

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-41-47

## Ветроэнергостановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции

В. И. Буяльский, кандидат технических наук, ГБОУ «Средняя общеобразовательная школа № 23», Севастополь, Россия

На основе проведенного анализа управления ветроэлектрическим агрегатом с заблаговременной установкой лопастей на требуемый угол в соответствии с оценкой времени включения двигателя привода питча и учетом образования льда на лопастях ветроколеса, направленного на минимизацию времени переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины, что способствует обеспечению повышения стабильности скорости вращения ветроколеса в условиях неполной информации о характеристиках скорости ветра и 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 в составе ветроэлектростанции, обеспечивающий своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям с учетом образования льда на лопастях ветроколеса при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, из которого следует, что изменение угловой скорости ротора ветротурбины в большую сторону в зимнее время требует больше энергии ветрового потока (14 м/с) в сравнении с весенне-осенним периодом (11,1 м/с), то есть образование льда на лопастях ветроколеса замедляет вращение ротора ветроколеса. Следовательно, эффективность применения предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий, что проявляется при изменении скорости вращения ротора ветротурбины в сторону увеличения, может быть осуществима при скорости ветра от 13 м/с и выше. Усовершенствован программный комплекс управления ветроэлектрической установкой в составе ветроэлектростанции на основе режимности работы энергоагрегата: летний режим – процесс производства электроэнергии при благоприятных природных условиях; зимний режим – процесс производства электроэнергии в условиях образования льда на лопастях ветроколеса.

**Ключевые слова:** оптимизация, ветротурбина, оценка времени, компьютерная программа, автоматизация, система управления.

### Введение

Существующая технология функционирования ветроэнергостановок в условиях образования льда на лопастях ветроколеса и быстро изменяющейся энергии ветрового потока не обеспечивает должной стабильности частоты вращения ротора, что снижает надежность ветроэлектрических агрегатов. Сочетание значимости ветровой энергетики с недостаточной эффективностью автоматизации ее управления делает актуальным решение этих проблем [1–12].

Целью выполненных исследований является определение критерия согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного способов управления ветроэнергостановкой с учетом образования льда на лопастях ветроколеса и программная реализация в составе ветроэлектростанции, что способствует улучшению условий поддержки номинального значения угловой скорости ветроколеса современных ветрогенераторов при разных режимах эксплуатации.

### Влияние изменения массы лопастей на инерционность системы

Оптимальное управление ветроэнергостановкой, предложенное в [13], основывается на упреждении внешних возмущений с учетом сил инерции, действующих на роторные системы, которые определяются для движущего ( $J_{пр.Д}$ ) и тормозного ( $J_{пр.Т}$ ) усилий:

$$J_{пр.Д} = m_{в.к} l_{в.к}^2 + \frac{1}{2} (m_{мф} R_{мф}^2 + m_{в.ш} R_{в.ш}^2) + \frac{1}{2} (m_{з.к} R_{з.к}^2 + m_{г.м} R_{г.м}^2 + m_{р.г} R_{р.г}^2) i^2 \frac{m_{р.г} \Omega_{р.г}^3 R_{р.г}^2}{m_{в.к} \Omega_{в.к}^3 R_{в.к}^2}, \quad (1)$$

$$J_{пр.Т} = m_{в.к} l_{в.к}^2 + \frac{1}{2} (m_{мф} R_{мф}^2 + m_{в.ш} R_{в.ш}^2) + \frac{1}{2} (m_{з.к} R_{з.к}^2 + m_{г.м} R_{г.м}^2 + m_{р.г} R_{р.г}^2) i^2 \frac{m_{в.к} \Omega_{в.к}^3 R_{в.к}^2}{m_{р.г} \Omega_{р.г}^3 R_{р.г}^2}, \quad (2)$$

где  $m_{в.к} = 1570$  кг – масса ветроколеса;  $l_{в.к} = 8,5$  м – длина лопасти;  $m_{мф} = 628$  кг – масса муфты;  $R_{мф} = 0,3$  м – радиус муфты;  $m_{в.ш} = 150$  кг – масса ведущей шестерни;  $R_{в.ш} = 0,3$  м – радиус ведущей шестерни;  $m_{з.к} = 50$  кг – масса зубчатого колеса;  $R_{з.к} = 0,1$  м – радиус зубчатого колеса;  $m_{г.м} = 52$  кг – масса гибкой муфты;  $R_{г.м} = 0,08$  м – радиус гибкой муфты;  $m_{р.г} = 80$  кг – масса ротора генератора;  $R_{р.г} = 0,35$  м – радиус ротора генератора.

В работе [14] предложен метод повышения эффективности ветроэлектрической установки в условиях образования льда на лопастях ветроколеса. В основе предложенного метода лежит математическая зависимость коэффициента быстроходности ветротурбины от толщины образования льда на лопастях ветроколеса, энергии ветрового потока и угла установки лопастей. Формула фактической массы лопасти с учетом образования льда имеет вид:

$$m_{\text{лф}} = m_{\text{л}} + m_{\text{лд}}, \text{ кг}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{л}}$  – масса лопасти;  $m_{\text{лд}}$  – масса льда.

Для определения массы льда в (3) используется выражение:

$$m_{\text{лд}} = 917 \cdot 2rbh, \text{ кг}, \quad (4)$$

где  $r$  – длина лопасти;  $b$  – ширина лопасти;  $h$  – толщина льда на лопасти.

Подставив численные значения  $r = 8,5$  м,  $b = 0,68$  м,  $h = 0,005$  м в (4), получим массу льда на лопасти  $m_{\text{лд}} = 53$  кг, а для трех лопастей будет равна  $m_{\text{лд}} = 159$  кг.

Тогда масса ветроколеса в (1) и (2) увеличится на 159 кг и составит  $m_{\text{в,к}} = 1729$  кг, а приведенный момент инерции системы:  $J_{\text{пр,д}} = 126603 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_{\text{пр,т}} = 127529 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Ввиду незначительных расхождений между полученными результатами примем среднее значение  $J = 127372 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

**Сравнение результатов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины в обычном режиме и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе базовой функции управления**

Управляющая функция разомкнутой системы автоматического регулирования угловой скорости ротора ветротурбины имеет вид:

$$W = \frac{20,8}{T_{\Delta R} \cdot p + 1} \left( \frac{0,25}{Tp + 1} \Delta V + \frac{0,86}{Tp + 1} \Delta \alpha \right) - \frac{0,007}{Tp + 1} \Delta P, \quad (5)$$

где  $T$  – постоянная времени затухания колебаний угловой скорости ротора ветротурбины;  $T_{\Delta R}$  – постоянная времени редуктора;  $\Delta \alpha$  – переменная управления, характеризующая относительную ординату угла установки лопасти турбины;  $\Delta V$ ,  $\Delta P$  – переменные по возмущению – относительные ординаты скорости ветра и электрической нагрузки соответственно.

Время прекращения колебаний угловой скорости ветротурбины в (5) определяется по формуле

$$T = J / (F_T + k_{\text{тр}}), \text{ с}, \quad (6)$$

где  $F_T = 6220$  – фактор устойчивости;  $k_{\text{тр}} \approx 5500$  – коэффициент трения.

Подставив значение сил инерции роторных систем  $J = 127372 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  в (6), получим постоянную времени затухания колебаний  $T = 11$  с с учетом образования льда на лопастях ветроколеса.

График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины  $T = 10$  с приведен на рис. 1, а, и  $T = 11$  с – рис. 1, б, в соответствии с реализацией функции управления (5) в среде Matlab Simulink.

Из графиков видно, что время переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины практически не отличается.

**Сравнение результатов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины в обычном режиме и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе оптимизационной функции управления**

Оптимизационная управляющая функция (7) направлена на повышение устойчивости системы управления энергоагрегатом на основе оптимизации ошибки управления в результате воздействия внешних возмущений.

$$W_{\text{opt}} = \frac{0,15}{j^2 \omega^2 T_{\Delta R}^2 + 1} \cdot \frac{1}{j\omega T + 1} \Delta P - \frac{0,007}{j\omega T + 1} \Delta P. \quad (7)$$

График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины  $T = 10$  с приведен на рис. 2, а, а  $T = 11$  с – рис. 2, б, на основе модели оптимизационной функции управления созданной в среде Matlab Simulink.

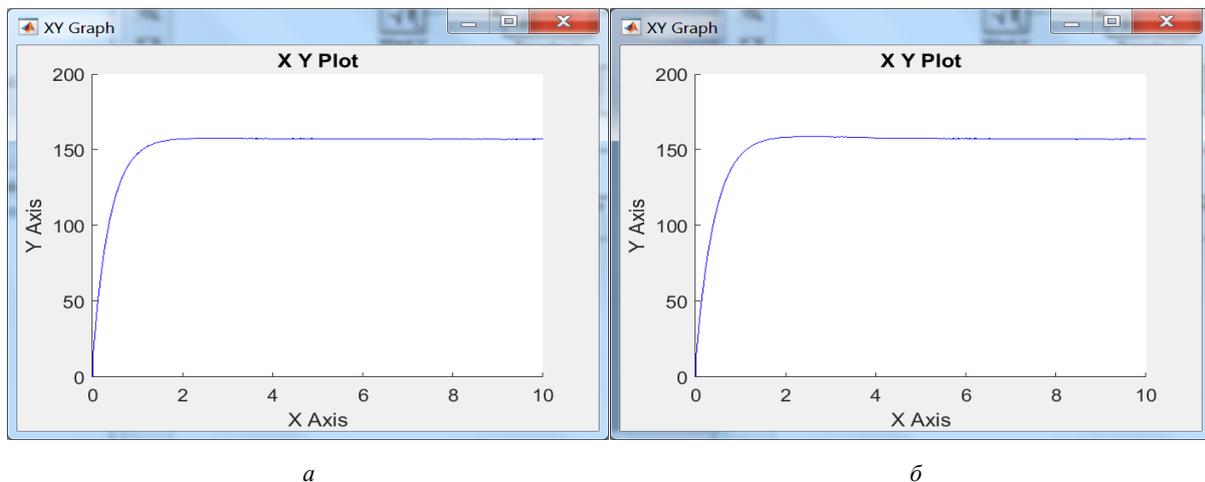


Рис. 1. График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины

Fig. 1. The schedule of transient of regulation of angular speed of a rotor of wind-turbine

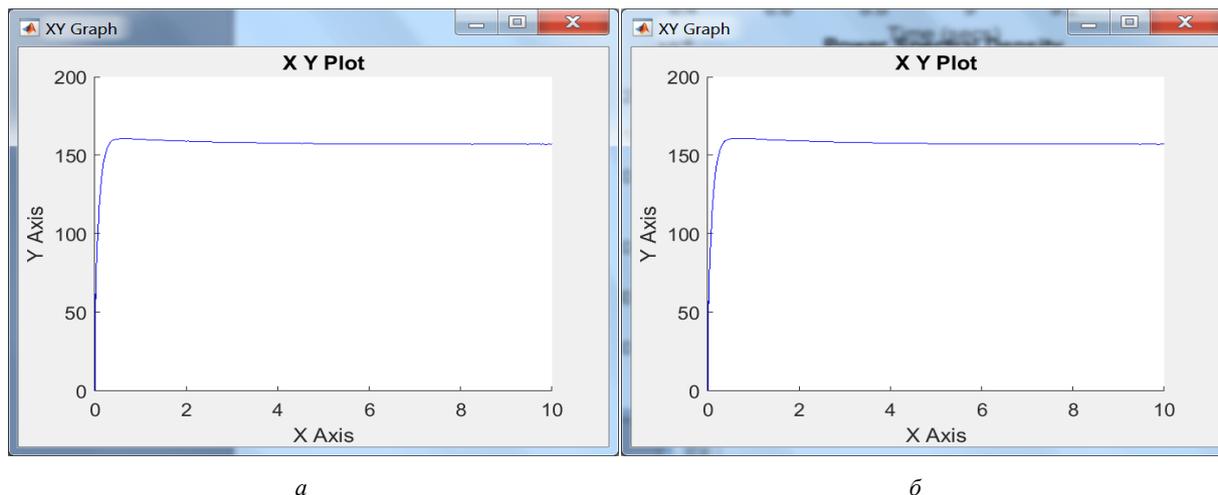


Рис. 2. График переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины

Fig. 2. The schedule of transient of regulation of angular speed of a rotor of wind-turbine

Из графиков видно, что время переходного процесса регулирования угловой скорости ротора ветротурбины практически не отличается.

Таким образом, на основе анализа, сравнения результатов регулирования угловой скорости ветротурбины в обычном режиме и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса следует, что критерий по формированию согласованного доступа к двигателю привода угла pitch лопасти со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений остается неизменным.

#### Программная реализация

Для программной реализации управления ветроэнергостанцией в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции будет целесообразным использование математической зависимости скорости вращения ветротурбины от скорости ветра, электрической нагрузки и угла установки лопастей с учетом условий вибраций роторных систем при разных режимах эксплуатации ветроэнергостанции, что способствует повышению надежности ветрогенераторов:

$$\Omega = 119k \frac{1}{rib(1-e^2)} \frac{Ze}{\left(1 - \left[ \frac{r_2'}{\sqrt{\frac{U_1^2 - (I_1')^2(x_1 + x_2')^2}{(I_1')^2} - r_1}} \right]} \right)^\alpha} V, \text{ рад/с,}$$

где  $U_1$  – фазное напряжение;  $x_1$  – индуктивное сопротивление;  $x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление;  $r_1$  – активное сопротивление фазы

обмотки статора;  $r_2'$  – приведенное активное сопротивление фазы обмотки статора.

В работе [15] предложен программный комплекс управления ветротурбиной в составе ветроэлектростанции на базе учета вибраций роторных систем, что способствует своевременной установке лопастей к внешним возмущающим воздействиям при разных режимах эксплуатации энергоагрегата.

Таким образом, с учетом наличия свойств инвариантности решения задач по управлению объектом со стороны компьютерной программы будет целесообразным и эффективным реализовать модифицированный «Главный экран» (рис. 3), который включает два режима оптимального управления ветротурбиной: летний и зимний режим.

«Главный экран» всегда отображается на мониторе компьютера управления и контроля, а области А, В, С D, Е, F и G имеют назначения.

Летний режим реализует подход для оптимального управления ветроагрегатом выработки электроэнергии на основе учета вибраций роторных систем и упреждения внешних возмущений, что способствует своевременной установке лопастей к изменению внешней среды.

Зимний режим отличается тем, что подход по управлению реализуется в соответствии с подходом для летнего режима, но в дополнение учитывает образование льда на лопастях ветроколеса.

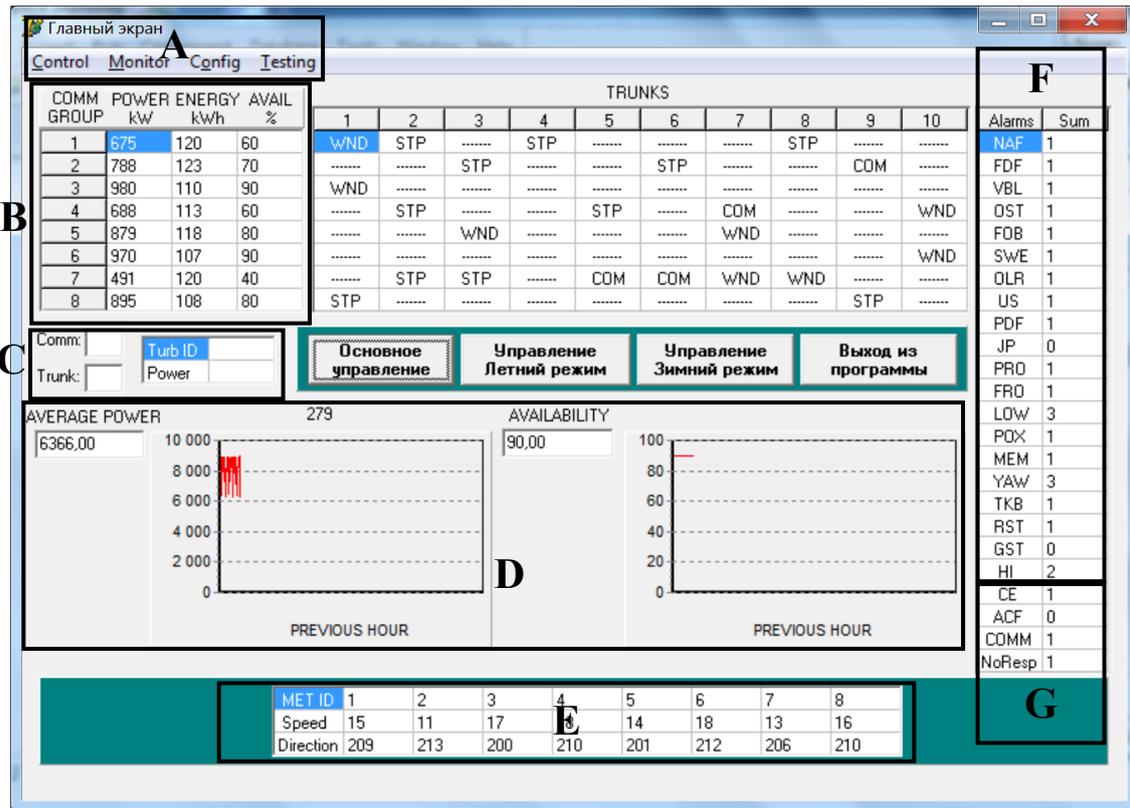


Рис. 3. «Главный экран» системы управления ветроэлектростанцией. Расположение областей: А, В, С D, Е, F, G

Fig. 3. «The main Screen» control systems wind power plant. An arrangement of areas: A, B, C D, E, F, G

На рис. 4 представлен вид окна программного модуля управления работой ветроагрегата «Летний режим». Алгоритм обработки данных способствует

своевременной установке лопастей к внешним возмущающим воздействиям и согласно (1), (2) учитывает силы инерции, действующие на роторные системы.



Рис. 4. Программный модуль управления работой ветроагрегата в условиях весенне-осеннего периода

Fig. 4. The program module of control of work wind unit in the conditions of the vesenne-autumn period

Алгоритм обработки данных для своевременной подготовки системы к внешним возмущаю-

щим воздействиям «Зимний режим» представлен на рис. 5.



Рис. 5. Программный модуль управления работой ветроагрегата в условиях зимнего периода

Fig. 5. The program module of control of work wind unit in the conditions of the winter period

В результате программной реализации управления ветроэнергоустановкой (рис. 4, 5) следует, что изменение угловой скорости ротора ветротурбины в большую сторону в зимнее время требует больше энергии ветрового потока (14 м/с) в сравнении с весенне-осенним периодом (11,1 м/с), то есть образование льда на лопастях замедляет вращение ротора ветроколеса.

Следовательно, эффективность применения предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий, что проявляется при изменении скорости вращения ротора ветротурбины в сторону увеличения, может быть осуществима при скорости ветра от 13 м/с и выше.

#### Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- проведен анализ моделирования регулирования угловой скорости ротора ветротурбины при стандартных погодных условиях и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе базовой и оптимизационной управляющих функций, который показал, что время переходного процесса не отличается;

- в результате идентичности переходных процессов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины для разных погодных условий критерий согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного способов управления ветроэнергоустановкой с учетом образования льда на лопастях ветроколеса остается неизменным;

- на основе программной реализации управления ветроэнергоустановкой в летнее и зимнее время сле-

лан вывод, что в условиях образования льда на лопастях ветроколеса потребность энергии ветра возрастает относительно режима, когда обледенение отсутствует (14 м/с > 11,1 м/с).

Таким образом, предложенный метод принятия управляющих воздействий минимизирует время запаздывания по управлению, что способствует повышению стабильности скорости вращения ветроколеса.

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

#### Библиографические ссылки

1. Серебряков П. А. Перспективы развития ветроэнергетики // Точная наука. 2021. № 110. С. 2–13.
2. Серебряков П. А. Теоретические основы математического моделирования вихревой ветроэнергетической установки // Точная наука. 2021. № 110. С. 23–30.
3. Многоагрегатная ветроэнергетическая установка для районов с низким ветровым потенциалом / С. С. Доржиев, Е. Г. Базарова, В. В. Пилипков, М. И. Розенблюм // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 2 (31). С. 45–52.
4. Пионкевич В. А. Математическое моделирование ветротурбины для ветроэнергетической установки с асинхронным генератором методом частотных скоростных характеристик // Вестник ИрГТУ. 2016. № 3. С. 83–88.
5. Emadifar R., Tohidi D., Eldoromi M. Controlling Variable Speed Wind Turbines Which Have Doubly Fed Induction Generator by Using of Internal Model Control Method // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. No. 5. Pp. 3464–3471.
6. Balamurugan N., Selvaperumal S. Intelligent controller for speed control of three phase induction motor using indirect vector control method in marine applications // Indian journal of Geo Marine Sciences. 2018. No. 47. Pp. 1068–1074.

7. Vijayalaxmi B., Bheema K. Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Using Fuzzy Logic with DFIG // International Journal of research in advanced engineering technologies. 2016. No. 5. Pp. 45–52.

8. Qin Hongwu, Li Xinze, Chye En Un, Voronin V.V. Research on the mechanism of wind turbine blades ice coating and anti-icing methods // Вестник ТОГУ. 2021. № 2 (61). С. 53–60.

9. Wei K, Yang Y, Zuo H, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. Wind Energy. 2020. No. 23 (3). Pp. 433–457.

10. Пионкевич В. А. Следящие системы автоматического управления напряжением асинхронного генератора и перспективы их развития // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 81–86.

11. Нечаев И. С., Шонина Д. Е. Особенности и проблемы развития ветровой энергетики // Молодой ученый. 2019. № 15 (253). С. 44–46.

12. Горячев С. В., Смолякова А. А. Проблемы и перспективы ветроэнергетических систем в России // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 5 (119). С. 37–41.

13. Буяльский В. И. Методика для устранения запаздывания включения устройства разворота лопастей ветротурбины // Энергетик. 2014. №5. С. 33–35.

14. Буяльский В. И. Методы повышения эффективности ветроэлектрической установки в условиях образования льда на лопастях ветроколеса // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 42–46. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-42-46.

15. Буяльский В. И. Программное обеспечение управления ветротурбиной в составе ветроэлектростанции на базе учета вибрационной нагруженности привода и своевременной подготовки процесса принятия управляющих решений при разных режимах эксплуатации энергоагрегата // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 79–87. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.

#### References

1. Serebryakov R.A. [Prospects for the development of wind energy]. *Tochnaya nauka*. 2021. No. 110. Pp. 2-13 (in Russ.).

2. Serebryakov R.A. [Theoretical foundations of mathematical modeling of a vortex wind power plant]. *Tochnaya nauka*. 2021. No. 110, pp. 23-30 (in Russ.).

3. Dorgiev S.S., Bazarova E.G., Pilipkov V.V., Rozenblum M.I. [Multi-unit wind power plant for areas with low wind potential]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2021. No. 2. Pp. 45-52 (in Russ.).

4. Pionkevich V.A. [Mathematical modeling of a wind turbine for a wind power plant with an asynchronous generator using the method of frequency-speed characteristics]. *Vestnik IrGTU*. 2016. No. 3, pp. 35-37 (in Russ.).

5. Emadifar R., Tohidi D., Eldoromi M. Controlling Variable Speed Wind Turbines Which Have Doubly Fed Induction Generator by Using of Internal Model Control Method. In International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. No. 5. Pp. 3464-3471.

6. Balamurugan N., Selvaperumal S. Intelligent controller for speed control of three phase induction motor using indirect vector control method in marine applications. In Indian journal of Geo Marine Sciences. 2018. No. 47. Pp. 1068-1074.

7. Vijayalaxmi B., Bheema K. Individual Pitch Control of Variable Speed Wind Turbines Using Fuzzy Logic with DFIG. In International Journal of research in advanced engineering technologies. 2016. No. 5. Pp. 45-52.

8. Qin Hongwu, Li Xinze, Chye En Un, Voronin V. V. Research on the mechanism of wind turbine blades ice coating and anti-icing methods. *Vestnik TOGU*. 2021. No. 2. Pp. 53-60.

9. Wei K, Yang Y, Zuo H, et al. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. Wind Energy. 2020. No. 23. Pp. 433-457.

10. Pionkevich V.A. [Watching systems of automatic control of pressure of the asynchronous generator and prospect of their development]. *Bulletin IrGTU*. 2016. vol. 109, no. 2, pp. 81-86 (in Russ.).

11. Nechev I.S., Shonina D.E. [Features and problems of development of wind power]. *Molodoy ucheniy*. 2019. No. 15. Pp. 44-46 (in Russ.).

12. Goryachev S.V., Smolyakova A.A. [Problems and prospects wind power systems in Russia]. *Megdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy jurnal*. 2022. No. 5. Pp. 37-41 (in Russ.).

13. Buyalsky V.I. [Technique for elimination of delay of inclusion of the device of a turn of blades wind turbine]. *Energetik*. 2014, no. 5, pp. 33-35 (in Russ.).

14. Buyalsky V.I. [Wind Power Plant Efficiency Increasing Methods in Ice Formation on Wind Wheels Blades]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 42-46 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-4-42-46.

15. Buyalsky V.I. [Software for controlling a wind turbine as part of a wind power plant based on taking into account the vibration load of the drive and timely preparation of the process of making control decisions under different operating modes of the power unit]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 79-87 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-1-79-87.

\*\*\*

#### Optimum Control Wind Power Installations Being Subjected to Ice Formation on Wind Wheel Blades Within Wind Electric Station Structure

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State budgetary educational institution of a city of Sevastopol Average comprehensive school No. 23

*On the basis of the analysis of wind electric unit control with preliminary installation of blades at a required angle according to an estimation of the drive pitch engine start timesubjected toice formation on wind wheel blades to minimize the wind turbine rotor angular speedtransient time, that promotes wind wheel rotation speed stability under the conditions of incomplete wind speed and the electric loadinginformation, that may change significantly with time, the criterion of access time to the of bladeposition control devicefrom the proposed and basic methods of control is established.*

*The program module towind power automation control within thewind electric stationstructure is developed, providing relevantssystem preparation for external actions due to ice formation on blades wind wheel at different operation modes of power unit,that showedangular speed increase of a wind turbine rotor during winter time thus demanding more energy of a wind stream*

(14m/s) in comparison with the spring and autumn period (11.1m/s). Therefore, ice formation on wind wheel blades slows down wind wheel rotor rotation. Hence, the offered control method efficiency during winter time to avoid control delay is shown by rotation speed increase of a wind turbine rotor towards can be realized for wind speeds exceeding 13m/s.

The improved software control unit of wind power installation within the structure of wind power station based on the power unit operation modes provides: «Summer mode» – electric power generation under favorable environment conditions; «Winter mode» – electric power generation under ice formation on blades wind wheel.

**Keywords:** optimization, wind turbine, time estimation, computer program, automation, control system.

Получено: 21.12.23

#### Образец цитирования

Буяльский В. И. Ветроэнергостановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 1. С. 41–47. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-41-47.

#### For Citation

Buyalsky V.I. [Wind power installations with optimum control in the conditions of ice formation on blades wind wheel in structure wind electric station]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 40-47. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-1-40-47.