

УДК 621.311.24

Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Е.Е. Соломин

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Исследования в области ветроэнергетики, проведенные в Южно-Уральском государственном университете, продемонстрировали высокие показатели выработки электроэнергии экспериментальными вертикально-осевыми конструкциями мощностным рядом 0,1–30 кВт. Методология ускоренной (кластерной) разработки экспериментальных образцов, разработанная в университете, предполагает итерационный подход с проектированием изделия помодульно. Причем инженерной разработке предшествует математическое моделирование компонентов модели, являющихся независимыми кластерами или модулями. Таким образом, разработанный метод является системным подходом при проектировании электромеханических конструкций и показал свои преимущества наряду с конкурентоспособностью изделий. При проведении исследований выявлен ряд преимуществ и недостатков, как процесса проектирования, так и непосредственно самих конструкций, что является неизбежным при создании экспериментальных образцов. Основные проблемы системного подхода заключаются в новизне кластерного подхода, напоминающего конвейер в производстве, когда разработка каждого кластера при плановом процессе не зависит от других кластеров, а интегральная математическая модель является совокупностью кластеров-модулей, функционирующих в одной системе. При этом разработчик вынужден соблюдать требования по входу и выходу данных, что несколько осложняет работу, но, с другой стороны, дисциплинирует исполнителя. Выявленными недостатками конструкции являются наличие дисбаланса вертикально-осевого ротора, излишняя масса рабочей части ветроэнергоустановки и сбой программного обеспечения регулятора мощности. В задачи дальнейших исследований входит: снижение массы рабочих органов, устранение дисбаланса ротора за счет динамической балансировки, совершенствование программы управления отбором мощности. Немаловажными отдельными направлениями исследований должны стать дальнейшее изучение лопастных материалов, эффективных виброгасителей мачты, аэродинамическое и электромеханическое регулирование частоты вращения.

Ключевые слова: ветроэнергетика, вертикально-осевая ветроэнергоустановка, гибридный ветросолнечный энергокомплекс.

E.V. Solomin, E.A. Sirotkin, E.E. Solomin

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

THE RESULTS OF TESTING AND OPERATION OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES

The research in wind power area adopted by South Ural State University, have demonstrated a high indicators of electric energy generation by 0.1-30 kW power family vertical axis wind turbines. The methodology of rapid (cluster) R&D of experimental prototypes, developed at the University, is worth the

systematic approach while designing the electromechanical components, showing their advantages as well as the competitiveness of components. The research showed both advantages and disadvantages of development process and the components design, which is normal under the R&D experimental prototyping stage. The main problems are the unbalance of vertical axis rotor, excessive mass of turbine operating part and non-stable operation of software for power controller. The tasks of further research include the reduction of working components mass, rotor unbalance removal by dynamic balancing, and improvement of power takeoff control software. The significant areas of research should be a further development of air foil materials, efficient vibration dampers, aerodynamic and electromechanical control of rotation frequency.

Keywords: wind energy, vertical axis wind turbine, hybrid wind-solar plant.

Введение. Ветроэнергетика является одной из быстро развивающихся отраслей мировой энергетической промышленности [1]. Особенно быстрый рост наблюдается в Китае и США [2]. Значительные достижения в этой области также за последние 5 лет показывают Индия, Бразилия, Румыния и ряд стран Африки [3]. В России ветроэнергетика пока не получила широкого развития по ряду причин (наличие крупных месторождений углеводородов, превалирующее развитие тяжелой промышленности и т.д.). Тем не менее, потребность в устройствах на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) ощущается во всех отраслях промышленности. Даже нефтегазовые корпорации вовлечены в разработки ВИЭ: ОАО «Газпром» исследует варианты применения ветроэнергоустановок (ВЭУ) для использования в насосном оборудовании, ОАО «ЛУКОЙЛ» заинтересован в организации автономного энергоснабжения запорочных станций с использованием ветросолнечных энергокомплексов. Ряд исследований в области ВИЭ проведен членами ракетно-космической корпорации. В частности, НИИ космического приборостроения исследовал варианты применения ВЭУ в арктических условиях для энергоснабжения аппаратуры ГЛОНАСС и GPS [4].

Бурное развитие ветроэнергетики традиционно происходит в основном в диапазоне мегаваттного класса с единичной мощностью 1–10 МВт, где применяются все последние достижения самолетостроения. Однако с экономической точки зрения этот подход неудачен [5]. Рассуждая о влиянии уровня мощности и/или массо-габаритных характеристик на себестоимость, необходимо отметить, что производство малых ветроустановок является более выгодным, чем крупных. Это утверждение поясняется следующим примером сравнения различных по мощности горизонтально-осевых (ГО) ВЭУ. Если взять 100 установок с диаметром 10 м и 1 установку с диаметром 100 м, то их совокупные ометаемые площади будут равны (соответственно $100\pi \cdot d^2 = \pi \cdot D^2$ или $100\pi \cdot 10^2 = \pi \cdot 100^2$).

Масса ротора находится в кубической зависимости от его диаметра. Соответственно масса роторов всех малых установок будет меньше массы ротора одной крупной установки ($100\text{-m} \sim 100d^3 = 10^5$ – порядок массы всех малых ВЭУ и $M \sim D^3 = 10^6$ – порядок массы крупной ВЭУ). Очевидно, что масса одной крупной ВЭУ на порядок выше, чем 10 малых ВЭУ, что определяет ее более высокую себестоимость. Однако при этом надо сказать, что удельные эксплуатационные расходы на обслуживание малых ВЭУ выше, чем, например, установок мегаваттного класса. Тем не менее, очевидно, что одним типоразмером невозможно «закрыть» все энергетические проблемы, поэтому необходимо смириться с существующим многообразием ВЭУ по аналогии, например, с автопромом.

Вертикально-осевые конструкции, работа которых основана на эффекте аэродинамической подъемной силы крыла, находятся среди перспективных направлений развития ветроиндустрии в связи со своими неоспоримыми достоинствами – независимостью работы от направления ветра, тихоходностью, высоким коэффициентом использования энергии ветра (коэффициентом мощности C_p) и низкими уровнями механических и аэродинамических шумов [6]. Однако отсутствие стройных теорий расчета компонентов и очевидные недостатки в массогабаритных характеристиках, а также дисбаланс серьезно сдерживают развитие этого относительно нового направления в ветроэнергетике [7].

В ходе проведения научно-исследовательских работ и частичных опытно-конструкторских разработок были получены следующие результаты в виде экспериментальных образцов вертикально-осевых ВЭУ (ВО ВЭУ) и автономно-сетевых гибридных ветросолнечных комплексов (рис. 1–4).

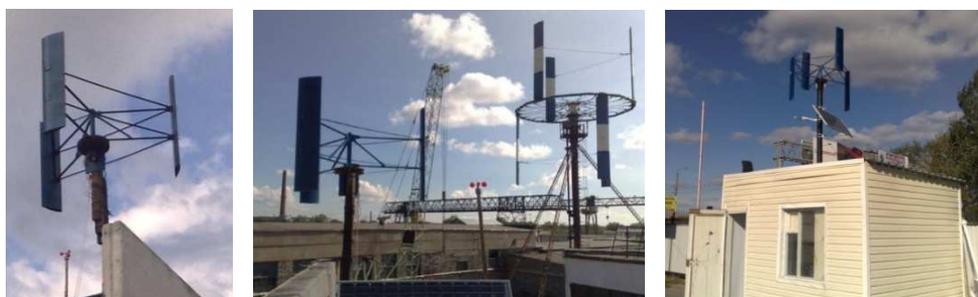


Рис. 1. Трех- и четырехлопастные одноярусные и двухъярусные микро-ВЭУ номинальной мощностью 0,1–0,5 кВт и гибридные энергокомплексы (0,2–0,6 кВт)



Рис. 2. Трех-, четырех- и девятилопастные многоярусные микро-ВЭУ мощностью 1 кВт



Рис. 3. Четырех- и шестилопастные двухъярусные ВЭУ мощностью 3 кВт с размещением на парковках, зданиях и инженерных сооружениях (морской буй)



Рис. 4. Шестилопастная ВЭУ мощностью 30 кВт в составе ветродизельного комплекса общей мощностью 90 кВт

Краткая характеристика разработанных изделий: это ветроэнергетические установки с вертикальной осью вращения. Ротор типа «Дарье», одно- или многоярусный. Работа ротора основана на создании крутящего момента за счет аэродинамических (подъемных) сил. Лопасты сделаны из армированного стеклопластика с изготовлением опорного фланца и механизации крыла за одну формовку. Ограничение частоты вращения по верхнему пределу осуществляется за счет аэродинамического регулирования центробежными горизонтальными обтекателями, расположенными на траверсах. Генератор синхронный (вентильный) на постоянных магнитах NeFeB, отбор мощности производится на основе регулирования максимальной мощности за счет управления быстроходностью, инвертор покупной. Гибридные ветросолнечные комплексы укомплектованы солнечными модулями номинальной мощностью 100–300 Вт и гибридной системой управления энергопотоками.

Типовая схема наиболее востребованной двухъярусной шестилопастной ветроэнергоустановки приведена на рис. 5.

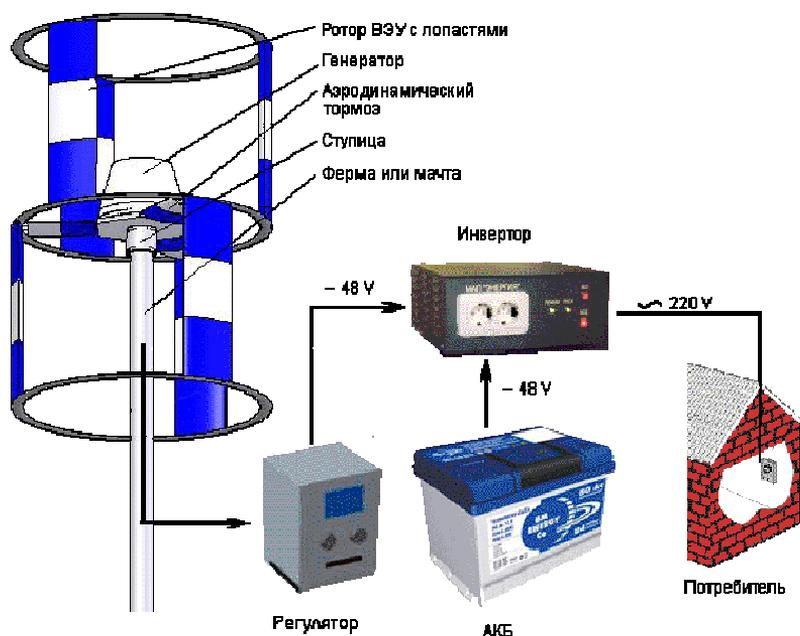


Рис. 5. Базовая схема ветроэнергетической установки

В процессе проведения глубоких научно-исследовательских работ по разработке экспериментальных образцов и их опытной эксплуатации был выявлен ряд преимуществ и недостатков конструкций.

Выявленные преимущества:

- работа ВЭУ не зависит от направления ветра;
- старт при малых ветрах до 2 м/с;
- начало выработки электроэнергии при скорости ветра с 3 м/с;
- низкий уровень шумов (в сравнении с аналогами);
- наличие аэродинамической стабилизации (ограничения) частоты вращения.

Выявленные недостатки:

– наличие ряда резонансов собственных тонов колебаний и дисбаланса ротора (возможные причины: заводской брак, отсутствие овальности несущих колец, отклонение лопастей от вертикали, наличие неоднородностей в материале комплектующих);

– лопасти могут разрушаться в местах крепления к несущей конструкции за счет знакопеременных колебаний;

– аэродинамические регуляторы работают не синхронно, за счет чего появляется дополнительный дисбаланс ротора;

– система механического торможения не эффективна;

– масса комплектующих слишком завышена в связи с проведенными расчетами на буревую скорость ветра 60 м/с;

– стоимость инверторов высока в связи с малыми объемами потребления.

В период 2010–2014 гг. была проанализирована себестоимость комплектующих наиболее востребованной по данным маркетологов экспериментальной ВЭУ-3 мощностью 3 кВт (в ценах тех же лет) с учетом выполненных работ и оказанных услуг (базовая типовая комплектация) (табл. 1).

Таблица 1

Себестоимость комплектующих экспериментальной ВЭУ

Компонент	Количество в комплекте	Цена за ед., руб	Цена за комплект, руб
Лопасть	4–6	2500	4500–6000
Ступица	1	21 000	21 000
Кольцо несущее	1	14 000	14 000
Аэродинамические регуляторы	3	7000	21 000
Обтекатели	3	1500	4500

Окончание табл. 1

Компонент	Количество в комплекте	Цена за ед., руб	Цена за комплект, руб
Стяжки ротора	15	300	4500
Генератор	1	110 000	110 000
Мачта 12 м	1	50 000	50 000
Регулятор мощности	1	26 000	26 000
Аккумуляторные батареи 55-200 А-ч	–	–	–
Инвертор	1	35 000–75 000	35 000–75 000
ИТОГО:			290 000–330 000

Основные характеристики наиболее востребованных ВЭУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики экспериментальных ВЭУ

ВЭУ	ВЭУ-0,5 (0,5 кВт, 3 лопасти)	ВЭУ-3(6) (3 кВт, 6 лопастей)
Генерация электроэнергии, кВт-ч в месяц на скорости ветра (ориентировочно):	кВт-ч в месяц	кВт-ч в месяц
– 4 м/с (9 миль/с или 14 км/ч)	34	180
– 5 м/с (11 миль/с или 18 км/ч)	64	360
– 6 м/с (13 миль/с или 21 км/ч)	122	540
– 8 м/с (18 миль/с или 28 км/ч)	272	1152
– 11 м/с (24 миль/с или 40 км/ч)	440	2376
Диаметр ротора, м	2,0	3,4
Высота ротора, м	1,5	4,0
Количество лопастей	3–4	3–4–6
Материал лопастей	усиленный стеклопластик	усиленный стеклопластик
Номинальная мощность, Вт	500	3000
Номинальная скорость ветра, м/с	11	11
Скорость ветра стартовая, м/с	1,5	2,0
Выходное напряжение, В пост.тока	24VDC	48VDC
Аэродинамическое регулирование	нет	да
Шум в 50 м от ВЭУ на скорости ветра 8 м/с	20–30 dB(A)	20–45 dB(A)
Защита от бурового ветра	–	аэродинамическое регулирование
Генератор	магниты NeFB	магниты NeFB
Масса ротора, кг	55	250
Мачта (с растяжками), м	0–2	12–16–20

Результатом разработок явился мощностной ряд вертикально-осевых ветроэнергоустановок 0,1–30 кВт, а результатом проведенных исследований стали вышеуказанные достоинства и недостатки, которые выявили новые задачи, обозначенные ниже.

Решения конструкторских проблем тесно связаны с исследованием экономических показателей. Ниже приведены задачи, которые предстоит решить помодульно с учетом соответствующих технико-экономических требований и принятием соответствующих мер безопасности.

Модуль: ротор (рис. 6). Задача – снизить массу изделия с сохранением или увеличением прочности.



Рис. 6. Ротор и ступица ВЭУ-3

Возможные материалы и технологии исполнения:

- облегчение ступицы;
- аэродинамическое регулирование лопастей;
- создание несущей конструкции в виде кольца или шестигранника;
- исключение всех возможных растяжек для снижения сопротивления;
- замена горизонтальных траверс с аэродинамическими регуляторами и обтекателями на траверсы овальной (аэродинамической) формы в сечении;
- создание кожуха генератора в виде овальной формы;

– сглаживание поверхности всех выступающих элементов для исключения ультразвука.

Модуль: генератор (рис. 7). Задача – снизить массу и себестоимость.

Возможные варианты и технологии исполнения:

- тихоходный синхронный (вентильный) генератор с осевым (аксиальным) зазором (дорогой в связи с высокой стоимостью магнитов);
- асинхронизированный синхронный генератор;
- тихоходный синхронный (вентильный) генератор с радиальным зазором;
- быстроходный синхронный (вентильный) генератор с мультипликатором (планетарный редуктор, редуктор на вихревых токах Фуко и т.д.).
- доработать кожух генератора в части охлаждения и фильтрации подаваемого воздуха.



Рис. 7. Генератор ВЭУ (схема, внешний вид и вид якорной обмотки)

Модуль – регулятор мощности ВЭУ. Задача – улучшение программного обеспечения. Возможные варианты и технологии покомпонентного исполнения:

- система интеллектуального отбора мощности от ВЭУ;
- система заряда-разряда аккумуляторных батарей;
- интеллектуальная система определения параметров локальной сети;
- система стохастического анализа и прогнозирования.

Модуль: регулятор мощности гибридного ветросолнечного комплекса. Задача – улучшение программного обеспечения. Возможные варианты и технологии функционального исполнения:

- система интеллектуального отбора мощности от ВЭУ;

- система интеллектуального отбора мощности от СМ;
- система заряда-разряда аккумуляторных батарей;
- интеллектуальная система определения параметров локальной сети (опционально);
- система стохастического анализа и прогнозирования (опционально);

Основы регулирования. При расчете ветроэнергоустановки мощность ветрового потока, проходящего через площадь ометания ветроколеса, вычисляется по формуле [8]:

$$P = C_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V^3, \quad (1)$$

где P – мощность, Вт; ρ – плотность воздуха, $1,23 \text{ кг/м}^3$; S – площадь ометания ротора м^2 ; V – скорость ветра, м/с.

Главная аэродинамическая характеристика: график коэффициента мощности C_p от быстроходности Z (отношение линейной скорости лопасти к скорости ветра) для ВЭУ-3(6) приведен на рис. 7. Линейная скорость лопасти выше скорости ветра (в данном случае в 2,1 раза).

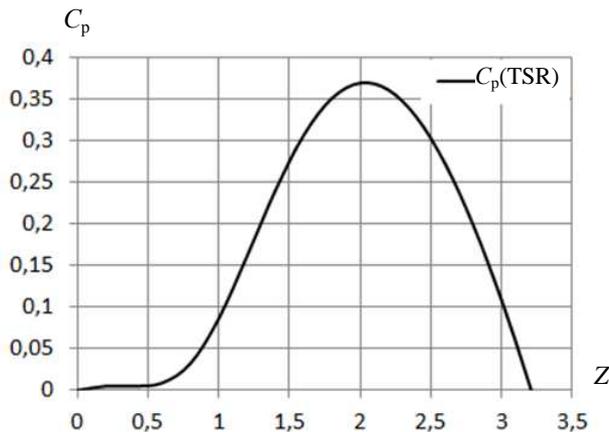


Рис. 7. График зависимости коэффициента мощности C_p (коэффициента использования энергии ветра КИЭВ) от быстроходности Z

Задача регулирования заключается в поддержании максимального C_p (а значит, оптимальной быстроходности Z) за счет нагружения-разгружения генератора с помощью нагрузки.

Схема соединений ВЭУ-3(6) показана упрощенно (рис. 8).

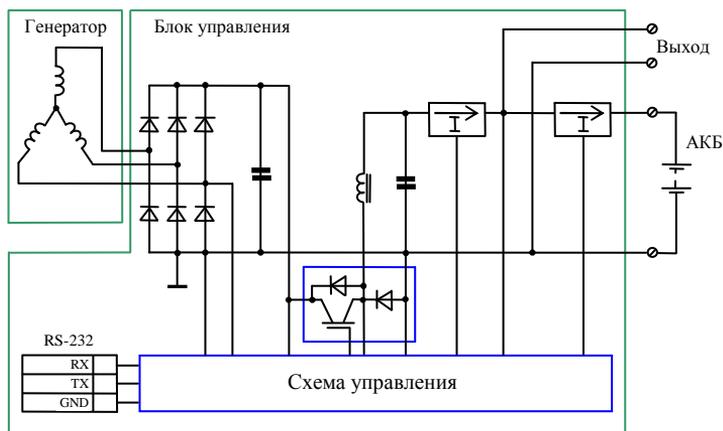


Рис. 8. Схема соединений ВЭУ, упрощенная

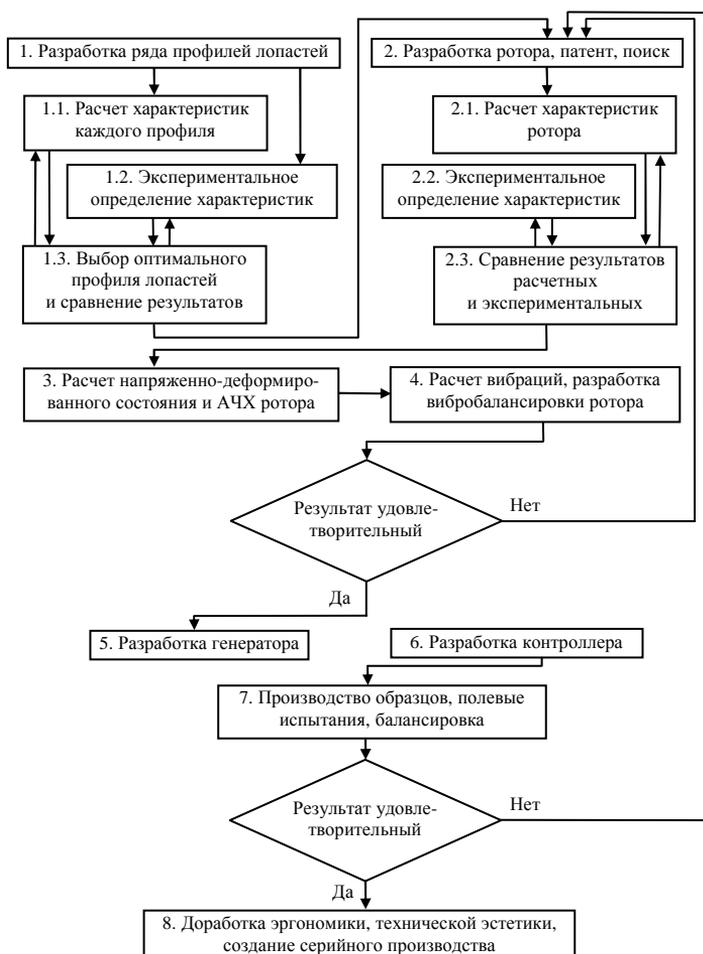


Рис. 9. Структурная схема методологии разработки компонентов ВО ВЭУ

Заключение. На схеме методологии разработки компонентов ВО ВЭУ (рис. 9) наглядно демонстрируется, каким образом происходит отбор лучших моделей и идей для совершенствования ВЭУ и внедрения новых комплектующих в конструкцию [9, 10].

Библиографический список

1. Solomin E.V. State of World Wind Industry Development // Альтернативная энергетика и экология. – Саров, 2014. – № 1(1). – С. 22–26.
2. Гусев А.Л., Соломин Е.В. Ветроэнергетика Китая (краткий обзор) // Альтернативная энергетика и экология. – Саров, 2014. – № 17 (157). – С. 10–23.
3. Состояние развития мировой ветроиндустрии / Е.А. Сироткин, Е.В. Соломин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – Саров, 2014. – № 05 (145). – С. 20–25.
4. Автономное энергоснабжение объектов Крайнего Севера / Н.А. Павлов, Д.С. Рогачев, А.В. Сеницкий, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – Саров, 2015. – № 10(174). – С. 75–83. DOI: 10.15518 / isjaee.2015.10.007.
5. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии / пер. с англ. под ред. В.А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 195–242.
6. Рензо Д. Ветроэнергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – С. 4–35.
7. Состояние малой ветроэнергетики в мире / Е.А. Сироткин, Е.В. Соломин [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – Саров, 2014. – № 05 (145). – С. 26–31.
8. Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.). Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов / Ин-т устойчивого развития Общественной палаты РФ; Центр экологической политики России. – М., 2011. – 74 с.
9. Соломин Е.В. Итерационная оптимизация параметров и режимов работы вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – Челябинск, 2011. – Вып. 15(232). – С. 73–81.
10. Соломин Е.В. Методология разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок: монография. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 324 с.

References

1. Solomin E.V. State of World Wind Industry Development. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya*. Sarov, 2014, no. 1(1), pp. 22-26.
2. Gusev A.L., Solomin E.V. Vetroenergetika Kitaia (kratkii obzor) [China wind power (an overview)]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya*. Sarov, 2014, no. 17 (157), pp. 10-23.
3. Sirotkin E.A., Solomin E.V. [et al.]. Sostoianie razvitiia mirovoi vetroindustrii [Status of the global wind power]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya*. Sarov, 2014, no. 05 (145), pp. 20-25.
4. Pavlov N.A., Rogachev D.S., Sinitskii A.V., Solomin E.V. Avtonomnoe energosnabzhenie ob"ektov Krainego Severa [Independent power supply facilities of the Far North]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya*. Sarov, 2015, no. 10(174), pp. 75-83. DOI: 10.15518 / isj.2015.10.007
5. Tvaidel Dzh., Ueir A. Vozobnovliaemye istochniki energii [Renewable Energy Resources]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. pp. 195-242.
6. Renzo D. Vetroenergetika [Wind power]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, pp. 4-3.
7. Sirotkin E.A., Solomin E.V. [et al.]. Sostoianie maloi vetroenergetiki v mire [The condition of small wind power in the world]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya*. Sarov, 2014, no. 05 (145), pp. 26-31.
8. Bezrukikh P.P., Bezrukikh P.P. (ml.). Vetroenergetika. Vymysly i fakty. Otvery na 100 voprosov [Wind power. Fictions and facts. Answers to 100 questions]. *Institut ustoychivogo razvitiia Obshchestvennoi palaty Rossiiskoi Federatsii; Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii*. Moscow, 2011. 74 p.
9. Solomin E.V. Iteratsionnaia optimizatsiia parametrov i rezhimov raboty vertikal'no-osevykh vetroenergeticheskikh ustanovok [The iterative optimization of parameters and operating modes of the vertical-axis wind turbines]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*. Cheliabinsk, 2011, iss. 15(232), pp. 73-81.
10. Solomin E.V. Metodologiya razrabotki i sozdaniia vertikal'no-osevykh vetroenergeticheskikh ustanovok: monografiia [The methodology of development and creation of vertical-axis wind turbines]. Cheliabinsk: Iuzhno-Ural'skii gosudarstvennyi universitet, 2011. 324 p.

Сведения об авторах

Соломин Евгений Викторович (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, профессор, доцент кафедры электротехники и возобновляемых источников энергии Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: evsolomin@inbox.ru).

Сироткин Евгений Анатольевич (Челябинск, Россия) – магистрант кафедры электротехники и возобновляемых источников энергии Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: ea.sirotkin@gmail.com).

Соломин Евгений Евгеньевич (Челябинск, Россия) – студент Южно-Уральского государственного университета (454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: E.Solomin@bk.ru).

About the authors

Solomin Evgeny Viktorovich (Chelyabinsk, Russian Federation) Professor of “Electric Engineering and Renewable Energy Sources” Department, Doctor of Technical Science, Ph.D. South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Lenin prospect 76, e-mail: evsolomin@inbox.ru).

Sirotkin Evgeny Anatolyevich (Chelyabinsk, Russian Federation) Undergraduate South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Lenin prospect 76, e-mail: ea.sirotkin@gmail.com).

Solomin Evgeny Evgenyevich (Chelyabinsk, Russian Federation) Graduate specialist South Ural state University (454080, Chelyabinsk, Lenin prospect 76, e-mail: E.Solomin@bk.ru).

Получено 06.07.2015