

УДК 621.658.012.531  
 DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-34-39

## **Автономные ветроэнергоустановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции**

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

*Б. А. Якимович*, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*На основе проведенного анализа управления автономным ветроэлектрическим агрегатом с заблаговременной установкой лопастей на требуемый угол в соответствии с оценкой времени включения двигателя привода питча и учета образования льда на лопастях ветроколеса, направленного на минимизацию времени переходного процесса регулирования фазного напряжения генератора ветротурбины, что способствует повышению качества процесса самовозбуждения асинхронного генератора в условиях неполной информации о характеристиках скорости ветра и электрической нагрузки и учета параметров индуктивного сопротивления  $x_1$ , приведенного индуктивного сопротивления  $x'_2$ , активного сопротивления фазы обмотки статора  $r_1$ , приведенного активного сопротивления фазы обмотки статора  $r'_2$ , 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 автономной ветроэнергетической установкой в составе ветроэлектростанции, обеспечивающий свое временную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям с учетом образования льда на лопастях ветроколеса при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, из которого следует, что эффективность применения предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий может быть осуществимо при скорости ветра от 13 м/с и выше. Усовершенствован программный комплекс управления ветроэлектрической установкой в составе ветроэлектростанции на основе режимности работы энергоагрегата: «Автономное управление. Летний режим», «Энергосистемное управление. Летний режим» – процесс производства электроэнергии при благоприятных природных условиях; «Автономное управление. Зимний режим», «Энергосистемное управление. 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 преобразования энергии ветра в электроэнергию влияет на эффективность ветроэнергоустановок. 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 потребление производимой ветроэнергетическими установками электроэнергии, 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 определение критерия согласованного доступа к двигателю привода питча со стороны предложенного и основного способов управления автономной ветроэнергоустановкой с учетом образования льда на лопастях ветро-

колеса и программной реализацией в составе ветроэлектростанции, что способствует поддержанию напряжения генератора ветротурбины на заданном уровне при разных режимах эксплуатации.

### **Комбинированный метод управления автономной ветроэлектрической установкой**

В работе [13] предложен метод повышения эффективности ветроэлектрической установки в условиях образования льда на лопастях ветроколеса.

В основе предложенного метода лежит математическая зависимость коэффициента быстродействия ветротурбины от толщины образования льда на лопастях ветроколеса, скорости ветра и угла положения лопасти:

$$Z = \sqrt{\frac{\rho FV}{m_n + 917 \cdot 2rbh}} \frac{ib(1-e^2)}{119e} \alpha, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $F$  – площадь ометаемой поверхности;  $m_l$  – масса лопасти;  $r$  – длина лопасти;  $V$  – скорость ветра;  $\alpha$  – угол положения лопасти;  $i$  – количество лопастей ветротурбины;  $b$  – ширина лопасти;  $e$  – коэффициент торможения;  $h$  – толщина льда на лопасти.

В основе метода повышения эффективности автономной ветроэлектрической установкой лежит математическая модель фазного напряжения генератора ветротурбины, которая имеет вид. В:

$$U_1 = I'_2 \sqrt{\left( \frac{r'_2}{1 - [119kZeV/\Omega rib(1-e^2)\alpha]} + r_1 \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}, \quad (2)$$

где  $I'_2$  – ток обмотки ротора;  $x_1$  – индуктивное сопротивление;  $x'_2$  – приведенное индуктивное сопротивление;  $r_1$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $r'_2$  – приведенное активное сопротивление фазы обмотки статора;  $k$  – передаточное число редуктора.

В таблице представлены результаты тестирования формулы (2) с учетом изменения толщины кромки льда на лопастях ветроколеса в соответствии с (1), согласно параметрам ветротурбины USW56–100:

$$\begin{aligned} r &= 8,5 \text{ м}; \quad i = 3; \quad b = 0,68 \text{ м}; \quad \rho = 1,25 \text{ кг/м}^3; \\ e &= 0,6, \quad F = \pi r^2 = 227 \text{ м}^2; \quad m_l = 160 \text{ кг}; \\ \Omega &= 7,5 \text{ рад/с}; \quad I'_2 = 98 \text{ А}; \quad r_1 = 0,05 \text{ Ом}; \\ U_{\text{ном}} &= 220 \text{ В}; \quad r'_2 = 0,07 \text{ Ом}; \quad x_1 = 0,1 \text{ Ом}; \\ x'_2 &= 0,2 \text{ Ом}; \quad k = 20,8. \end{aligned}$$

Расчетные данные, представленные в таблице, показывают, что образование кромки льда на лопастях ветроколеса толщиной  $h = 0,005 \text{ м}$  негативно влияет на стабильность фазного на-

пряжения с ошибкой рассогласования больше 10 %, что не обеспечивает поддержания напряжения генератора ветротурбины на заданном уровне при разных режимах эксплуатации.

#### Результаты тестирования формулы (2) в соответствии с (1)

Results of testing of formulas (2) according to (1)

Коэффициент быстродействия, $Z$	Толщина льда, $h$ , м	Скорость ветра, $V$ , м/с	Фазное напряжение, $U_1$ , В	Угол лопасти, $\alpha$ , град	Погрешность $\delta$ , %
4,2	0,005	5	55	22,0	303
4,3	0,005	6	54	26,5	308
4,4	0,005	7	85	28,9	159
4,4	0,005	8	60	35,1	267
4,4	0,005	9	60	39,4	264
4,3	0,005	10	56	43,7	294
4,3	0,005	11	55	48,2	298
4,3	0,005	12	55	52,7	301
4,3	0,005	13	55	57,2	303
4,3	0,005	14	54	61,7	305
4,3	0,005	15	54	66,2	307
4,3	0,005	16	54	70,8	310
4,4	0,005	17	58	75,3	281
4,3	0,005	18	54	79,4	306
4,3	0,005	19	55	83,2	297
4,3	0,005	20	56	87,4	294

#### Моделирование регулирования угловой скорости ротора автономной ветротурбины в условиях образования льда на лопастях ветроколеса

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

$$W = \left( \frac{0,01}{T_p+1} \Delta\alpha + \frac{0,02}{T_p+1} \Delta V + \frac{0,002}{T_p+1} \Delta I'_2 + \frac{0,35}{T_p+1} \Delta r_1 - \frac{2,25}{T_p+1} \Delta r'_2 - \frac{0,35}{T_p+1} \Delta x_1 - \frac{0,35}{T_p+1} \Delta x'_2 + \left( \frac{0,0024}{T_p+1} \Delta I'_2 - \frac{0,015}{T_p+1} \Delta x_1 - \frac{0,015}{T_p+1} \Delta x'_2 + \frac{0,0000006}{T_p+1} \Delta r_1 \right) \right) \cdot \frac{20,8}{T_{\Delta R}+1} +$$

$$+ \left( \frac{0,0024}{T_p+1} \Delta I'_2 - \frac{0,015}{T_p+1} \Delta x_1 - \frac{0,015}{T_p+1} \Delta x'_2 + \frac{0,0000006}{T_p+1} \Delta r_1 \right). \quad (3)$$

Постоянная времени затухания колебания напряжения генератора в (4) определяется по формуле:

$$T = J / F_T, \text{ с}, \quad (4)$$

где  $F_T = 55878$  – фактор устойчивости.

Подставив значение параметра приведенного момента инерции системы  $J = 127372 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  в (4), получим постоянную времени затухания

колебаний с учетом образования льда на лопастях ветроколеса  $T = 2,3 \text{ с}$  или  $T = 2 \text{ с}$ , что совпадает с постоянной времени, полученной в [14], и не влияет на переходный процесс регулирования фазного напряжения генератора ветротурбины.

Таким образом, на основе анализа вышеизложенных результатов следует, что критерий по формированию согласованного доступа к двига-

телю привода угла питча лопасти со стороны предложенного и основного методов принятия управляющих решений остается неизменным.

### Программная реализация

В работе [15] предложен программный комплекс управления автономной ветротурбиной в составе ветроэлектростанции.

Поскольку программное обеспечение имеет свойства инвариантности управления объектом, то будет целесообразным и эффективным реализовать модифицированный «Главный экран» (рис. 1), который включает четыре режима оптимального управления ветротурбиной: летний и зимний для автономного управления; летний и зимний для энергосистемного управления.

«Главный экран» всегда отображается на мониторе компьютера управления и контроля, а области A, B, C D, E, F и G имеют назначения.

«Автономное управление. Летний режим» – реализует подход для оптимального управления ветроагрегатом выработки электроэнергии для автономного электроснабжения.

«Автономное управление. 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.

«Энергосистемное управление. Летний режим» – реализует подход для оптимального управления ветроагрегатом выработки электроэнергии на энергосистему.

«Энергосистемное управление. 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.

На рис. 2 представлен вид окна программного модуля управления работой ветроагрегата «Автономное управление. Зимний режим». Алгоритм обработки данных обеспечивает своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям.

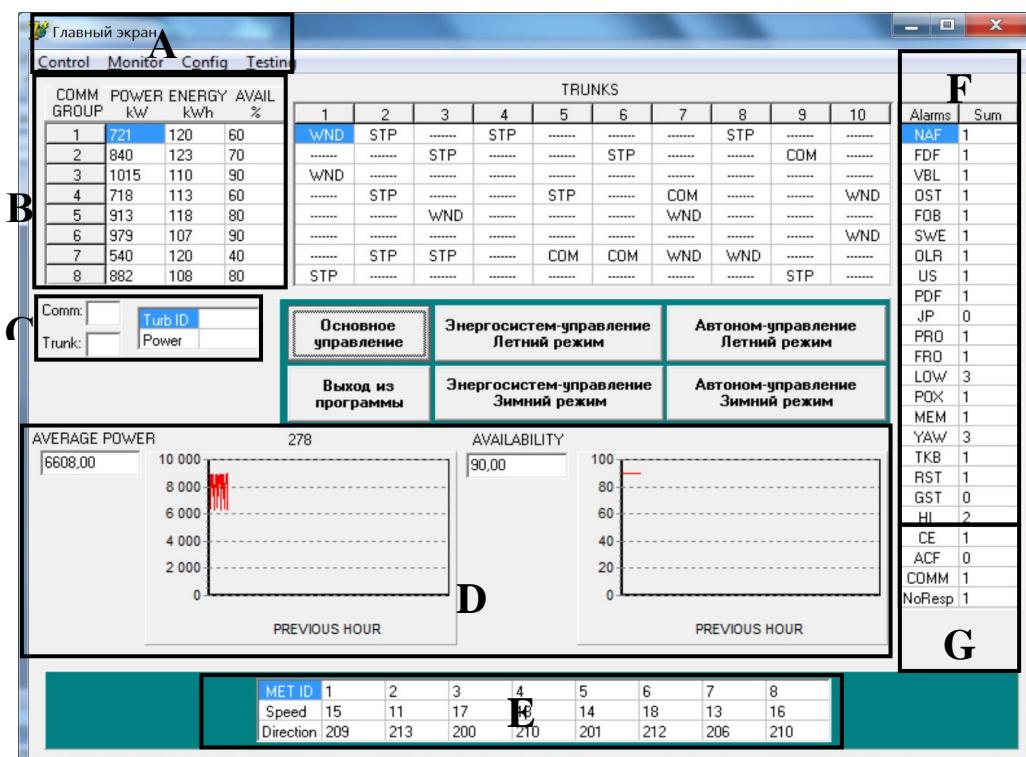
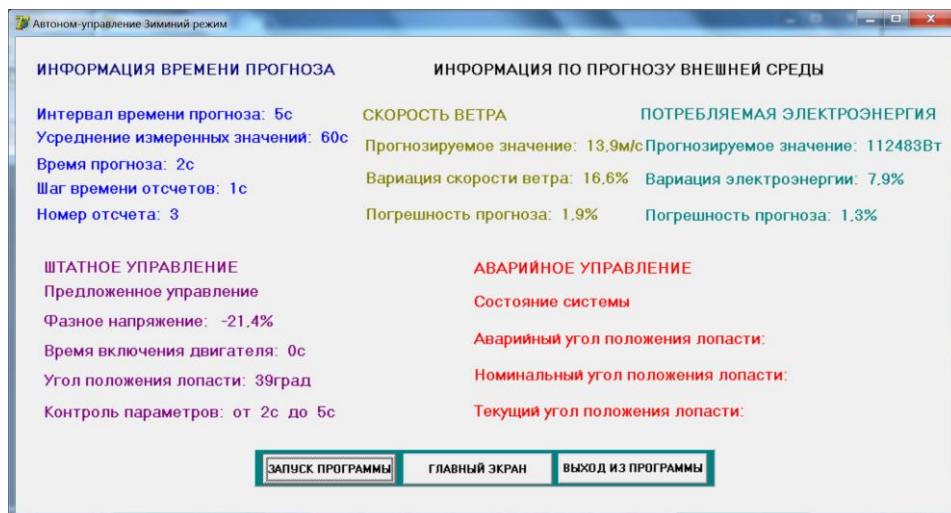


Рис. 1. «Главный экран» системы управления ветроэлектростанцией.

Расположение областей A, B, C D, E, F, G

Fig. 1. «The main Screen» control systems wind power plant.  
An arrangement of areas A, B, C D, E, F, G



*Rис. 2. Программный модуль управления работой автономного ветроагрегата в условиях зимнего периода*

*Fig. 2. The program module of control of work independent wind unit in the conditions of the winter period*

Программная реализация управления автономной ветроэнергоустановкой в условиях образования льда на лопастях ветроколеса показывает, что эффективность применения предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий может быть осуществимо при скорости ветра от 13 м/с и выше.

#### **Анализ полученных результатов**

#### **и выводы**

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- обоснована актуальность метода повышения эффективности автономной ветроэлектрической установкой в условиях образования льда на лопастях ветроколеса;

- проведен анализ на идентичность постоянной времени переходного процесса при стандартных погодных условиях и в условиях образования льда на лопастях ветроколеса на основе уточненного параметра инерционности системы;

- в результате идентичности постоянной времени переходного процесса 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 автономной ветроэнергоустановкой в условиях образования льда на лопастях ветроколеса выявлено, что эффективность применения

предложенного управления в зимнее время для исключения запаздывания выработки управляющих воздействий может быть осуществимо при скорости ветра от 13 м/с и выше.

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

#### **Библиографические ссылки**

1. Серебряков Р. А. Перспективы развития ветроэнергетики // Точная наука. 2021. № 110. С. 2–13.
- 2 Серебряков Р. 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. Пилипов, М. И. Розенблум // 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. 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.
14. Буяльский В. И. Методы повышения эффективности автономной ветроэлектрической установки с программным управлением // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 2. С. 49–57. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-2-49-57.
15. Буяльский В. И., Якимович Б. А. Автономные ветроэнергоустановки с оптимальным управлением в составе ветроэлектростанций // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 48–53. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-48-53.
- 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., Rosenblum M.I. [Multi-unit wind turbine for areas with low wind potential]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2021. No. 2, pp. 45-52 (in Russ.).
  4. Pionkевич V.A. [Mathematical modeling of wind turbine for wind power plant with asynchronous generator by frequency-speed characteristics method]. *Vestnik IrGTU*. 2016. No. 3, pp. 35-37.
  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. In *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. Pionkевич 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.
  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. [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.
  14. Buyalsky V.I. [Methods of increase of efficiency independent wind electric installation with programmed control]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 2, pp. 49-58 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-2-49-58.
  15. Buyalsky V.I., Yakimovich B.A. [Independent wind power installations with optimum control in structure wind power plant]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 48-53 (in Russ.). DOI:10.22213/2410-9304-2023-3-48-53.

## Independent Wind Power Units with Optimal Control in the Condition of Ice Formation on Wind Wheel Blades being the Part of Wind Powerplant

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, State Autonomous Educational Institution of Vocational Training

"Institutefor Education Development" Sevastopol, Russia

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

*Based on theperformed analysis of independent wind electric power unitcontrol with pre-installed blades at a required angle according to an estimated engine starttime,pitch drive and ice formation on wind wheel blades to minimize transient time of regulation thewind turbine generator phase voltage that provides self-excitation quality ofasynchronous generator under incomplete information on wind speed and electric loading and accounting the parameters of inductive resistance  $x_1$ , reduced inductive resistance  $x'_2$ , starter winding phase resistance  $r_1$ , reducedstarter winding phase resistance  $r'_2$  that may change in time significantly, the differentiation criterion of access time to thebladeposition controldevice from the offered and basiccontrol methods is established.*

*The software module to automate theindependent wind power control being the part of wind power plant is developed, providing timely system preparation for external disturbances taking into account ice formation on wind wheel blades at different modes of power unit operation shows that efficiency of the offered control typein winter can be realizable at speed of a wind from 13m/c and above to eliminate delaysin control.*

*The improvedsoftware of electric power unit control being the part of a wind power plant on the basis of power unit control modes is improved: «Independentcontrol. Summer mode», «Power system control. Summer mode»—electric power is produced at favorable environment conditions; «Independent control. Winter mode», «Power system control. Winter mode» – electric power is producedwhen ice is formedon wind wheel blades.*

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

Получено: 09.10.24

### Образец цитирования

Буяльский В. И., Якимович Б. А. Автономные ветроэнергоустановки с оптимальным управлением в условиях образования льда на лопастях ветроколеса в составе ветроэлектростанции // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 1. С. 34–39. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-34-39.

### For Citation

Buyalsky V.I., Yakimovich B.A. [Independent wind power installations with optimum control in the conditions of ice formation on blades wind wheel in structure wind electrc station]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 34-39. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-34-39.