



ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ РОТОРА САВОНИУСА

Гусева Ю.В., Кострюков С.А., Васильев А.Р.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

в г. Волжском, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9005-9222>, vasilevayv@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Повышение эффективности и экономичности работы электростанций на основе возобновляемых источников энергии необходимо проводить посредством совершенствования технологических, конструктивных, организационно-правовых, технико-экономических мероприятий. Даны предложения для развития подходов к оценке эффективности работы ветроэнергетических установок на основе ротора Савониуса. Обоснованы конструктивные параметры и создана физическая модель для комплексного исследования и рабочих характеристик в лабораторных условиях. МЕТОДЫ. На основе методов физического и математического моделирования конструкций и профилей лопастей ветрогенератора определены технико-экономические показатели различных профилей лопастей ротора Савониуса. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выполнено теоретическое обоснование конструкции и различных профилей лопастей ротора Савониуса. На основе комплексного исследования рабочих характеристик в лабораторных условиях установлены значения коэффициента эффективности использования энергии ветра, частоты вращения профиля ветроколеса, электрической мощности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования могут быть применены для обоснования широкого распространения и создания ветроэнергетических установок с ротором Савониуса для обеспечения качественного и надежного энергоснабжения удаленных потребителей электрической энергии, создания изолированных энергосистем и дальнейшего развития альтернативных источников энергии в отечественной электроэнергетике.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; возобновляемые источники энергии; ветроэнергетическая установка; ротор Савониуса.

Для цитирования: Гусева Ю.В., Кострюков С.А., Васильев А.Р. Приемы системного анализа и ресурсосберегающие электрооборудованные технологии при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики Республики Татарстан // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 83-90. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-83-90.

LABORATORY MODEL OF THE SAVONIUS ROTOR

YuV. Guseva, SA. Kostryukov, AR. Vasilev

Volzhsy Branch of the National Research University

«Moscow Power Engineering Institute», Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453>, vasilevayv@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Increasing the efficiency and efficiency of power plants based on renewable energy sources should be carried out by improving technological, constructive, organizational, legal, technical and economic measures. Proposals are given for the development of approaches to assessing the efficiency of wind power plants based on the Savonius rotor. The design parameters are substantiated and a physical model is created for a comprehensive study and performance characteristics in laboratory conditions. METHODS. Based on the methods of physical and mathematical modeling of structures and profiles of wind turbine blades, the technical and economic indicators of various profiles of the blades of the Savonius rotor are determined. RESULTS. The theoretical substantiation of the design and various profiles of the blades of the Savonius rotor is carried out. On the basis of a comprehensive study of performance characteristics in laboratory conditions, the values of the wind energy efficiency coefficient, the rotation frequency of the wind wheel profile, and electric power were established. CONCLUSION.

The results of the study can be applied to substantiate the widespread use and creation of wind power plants with a Savonius rotor to ensure high-quality and reliable power supply to remote consumers of electric energy, the creation of isolated power systems and the further development of alternative energy sources in the domestic electric power industry.

Keywords: energy efficiency; renewable energy sources; wind power plant; Savonius rotor.

For citation: Guseva YuV., Kostyukov SA., Vasilev AR Laboratory model of the savonius rotor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):83-90. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-83-90.

Введение

Развитие отечественной электроэнергетики базируется на энергетической стратегии энергетики России до 2035 года. В соответствии со структурой выработки электрической энергии на долю электрических станций на основе использования энергии ветра приходится 0,13%, что в абсолютном выражении установленной мощности соответствует значению 1381 МВт. Необходимость развития ветроэнергетики в нашей стране обусловлена в первую очередь наличием большого ветроэнергетического потенциала, потребителей энергии, удаленных от централизованных сетей, исполнением условий экологической программы развития регионов, научно-техническими и производственными разработками. Таким образом, развитие альтернативной энергетики с целью сокращения потребления органического топлива и снижения углеродного следа от процесса выработки электрической энергии, посредством создания эффективных ветроэнергетических установок с вертикальным расположением ротора, представляет собой актуальную задачу исследования [1 – 3].

В настоящее время широкое распространение получили два основных типа ветроэнергетических установок: с горизонтальной и вертикальной осями вращения ротора. Для обеспечения технических нужд выгодно использовать вертикально-осевые установки малой мощности, например с ротором Савониуса с S-образным профилем лопастей. Для данного типа ветрогенератора характерны большие пусковые крутящие моменты, работа при низких скоростях ветрового потока и высокая технологичность и простота исполнения. Основными недостатками ветрогенератора с ротором Савониуса являются большой расход материала и низкий коэффициент использования энергии ветра. В работах [4 – 6] авторами выполнен вычислительный гидродинамический прогноз модифицированной ветротурбины с вертикальным расположением ротора с новыми формами лопастей. Рассмотрена проблема возникновения подсинхронного резонанса, оценки и прогнозирования энергетической эффективности ветроэнергетических установок. При этом отсутствует комплексный подход к практической проверке рабочих характеристик ветрогенераторов с различными профилями ветроколеса и климатическими условиями их эксплуатации.

Анализ работ [7– 9] показывает, что авторами рассматриваются методические подходы к обобщению статистических данных для создания логистического распределения в динамической модели направления ветра для выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции, а также комплексного обоснования конструктивных параметров и создания физической модели ветрогенератора для исследования рабочих характеристик. Однако, следует отметить, что при разработке профилей лопастей ветрогенератора необходимо учитывать влияние различных конструктивных и режимных факторов на рабочие характеристики генерирующего оборудования, в том числе для обеспечения заданных рабочих характеристик лопастей ротора при низких скоростях набегающего потока воздуха на малых моделях ветрогенераторов.

В этой связи для устранения вышеуказанных недостатков необходимо выполнить основные задачи исследования:

1. Выполнить теоретическое обоснование конструкции ветрогенератора на основе ротора Савониуса.
2. Создать физическую модель ветрогенератора с ротором Савониуса для комплексного исследования рабочих характеристик генерирующей установки.
3. Усовершенствовать подход к определению энергетической эффективности использования ветрогенератора с ротором Савониуса.

В связи с этим, целью работы является обоснование конструктивных параметров и создание физической модели для комплексного исследования рабочих характеристик ветрогенератора с ротором Савониуса в лабораторных условиях.

Научная новизна работы состоит в том, что на основании выполненных лабораторных исследований получены новые данные о влиянии различных профилей ветроколеса с вертикальным расположением ротора на изменение значения коэффициента эффективности использования энергии ветра, частоты вращения профиля ветроколеса, электрической мощности. Практическая значимость заключается в проведении лабораторных исследований различных профилей ветроколеса с целью повышения эффективности использования энергии ветра и широкого распространения (масштабирование) ветроэнергетики в районах с предрасполагающими климатическими факторами и наличием потребителей энергии (на примере климатических условий Волгоградской области) в условиях цифровизации электроэнергетики.

Материалы и методы

Для построения модели ветрогенератора с ротором Савониуса использован принцип математической спирали с учетом рекомендаций [1 – 3]. На рисунке 1 представлена схема построения модели профиля лопастей ветрогенератора на основе «золотого» сечения.

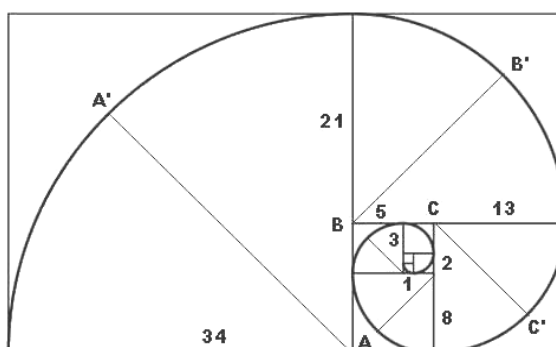


Рис. 1. Схема построения модели профиля лопастей ветрогенератора

Fig. 1. Diagram of building a profile model of wind turbine blades

По дуге $A' - B'$ математической спирали строится каждая из двух лопастей крыльчатки, совместно они образуют поверхность близкую к форме цилиндра. Спираль строится на основе «золотого» сечения. Две лопасти образуют угол между осями в 180° , как это показано на рисунке 1.

Таким образом для решения поставленной задачи исследования в работе выполнено построение профиля лопасти ротора ветрогенератора. Профиль лопасти ротора ветрогенератора представлен на рисунке 2.

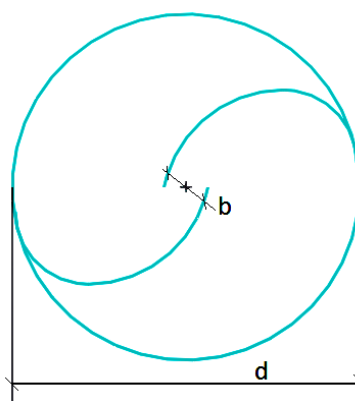


Рис. 2. Профиль лопасти ротора ветрогенератора

Fig. 2. The profile of the rotor blade of the wind generator

Лопасты соединяются с зазором b , причем $b=(0,15\div 0,3)d$, для обеспечения проникновения воздушных масс в межлопастное пространство с целью обеспечения стабильности крутящего момента. Такой принцип действия позволяет ротору Савониуса работать даже при слабом ветре при скорости ветра менее 1 м/с.

Модель профиля ротора Савониуса, исследуемая в работе, выполнена в программе Компас 3D и изготовлена на 3D-принтере из полимерного материала. Модель ротора Савониуса представлена на рисунке 3.

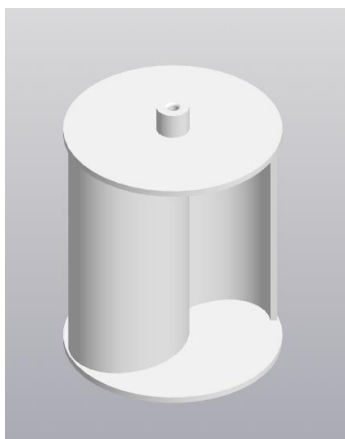


Рис. 3. 3D- модель ротора Савониуса

Fig. 3. 3D model of the Savonius rotor

Следует отметить, что при профилировании лопастей ротора Савониуса учитывалось, что скорость воздуха в створе ветроколеса составляет $1/3$ от скорости набегающего потока воздуха.

Расчет коэффициента мощности выполнен на основе зависимости с учетом [2, 3]:

$$C_p = 2C_x \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \frac{u}{v}, \quad (1)$$

где C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления; v – скорость набегающего потока воздуха, м/с; $u = 2\pi r$ – скорость воздуха в створе ветроколеса, м/с; ν – частота вращения ротора, Гц; r – радиус ветроколеса, м.

Мощность ветрогенератора определяли по формуле [2, 3]:

$$P = C_x \rho r h (v - u)^2 u, \quad (2)$$

здесь h – высота ветроколеса, м.

Расчетные значения коэффициента мощности и электрической мощности модельной установки ветрогенератора для исследуемого профиля лопасти представлены на рис. 4 – рисунке 6.

Обсуждение результатов

На основании проведенных исследований предложена конструкция лабораторного стенда для исследования рабочих характеристик ветрогенератора в лабораторных условиях. Принимая за основу особенность климата степей Нижнего Поволжья – активный ветровой режим в течение всего года со среднегодовой скоростью ветра от 3,3 м/с до 6,3 м/с в модельной установке в качестве источника ветра используется нагнетатель с расходом $180 \text{ м}^3/\text{ч}$. Нагнетаемый поток воздуха проходит через трубу с внутренним диаметром 125 мм, что создает направленный поток ветра со скоростью 4,1 м/с. Внутри трубы помещена разработанная модель ветрогенератора с ротором Савониуса, представленная на рисунке 3. Общий диаметр ветрогенератора 65 мм, высота 74 мм. Фиксация и центрирование модели ветроэнергетической установки осуществляется с помощью валов и подшипников скольжения. Подшипники с внутренним диаметром 3 мм фиксируются в обводном хомуте аэродинамической трубы. Поэтому конструкция является мобильно заменяемой, что удобно для исследования различных профилей лопастей ветрогенераторов. В предлагаемой системе контроля частоты вращения на вал ветрогенератора прикреплен неодимовый магнит. Датчик Холла отслеживает изменение магнитного поля в определенной области и генерирует сигнал, который поступает на микроконтроллер, затем сигнал обрабатывается и передается на персональный компьютер. Для регулирования скорости воздушного потока в трубе применен резистор переменного сопротивления для нагнетателя воздуха.

Результаты измерения частоты вращения ротора ветрогенератора используются для расчета коэффициента эффективности использования энергии ветра и мощности генерирующей установки по уравнениям (1), (2).

Результаты оценки рабочих характеристик ветроколеса, имитирующего работы на начальном (разгонном) участке времени представлены на рисунке 4. Следует отметить, что продолжительность разгона ветроколеса до выхода на установившийся режим составляет порядка 10 с.

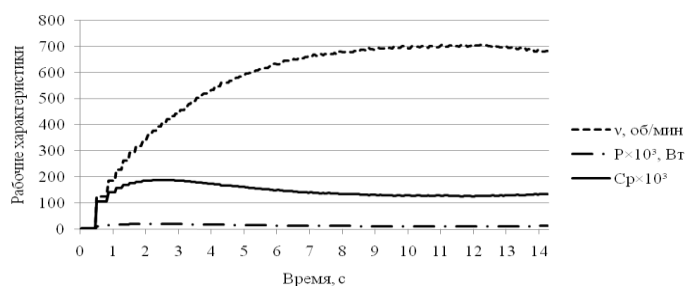


Рис.4. Рабочие характеристики ветроколеса на начальном (разгонном) участке времени

Fig.4. Operating characteristics of the wind wheel at the initial (acceleration) time interval

В ходе расчетов установлено, что для обеспечения заданных рабочих характеристик лопастей ротора скорость набегающего потока воздуха на малых моделях ветрогенераторов значения Re должны находиться в диапазоне $(3 \div 5) \cdot 10^5$ [6 – 9].

В соответствии с этим, для модельной установки экспериментально полученные значения частоты вращения в номинальном режиме работы составляют 600 об/мин., электрической мощности 16 мВт, коэффициента мощности 0,182, что соответствует расчетным данным. Значения коэффициента мощности соответствуют данным, приведенным в научно-технических источниках [9 – 12].

На рисунке 5 и 6 представлены рабочие характеристики профилируемой модели ветроколеса на установившемся режиме и в процессе регулирования скорости набегающего потока воздуха.

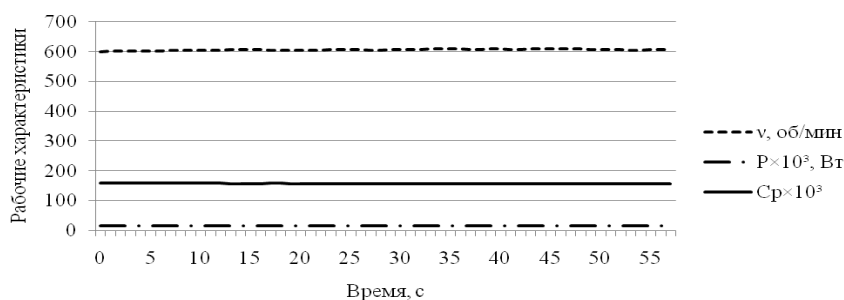


Рис.5. Рабочие характеристики ветроколеса на установившемся режиме

Fig.5. Operating characteristics of the wind wheel in steady-state mode

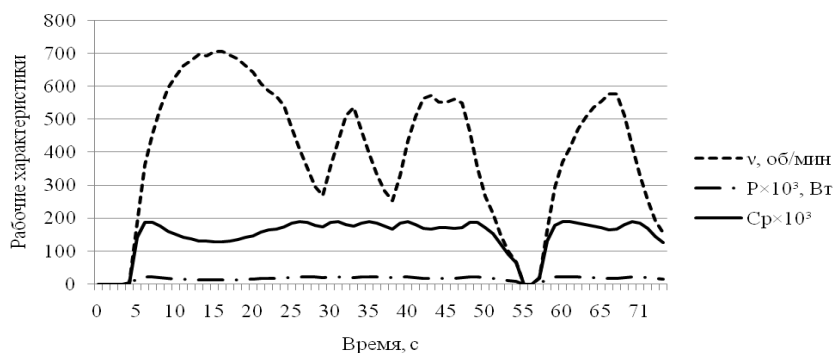


Рис.6. Рабочие характеристики ветроколеса в процессе регулирования скорости набегающего потока воздуха

Fig.6. Operating characteristics of the wind wheel in the process of regulating the speed of the incoming air flow

При осуществлении регулирования скорости набегающего потока воздуха практически во всем диапазоне управления ротором стабильно поддерживается коэффициент использования энергии ветра на уровне 0,169 – 0,189, за исключением участка времени от 50 до 60 с на котором скорость потока воздуха равна нулю, как это показано на рисунке 6. При этом на начальном участке коэффициент использования энергии ветра принимает значения от 0,128 до 0,187.

Анализ полученных расчетных значений показывает, что при профилировании моделей лопастей ветрогенераторов необходимо учитывать обратные вихри, возникающие

в разреженной зоне после прохождения потоком воздуха створа ветроколеса, которые в свою очередь оказывают значительное влияние на эффективность использования энергии ветра конкретной моделью ветрогенератора [12, 13].

В дальнейшем планируется развитие работы с разработкой новых профилей лопастей и вариацией скорости воздушного потока с целью поиска оптимального варианта модели ветрогенератора для использования в Волгоградской области. Также планируется проведение лабораторных испытаний на модели больших размеров, созданной по оптимальным значениям параметров [14, 15].

Выводы

В результате проведенного исследования выполнено теоретическое обоснование создания конструкции ветрогенератора на основе ротора Савониуса, учитывающая особенности кинематического обтекания ветроколеса набегающим потоком воздуха. Таким образом, усовершенствован подход к определению энергетической эффективности использования ветрогенератора с ротором Савониуса.

Создана физическая модель ветрогенератора с ротором Савониуса для комплексного исследования рабочих характеристик генерирующей установки в лабораторных условиях.

Проведены лабораторные испытания созданной физической модели. Получены новые опытные данные коэффициента мощности и электрической мощности модельной установки ветрогенератора с ротором Савониуса.

Литература

1. Шерязов С. К., Исенов С. С., Исаков Р. М., и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. №5. С. 24 - 33.
2. Templin R. J. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine // National Research Council of Canada. Rep. LTR 160. 1974; 185.
3. Янсон Р. А. Ветроустановки. М.: 2007. 36 с: ил.
4. Tian W., Song B., Van Zwieten J. H., et al. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes // Energies. 2015. Т. 8. № 8. С. 7915 - 7929.
5. Елаев М. В., Халысмаа А. И., Самойленко В. О. Проблема подсинхронного резонанса в ветроэнергетических установках и системах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3(47). С. 57-71.
6. Капанский А. А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 2(42). С. 103-115.
7. Лаврик А. Ю., Жуковский Ю. Л., Лаврик А., и др. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 10-17.
8. Кострюков С.А., Васильев А.Р., Гусева Ю.В. Обоснование конструктивных параметров и создание физической модели ветрогенератора для комплексного исследования рабочих характеристик в лабораторных условиях // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Энергетика в условиях цифровой трансформации. Наука. Технологии. Инновации». 2022. С. 142-146.
9. Kaplya E.V. Generalization of the logistic distribution in the dynamic model of wind direction // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Т. 52. № 7. С. 760-767.
10. Kaplya E.V. Energy-efficient termination control of the servo drives of modules of a solar-power plant // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 1. С. 40-43.
11. Капля Е.В. Обобщение закона гиперболического секанса и логистического закона распределения в единый закон распределения с варьируемым коэффициентом эксцесса // Дальневосточный математический журнал. 2020. Т. 20. № 1. С. 74-81.
12. Kaplya V.I., Silaev A.A., Kaplya E.V. Identification of the transient response of a capacitive relative humidity sensor // Measurement Techniques. 2020. Т. 62. № 12. С. 1099-1105.
13. Ruban N., Askarov A., Razzhivin I., et al. Wind power plants influence on out-of-step operation mode parameters of the power system // Electrotehnica, Electronica, Automatica. 2020. Т. 68. № 4. С. 5-10.
14. Kulyk M., Zgurovets O. Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Т. 298. С. 231-245.

15. Mahkamadzhanov B.M., Mukhammadiev M.M., Zakhidov R.A., et al. Technological model of a combined power system based on solar, wind, and hydraulic low-power plants // *Applied Solar Energy*. 2004. T. 39. № 3. С. 84-91.

Автор публикации

Гусева Юлия Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Фундаментальные дисциплины филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: vasilevayv@yandex.ru.

Кострюков Сергей Александрович – студент филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: kostryukovsa@mail.ru.

Васильев Андрей Романович – студент филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: vasilev.anr@yandex.ru.

References

1. Sher'yazov SK, Isenov SS, Iskakov RM, i dr. Osnovnye tipy vetroturbín-generatorov v sisteme elektrosnabzheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021; 5: 24 - 33.
2. Templin RJ. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine. *National Research Council of Canada*. Rep. LTR 160. 1974; 185.
3. Yanson RA. *Vetroustanovki*. M.: 2007; 36. il.
4. TianW, Song B, Van Zwieten JH, et al. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*. 2015; 8: 7915 - 7929.
5. Elaev MV, Khal'yasmaa AI, Samoilenko VO. Problema podsinkhronnogo rezonansa v vetroenergeticheskikh ustanovkakh i sistemakh. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020; 3(47): 57-71.
6. Kapanskii A. A. Metody resheniya zadach otsenki i prognozirovaniya energeticheskoi effektivnosti. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019; 2(42): 103-115.
7. Lavrik AYU, Zhukovskii YuL, Lavrik A, i dr. Osobennosti vybora optimal'nogo sostava vetro-solnechnoi elektrostantsii s dizel'nymi generatorami. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020; 1: 10-17.
8. Kostryukov SA, Vasil'ev AR, Guseva YuV. Obosnovanie konstruktivnykh parametrov i sozdanie fizicheskoi modeli vetrogeneratora dlya kompleksnogo issledovaniya rabochikh kharakteristik v laboratornykh usloviyakh. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika v usloviyakh tsifrovoi transformatsii. Nauka. Tekhnologii. Innovatsii»*. 2022; 142-146.
9. Kaplya EV. Generalization of the logistic distribution in the dynamic model of wind direction. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016; 7: 760-767.
10. Kaplya EV. Energy-efficient termination control of the servo drives of modules of a solar-power plant. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 1: 40-43.
11. Kaplya EV. Obobshchenie zakona giperbolicheskogo sekansa i logisticheskogo zakona raspredeleniya v edinyi zakon raspredeleniya s var'iruемым koeffitsientom ekstsessa. *Dal'nevostochnyi matematicheskii zhurnal*. 2020; 1: 74-81.
12. Kaplya VI, Silaev AA, Kaplya EV. Identification of the transient response of a capacitive relative humidity sensor. *Measurement Techniques*. 2020; 12: 1099-1105.
13. Ruban N, Askarov A, Razzhivin I, et al. Wind power plants influence on out-of-step operation mode parameters of the power system. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2020; 4: 5-10.
14. Kulyk M, Zgurovets O. Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020; 298: 231-245.
15. Mahkamadzhanov BM, Mukhammadiev MM, Zakhidov RA, et al. Technological model of a combined power system based on solar, wind, and hydraulic low-power plants. *Applied Solar Energy*. 2004; 3: 84-91.

Author of the publication

Yulia V. Guseva —« Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) in Volzhsky.

Sergey A. Kostryukov – «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) in Volzhsky.

Andrey R. Vasiliev – «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) in Volzhsky.

Получено ***25.05.2022г.***

Отредактировано ***30.05.2022г.***

Принято ***30.05.2022г.***