
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.658.012.531

DOI: 10.22213/2410-9304-2022-1-43-48

Оптимизационная модель учета условий нагруженности привода при разных условиях эксплуатации ветроэлектрической установки

В. И. Буюльский, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Произведено описание оптимизационной модели динамических звеньев роторных систем ветроэлектрической установки, которая бы охватывала управление не только с помощью угла поворота лопастей электрогенератора, но и учитывала условия вибрационной нагруженности привода при разных условиях эксплуатации энергоагрегата как одной из подзадач, востребованных для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы с целью модификации автоматизированного управления ветроэлектрической установкой, которая обеспечивает уменьшение вибраций всех элементов роторных систем в условиях нагруженности привода в рабочем режиме эксплуатации агрегата, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветроустановок.

Выполнен анализ устойчивости системы управления ветроэнергетической установкой на основе результатов описания характеристического уравнения передаточных функций модели, разработанных для решения задачи повышения эффективности управления ветроэлектрическим агрегатом.

Решена задача определения экстремумов функции в структуре ее переменных на основе первой и второй производных функций по выбранному аргументу с учетом требования минимума суммы квадратов невязок вариации ошибки управления по крутящему моменту.

Составлена структурная схема передаточных функций динамических звеньев роторных систем на основе оптимизированной модели системы управления ветроэлектрическим агрегатом.

Выполнено моделирование системы автоматического регулирования угловой скорости ротора ветротурбины на основе оптимизированной функции, которая охватывает управление не только с помощью угла поворота лопастей электрогенератора, но и учитывает условия нагруженности привода при разных условиях эксплуатации энергоагрегата.

Произведен анализ запаздывания регулирования угловой скорости ветроколеса на основе оптимизационной модели управления ветроэлектрическим агрегатом, даны рекомендации осуществимости дальнейших исследований в рамках метода для своевременной подготовки системы принятия управляющих решений.

Ключевые слова: оптимизационная модель, экстремум функции, запаздывание, вибрация, ветротурбина, роторная система.

Введение

Современная технология производства электроэнергии путем использования энергии ветра имеет ряд проблем, которые негативным образом влияют на повышение эффективности преобразования энергии. Широко используемые методы управления ветроэнергетической установкой в условиях быстро изменяющихся ветровых и электрических нагрузок не обеспечивают должной стабильности частоты вращения ротора ветротурбины, что отрицательно влияет на надежность и продолжительность безаварийной работы ветроэлектрических агрегатов, экономии производимой электроэнергии при собственном потреблении, а также на эффективность использования энергии ветра. Решение этих проблем возможно лишь при наличии

эффективного автоматизированного управления ветроэнергетической установкой [1–12].

Цель выполненных исследований – оптимизировать математическую модель системы управления ветротурбиной как одной из подзадач, востребованных для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы для модификации автоматизированного управления ветроэлектрической установкой, которая обеспечивает уменьшение вибраций всех элементов роторных систем в условиях нагруженности привода при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветроустановок.

Определение экстремумов функции в структуре ее переменных

Повышение эффективности управления ветротурбиной основано на построении оптимизационной модели, которая бы охватывала управление не только с помощью угла поворота лопастей электрогенератора, но и учитывала условия вибрационной нагруженности привода при разных условиях эксплуатации энергоагрегата, а это динамический анализ частотных взаимодействий всех элементов роторных систем и силовых взаимодействий от лопастных элементов как одной из составляющих ветровой нагрузки.

В работе [13] представлена структурная схема передаточных функций динамических звеньев роторных систем ветрогенератора (рис. 1).

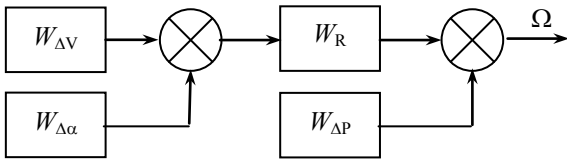


Рис. 1. Структурная схема передаточных функций роторных систем ветрогенератора

Fig. 1. The block diagramme of transfer functions rotor systems of wind-generator

Передаточные функции динамических звеньев роторных систем ветроагрегата имеют следующий вид [13]:

$$\begin{aligned} W_{\Delta V} &= \frac{0,25}{Tp+1} \Delta V; & W_{\Delta \alpha} &= \frac{0,86}{Tp+1} \Delta \alpha; \\ W_{\Delta P} &= \frac{0,007}{Tp+1} \Delta P; & W_R &= \frac{20,8}{T_{\Delta R}p+1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $W_{\Delta V}$, $W_{\Delta P}$, $W_{\Delta \alpha}$, $W_{\Delta R}$ – соответственно передаточные функции динамических звеньев роторных систем ветроагрегата, характеризующие влияние: скорости ветра V ; угла положения лопасти α ; величину потребляемой мощности P ; безынерционного звена редуктора $k = 20,8$.

Тогда, в соответствии с (1) и [13], функция в структуре ее переменных будет иметь вид:

$$W = \frac{20,8}{T_{\Delta R}p+1} \cdot \left(\frac{0,25}{Tp+1} \Delta V + \frac{0,86}{Tp+1} \Delta \alpha \right) - \frac{0,007}{Tp+1} \Delta P, \quad (2)$$

где $\Delta \alpha$ – переменная по управлению; ΔV и ΔP – переменные по возмущению.

Для оптимизации функции (2) следует минимизировать вариацию ошибки управления по крутящему моменту $W_{\Delta V}$, $W_{\Delta \alpha}$, то есть определить экстремумы функции W в структуре ее переменных для аргумента $\Delta \alpha$, как управляющего воздействия, на основе первой и второй производной.

Обозначив вариацию ошибки управления через дисперсию σ^2 , а в (2) заменив аргумент p на $j\omega$ и воспользовавшись условием обращения суммы квадратов невязок в (2), получим:

$$\sigma^2 = \left[\left(\frac{0,25}{j\omega T+1} \Delta V + \frac{0,86}{j\omega T+1} \Delta \alpha \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{20,8}{j\omega T_{\Delta R}+1} - \frac{0,007}{j\omega T+1} \Delta P \right]^2, \quad (3)$$

в минимум задано путем определения производных по $\Delta \alpha$ – как аргумент оптимизации вариации ошибки управления по крутящему моменту.

$$\frac{d\sigma^2}{d\Delta \alpha} = 0 \text{ при } \frac{d^2\sigma^2}{d\Delta \alpha^2} > 0. \quad (4)$$

Предварительно определим, что система (2) является устойчивой, так как ее характеристическое уравнение имеет все положительные коэффициенты [14].

Определение производных выражения (3) в соответствии с условием (4) и дальнейшие преобразования полученной формулы позволят сформировать уравнение с целью преобразования крутящего момента $W_{\Delta V}$, $W_{\Delta \alpha}$ в (2):

$$\begin{aligned} \frac{20,8}{j\omega T_{\Delta R}+1} \cdot \frac{0,86^2}{j\omega T+1} \Delta \alpha + \frac{20,8}{j\omega T_{\Delta R}+1} \times \\ \times \frac{0,25 \cdot 0,86}{j\omega T+1} \Delta V = \frac{0,86 \cdot 0,007}{j\omega T+1} \Delta P. \end{aligned} \quad (5)$$

Положим

$$a = \frac{20,8}{j\omega T_{\Delta R}+1}, \quad b = j\omega T+1, \quad c = \frac{a}{b},$$

$$k1 = 0,25, \quad k2 = 0,86, \quad k3 = 0,007. \quad (6)$$

Тогда уравнение (5) запишется:

$$k2^2 \cdot c \cdot \Delta \alpha + k1 \cdot k2 \cdot c \cdot \Delta V = \frac{k2 \cdot k3}{b} \Delta P \quad \text{или}$$

$$\Delta \alpha = \frac{k2 \cdot (k3 \cdot \Delta P - b \cdot c \cdot k1 \cdot \Delta V)}{k2^2 \cdot b \cdot c}. \quad \text{В результате}$$

дальнейших преобразований получим

$$\Delta \alpha = \frac{k3 \cdot \Delta P - k1 \cdot b \cdot \frac{a}{b} \cdot \Delta V}{k2 \cdot b \cdot \frac{a}{b}},$$

$$\text{или } \Delta \alpha = \frac{a \cdot \left(\frac{k3}{a} \cdot \Delta P - k1 \cdot \Delta V \right)}{a \cdot k2},$$

$$\text{или } \Delta \alpha = \frac{k3/a \cdot \Delta P - k1 \cdot \Delta V}{k2}. \quad (7)$$

Подставив (6) и (7) в (5), получим:

$$\frac{20,8}{j\omega T_{\Delta R} + 1} \cdot \left(\frac{0,25}{j\omega T + 1} \Delta V + \frac{0,86}{j\omega T + 1} \cdot \frac{(0,007 / j\omega T_{\Delta R} + 1) \cdot \Delta P - 0,25 \Delta V}{0,86} \right) - \frac{0,007}{j\omega T + 1}$$

или

$$\frac{20,8}{j\omega T_{\Delta R} + 1} \cdot \left(\frac{0,25}{j\omega T + 1} \Delta V + \frac{1}{j\omega T + 1} \cdot \frac{0,007}{j\omega T_{\Delta R} + 1} \Delta P - \frac{0,25}{j\omega T + 1} \Delta V \right) - \frac{0,007}{j\omega T + 1}. \quad (8)$$

В результате дальнейших преобразований (8) получим оптимизационную функцию для учета нагруженности привода при разных условиях эксплуатации ветроэлектрической установки:

$$W_{opt} = \frac{0,15}{j^2 \omega^2 T_{\Delta R}^2 + 1^2} \cdot \frac{1}{j\omega T + 1} \Delta P - \frac{0,007}{j\omega T + 1} \Delta P. \quad (9)$$

Согласно (9), в выражении (3) в ходе оптимизации крутящий момент преобразовался в вид: $\frac{0,15}{j^2 \omega^2 T_{\Delta R}^2 + 1^2} \cdot \frac{1}{j\omega T + 1} \Delta P$. Так как производная по $\Delta P'$ даст

$$\frac{0,15}{j^2 \omega^2 T_{\Delta R}^2 + 1^2} \cdot \frac{1}{j\omega T + 1} \Delta P' = \frac{0,15}{j^2 \omega^2 T_{\Delta R}^2 + 1^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{|j^2 \omega^2 T^2 + 1^2|}},$$

то после подстановки: $j = \sqrt{-1}$, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50$, $T = 10c$, $T_{\Delta R} = 0,0004c$ – результат вычисления составит 0,00005, то есть >0 , выполняется условие (4).

Моделирование системы автоматического регулирования угловой скорости ротора ветротурбины на основе оптимизационной функции

Согласно (9) структурная схема оптимизированной функции динамических звеньев роторных систем ветрогенератора представлена на рис. 2.

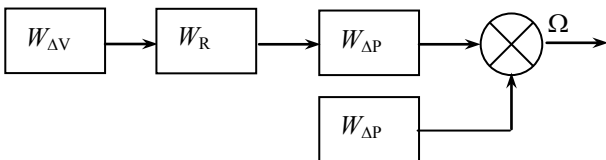


Рис. 2. Структурная схема оптимизированной функции роторных систем ветрогенератора

Fig. 2. The block diagrammed of the optimized functions rotor systems of wind-generator

В целях корректности учета возмущений в системе (2): скорости ветра V и величины потребляемой мощности P на рис. 2 добавлен блок

$$W_{\Delta V} = k_{\Delta V}, \text{ где } k_{\Delta V} = \frac{\Delta V}{\Delta V} = 1.$$

Имитационная модель оптимизированной функции динамических звеньев роторных систем ветрогенератора, созданная в среде Matlab Simulink, приведена на рис. 3 и включает дополнительный блок Transport Delay, обусловленный свойством запаздывания принятия управляющих решений по управлению, проявление которого характеризуется большой инерционностью ветроустановки. В работе [15] предложен метод для устранения запаздывания выработки управляющих воздействий ветроэлектрическим агрегатом, то есть обеспечивает своевременную подготовку системы к внешним возмущающим воздействиям за счет упреждения характеристик метеорологических и электроэнергетических условий, а также учета динамических свойств системы, что позволяет уменьшить время переходного процесса регулирования угловой скорости ветроколеса.

Графики переходных процессов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины функции (2) и функции (9) представлены на рис. 4.

Из графиков видно:

- время модельного времени переходного процесса функции (9) (рис. 3, б) составило $t_{nn} \approx 30c$ при установившемся значении угловой скорости ротора ветротурбины $\Omega_{уст} = 157 \text{ рад/с}$, то есть уменьшилось на 50 % по сравнению с переходным процессом функции (2) (рис. 3, а), где $t_{nn} \approx 60c$;

- запаздывание $t_{зап} = 4c$ в функции (9) (рис. 3, в) вызывает колебания угловой скорости ветроколеса и увеличивает время переходного процесса, что подчеркивает необходимость рассматривать дальнейшие исследования в рамках метода своевременной подготовки системы принятия управляющих решений, предложенного в [15].

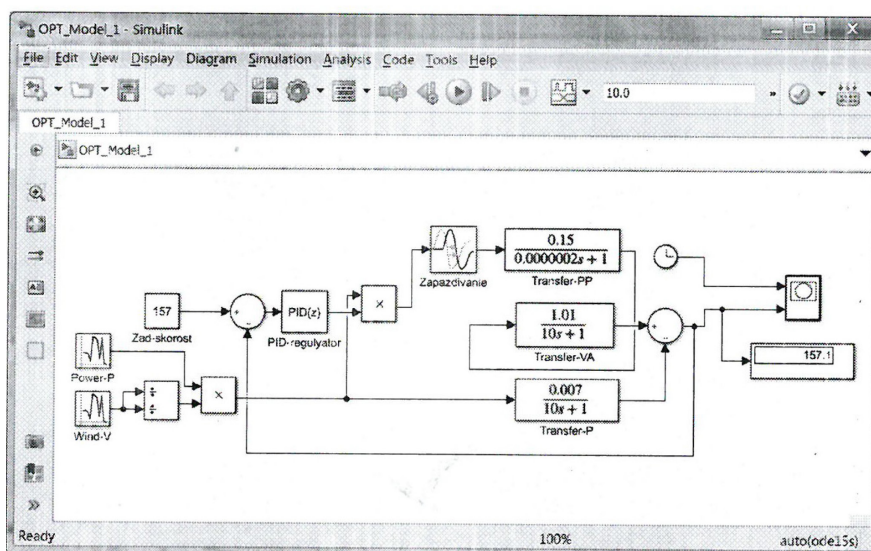


Рис. 3. Имитационная модель оптимизированной функции роторных систем ветрогенератора

Fig. 3. Imitating model of the optimized functions rotor systems of wind-generator

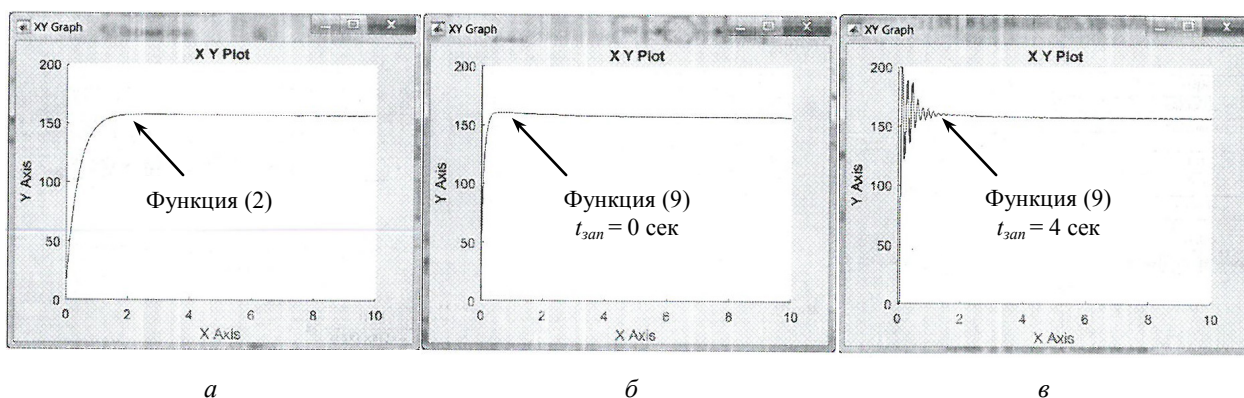


Рис. 4. Графики переходных процессов регулирования угловой скорости ротора ветротурбины

Fig. 4. Graphs of transients of regulation of angular speed of a rotor of wind-turbine

Анализ полученных результатов и выводы

В результате проведения исследований можно сделать следующие выводы:

- произведено описание оптимизационной модели динамических звеньев роторных систем ветроэлектрической установки, как одной из подзадач востребованных для дальнейшей разработки математических алгоритмов динамического поведения системы с целью модификации автоматизированного управления ветроэлектрической установкой, которая обеспечивает уменьшение вибраций всех элементов роторных систем в условиях нагруженности привода при разных режимах эксплуатации энергоагрегата, что способствует улучшению показателей надежности составляющих частей современных ветроустановок;

- произведен анализ устойчивости системы управления ветротурбиной на основе характеристического уравнения передаточных функций

модели, который указал на положительный результат устойчивости;

- решена задача определения экстремумов функции в структуре ее переменных на основе первой и второй производных модели по выбранному аргументу с учетом требования минимума суммы квадратов невязок вариации ошибки управления по крутящему моменту с последующим выводом о существовании экстремумов функции;

- составлена структурная схема передаточных функций динамических звеньев роторных систем на основе оптимизированной модели системы управления ветроэлектрическим агрегатом, в результате определен измененный вид крутящего момента;

- выполнено моделирование системы автоматического регулирования угловой скорости ротора ветротурбины на основе оптимизированной функции, которая охватывает управле-

ние не только с помощью угла поворота лопастей электрогенератора, но и учитывает условия нагруженности привода при разных условиях эксплуатации энергоагрегата, выявлено, что время переходного процесса уменьшилось на 50 % по сравнению с переходным процессом первообразной функции;

– произведен анализ запаздывания регулирования угловой скорости ветроколеса на основе оптимизационной модели управления ветроэлектрическим агрегатом, который показал, что запаздывание $t_{\text{зап}} = 4\text{ с}$ и больше вызывает колебание угловой скорости и увеличивает время переходного процесса, что подчеркивает необходимость рассматривать дальнейшие исследования в рамках метода своевременной подготовки системы принятия управляющих решений, ранее предложенного.

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

Библиографические ссылки

1. Шнеерсон Р. М. Разработка гибридного ветроэнергетического комплекса для электроснабжения удаленных потребителей Мурманской области // Вестник науки Сибири. 2015. № 15. С. 55–58.
2. Пионкевич В. А. Математическое моделирование ветротурбины для ветроэнергетической установки с асинхронным генератором методом частотных скоростных характеристик // Вестник ИрГТУ. 2016. № 3. С. 83–88.
3. Степанов С. Ф., Павленко И. М., Ербаев Е. Т. Обеспечение эффективной работы мультимодульной ветроэлектростанции при изменении скорости ветра и нагрузки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 93–94.
4. Суяков С. А. Проблемы интеграции ветроустановок в единую энергетическую систему России // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. С. 10–23.
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. Subbaian V., Sasidhar S. Maximum energy capture of variable speed variable pitch wind turbine by using RBF neural network and fuzzy logic control // International Research Journal of Engineering and Technology. 2015. No. 2. Pp. 493-500.

9. Haiying D., Lixia Y., Guohan Y., Hongwei L. Wind Turbine Active Power Control Based on Multi-Model Adaptive Control // International Journal of Control and Automation. 2015. No. 8. Pp. 273-284.

10. Серебряков Р. А. Перспективы развития ветроэнергетики // Точная наука. 2021. № 110. С. 2–13.

11. Серебряков Р. А. Теоретические основы математического моделирования вихревой ветроэнергетической установки // Точная наука. 2021. № 110. С. 23–30.

12. 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.

13. Буяльский В. И. Методы повышения эффективности управления ветроэлектрической установкой на базе учета вибрационной нагруженности привода при разных условиях эксплуатации энергоагрегата // Интеллектуальные системы в производстве. 2021. Т. 19, № 3. С. 74–81.

14. Крутов В. И. Основы теории автоматического регулирования. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1984. 348 с.

15. Буяльский, В. И. Комбинированный метод управления ветротурбиной // Энергетик. 2016. № 4. С. 18–20.

References

1. Schneerson R.M. [Development of a hybrid wind power complex for power supply to remote consumers of the Murmansk region]. *Vestnik nauki Sibiri*. 2015, no. 15, pp. 12-15 (in Russ.).
2. Pionkevich V.A. [Mathematical modeling of a wind turbine for a wind power plant with an asynchronous generator by the method of frequency speed characteristics]. *Vestnik IrGTU*. 2016. No. 3, pp. 35-37 (in Russ.).
3. Stepanov S.F., Pavlenko I.M., Erbaev E.T. [Ensuring efficient operation of a multimodule wind farm when wind speed and load change]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2013. No. 6, pp. 22-27 (in Russ.).
4. Suyakov S.A. [Problems of integration of wind turbines into the unified energy system of Russia]. *Ingenerniy vestnik Dona*. 2014, no. 3, pp. 10-12 (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 applica-

tions. 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. Subbaian V., Sasidhar S. Maximum energy capture of variable speed variable pitch wind turbine by using RBF neural network and fuzzy logic control. In International Research Journal of Engineering and Technology. 2015, no. 2. Pp. 493-500.

9. Haiying D., Lixia Y., Guohan Y., Hongwei L. Wind Turbine Active Power Control Based on Multi-Model Adaptive Control. In International Journal of Control and Automation, 2015. No. 8. Pp. 273-284.

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

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

12. 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.).

13. Buyalsky V.I. [Methods of increasing the efficiency of wind power plant control based on the consideration of the vibration load of the drive under different operating conditions of the power unit]. *Intelectualniy sistemy v proizvodstve*. 2021. Vol. 19, no. 3. Pp. 74-81 (in Russ.).

14. Krutov V.I. *Osnovi teorii avtomaticheskogo regulirovaniya* [Bases of the theory of automatic control]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 1984 (in Russ.).

15. Buyalsky V.I. [Combined wind turbine control method]. *Energetik*. 2016. No. 4, pp. 18-20 (in Russ.).

Optimizing Model of the Account of Conditions Loading the Drive Under Different Conditions of Operation of Wind-Electric Installation

V. I. Buyalsky, PhD in Engineering, Federal State Independent Educational Institution Sevastopol State University

An optimizing model of dynamic links of rotary systems of a wind power plant is described, which would cover control not only using the angle of rotation of the blades of an electric generator, but also take into account the conditions of vibration loading of the drive under different operating conditions of the power unit, as one of the subtasks in demand for further development of mathematical algorithms for dynamic behavior of the system in order to modify automated control of a wind power plant, which reduces the vibrations of all elements of rotary systems under conditions of drive loading in the operating mode of the unit, which contributes to improving the reliability of the components of modern wind turbines.

The analysis of stability of a control system wind-power by installation on the basis of the results of the description of the characteristic equation of transfer functions of model developed for the decision of a problem of increase of a control efficiency wind-electric by the unit is made.

The problem of function extremes definition within the structure of its variables based on the first and second function derivatives in terms of chosen argument taking into account the requirement of the sum minimum of squares of no viscous variations of twisting moment error control is solved.

The block diagram of transfer functions of dynamic links rotor systems on the basis of the optimized model of a control system wind-electric unit is made.

Modeling of automatic control system of a rotor wind turbine angular speed on the basis of the optimized function which covers control not only by means of blades rotation angle of the electric generator, but also considers conditions of drive loading under different conditions of power unit operation is executed.

The analysis of angular speed delay regulation of the wind wheel on the basis of optimizing model of wind-electric unit control is made, recommendations of practicability of the further researches within the limits of the method for timely preparation of operating decision-making system are given.

Keywords: optimizing model, function extreme, delay, vibration, wind turbine, rotor system.

Получено: 08.11.21