скорости ветра от 0 до 20 м/с, то на $\Delta V = 2$ м/с изменения ветрового потока приходится $\Delta \varphi = 9^\circ$ отсчета угла направления ветра.

В результате подстановки $\Delta \varphi = 9^\circ$ в (5) для номинальной скорости ветра $V = 13$ м/с получим результат, аналогичный $\Delta V = 2$ м/с. Следовательно, влияние на время переходного процесса изменение отсчета угла направления ветра

$\Delta \varphi = 9^\circ$ эквивалентно изменению скорости ветра $\Delta V = 2$ м/с.

Таким образом, отрезок времени упреждения скорости ветра и электрической нагрузки, обеспечивающий оптимальный коридор для вариации результатов оценки времени включения двигателя привода питча $\Delta t = 10$ с, обусловленный минимальным временем запаздывания $t_{\text{зап}} = 9$ с, целесообразно оставить неизменными. При использовании оптимизационной модели учета условий нагруженности привода при разных режимах эксплуатации энергоагрегата интервал вариации уменьшится и составит: $\Delta t = 5$ с.

Заблаговременная установка положения лопастей на требуемый угол в соответствии с изменением скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии осуществляется апробированным математическим аппаратом для упреждения значений случайных процессов в гидрометеорологии, который реализует подход к их анализу посредством разложения в ряд по полиномам [16].

Изменение угла направления ветра, как и скорость ветра, имеет стохастический характер. Таким образом, предложенный метод упреждения значений скорости ветра может быть применим и к упреждению изменения угла направления ветра, учитывая, что такие данные предоставляются метеостанциями.

На рис. 4 представлен вид окна программного модуля управления ветроэнергоустановкой на основе учета изменения направления ветра.

Алгоритм обработки данных обеспечивает своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям.

На рисунке видно, что упреждение скорости ветра на следующие $\Delta t = 5$ с составляет $V = 10$ м/с, а изменение отсчета угла направления ветра $\Delta\varphi = 6,2^\circ$. Тогда в соответствии с (5) результирующее значение упреждения скорости ветра изменилось в большую сторону (рис. 2) и составило $V = 11$ м/с.

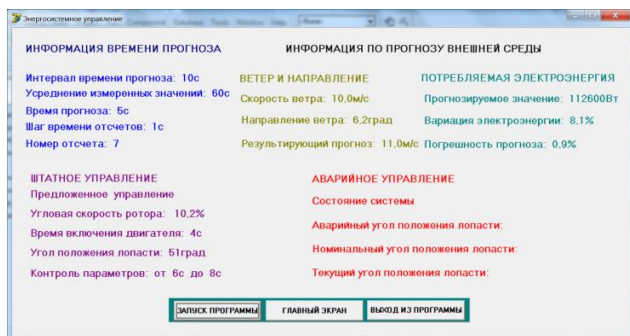


Рис. 4. Программный модуль управления ветроэнергоустановкой на основе учета изменения направления ветра

Fig. 4. The program module of control wind power installation on the basis of the account change direction of a wind

Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- обоснована актуальность метода повышения эффективности ветроэнергоустановкой на основе учета изменения направления ветра;
- получена математическая зависимость угловой скорости ветроколеса от скорости и направления ветра, угла положения лопасти;
- проведен анализ влияния изменения направления ветра на стабильность угловой скорости ветроколеса;
- определен метод и интервал времени упреждения измеренных значений скорости и направления ветра, электрической нагрузки, а также отрезок времени разграничения доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного методов выработки управляющих воздействий;
- разработан программный модуль управления ветроэнергоустановкой на основе учета изменения направления ветра, обеспечивающий

своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям при разных режимах эксплуатации энергоагрегата.

Полученные результаты исследований могут использоваться для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы.

Библиографические ссылки

1. Бабанов А. М., Квач Е. С. Использование IS-THE-графов для анализа иерархических структур данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 66. С. 87–96. DOI 10.17223/19988605/66/9. EDN KXWGYR.
2. Дурново А. А., Инькова О. Ю., Попкова Н. А. Принципы описания показателей логико-семантических отношений и их иерархии // Информатика и ее применения. 2022. Т. 16, № 2. С. 52–59. DOI 10.14357/19922264220207. EDN NPFTON.
3. Бледных Е. Н., Макарик Е. В., Степин Ю. П. Марковская модель метода анализа иерархий в оценке рисков вариантов разработки месторождений углеводородов // Автоматизация, телемеханика и связь в нефтяной промышленности. 2021. № 1 (570). С. 23–32. DOI 10.33285/0132-2222-2021-1(570)-23-32. EDN HSQLIC.
4. Зайцев И. В., Молев А. А. Алгоритм генерации структуры самоорганизующейся системы радиосвязи на основе иерархии системы управления // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26, № 6. С. 57–70. DOI 10.18127/j15604128-202106-06. EDN CGNLXY.
5. Радкевич К. А. Метод анализа иерархий при построении сетей Интернета вещей // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи. 2022. № 1. С. 77–78. EDN UNPGIO.
6. Радкевич К. А., Горбадей О. Ю. Программная реализация метода анализа иерархий для выбора оптимальной структуры сети Интернета вещей // Современные средства связи. 2022. Т. 1, № 1. С. 19–20. EDN TFUCZC.
7. Богаченко Н. Ф., Лавров Д. Н. Применение метода анализа иерархий к задаче оценки актуальности угроз информационной безопасности // Математические структуры и моделирование. 2023. № 3 (67). С. 104–110. DOI 10.24147/2222-8772.2023.3.104-110. EDN RUUQNM.
8. Макарова О. С., Поршнев С. В. Оценивание вероятностей компьютерных атак на основе метода анализа иерархий с динамическими приоритетами и предпочтениями // Безопасность информационных технологий. 2020. Т. 27, № 1. С. 6–18. DOI 10.26583/bit.2019.4.01. EDN BYBSDK.
9. Козлова М. Г., Лукьяненко В. А., Макаров О. О. Построение многоагентных маршрутов в сети с иерархией вершин // Вестник Воронежского госу-

дарственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023. № 3. С. 32–50. DOI 10.17308/sait/1995-5499/2023/3/32-50. EDN AYAQKM.

10. Иванова Т. Л., Изуменцева А. В. Оценка стратегической устойчивости угледобывающих предприятий ДНР на основе метода анализа иерархий // Сборник научных работ серии «Экономика». 2020. № 18. С. 116–128. EDN MCXDPF.

11. Семенихина Н. Б. Метод анализа иерархий как системный подход к проблеме принятия решений // Дискуссия. 2023. № 2 (117). С. 38–48. DOI 10.46320/2077-7639-2023-2-117-38-48. EDN VZFMHF.

12. On the approach to forecasting indicators of socio-economic development of the region based on indirect indicators / M. A. Rusanov, V. R. Abbazov, V. A. Baluev [et al.] // Modeling, Optimization and Information Technology. – 2022. – Vol. 10, No. 3(38). – P. 2-3. – DOI 10.26102/2310-6018/2022.38.3.004. – EDN FABAJV.

13. Кулакова Т. А., Паикус В. Ю., Волкова А. В. Сети против иерархий или новые иерархии? Возможности и ограничения сетевого подхода в управлении публичной политикой // Проблемы современной экономики. 2020. № 1 (73). С. 40–44. EDN LUXCLR.

14. Преобразование качественных характеристик автотранспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий / Л. Н. Мазунова, В. В. Беляков, В. С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2023. № 1 (140). С. 97–106. DOI 10.46960/1816-210X_2023_1_97. EDN JOIWBI.

15. Система мониторинга технико-экономических условий инновационной деятельности предприятия / С. Н. Яшин, Ю. С. Коробова, С. А. Борисов, Ю. В. Захарова // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. 2023. № 4 (72). С. 72–78. DOI 10.52452/18115942_2023_4_72. EDN QYHKUY.

References

1. Babanov A.M., Kvach E.S. [Using IS-THE graphs to analyze hierarchical data structures]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika*. 2024. No. 66. Pp. 87-96 (in Russ.). DOI 10.17223/19988605/66/9. EDN KXWGYR.

2. Durnovo A.A., In'kova O. u., Popkova N.A. [Principles of description of indicators of logical-semantic relations and their hierarchy]. *Informatika i ee primeneniya*. 2022. Vol. 16, no. 2. Pp. 52-59 (in Russ.). DOI 10.14357/19922264220207. EDN NPFTOH.

3. Blednyh E.N., Makarik E.V., Stepin Ju.P. [Markov Model of the Analytic Hierarchy Process in Risk Assessment of Hydrocarbon Field Development Options]. *Avtomatizacija, telemehanizacija i svjaz' v neftjanoj promyshlennosti*. 2021. № 1. Pp. 23-32 (in

Russ.). DOI 10.33285/0132-2222-2021-1(570)-23-32. EDN HSQLIC.

4. Zajcev I.V., Molev A.A. [Algorithm for generating the structure of a self-organizing radio communication system based on the hierarchy of the control system]. *Jeletromagnitnye volny i jelektronnye sistemy*. 2021. Vol. 26, no. 6. Pp. 57-70 (in Russ.). DOI 10.18127/j15604128-202106-06. EDN CGNLXY.

5. Radkevich K.A. [Hierarchy Analysis Method for Building Internet of Things Networks]. *Novye informacionnye tehnologii v telekommunikacijah i pochtovoj svjazi*. 2022. No. 1. Pp. 77-78 (in Russ.). EDN UHPGIO.

6. Radkevich K.A., Gorbadej O.Ju. [Software implementation of the hierarchy analysis method for selecting the optimal structure of the Internet of Things network]. *Sovremennye sredstva svjazi*. 2022. Vol. 1, no. 1. Pp. 19-20 (in Russ.). EDN TFUCZC.

7. Bogachenko N.F., Lavrov D.N. [Application of the Analytic Hierarchy Process to the Problem of Assessing the Relevance of Information Security Threats]. *Matematicheskie struktury i modelirovanie*. 2023. No. 3. Pp. 104-110 (in Russ.). DOI 10.24147/2222-8772.2023.3.104-110. EDN RUUQNM.

8. Makarova O.S., Porshnev S.V. [Estimating the Probabilities of Computer Attacks Based on the Analytical Hierarchy Process with Dynamic Priorities and Preferences]. *Bezopasnost' informacionnyh tehnologij*. 2020. Vol. 27, no. 1. Pp. 6-18 (in Russ.). DOI 10.26583/bit.2019.4.01. EDN BYBSDK.

9. Kozlova M.G., Luk'janenko V.A., Makarov O.O. [Building multi-agent routes in a network with a hierarchy of nodes]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii*. 2023. No. 3. Pp. 32-50 (in Russ.). DOI 10.17308/sait/1995-5499/2023/3/32-50. EDN AYAQKM.

10. Ivanova T.L., Igumenceva A.V. [Assessment of the strategic sustainability of coal mining enterprises of the DPR based on the method of hierarchy analysis]. *Sbornik nauchnyh rabot serii "Jekonomika"*. 2020. No. 18. Pp. 116-128 (in Russ.). EDN MCXDPF.

11. Semenišina N.B. [The Analytic Hierarchy Process as a Systematic Approach to Decision Making]. *Diskussija*. 2023. No. 2. Pp. 38-48 (in Russ.). DOI 10.46320/2077-7639-2023-2-117-38-48. EDN VZFMHF.

12. Rusanov M.A., Abbazov V.R., Baluev V.A. [et al.] On the approach to forecasting indicators of socio-economic development of the region based on indirect indicators // Modeling, Optimization and Information Technology. 2022. Vol. 10, no. 3(38). P. 2-3. DOI 10.26102/2310-6018/2022.38.3.004. EDN FABAJV.

13. Kulakova T.A., Pashkus V.Ju., Volkova A.V. [Networks versus Hierarchies or New Hierarchies? Potential and Limitations of the Network Approach to Public Policy Management]. *Problemy sovremennoj*

jeconomiki. 2020. No. 1. Pp. 40-44 (in Russ.). EDN LUXCLR.

14. Mazunova L.N., Beljakov V.V., Makarov V.S. [i dr.] *Preobrazovanie kachestvennykh harakteristik avtotransportnykh sredstv v kolichestvennye pokazateli s primeneniem metoda analiza ierarhij* [Преобразование качественных характеристик автотранспортных средств в количественные показатели с применением метода анализа иерархий]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev].

2023. No. 1. Pp. 97-106 (in Russ.). DOI 10.46960/1816-210X_2023_1_97. EDN JOIWBI.

15. Yashin S.N., Korobova Yu.S., Borisov S.A., Zakharova Yu.V. [System for monitoring the technical and economic conditions of innovative activity of an enterprise] Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Series: Social Sciences. 2023. No. 4. Pp. 72-78 (in Russ.). DOI 10.52452/18115942_2023_4_72. EDN QYHKUY.

* * *

Wind Power Unit Optimal Control due to Wind Direction Alteration

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State Autonomous Educational Institution of Vocational Training "Institute for Education Development" Sevastopol, Russia

B. A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The relevance of the effective wind power unit automated control on the account a wind direction alteration at various operation modes is made, so as to minimize the time of rotor angular speed adjustment transient process, providing windwheel speed stability improvement and modern wind power unit component reliability increasing under incomplete information about wind speed and the electric loading values, essentially changing in time.

The review of principal researches regarding the influence of wind direction change on wind power unit operation is made. The description of mathematical relation of windwheel angular speed and wind speed, direction, and blade angle is made.

On the basis of the carried out analysis of wind power unit control with preliminary blade adjustment at a demanded angle according to the estimation of the pitch drive engine on-time and wind direction alteration to minimize the time of wind turbine angular speed adjustment transient process stabilizing the windwheel rotor rotation speed under incomplete information about wind speed and direction, electric loading, essentially changing in time, the criterion of access time differentiation to the device of blade position adjustment in terms of the offered and the basic methods of control is established.

The software automation control module of wind power unit is developed, providing timely system preparation for external disturbances taking into account wind direction alterations at different power unit operation modes. The software module application showed that the efficiency of the offered control method to eliminate the delay of the control actions is the utmost at rated wind speed of 13m/s.

Keywords: optimization, wind turbine, wind direction, computer program, automation, control system.

Получено: 29.11.24

Образец цитирования

В. И. Буяльский, Б. А. Якимович. Оптимальное управление ветроэнергоустановкой на основе учета изменения направления ветра // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 2. С. 74–79. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-74-79.

For Citation

Buyalsky V.I., Yakimovich B.A. [Wind Power Unit Optimal Control due to Wind Direction Alteration]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 74-79. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-74-79.