

11. Gershman, Brickner & Bratton, Inc. American Chemistry Council. *The Evolution of Mixed Waste Processing Facilities 1970-Today*, 2015. 62 p.
12. Hoo-Chang Shin, Holger R. Roth, Mingchen Gao et al. Deep Convolutional Neural Networks for Computer-Aided Detection: CNN Architectures, Dataset Characteristics and Transfer Learning. *IEEE Transaction on Medical Imaging*, 2016, pp. 1285–1298.
13. Irwin Sobel, History and Definition of the Sobel Operator. Available at: <https://ru.scribd.com/document/271811982/History-and-Definition-of-Sobel-Operator> (accessed 10.04.2019).
14. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox. U-Net – Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, pp. 234–241.
15. Raymond Clavel. Conception d'un robot parallele rapide à 4 degrés de liberté. These # 925. EPFL, 1991. 146 p.
16. *Recycling through the ages: 1970s. Plastic Expert*, 30 July 2014, Retrieved 7 March 2015.
17. Ross Girshick. Fast R-CNN. *Microsoft research*, 2015, pp. 1–9.
18. Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick Jian Sun. Faster R-CNN. Towards real-time object detection with region proposal networks. *Microsoft Research*, 2015, pp. 1–14.
19. West Jeremy, Ventura Dan, Warnick Sean. *Spring Research Presentation: A Theoretical Foundation for Inductive Transfer*. Brigham Young University, College of Physical and Mathematical Sciences, 2007, Archived from the original on 2007-08-01, Retrieved 2007-08-05.
20. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Available at: <http://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/> (accessed 10.04.2019).
21. LeCun Y., Boser B., Denker J. S., Henderson D., Howard R. E., Hubbard W. and Jackel L. D. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation*, 1989, no. 1 (4), pp. 541–551.

УДК 621.311.24 (06)

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИЛОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ ВИХРЕВОГО ТИПА

Статья поступила в редакцию 15.05.2019, в окончательном варианте – 28.05.2019.

Костюков Владимир Александрович, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: wkost-einheit@yandex.ru

Медведев Михаил Юрьевич, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2,

доктор технических наук, профессор, e-mail: medvmihal@sfned.ru

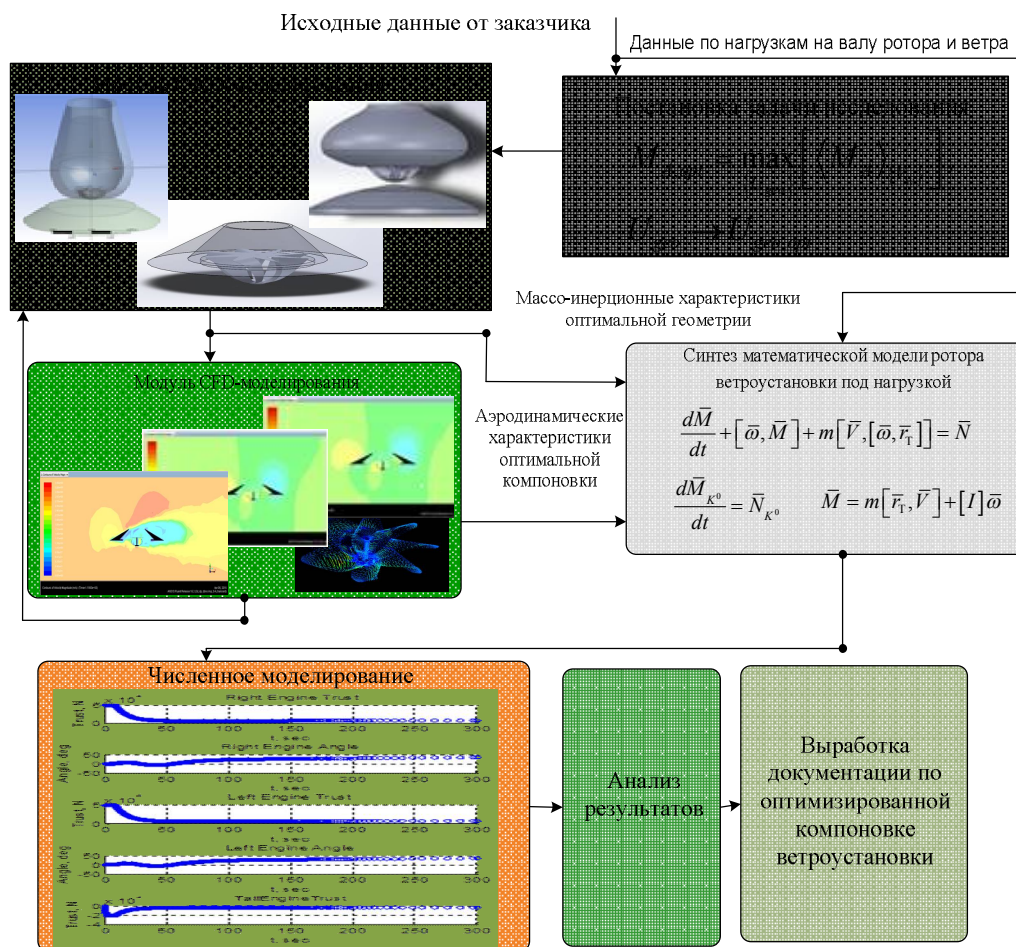
Полюянович Николай Константинович, Южный федеральный университет, 347900, Российская Федерация, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2,

кандидат технических наук, доцент, e-mail: nik1-58@mail.ru

Рассматриваются возможности стабилизации частоты вращения ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки, которая может входить в качестве элемента в комплексную силовую энергетическую установку для дополнительного и аварийного электропитания надводных робототехнических комплексов. С этой целью в работе предлагается использовать метод стабилизации угловой скорости путем управления положением подвижного элемента конструкции рассматриваемой установки. Получен соответствующий закон регулирования угловой скорости вращения ротора. Проведено моделирование уравнений системы стабилизации частоты вращения ротора при аperiodическом ветровом возмущении. Показано, что построенный регулятор способен эффективно парировать влияние ветровых возмущений. Синтезирован регулятор, позволяющий осуществлять стабилизацию частоты вращения ротора ветроэнергетической установки вихревого типа с использованием изменяемых элементов геометрии ветроэнергетической установки. Регулятор способен поддерживать значение угловой скорости ротора при ветровых возмущениях с амплитудой аperiodической составляющей не более 2,5 м/с при длительности переходного процесса не более 6 секунд. Это достигается при значительном динамическом диапазоне изменения управляющей величины h . Использование данного способа регулирования скорости ротора ветроэнергетической установки позволит значительно повысить адаптивность системы управления в отношении её выходных характеристик; существенно расширить динамический диапазон регулирования момента на роторе ветроэнергетической установки, а также повысить робастность указанных характеристик к внешним ветровым и внутренним конструкционным параметрическим возмущениям.

Ключевые слова: вихревая ветроэнергетическая установка, аэродинамический момент, ротор, изменяемые элементы геометрии, ветровые возмущения, стабилизация, частота вращения ротора

Графическая аннотация (Graphical annotation)



FEATURES OF ELECTROMECHANICAL CONTROL OF COMPLEX POWER ENERGY INSTALLATION WITH VORTEX WIND POWER INSTALLATIONS

The article was received by editorial board on 15.05.2019, in the final version 28.05.2019.

Kostjukov Vladimir A., Southern Federal University, 2 Shevchenko St, Taganrog, 347900, Russian Federation,

Ph.D., Associate Professor, e-mail: wkost-einheit@yandex.ru

Medvedev Mikhail Yu., Southern Federal University, 2 Shevchenko St, Taganrog, 347900, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: medvmihal@sfnu.ru

Poluyanovich Nicholay K., Southern Federal University, 2 Shevchenko St, Taganrog, 347900, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, e-mail: nik1-58@mail.ru

The possibilities of stabilizing the rotor speed of a vertical-axial wind power installation are considered, which can be included as an element in a complex power energy installation for additional and emergency power supply of surface robotic complexes. For this purpose, it is proposed to use the method of stabilizing the angular velocity by controlling the position of the moving structural element of the installation in question. Received the corresponding law of regulation of the angular velocity of rotation of the rotor. The equations of the system for stabilizing the rotor rotation frequency with aperiodic wind disturbance are simulated. It is shown that the constructed regulator is able to effectively counter the influence of wind disturbances. A regulator has been synthesized that allows the stabilization of the rotor speed of a wind turbine of a vortex type using variable elements of the wind turbine geometry. The regulator is able to maintain the value of the angular velocity of the rotor with wind disturbances with an amplitude of the aperiodic component of no more than 2.5 m/s with a transient duration of no more than 6 seconds. This is achieved with a significant dynamic range of control value. Using this method of regulating the speed of the rotor of the wind turbine will significantly improve the adaptability of the control system with respect to its output characteristics; significantly expand the dynamic range of torque control on the rotor of a wind power installation, as well as increase the robustness of these characteristics to external wind and internal structural parametric perturbations.

Keywords: vortex wind power installation, aerodynamic moment, rotor, variable geometry elements, wind disturbances, stabilization, rotor speed

Введение. Задача управления ветроэнергетическими установками (ВЭУ), которые могут входить в состав дополнительных/резервных силовых источников для питания морских надводных платформ (робототехнических комплексов), является актуальной [13, 15]. Здесь под «платформой» понимается носитель, который может быть роботизирован. Это термин, принятый в робототехнических приложениях.

Однако в существующих публикациях эта задача рассмотрена недостаточно полно. Поэтому целью данной работы была попытка устранить указанный недочет.

Общая характеристика проблематики предметной области. В настоящей статье рассматривается задача управления частотой вращения ротора вихревой вертикально-осевой ВЭУ (см. рис. 1, а), содержащей осесимметричную с ротором статическую двусвязную часть конструкции – статор. Положение нижней подвижной части статора, характеризуемое величиной h , может изменяться по вертикали относительно ротора (рис. 1, б). Поэтому указанная часть статора есть изменяемый элемент геометрии (ИЭГ) ВЭУ [14]. Отклонение положения этого элемента приводит к изменению аэродинамических свойств установки.

Возможный вариант применения рассматриваемой ВЭУ в составе комплексной силовой установки для катера малого водоизмещения показан на рисунке 1, в.

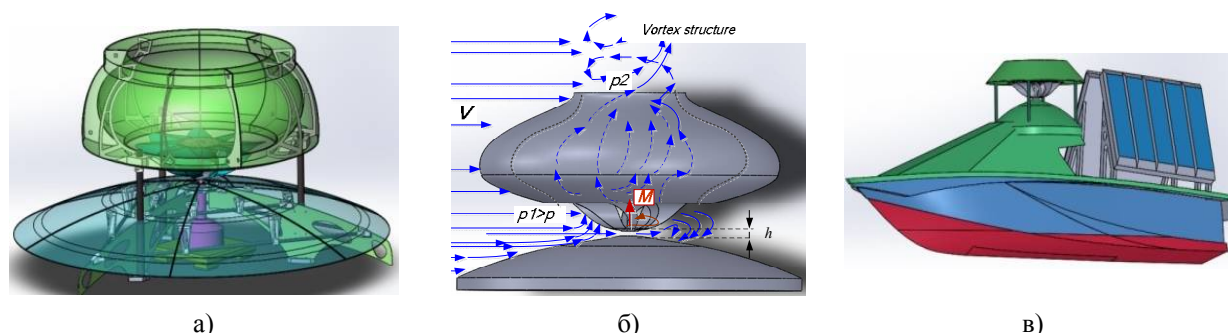


Рисунок 1 – Использование разрабатываемой ВЭУ для электроснабжения подвижных объектов: а) 3d-модель используемой ВЭУ вихревого типа; б) к пояснению управляющей величины; в) упрощенная модель маломерного катера с установленной на нём ВЭУ и солнечными панелями

В отличие от статьи [14], в настоящей работе ставится задача стабилизации угловой скорости вращения ротора с помощью управления положением ИЭГ. Эта задача здесь решается с учетом инерционности регулирования в соответствии с некоторым уравнением ошибки системы.

Стабилизация скорости нужна для следующих целей:

- а) предотвращения недопустимого увеличения скорости ротора, что грозит выходом его из строя;
- в) понижения требований к уровню стабилизации напряжения на входе генератора ВЭУ. Известно, что с изменением числа оборотов ротора амплитуда напряжения на генераторе может сильно меняться;
- с) возможности организации питания потребителя даже без АКБ – в перспективе.

Синтез регулятора ВЭУ. Пусть задано уравнение для управляемого объекта – ВЭУ, представляющее собой уравнение вращательного движения её ротора с угловой скоростью ω :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M(V, \omega, h) + M_c(\omega), \quad (1)$$

где V – скорость ветра, изменения которой представляют в данной задаче внешнее возмущение; h – управляющая величина, определяющая положение ИЭГ; J – приведенный момент инерции ротора; $M(V, \omega, h)$ и $M_c(\omega)$ – полезный аэродинамический момент на роторе и момент сопротивления, определяемые следующими эмпирическими зависимостями [3]:

$$M(V, \omega, h) = V \left[a_1 + a_2 (V - V^*) \omega \right] f_u(h), \quad (2)$$

$$M_c(\omega) = -b\omega, \quad (3)$$

$$f_u(h) = \begin{cases} a_3 h^{-1} + a_4, & \text{при } h \in [h_1, h_2]; \\ h_1, & \text{при } h < h_1; \\ h_2, & \text{при } h > h_2, \end{cases} \quad (4)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, b, V^*$ – постоянные коэффициенты; h_1, h_2 – граничные значения управляющей величины h , определяемые конструктивными особенностями ВЭУ.

Уравнение исполнительного устройства принимается в следующем виде:

$$q \frac{dh(t)}{dt} + rh(t) = f^*(t), \quad (5)$$

где q и r – некоторые постоянные коэффициенты, функция $f^*(t) = qh^*(t) + rh^*(t)$; $h^*(t)$ – вспомогательная функция [2].

При синтезе искомого регулятора будем исходить из следующего уравнения ошибки [4]:

$$\frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + A \frac{d\varepsilon}{dt} + B\varepsilon = 0, \quad (6)$$

где $\varepsilon = \omega_g - \omega$ – ошибка регулирования; ω_g – целевое значение угловой скорости ω ; A, B – некоторые постоянные коэффициенты, определяющие характер переходного процесса по угловой частоте, в частности, время затухания этого процесса и степень его перерегулирования.

Комбинируя (1)–(6), можно прийти к следующему выражению для управляющей величины:

$$h(t) = \begin{cases} h^*(t) + [h_0 - h^*(0)] \exp[-rt/q], & \text{при } h^*(t) \in [h_1; h_2], \\ h_1, & \text{при } h^*(t) < h_1; \\ h_2, & \text{при } h^*(t) > h_2, \end{cases} \quad (7)$$

где $h_0 = h(0)$ – заданное начальное значение величины h . Функция $h^*(t)$ находится в результате решения дифференциального уравнения

$$\frac{dh^*}{dt} = \frac{1}{M'_h} \{BJ\varepsilon - F(V, I, \omega, h^*)\} \quad (8)$$

совместно с уравнением ВЭУ (1). Функция $F(V, I, \omega, h^*)$ и частная производная M'_h в (8) определяются выражениями:

$$F(V, I, \omega, h^*) = [a_1 + a_2\omega(2V - I)]f_u(h^*)I + \frac{1}{J} [a_2V(V - I)f_u(h^*) + AJ - b](M + M_c), \quad (9)$$

$$M'_h = \begin{cases} V[a_1 + a_2(V - I)\omega](a_4 - a_3h^{-2}), & h^*(t) \in (h_1, h_2), \\ V[a_1 + a_2(V - I)\omega](a_4 - a_3h_1^{-1}), & h^*(t) \leq h_1, \\ V[a_1 + a_2(V - I)\omega](a_4 - a_3h_2^{-1}), & h^*(t) \geq h_2. \end{cases} \quad (10)$$

Выражения (6)–(10) описывают искомый регулятор ВЭУ.

Эта схема построена на известных принципах в теории управления. Новшество заключается в том, что эти принципы впервые применены для управления аэродинамикой ВЭУ с изменяемыми элементами геометрии.

Структурная схема системы стабилизации угловой скорости ротора приведена на рисунке 2. Задающее устройство формирует целевой закон изменения угловой скорости вращения ω_g с учетом тока и напряжения на нагрузке и целевых установок оператора в отношении требуемого характера электропитания этой нагрузки. Далее на основании ω_g и выхода ω' измерителя угловой скорости ω ротора (инкодера) формируется сигнал ошибки $\varepsilon = \omega_g - \omega' \approx \omega_g - \omega$, поступающий на регулятор. Последний в соответствии с выражениями (6)–(10) формирует величину $h^*(t)$, поступающую на исполнительное устройство, которое изменяет положение ИЭГ, компенсируя изменения скорости ветра.

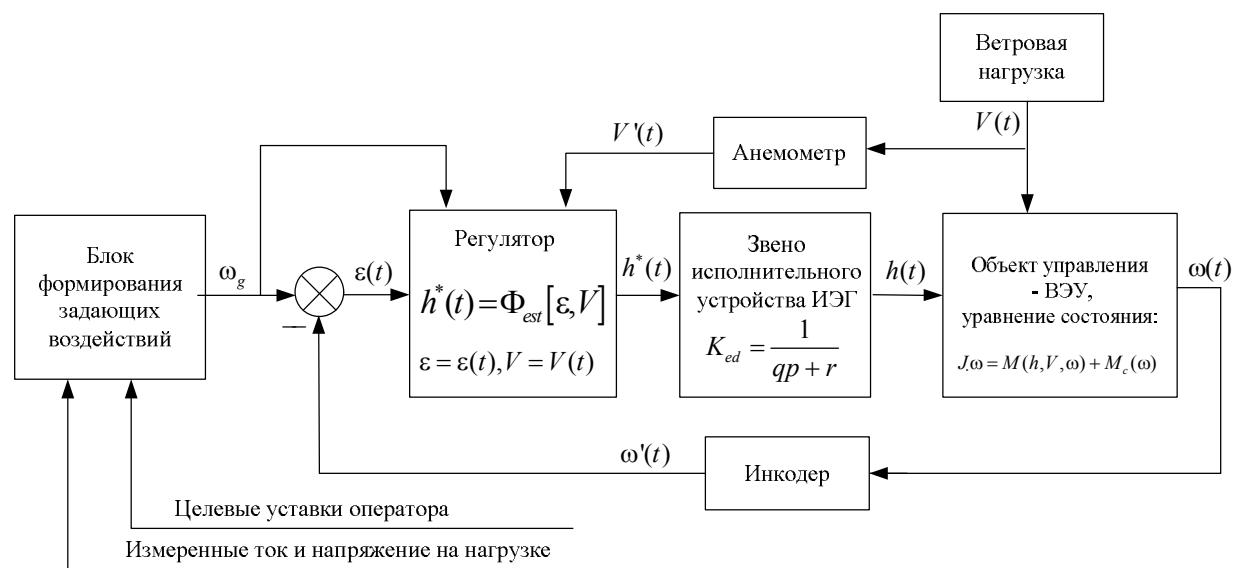


Рисунок 2 – Структурная схема системы стабилизации скорости вращения ротора

Регулятор построен по заданному уравнению ошибки регулирования – в виде дифференциального уравнения второго порядка. Закон регулирования, определяемый уравнениями в форме Коши (1) и (8), более сложен по сравнению с наиболее распространенными типами регуляторов. К последним относятся пропорциональный, пропорционально-дифференциальный или пропорционально-интегрально-дифференциальный регуляторы.

Моделирование. Компьютерная модель реализована средствами программной среды Matlab 2016.

При исследовании разработанной системы была принята следующая зависимость возмущающего ветрового воздействия от времени:

$$V(t) = V^*(t) = V_0 + A_v \exp(\alpha_v t) \sin(\Omega_v t),$$

где A_v – амплитуда ветровых колебаний; α_v , Ω_v – постоянные параметры, $\alpha_v < 0$. Моделирование проводилось при следующих параметрах: три значения начальной амплитуды колебаний скорости: $A_v = 1; 2; 2,5; 3,36$ м/с; граничные значения диапазона управляющей величины: $h_1 = 0,01$ м, $h_2 = 0,65$ м; целевое значение скорости ротора $\omega_g = 2\pi$ рад/с, допустимое время завершения переходного процесса $T_{\max} = 6$ с; начальные условия $\omega_0 = 3\pi$ рад/с, $h_0 = 0,015$ м; $\Omega_v = 2\pi$ рад/с; постоянная времени исполнительного устройства – $q/r = 0,2$ с.

На рисунке 3, а представлены временные зависимости угловой скорости $\omega(t)$, а на рисунке 3, б – управляющей величины $h(t)$, полученные в результате моделирования.

Из этих графиков видно, что длительность переходного процесса вплоть до амплитуды колебаний ветра $A_v = 2,5$ м/с является допустимой: $t_{\text{пн}} \approx 5$ с $< T_{\max}$, потому что удовлетворяется неравенство $t_{\text{пн}} \approx 5$ с $< T_{\max}$.

Однако при значении $A_v = 3,36$ м/с аналогичное время $t_{\text{пн}} \approx 10$ с $> T_{\max}$ является уже недопустимым, потому что неравенство $t_{\text{пн}} \approx 10$ с $< T_{\max}$ в этом случае уже не удовлетворяется.

Следовательно, предложенный регулятор частоты вращения ротора ВЭУ, изменяющий положение ИЭГ при некоторых интервалах изменения скорости ветра способен повысить эффективность и надежность работы ВЭУ, а также качество вырабатываемой электроэнергии.

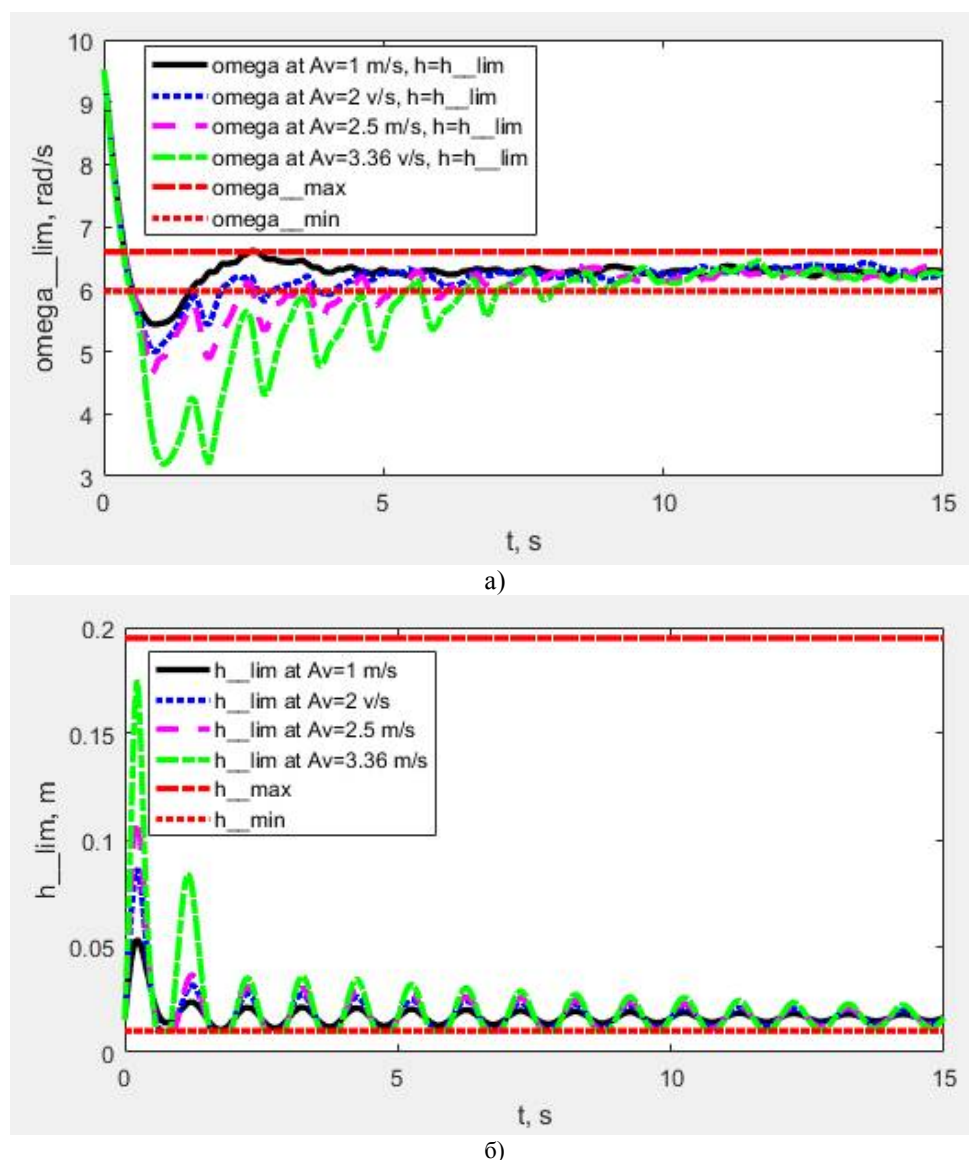


Рисунок 3 – Результаты моделирования: а) – зависимость от времени угловой скорости $\omega(t)$; (б) – зависимость управляющей величины $h(t)$

Выводы.

1. В работе синтезирован регулятор, осуществляющий стабилизацию частоты вращения ротора ветроэнергетической установки вихревого типа с использованием изменяемых элементов геометрии ВЭУ.
2. Предлагаемый регулятор способен поддерживать значение угловой скорости ротора при ветровых возмущениях с амплитудой аperiodической составляющей не более 2,5 м/с при длительности переходного процесса не более 6 секунд. Это достигается при значительном динамическом диапазоне изменения управляющей величины h .
3. Применение предложенного способа регулирования скорости ротора ВЭУ позволит значительно повысить адаптивность системы управления в отношении её выходных характеристик; существенно расширить динамический диапазон регулирования момента на роторе ветроэнергетической установки, а также повысить робастность указанных характеристик к внешним ветровым и внутренним конструкционным параметрическим возмущениям.

Библиографический список

1. Горелов Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) / Д. Н. Горелов. – Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2010. – С. 325–333.
2. Костюков В. А. Исследование перспективной ветроэнергетической установки с типом компоновки «ротор в растрube» / В. А. Костюков, М. Ю. Медведев, А. Н. Маевский, Н. К. Полуянович, В. В. Савченко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – № 1(88). – С. 85–91.

3. Костюков В. А. Оптимизация форм геометрии раstraбы ветроэнергетической установки типа «ротор в раstrубе» / В. А. Костюков, М. Ю. Медведев, А. Н. Маевский, Н. К. Полуянович, В. В. Савченко // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – № 4 (91). – С. 61–68.
4. Костюков В. А. Математическая модель надводного мини-корабля / В. А. Костюков, А. Н. Маевский, Б. В. Гуренко // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – Режим доступа: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3297, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
5. Костюков В. А. Методика расчета гидродинамических коэффициентов АНПА / В. А. Костюков, А. Е. Кульченко, Б. В. Гуренко // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3. – Режим доступа: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3226, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
6. Матвеев Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений / Н. М. Матвеев. – Москва : Высшая школа, 1967. – 555 с.
7. Медведев М. Ю. Разработка комплексной силовой энергетической установки для надводных робототехнических платформ / М. Ю. Медведев, В. А. Костюков, А. М. Маевский, Д. Д. Павленко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 01. – С. 194–208.
8. Михненко Л. В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа / Л. В. Михненко // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия «Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов». – 2002. – № 49. – С. 110–113.
9. Михненко Л. В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа / Л. В. Михненко // Научный вестник МГТУ. – 2008. – № 125. – С. 22–24.
10. Патент на полезную модель «Устройство преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию с использованием нижней направляющей структуры» / В. А. Костюков, М. Ю. Медведев, А. М. Маевский, Н. К. Полуянович, В. В. Савченко, от 11.08.2016 г., № 175397.
11. Пшихопов В. Х. Математические модели манипуляционных роботов : учебник / В. Х. Пшихопов. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. 117 с.
12. Heo Y. G. CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine / Y. G. Heo, N. J. Choic, K. H. Choib, H. S. Jia, K. C. Kima // Energy and Buildings. – Vol. 129. – P. 162–173.
13. Innovative Technologies & Solutions for Sustainable Shipping // Eco Marine Power. – Режим доступа: ecomarinepower.com/en/about-us, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 26.10.2018).
14. Kostjukov V. A. Adaptive mechatronic management system of wind-driven power-plant with variable geometry / V. A. Kostjukov, A. M. Maevskiy, N. K. Poluyanovich and M. N. Dubyago // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Erlagol, 2017. – P. 460–464.
15. Ocius Technology Limited (Australia). – Режим доступа: ocius.com.au, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. англ. (дата обращения 26.10.2018).
16. Qing'an Li. Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (part II: Wake characteristics) / Qing'an Li, Junsuke Murata, Masayuki Endo, Takao Maeda, Yasunari Kamada // Energy. – Vol. 113. – P. 1304–1315.
17. Rafał Wróżyński. The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines / Rafał Wróżyński, Mariusz Sojka, Krzysztof Pyszny, Krzysztof Pyszny // Renewable Energy. – Vol. 96, part A. – P. 625–635.
18. Wanga L. Liub X. Renewable and Sustainable Energy Reviews / Wanga L. Liub X., A. Koliosa. – Vol. 64. – P. 195–210.
19. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system / Wenyi Liu // Renewable Energy. – Vol. 94. – P. 547–557.
20. Ying P. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine / P. Ying, Y. K. Chen, Y. G. Xu, Y. Tian // Applied Energy. – Vol. 146. – P. 74–83.

References

1. Gorelov D. N. *Energeticheskie kharakteristiki rotora Dare (obzor)* [Energy characteristics of the Darier rotor (review)]. Novosibirsk, Publishing House of Sibirean branch of RAS, 2010, pp. 325–333.
2. Kostyukov V. A., Medvedev M. Yu., Maevskiy A. N., Poluyanovich N. K., Savchenko V. V. Issledovanie perspektivnoy vetroenergeticheskoyustanovki s tipom komponovki «rotor v rastrube» [Investigation of a promising wind power plant with the “rotor in a bell” arrangement type]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2017, no. 1 (88), pp. 85–91.
3. Kostyukov V. A., Medvedev M. Yu., Maevskiy A. N., Poluyanovich N. K., Savchenko V. V. Optimizatsiya form geometrii rastruba vetroenergeticheskoy ustanovki tipa «rotor v rastrube» [Optimization of the geometry of the socket of the wind turbine of the “rotor in the socket” installation]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2017, no. 4 (91), pp. 61–68.
4. Kostyukov V. A., Maevskiy A. N., Gurenko B. V. Matematicheskaya model nadvodnogo mini-korablya [Mathematical model of the surface mini-ship]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2015, no. 3. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3297.
5. Kostyukov V. A., Kulchenko A. E., Gurenko B. V. Metodika rascheta gidrodinamicheskikh koeffitsientov ANPA [The method of calculating the hydrodynamic coefficients of the AUV]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2015, no. 3. Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2015/3226.
6. Matveev N. M. *Metody integrirvaniya obyknovennykh differentsialnykh uravneniy* [Methods of integration of ordinary differential equations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 555 p.

7. Medvedev M. Yu., Kostyukov V. A., Maevskiy A. M., Pavlenko D. D. Razrabotka kompleksnoy silovoy energeticheskoy ustanovki dlya nadvodnykh robototekhnicheskikh platform [Development of a complex power plant for surface robotic platforms]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [News of South Federal University], 2018, no. 01, pp. 194–208.
8. Mikhnenkov L. V. Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa [Wind power plant of planetary type]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA. Seriya "Ekspluatatsiya vozdušnogo transporta i remont aviatsionnoy tekhniki. Bezopasnost poletov* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. Series "Operation of air transport and repair of aviation equipment. Flight safety"], 2002, no. 49, pp. 110–113.
9. Mikhnenkov L. V. Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa [Wind power plant of planetary type] *Nauchnyy vestnik MGTU* [Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University], 2008, no. 125, pp. 22–24.
10. Kostyukov V. A., Medvedev M. Yu., Maevskiy A. M., Poluyanovich N. K., Savchenko V. V. *Patent na poleznuyu model «Ustroystvo preobrazovaniya kineticheskoy energii vetra v mekhanicheskuyu energiyu s ispolzovaniem nizhney napravlyayushchey struktury»* [Patent for utility model "Device for converting kinetic wind energy into mechanical energy using the lower guide structure"] of 11.08.2016, no. 175397.
11. Pshikhov V. Kh. *Matematicheskie modeli manipulyatsionnykh robotov : uchebnik* [Mathematical models of manipulation robots : textbook]. Taganrog, 2008. 117 p.
12. Heo Y. G. , Choic N. J., Choib K. H., Jia H. S, Kima K. C. CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine. *Energy and Buildings*, vol. 129, pp. 162–173.
13. Innovative Technologies & Solutions for Sustainable Shipping. *Eco Marine Power*. Available at: ecomarine-power.com/en/about-us (accessed 26.10.2018).
14. Kostyukov V. A., Maevskiy A. M., Poluyanovich N. K. and Dubyago M. N. Adaptive mechatronic management system of wind-driven power-plant with variable geometry. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*. Erlagol, 2017, pp. 460–464.
15. Ocius Technology Limited (Australia). Available at: ocius.com.au (accessed 26.10.2018).
16. Qing'an Li, Junsuke Murata, Masayuki Endo, Takao Maeda, Yasunari Kamada. Experimental and numerical investigation of the effect of turbulent inflow on a Horizontal Axis Wind Turbine (part II: Wake characteristics). *Energy*, vol. 113, pp. 1304–1315.
17. Rafał Wróżyński, Mariusz Sojka, Krzysztof Pyszny, Krzysztof Pyszny. The application of GIS and 3D graphic software to visual impact assessment of wind turbines. *Renewable Energy*, vol. 96, part A, pp. 625–635.
18. Wanga L. Liub X., Koliosa. A. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 195–210.
19. Wenyi Liu. Design and kinetic analysis of wind turbine blade-hub-tower coupled system. *Renewable Energy*, vol. 94, pp. 547–557.
20. Ying P., Chen Y. K., Xu Y. G., Tian Y. Computational and experimental investigations of an omni-flow wind turbine. *Applied Energy*, vol. 146, pp. 74–83.