

Коробатов Д.В., Мартянов А.С., Бодрова Е.С., Четошников С.А.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет)»

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Малые и микроветроэнергетические установки (микро ВЭУ), имеющие мощность до 10 кВт, используются в основном для энергоснабжения маломощных объектов распределенной энергетики. На базе Южно-Уральского государственного университета в г. Челябинске созданы и испытаны вертикально-осевые ВЭУ малой и сверхмалой мощности для электроснабжения осветительных установок, использующих для питания напряжение постоянного тока. С целью оптимизации конструкции ротора ВЭУ был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение аэродинамических характеристик. В результате исследований были определены основные габаритные соотношения элементов ротора, обеспечивающие заданную расчетную мощность, рассчитаны аэродинамические характеристики лопастей, произведен выбор оптимального профиля, рассчитаны относительные размеры лопастей и углы их установки. Установлена зависимость коэффициента использования энергии ветра от быстроходности ротора. Рассчитан коэффициент использования энергии ветра в зависимости от быстроходности, получена главная аэродинамическая характеристика ротора. Получены данные для всего используемого диапазона быстроходностей по величинам аэродинамических сил и моментов, необходимых для проведения прочностных и динамических расчетов. Подготовлен массив значений аэродинамической мощности как функции двух переменных: скорости ветра и скорости вращения ротора для использования его в системе регулирования.

Ключевые слова: ветроустановка, микро ВЭУ, аэродинамическая характеристика, ротор, коэффициент использования энергии ветра.

ВВЕДЕНИЕ

Малые и микроветроэнергетические установки (микро ВЭУ), имеющие мощность менее 10 кВт, пока не имеют широкого применения ни в России, ни в мире и используются в основном в малой распределенной энергетике для энергоснабжения разрозненных маломощных объектов [1]. Как правило, они работают в системах общественного освещения в автономном режиме без подключения к магистральной сети [2]. Их ограниченное применение объясняется в основном высокой текущей стоимостью комплектующих [3]. Однако преобладающее мнение о том, что экономическая эффективность малых ВЭУ ниже, чем крупных, является ошибочным, но, к сожалению, пока определяет современные тренды. Например, сравнивая мощность одной крупной ветроустановки с диаметром ротора 100 м и 100 ветроустановок с диаметром 10 м, нетрудно заметить, что мощность этих двух генерирующих объектов имеет одинаковый порядок, поскольку зависит от квадрата ометаемой площади. В первом случае эта площадь имеет порядок $100^2 = 10^4$ (м²) и во втором тот же порядок $100 \cdot 10^2 = 10^4$ (м²). Однако материалоемкость конструкции ротора имеет кубическую зависимость от диаметра, и в этом случае крупная установка экономически проигрывает, поскольку ее масса будет иметь порядок $100^3 = 10^6$ (кг), а в случае малых ВЭУ $100 \cdot 10^3 = 10^5$ (кг), то есть на порядок меньше. А это значит, что затраты на производство малых ВЭУ будут в 10 раз меньше, чем крупных. Следовательно, малые и микро ВЭУ имеют серьезные конкурентные экономические преимущества, несмотря на то, что пока стоимость их комплектующих, как правило, производимых штучно, слишком велика и в целом не отражает реальной рыночной ситуации.

С учетом неоспоримого преимущества вертикально-осевых конструкций перед традиционными горизонтально-осевыми в части независимости работы от направления ветра главный фокус научно-исследовательских работ в этой области был сосредоточен на улучшении аэродинамических характеристик ротора и совершенствовании систем управления.

МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Силами ученых Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) [4, 5] и АО «ГРЦ Макеева» (Челябинская область) создана линейка вертикально-осевых ВЭУ малой мощности от 0,1 до 30 кВт (рис. 1) [6, 7].

Длительные ресурсные испытания микро ВЭУ в составе гибридного ветросолнечного энергокомплекса [8, 9] мощностью до 1 кВт в течение 5 лет совместно с осветительными установками на светодиодах показали исключительную эффективность изделий (рис. 2).

Светодиодный светильник мощностью 70 Вт успешно эксплуатируется для освещения прилегающей территории в ночное время суток. Энергокомплекс включает аккумуляторный модуль 24 В/100 А·ч. Тем не менее данная конструкция двухъярусного ротора оказалась технологически дорогой и подверженной вибрациям, в связи с чем были проведены дополнительные исследования, направленные на изучение аэродинамических характеристик и вибраций с дальнейшей оптимизацией конструкции. Основные аэродинамические характеристики ротора ВЭУ были получены расчетным путем с использованием инженерного метода [10]. Помимо конструктивно-габаритных параметров ротора, метод, в качестве исходных данных, принимает аэродинамические характеристики профиля лопасти. Серия профилей лопастей разработана в ООО «ГРЦ-Вертикаль» [11, 12] и оптимизирована для использования в роторах вертикально-осевых ВЭУ. Аэродинамические характеристики профилей на всех

установочных углах лопастей при круговом обдуве получены расчетом в пакете вычислительной аэродинамики ANSYS CFX и подтверждены экспериментальными исследованиями [13]. Расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии. На **рис. 3** приведены аэродинамические коэффициенты C_x (коэффициент сопротивления), C_y (коэффициент подъемной силы), C_d (коэффициент динамического момента), полученные расчетом [14]. Эти данные применяются далее при определении основных аэродинамических зависимостей коэффициента использования энергии ветра КИЭВ или $C_p(Z)$, а также коэффициента момента $C_m(z)$, графики которых представлены на **рис. 3**.

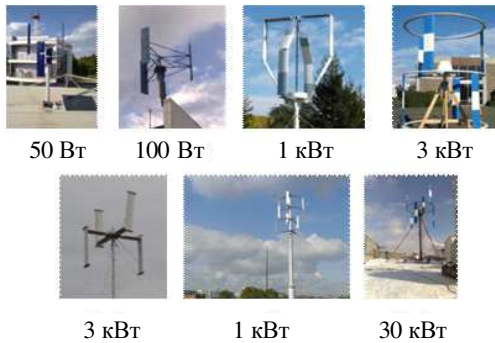


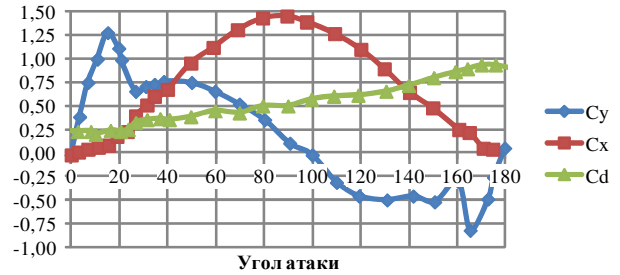
Рис. 1. Семейство вертикально-осевых ВЭУ ЮУрГУ



Рис. 2. Гибридный ветросолнечный энергокомплекс на основе микро ВЭУ

Найденная зависимость мощности от частоты вращения N (об/мин) и скорости ветра V (м/с) использована для расчета параметров системы управления. Система управления ВЭУ представляет собой электронное устройство, регулирующее скорость вращения ротора ВЭУ с учетом текущей располагаемой мощности для обеспечения наибольшей генерируемой электрической мощности. Законом управления является максимизация параметра $C_p(Z)$ при ряде граничных условий. Например, в нормальном рабочем режиме $P_o < P_p$, где P_o – генерируемая мощность, а P_p – располагаемая. Ограничение мощности (и частоты вращения) по верхнему пределу предусмотрено системой регулирования в соответствии с **рис. 4** за счет нагружения генератора до полной остановки ротора ВЭУ, и тогда $P_o > P_p$ [15]. Однако в силу малых размеров ветроустановки это ограничение может быть исключено, т.к. ротор такой ВЭУ может вращаться с большой скоростью без риска разрушения. Для аварийного ограничения скорости вращения используется электромеханическая система торможения [16].

ANSYS CFX: C_x, C_y, C_d в поточной системе



КИЭВ $C_p(Z)$ и коэффициент момента $C_m(Z)$

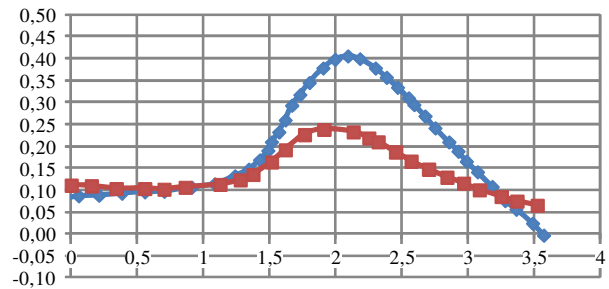


Рис. 3. Аэродинамические коэффициенты профиля лопасти и основные аэродинамические характеристики ротора микро ВЭУ

Данные **рис. 3** дают возможность рассчитать поле аэродинамической мощности в координатах «скорость ветра – частота вращения» (**рис. 4**).

Для расчетов прочности и устойчивости микро ВЭУ необходимо знать силы, действующие на ротор в целом. На **рис. 5** изображены графики коэффициентов, осредненных за оборот продольной и боковой сил. Наблюдаются некоторые различия в ходе кривых, полученных по инженерной методике и в пакете вычислительной аэродинамики, что, с одной стороны, будет способствовать улучшению инженерного метода, а с другой – повысит качество проектных работ при непосредственном использовании вычислительных комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате исследований была разработана, а затем изготовлена одноярусная конструкция микро ВЭУ, которую планируется применять, например, для электроснабжения осветительных устройств уличного освещения. В качестве дублирующего источника энергии может использоваться солнечный модуль (**рис. 6**).

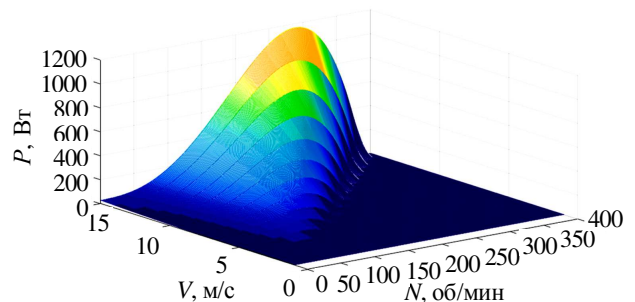


Рис. 4. Поле аэродинамической мощности микро ВЭУ

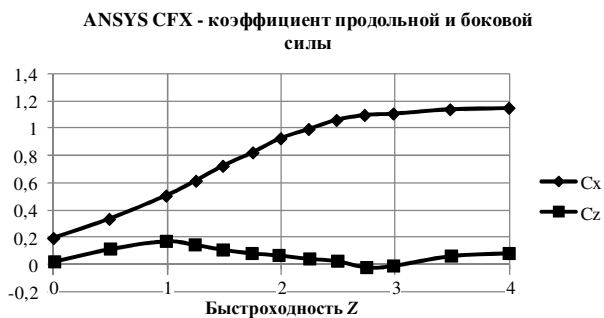
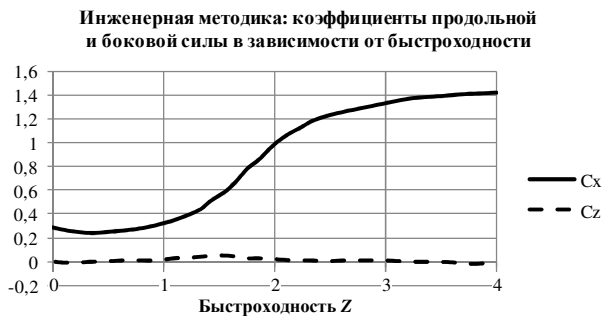


Рис. 5. Зависимости коэффициентов продольной и боковой сил от быстроходности, вычисленные по инженерной методике и в ANSYS CFX

Для ротора микро ВЭУ выбор параметров осуществлялся на основании опыта конструкторских разработок ветротурбин с вертикальной осью вращения мощностью 0,1-30 кВт, математического аппарата на базе программных комплексов NASTRAN [17], пакетов MATLAB, SolidWorks, а также методики оптимизации конструкции ВЭУ. В результате итерационных расчетов были выбраны следующие конструктивно-габаритные параметры:

$D = 1,2$ м – диаметр ротора;

$R = D/2 = 0,6$ м – радиус ротора;

$L = H = 1,3$ м – длина лопастей и одновременно высота ротора;

$S = D \cdot H = 1,56$ м² – ометаемая площадь ротора;

$b = 0,125$ м – длина хорды симметричного профиля лопасти;

$c = 20\%$ – относительная толщина профиля;

$n = 4$ – количество лопастей;

$\varphi = 3,5^\circ$ – установочный угол лопасти в ветроколесе;

$Z = \omega R/V$ – быстроходность, где ω – скорость вращения, V – скорость ветра;

$C_m = 2M/(\rho V^2 SR)$ – коэффициент крутящего момента M , ρ – плотность воздуха;

$C_p = 2P/(\rho V^3 S) = C_m \cdot Z$ – коэффициент использования энергии ветра.

Уровень виброускорений – не более $0,04$ м/с² в среднегеометрических полосах частот.

Поскольку ветроэнергетическая установка представляет собой динамический объект повышенной опасности, технические требования к ее конструкции и опорным элементам, прежде всего, формулировались с точки зрения безопасности воздействия на окружающую среду при высокой эффективности работы установки. Требования по безопасности удовлетворяют Требования Ллойда [18].

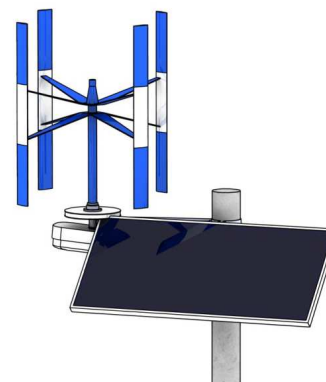


Рис. 6. Микро-ВЭУ с дублирующим солнечным модулем

Учитывая малую величину вертикальных виброускорений в резонансах собственных частот ротора и опорной конструкции, вычисленные для напряженно-деформированного состояния конструкции, можно предположить возможность размещения микро ВЭУ не только в непосредственной близости к жилым домам, но и непосредственно на крыше зданий и сооружений, что значительно расширяет область применения данной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вертикально-осевые микроветроэнергетические установки, разработанные на базе ЮУрГУ, явились первым поколением одноярусных микротурбин, позволяющих осуществить локальное электроснабжение сверхмалых потребителей в виде осветительных устройств, находящихся на значительном расстоянии. С помощью теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с целью оптимизации параметров конструкции, была определена характеристика коэффициента использования ветра в зависимости от быстроходности, вычислены главные аэродинамические характеристики ротора, найден оптимальный профиль лопасти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сироткин Е.А., Соломин Е.В., и др. Состояние развития мировой ветроиндустрии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 05 (145). С.20–25.
2. Halstead R., Solomin E. Vertical wind turbines (Технические особенности и преимущества ветроэнергетических установок) // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. №1. С.36–41.
3. Соломин Е.В. Перспективы использования малых ветроэнергетических установок в агропромышленном комплексе // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2011. Вып. 7. С.12–15.
4. Шестаков А.Л., Кирпичникова И.М. Южно-Уральский государственный университет как стартовая площадка энергосберегающих технологий и использования возобновляемых источников энергии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. № 1. С. 149-152.
5. Кирпичникова И.М. Разработки Южно-Уральского государственного университета в области использования возобновляемых источников энергии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 5 (145). С. 54-57.
6. Соломин Е.В., Кирпичникова И.М. Мартыанов А.С. Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII междунар. науч. конф. молодых ученых / Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. ЭЭЭ-2015. Новосибирск. 2015.*
7. Kirpichnikova I.M., Kozin A.A. Analysis of the group of vertical-axis wind turbines in the software package Matlab // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, № 1(1), 2014, С.43-46.
8. Кирпичникова И.М., Рахматулин И.Р. Лабораторные исследования устройства слежения за солнцем с использованием фотоэлементов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 12 (134). С. 10-14.
9. Кирпичникова И.М., Четошников С.А. Моделирование комбинированной ветросолнечной установки // *Альтернативная энергетика и экология*. 2016. №7-8. С. 25-31.
10. Кирпичникова И.М., Топольская И.Г., Топольский Д.В. Об особенностях развития теории моделирования возобновляемых источников энергии в России // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 5 (145), С. 63-68.
11. Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. №1. С.10–15.
12. Кирпичникова И.М., Соломин Е.В. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2008. Вып. 10. № 26 (126). С. 32–35.
13. ANSYS CFX Release 10.0 documentation. 2006.
14. Соломин Е.В. Методология разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. 324 с.
15. Киндряшов А.Н., Мартыанов А.С., Соломин Е.В. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013 №01/2 (118). С.59–62.
16. Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Козлов С.В. Электромеханическая система аварийного торможения ветроэнергетической установки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 1 (30). С. 19-23. doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-19-23
17. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2001.
18. Технические условия на безопасность ветросиловых установок / Компания "Германишер Ллойд".

Поступила в редакцию 16 декабря 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AERODYNAMIC STUDY OF MICRO WIND TURBINES

Denis V. Korobotov

Ph.D. (Engineering), Associated Professor, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: denis_vk@inbox.ru

Andrey S. Martyanov

Ph.D. (Engineering), Associated Professor, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: martyanov_andrey@mail.ru

Elena S. Bodrova

Post-graduate student, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: Lennok13@mail.ru

Sergey A. Tchetoshnikov

Post-graduate student, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: tchetser@gmail.com

Small and micro wind turbines (micro-wind turbines) with generation power up to 10 kW are used mostly for low power supply distributed facilities. Low and ultra-low power vertical axis wind turbines (VAWT) for DC supply local grids intended for street lighting installations were created and tested at South Ural State University (Chelyabinsk). Series of experimental and theoretical research for optimizing the wind turbine rotor design were made. The main objective was to study the aerodynamic characteristics. The obtained results contain the basic overall elements optimal ratios of a rotor which provides the increase of desired design power. The results include as well the calculated aerodynamic characteristics of the blades, the result of the choice of the optimal profile, calculated relative sizes of the angles of the blades and their installation procedure, and much more. We also calculated the dependence of power efficiency on tip speed ratio with the main aerodynamic curve of the rotor. We obtained data for all the usable range of tip speed ratio for aerodynamic forces and torques required for the strength and dynamic calculation. We have built an array of wind power values as a function of two variables: wind speed and angular rotor speed for the application in the control system.

Keywords: Wind turbine, micro wind, aerodynamic characteristics, rotor, wind power.

REFERENCES

1. Sirotkin E.A., Solomin E.V., et.al. Development State of the World Wind-turbine Industry. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2014, no. 05 (145), pp.20–25. (In Russian)
2. Halstead R., Solomin E. Vertical wind turbines (Technical features and advantages of SRC-Vertical wind turbines). *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2010, no. 1, pp.36–41. (In Russian)
3. Solomin E.V. Application prospects of small wind-power units in agriculture. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture], 2011, Iss. 7, pp.12–15. (In Russian)
4. Shestakov A.L., Kirpichnikova I.M. South Ural State University as a Launch Site of Energy-saving Technology and Application of Renewable Energy Sources. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2010, no. 1, pp. 149-152. (In Russian)
5. Kirpichnikova I.M. Scientific research results of the South-Ural State University in the field of renewable energy source application. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2014, no. 5 (145), pp. 54-57. (In Russian)
6. Solomin E.V. Kirpichnikova I.M. Martyanov A.S. [Iterative approach in development and enhancement of vertical wind-energy units. *Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika: sb. nauch. tr. VII mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrical engineering technology. Power engineering. Collection of scientific papers of VII international conference of young scientists. Novosibirsk State Technical University. EEE-2015], 2015. (In Russian)
7. Kirpichnikova I.M., Kozin A.A. Analysis of the group of vertical-axis wind turbines in the software package Matlab. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2014, no. 1(1), pp.43-46.
8. Kirpichnikova I.M., Rakhmatulin I.R. Laboratory investigation of a sun tracker using photo cells. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2013, no. 12 (134), pp. 10-14. (In Russian)
9. Kirpichnikova I.M., Chetoshnikov S.A. Modeling of a combined wind and solar energy unit. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2016, no. 7-8, pp. 25-31. (In Russian)
10. Kirpichnikova I.M., Topol'skaya I.G., Topol'skiy D.V. Characteristics of the theory of renewable energy sources development in Russia. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2014, no. 5(145), pp. 63-68. (In Russian)
11. Solomin E.V. Wind energy units of GRT-Vertikal. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2010, no. 1, pp. 10–15. (In Russian)
12. Kirpichnikova I.M., Solomin E.V. Wind energy unit with vertical axis of rotation. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Vestnik of YuUrGU. Series "Power engineering"], 2008, iss. 10, no. 26 (126), pp. 32–35. (In Russian)
13. ANSYS CFX Release 10.0 documentation. 2006.
14. Solomin E.V. *Metodologiya razrabotki i sozdaniya vertikalno-osevykh vetroener-geticheskikh ustanovok* [Development and design methodology of vertical wind energy units]. Chelyabinsk, Publishing center of YuUrGU, 2011, 324 p.
15. Kindryashov A.N., Mart'yanov A.S., Solomin E.V. Electrical machines of wind energy units with vertical axis of rotation. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2013, no. 01/2(118), pp. 59–62. (In Russian)
16. Solomin E.V., Sirotkin E.A., Kozlov S.V. Electro-Mechanical System of Emergency Braking for Wind Turbine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1 (3), pp. 19-23. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-19-23
17. Shimkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows* [Calculation of MSC/NASTRAN structures for Windows]. Moscow, DMK Press Publ., 2001.
18. *Tekhnicheskie usloviya na bezopasnost vetrosilovykh ustanovok* [Safety specifications of wind energy units]. Germanisher Lloyd.

Коробатов Д.В., Мартянов А.С., Бодрова Е.С., Четошников С.А. Исследование аэродинамических характеристик микроветроэнергетической установки // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 44-48. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-44-48

Korobatov D.V., Mart'yanov A.S., Bodrova E.S., Chetoshnikov S.A. Aerodynamic Study of Micro Wind Turbines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 44-48. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-44-48