

МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331

DOI:10.18324/2077-5415-2020-1-41-46

Метод настройки нечеткой системы управления ветрогенератора с возбуждением от постоянных магнитов

Ю.Н. Булатов^a, Э.К. Шуманский^b

Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b shumanskij@yandex.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2544-2759>

Статья поступила 24.12.2019, принята 07.02.2020

В последнее время в мире значительно увеличился интерес к использованию энергии ветра. Согласно статистическим данным, установленная мощность работающих в электрических сетях ветрогенерирующих установок (ВГУ) достигла 597 ГВт. Непостоянство скорости ветра приводит к колебаниям вырабатываемой мощности ВГУ. Это является основной проблемой при использовании ветра в качестве источника энергии. Однако ветрогенераторы постоянно совершенствуются, и повышение эффективности их работы возможно с помощью систем автоматического регулирования, в том числе с использованием интеллектуальных технологий. Ветрогенератор является нелинейным и нестационарным объектом, поэтому при управлении режимами его работы возникают сложные задачи настройки традиционных регуляторов. Одним из эффективных решений является применение системы нечеткого логического вывода. В работе рассматриваются вопросы моделирования и настройки нечеткой системы регулирования скорости вращения ротора ВГУ, работающей на основе генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Приведена настраиваемая модель ВГУ с возможностью изменения параметров генератора и ветротурбины. Управление скоростью вращения ротора ветрогенератора осуществляется за счет изменения угла поворота лопастей ветротурбины. Произведены анализ и сравнение следующих систем регулирования: автоматического пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора скорости вращения ротора и нечеткой системы регулирования. Результаты моделирования в системе MATLAB показывают, что предлагаемая нечеткая система регулирования скорости вращения ротора ветрогенератора позволяет обеспечить стабильность его работы. На основе предложенного метода синтезирована база правил системы нечеткого логического вывода, обеспечивающая эффективную работу ВГУ при вариации скорости ветра.

Ключевые слова: ветрогенератор с возбуждением от постоянных магнитов; угол поворота лопастей; нечеткая система управления; моделирование.

Method for setting up a fuzzy wind generator control system with permanent magnet excitation

Yu.N. Bulatov^a, E.K. Schumansky^b

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

^a bulatovyura@yandex.ru, ^b shumanskij@yandex.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-3716-5357>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2544-2759>

Received 24.12.2019, accepted 07.02.2020

Recently, interest in the use of wind energy has significantly increased in the world. According to statistics, the installed capacity of wind power plants (WPP) operating in electric networks has reached 597 GW. The inconsistency of wind speed leads to fluctuations in the generated power of the WPP. This is a major problem when using wind as a source of energy. However, wind generators are constantly being improved, and increasing the efficiency of their work is possible with the help of automatic control systems, including the use of intelligent technologies. A wind generator is a non-linear and non-stationary object, therefore, when managing its operating modes, complex tasks of tuning traditional regulators arise. One effective solution is to use a fuzzy inference system. The paper discusses the issues of modeling and tuning a fuzzy system for controlling the rotor speed of a rotor of a wind-driven installation operating on the basis of a generator with excitation from permanent magnets. A customizable model of a wind generating installation with the ability to change the parameters of the generator and wind turbine is presented. The rotation speed of the rotor of the wind generator is controlled by changing the angle of rotation of the blades of the wind turbine. The following control systems are analyzed and compared: automatic proportional-integral-differential (PID) rotor speed controller and fuzzy control system. The simulation results in the MATLAB system show that the proposed fuzzy system for controlling the speed of rotation of the rotor of a wind generator makes it possible to ensure the stability of its operation. Based on the proposed method, the rule base system of the fuzzy logical inference system is synthesized, which ensures the efficient operation of a wind-generating installation with variations in wind speed.

Keywords: permanent magnet excitation wind generator; blade rotation angle; fuzzy control system; modeling.

Введение. Концепция интеллектуальных электрических сетей (*smart grid*) [1–10] предусматривает масштабное использование установок распределенной генерации, работающих с использованием возобновляемых источников энергии. К таким установкам относятся ветрогенерирующие установки (ВГУ) [11–13]. В последнее время в мире значительно увеличилось использование ВГУ. Согласно статистическим данным, установленная мощность ВГУ, подключенных к электрическим сетям в разных странах мира, достигла 597 ГВт [14]. Непостоянство скорости ветра приводит к колебаниям вырабатываемой мощности ВГУ. Это является основной проблемой при использовании ветра в качестве источника энергии. Однако ветрогенераторы постоянно совершенствуются, и повышение эффективности их работы возможно с помощью систем автоматического регулирования, в том числе с использованием интеллектуальных технологий [15–23].

ВГУ является нелинейным и нестационарным объектом, поэтому при управлении режимами его работы возникают сложные задачи настройки традиционных регуляторов. Одним из эффективных решений является применение системы нечеткого логического вывода.

В работе рассматриваются вопросы моделирования и настройки нечеткой системы регулирования скорости вращения ротора ВГУ, работающей на основе генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Приведена настраиваемая модель ВГУ с возможностью изменения параметров генератора и ветротурбины под заданные условия и оборудование. Управление скоростью вращения ротора ВГУ осуществляется за счет изменения угла поворота лопастей ветротурбины (*pitch*-регулирование). Произведены анализ и сравнение следующих систем регулирования: автоматического пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора скорости вращения ротора и нечеткой системы регулирования, в которой, кроме скорости вращения ротора, также учитывались скорость ветра и мощность генератора.

Описание компьютерной модели ВГУ. Исследования проводились на компьютерной модели ветрогенератора с возбуждением от постоянных магнитов, работающего на выделенную нагрузку. Модель ВГУ с контуром регулирования разработаны в системе MATLAB с применением пакетов Simulink и SimPower Systems. К основным элементам модели ВГУ, работающей на выделенную нагрузку (рис. 1), относятся: генератор с возбуждением от постоянных магнитов [24], ветротурбина, механизм поворота лопастей, нечеткий регулятор [19–23; 25]. Генератор моделируется стандартным блоком пакета SimPowerSystems («синхронный генератор на постоянных магнитах» (блок *Permanent Magnet Synchronous Machine* на рис. 1) При номинальной скорости вращения ротора 1 700 об./мин и номинальном моменте 70,2 Н·м мощность генератора составляет 2 кВт. Для повышения момента на валу ветротурбина связана с генератором через механический редуктор. Электрическая нагрузка генератора при моделировании составляла 1 кВт.

Механизм поворота лопастей ветротурбины моделируется сервоприводом с редуктором [20] (блок *Servodrive with reductor* на рис. 1). Модель механизма поворота лопастей представлена передаточной функцией, учитывающей отрицательную обратную связь для поддержания заданного входного значения угла поворота:

$$W_{Serv} = \frac{K_S \cdot K_R}{T_S p^2 + p + K_S \cdot K_R},$$

где K_S — коэффициент усиления апериодического звена первого порядка, моделирующего привод; T_S — постоянная времени апериодического звена первого порядка; K_R — передаточный коэффициент редуктора; p — оператор Лапласа. При моделировании использовались следующие параметры модели механизма поворота лопастей: $K_S = 1$; $T_S = 0,3$ с; $K_R = 2$.

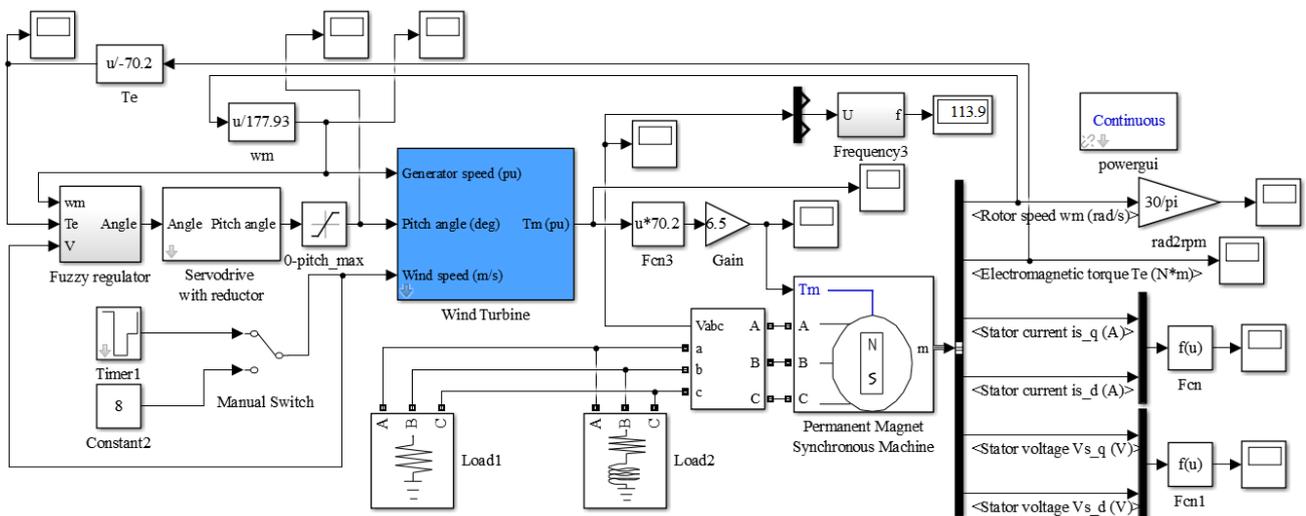


Рис. 1. Исследуемая схема модели ветрогенерирующей установки в системе MATLAB

Ветротурбина моделировалась стандартной моделью системы MATLAB (блок *Wind Turbine* на рис. 1), в которой используется следующее уравнение характеристики турбины [25]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda,$$

где $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}$; β — угол поворота лопастей, град.; постоянные коэффициенты, используемые в модели: $C_1 = 0,5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0,4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$, $C_6 = 0,0068$.

Управление скоростью вращения ротора и напряжением генератора выполнялось путем изменения угла поворота лопастей ветротурбины.

Используемая модель ветротурбины в MATLAB позволяет строить характеристики зависимости мощности на валу турбины от скорости вращения ротора для различных значений угла поворота лопастей β и скоростей ветра. Эти характеристики использовались для настройки предлагаемого нечеткого регулятора (блок *Fuzzy regulator* на рис. 1).

В структуре нечеткого регулятора можно выделить следующие элементы: система нечеткого логического вывода, база правил вида «ЕСЛИ–ТО». Система нечеткого логического вывода также включает блоки фаззификации, дефаззификации, блок вывода и базы нечетких переменных [20; 26]. На выходе системы нечеткого логического вывода формируются управляющие сигналы. Для управления скоростью вращения ротора ВГУ в модели используется алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани, основные этапы выполнения которого следующие [26]:

- 1) Формирование базы правил системы нечеткого логического вывода.
- 2) Фаззификация входных переменных.
- 3) Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций.
- 4) Активизация или композиция подзаклучений в нечетких правилах продукций. В предлагаемом нечетком регуляторе используется метод min-активизации, определяющий функцию принадлежности по правилу:

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\},$$

где c_i — значения степеней истинности подзаклучений для каждого из правил, входящих в рассматриваемую базу правил системы нечеткого вывода; $\mu(y)$ — функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной, заданной на универсальном множестве Y .

- 5) Аккумуляция заключений нечетких правил продукций.
- 6) Дефаззификация выходных переменных. В предлагаемой системе нечеткого логического вывода используется метод центра тяжести.

Метод настройки нечеткой системы управления ВГУ. Нечеткое регулирование выгодно применять в тех случаях, когда динамика системы плохо поддается изучению ввиду наличия значительной нелинейности. Этот принцип регулирования хорошо применим для ВГУ в связи с тем, что не требуется точного математического описания для определения поведения ветротурбины в различных режимах. Регулятор принимает решение об оптимальном поведении системы на основе базы правил, составленных на основе мощностных характеристик ветротурбины в зависимости от скорости

вращения ротора генератора при различных углах поворота лопастей и скоростях ветра. Задачей регулирования является поиск оптимального угла поворота, при котором достигается максимальная возможная мощность при номинальной скорости вращения ротора генератора.

Синтез нечеткого регулятора выполнялся в среде MATLAB (пакет Fuzzy Logic Toolbox) с использованием алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани.

Первый этап настройки регулятора предусматривает разбиение входных (скорость вращения ротора генератора, мощность на валу турбины, скорость ветра) и выходных (угол поворота лопастей) величин на термы и присвоения этим термам лингвистических переменных.

Анализ характеристик ветротурбины (рис. 2) позволяет определить диапазоны изменения входных и выходных величин, а также выбрать функции принадлежности нечетких переменных.

Скорость вращения ротора генератора и мощность на валу представлялись в модели с использованием восьми термов в диапазоне от 0 до 2 о.е. Для представления скорости ветра использовалось семь термов в диапазоне от 5 до 11 м/с. Выходной сигнал нечеткого регулятора — угол поворота лопастей β — представлялся 12-ю термами в диапазоне от 0 до 45 град.

Затем на основе мощностных характеристик турбины (рис. 2) для каждой комбинации термов мощности и скорости вращения ротора генератора выбирается характеристика с углом поворота лопастей, обеспечивающим максимальную мощность в заданном интервале скорости вращения. Из полученных зависимостей формируется база правил регулятора вида «ЕСЛИ–ТО».

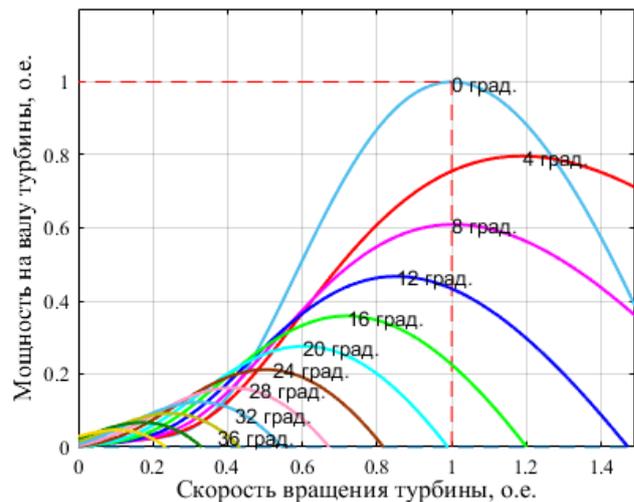


Рис. 2. Характеристики мощности ветротурбины при различных значениях угла поворота лопастей и скорости ветра 10 м/с

Представленный метод настройки нечеткой системы управления позволил сформировать базу правил системы нечеткого логического вывода для управления ВГУ, работающей на основе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Соответствующий фрагмент базы правил (всего 169 правил) и поверхностей нечеткого вывода представлены на рис. 3 и 4а, б. Из сформированных поверхностей нечеткого вывода

видно, что при малых скоростях вращения ротора угол поворота лопастей минимальный.

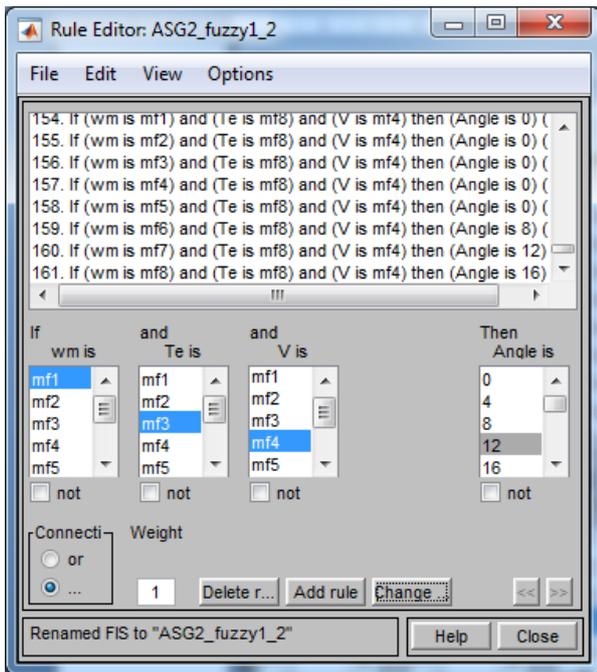


Рис. 3. Фрагмент базы правил нечеткого регулятора

Результаты моделирования. При моделировании ВГУ работала на постоянную выделенную нагрузку. Проверка разработанной нечеткой системы регулирования была осуществлена путем случайного изменения скорости ветра в диапазоне от 6 до 10 м/с. Для определения эффективности было произведено сравнение полученного нечеткого регулятора с ПИД-регулятором скорости вращения ротора. Настройка ПИД-регулятора выполнялась с использованием приложения автоматической настройки из пакета Simulink Control Design системы MATLAB.

При скоростях вращения ротора генератора, превышающих номинальную, а также при больших скоростях ветра угол поворота лопастей был выбран по характеристикам, максимальный для снижения момента на валу турбины (рис. 4).

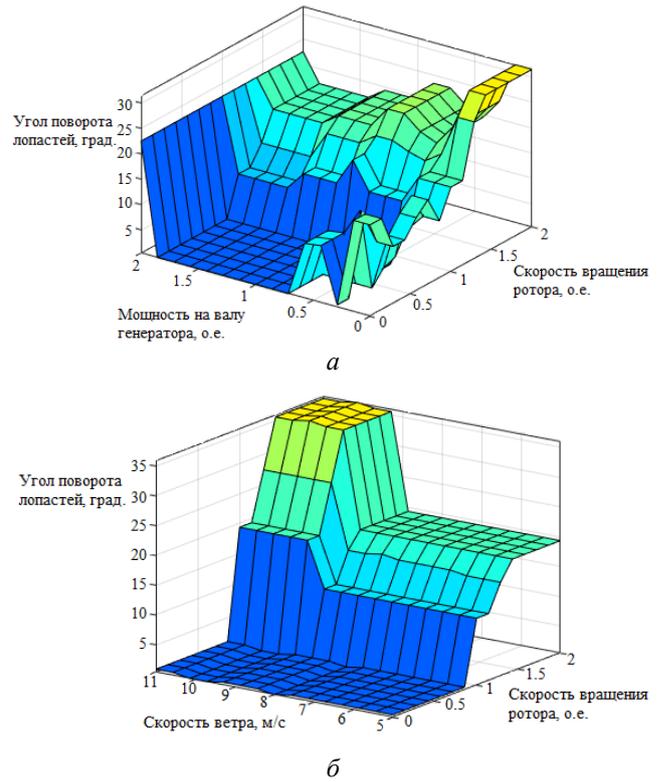


Рис. 4. Поверхности нечеткого вывода регулятора

Результаты моделирования представлены в виде осциллограмм скорости вращения ротора генератора (рис. 5) и угла поворота лопастей ветротурбины (рис. 6) при вариации скорости ветра с 10 на 6 м/с (момент времени 8 с), затем на 8 м/с (момент времени 16 с) и снова на 10 м/с (момент времени 23 с). По полученным характеристикам скорости вращения ротора генератора и угла поворота лопастей ветротурбины можно сделать вывод о более высокой эффективности нечеткого регулятора по сравнению с ПИД-регулятором. Полученная эффективность нечеткой системы управления заключается в снижении времени переходного процесса, колебательности и величины перерегулирования скорости вращения ротора и угла поворота лопастей ВГУ.

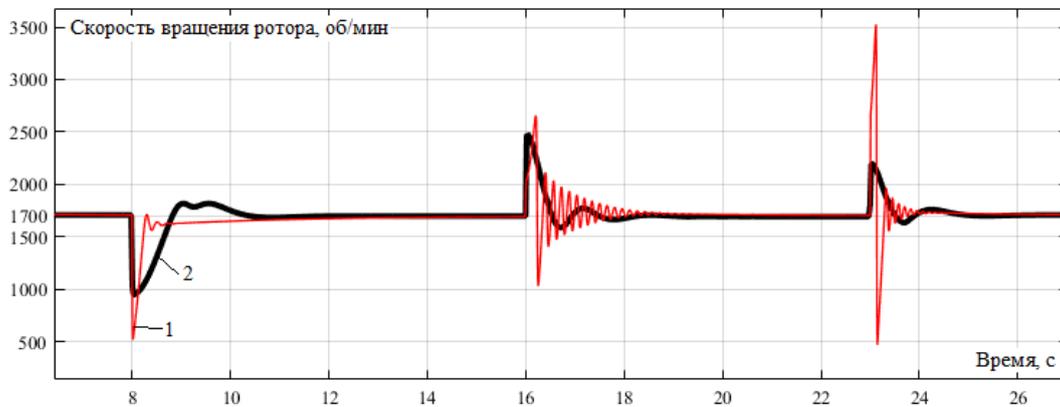


Рис. 5. Осциллограммы скорости вращения ротора генератора при вариации скорости ветра: 1 — использовался ПИД-регулятор; 2 — использовалась предлагаемая нечеткая система управления

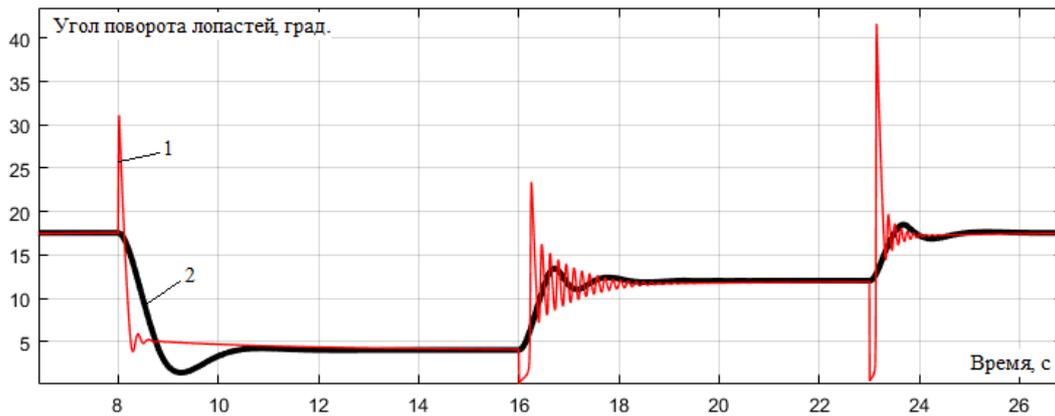


Рис. 6. Оциллограммы изменения угла поворота лопастей ветротурбины:

1 — использовался ПИД-регулятор; 2 — использовалась предлагаемая нечеткая система управления

Применение нечеткого регулятора, настроенного по предлагаемой методике, позволило плавно изменять угол поворота лопастей (значительно снижаются перерегулирование и колебательность по сравнению с ПИД-регулятором) при управлении скоростью вращения ротора генератора ВГУ в условиях изменения скорости ветра.

Заключение. В работе рассмотрены вопросы моделирования и настройки нечеткой системы регулирования скорости вращения ротора ВГУ, работающей на основе генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Приведена настраиваемая модель ВГУ с возможностью изменения параметров генератора и ветротурбины под заданные условия и оборудование. Модель ВГУ может использоваться в экспериментах при моделировании электроэнергетических сетей, включающих в себя установки малой распределенной генерации (ВГУ, солнечные батареи и т. п.).

Литература

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред. В.Е. Фортова, А.А. Макарова. М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012. 235 с.
2. Saleh V.S., Althabani A., Esa Y. Mhandi A.A. Mohamed. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts // Proceedings on International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), 2015. P. 195–200.
3. Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia, CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5–7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, Panel session 5D. P. 1–5.
4. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
5. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
6. Wang J., Huang F.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. № 2. Vol. 3. P. 16–23.
7. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation // Far East

Journal of Electronics and Communications. 2017. T. 17, № 5. P. 1127–1140.

В ходе исследования предложен универсальный метод настройки нечеткого регулятора маломощной ВГУ с возбуждением генератора от постоянных магнитов.

Результаты компьютерного моделирования показывают, что предлагаемая нечеткая система регулирования скорости вращения ротора ВГУ позволяет обеспечить стабильность работы ветрогенератора при изменении скорости ветра. Использование разработанного метода настройки нечеткого регулятора позволяет плавно изменять угол поворота лопастей при управлении скоростью вращения ротора генератора ВГУ в условиях изменения скорости ветра. При этом значительно снижаются перерегулирование и колебательность скорости вращения ротора и угла поворота лопастей ветротурбины по сравнению с использованием ПИД-регулятора.

8. Martínez E.A., Ceseña T., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // IEEE Transaction on Smart Grid. 2016. Vol. 7. P. 348–357, 2016.
9. Olivares D. "Trends in Microgrid Control", Smart Grid, IEEE Transactions on. 2014. Vol. 5, № 4. P. 1905–1919, 2014.
10. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid, Springer, 2018. 218 p.
11. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. "Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics", Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
12. Бубенчиков А.А., Дайчман Р.А., Артамонова Е.Ю. Выбор оптимального генератора для ветроустановки // Междунар. науч.-исследовательский журнал. 2015. № 10. С 18–22.
13. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology", Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 39. P. 748–764.
14. Wind Power Capacity Worldwide Reaches 597 GW, 50,1 GW added in 2018 [Электронный ресурс]: сайт World Wind Energy Association / URL // <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/> (дата обращения: 22.12.2019).
15. Piao Haiguo, Wang Zhixin Simulation Research of Fuzzy-PID Synthesis Yaw Vector Control System of Wind Turbine // Manuscript received June 27, 2007. P. 469–476.

16. Jahmeerbacus I., Bhurtun C. Fuzzy control of a variable-speed wind power generating system. *Energize*. August 2008. P. 41–45.
 17. Jianzhong Z., Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines. DRPT2008, 6–9 April, 2008.
 18. Evgenije Adziel. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2009. Vol. 6, № 1. P. 131–149.
 19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткий регулятор для горизонтально-осевой ветрогенерирующей установки // *Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки*. 2014. Т. 1. С. 285–294.
 20. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Нечеткие регуляторы для ветрогенерирующих установок // *Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики*. 2014. № 7–8. С. 60–69.
 21. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Чан Зюй Хынг. Интеллектуальные регуляторы для установок распределенной генерации // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2015. № 2 (46). С. 83–95.
 22. Булатов Ю.Н. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации // *Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та*. 2017. Т. 21, № 10. С. 78–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94
 23. Bulatov Yu., Kryukov A., Van Huan Nguyen, Duy Hung Tran. Fuzzy Controller of Rotation Angle of Blades of Horizontal-Axial Wind Power Generation Plant, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019. Vol. 983. P. 105–115. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_88.
 24. Grenier D., Dessaint L.-A., Akhrif O., Bonnassieux Y., LePoufle B. Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997. Vol. 44, № 5, October 1997. P. 680–687.
 25. Heier S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Wiley. New York, 1998.
 26. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб., 2003. 736 с.
- References*
1. The concept of Russia's intelligent electricity system with an active adaptive network / pod red. V.E. Fortova, A.A. Makarova. M.: OAO «NTC FSK EES», 2012. 235 p.
 2. Saleh V.S., Althaibani A., Esa Y. Mhandi A.A. Mohamed. Impact of clustering microgrids on their stability and resilience during blackouts // *Proceedings on International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, 2015. P. 195–200.
 3. Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia, CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5-7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, Panel session 5D. P. 1–5.
 4. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski *Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.
 5. Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2013. DOI:10.1109/PEOCO.2013.6564586.
 6. Wang J., Huang F.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. *Smart Grid Technologies // IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2009. № 2. Vol. 3. P. 16–23.
 7. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulatov Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation // *Far East Journal of Electronics and Communications*. 2017. V. 17, № 5. P. 1127–1140.
 8. Martínez E.A., Ceseña T., Capuder T., Mancarella P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty // *IEEE Transaction on Smart Grid*. 2016. Vol. 7. P. 348–357, 2016.
 9. Olivares D. “Trends in Microgrid Control”, *Smart Grid, IEEE Transactions on*. 2014. Vol. 5, № 4. P. 1905-1919, 2014.
 10. Ran Wang, Ping Wang, Gaoxi Xiao. *Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid*, Springer, 2018. 218 p.
 11. Voropai N.I., Stychinsky Z.A. “Renewable energy sources: theoretical foundations, technologies, technical characteristics, economics”, Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010. 223 p.
 12. Bubenchikov A.A., Dajchman R.A., Artamonova E.YU. Choosing the optimal generator for a wind turbine // *International Research Journal*. 2015. № 10. P. 18–22.
 13. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 39. P. 748–764.
 14. Wind Power Capacity Worldwide Reaches 597 GW, 50,1 GW added in 2018 [Elektronnyj resurs]: sajt World Wind Energy Association / URL // <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/> (data obrashcheniya: 22.12.2019).
 15. Piao Haiguo, Wang Zhixin Simulation Research of Fuzzy-PID Synthesis Yaw Vector Control System of Wind Turbine // *Manuscript received June 27, 2007*. P. 469–476.
 16. Jahmeerbacus I., Bhurtun C. Fuzzy control of a variable-speed wind power generating system. *Energize*. August 2008. P. 41–45.
 17. Jianzhong Z., Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu. Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines. DRPT2008, 6–9 April, 2008.
 18. Evgenije Adziel. Maximum Power Search in Wind Turbine Based on Fuzzy Logic Control // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2009. Vol. 6, № 1. P. 131–149.
 19. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., CHan Zyuj Hyng. Fuzzy regulator for horizontal axis wind turbine // *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014. V. 1. P. 285–294.
 20. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., CHan Zyuj Hyng. Fuzzy regulators for wind turbines // *Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems*. 2014. № 7–8. P. 60–69.
 21. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., CHan Zyuj Hyng. Intelligent regulators for distributed generation systems // *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2015. № 2 (46). P. 83–95.
 22. Bulatov YU.N. Intelligent control systems for distributed generation plants // *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2017. V. 21, № 10. P. 78-94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-78-94
 23. Bulatov Yu., Kryukov A., Van Huan Nguyen, Duy Hung Tran. Fuzzy Controller of Rotation Angle of Blades of Horizontal-Axial Wind Power Generation Plant, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019. Vol. 983. P. 105–115. DOI: 10.1007/978-3-030-19868-8_88.
 24. Grenier D., Dessaint L.-A., Akhrif O., Bonnassieux Y., LePoufle B. Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997. Vol. 44, № 5, October 1997. P. 680–687.
 25. Heier S. *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. Wiley. New York, 1998.
 26. Leonenkov A.V. *Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH*. SPb., 2003. 736 p.