

УДК 621.311.24

РАСЧЕТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКЕ

Голдаев Сергей Васильевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: SVGoldaev@tpu.ru.

Радюк Карина Нуржановна,

аспирант кафедры теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института, ассистент кафедры транспорта и хранения нефти и газа Института природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: radyuk@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена несовершенством существующих методик прогнозирования характеристик ветроэнергетических установок.

Цель исследования: совершенствование существующей методики расчета производительности ветроэнергетической установки большой мощности, проведение параметрического анализа, сравнение полученных результатов с приведенными ранее другими авторами.

Методы. В усовершенствованной методике расчета с помощью критерия Пирсона проводится проверка статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла–Гнеденко. Параметры распределения находятся путем численного решения трансцендентного уравнения с определением значений гамма-функции по интерполяционной формуле. Значения рабочей характеристики неполной гамма-функции определены численным интегрированием по формуле Уэддла. Методика автоматизирована на Турбо Паскале.

Результаты. Представлены результаты расчета характеристик ветроэнергетической установки, полученных на основе усовершенствования участков методики, касающихся проверки с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла–Гнеденко, точного вычисления значений гамма-функции и неполной гамма-функции. Сравнение результатов расчета по предлагаемой методике с полученными другими авторами выявило существенные различия в значениях выборочной дисперсии и эмпирического критерия Пирсона. Проведен анализ влияния на производительность ветроэнергетических установок начальной и максимальной скорости ветра.

Выводы. Функция Вейбулла–Гнеденко может быть использована для описания характеристик ветра в пунктах с умеренными и сильными ветрами. Варьирование скорости ветра в диапазоне возможных скоростей не влияет на среднее значение рабочей характеристики и производительности ветроэнергетических установок. Повышение максимальной скорости ветра приводит к значительному увеличению данных параметров. Усовершенствованная методика расчета производительности ветроэнергетических установок большой мощности может быть использована в проектных организациях и учебном процессе.

Ключевые слова:

Ветроэнергетическая установка, скорость ветра, стандартная высота флюгера, электрическая мощность, средняя производительность, рабочая характеристика, выборочная дисперсия, функция распределения Вейбулла–Гнеденко, плотность воздуха, критерий согласия Пирсона, гамма-функция.

Введение

Повышение цен на органическое топливо, освоение северных и арктических регионов, интенсификация сельскохозяйственного производства, развитие индивидуального строительства стимулируют использование в системах тепло- и электроснабжения небольших объектов возобновляемых источников энергии, в частности, ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1–3].

Все большее распространение получают автономные гибридные системы электро- и теплоснабжения. Так, в работе [4] описан опыт создания и эксплуатации энергоэффективных зданий в г. Барнауле, электроснабжение одного из них осуществляется гибридной системой, использующей в качестве источников электроэнергии ветроэлектрический агрегат, фотоэлектрическую установку и две дизель-электрические установки.

В России, согласно государственной программе «Энергоэффективность и развитие энергетики», доля ветроэлектростанций на 2020 г. должна составить 61 % от общего числа энергоустановок, работающих на возобновляемых источниках энергии (солнечные электростанции – 26 %, малые гидроэлектростанции – 13 %). Установленная мощность вводимых ветроэлектростанций за период с 2015–2020 гг. должна увеличиться с 250 до 1000 МВт [5].

Как отмечено в работе [6], успешное развитие ветроэнергетики зависит от решения трех основных проблем: выявления энергетической ценности ветра в рассматриваемом регионе и наиболее благоприятных мест для установки ВЭУ, создания высокоэффективных ВЭУ, определения их функций в энергетике региона.

Для выбора наиболее эффективной по своим энергетическим параметрам ВЭУ, удовлетворяющей требованиям надежности, необходимо учитывать особенности окружающей местности, время года [7]. Влияние отмеченных факторов следует проанализировать на стадии проектирования, применяя методику прогнозирования производительности ВЭУ.

Существующие методики расчета производительности ВЭУ преимущественно используют функцию распределения Вейбулла–Гнеденко для аппроксимации результатов измерений скорости ветра. В работе [8] рассмотрена достаточно простая методика расчета производительности ВЭУ, однако не сказано, каким образом она была реализована, хотя в ней использовались специальные функции, трансцендентные уравнения.

В публикации [9] описана автоматизированная методика рационального выбора ВЭУ малой мощности для систем автономного электроснабжения, позволяющая удовлетворить потребителя по отношению цена/качество. В ней отсутствует блок проверки статистической гипотезы о применимости распределения Вейбулла–Гнеденко, поэтому для расчета параметров k и c не привлекается трансцендентное уравнение, содержащее гамма-функцию.

Методика расчета

Опишем вариант усовершенствованной методики расчета производительности ВЭУ [8], в которой привлечены численные методы и их автоматизация на Турбо Паскале, осуществлено сравнение полученных результатов с приведенными в [8].

В зависимости от скорости ветра U , электрическая мощность, вырабатываемая ВЭУ с номинальной мощностью, равна:

$$N(U) = N_{nm} \varphi(U). \quad (1)$$

Входящий в выражение (1) сомножитель $\varphi(U)$ называется рабочей характеристикой ВЭУ. Для установок с постоянной частотой вращения ветроколеса в номинальном режиме применима аппроксимация:

$$\varphi(U) = \begin{cases} 0, & U < U_0 \\ (U / U_0^3), & U_0 < U \leq U_{nm} \\ 1, & U_{nm} < U \leq U_{mx} \\ 0, & U > U_{mx}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь U_0 – начальная скорость, при которой ветроколесо приводится во вращение; U_{nm} – номинальная скорость ВЭУ; U_{mx} – максимальная скорость, при которой ВЭУ выводится из рабочего режима. Например, в работе [10] использовалась ВЭУ Wincon-200. Среднегодовая скорость ветра на площадке на высоте оси ветроколеса ВЭУ составляла около 6,0 м/с. При достижении U_0 значения 4,5 м/с и сохранении этой скорости в течение более минуты управляющий контролер подавал сигнал на пуск ВЭУ. Максимальная мощность уста-

новки достигалась при скорости ветра 14 м/с. Когда $U_{mx} > 25$ м/с ВЭУ автоматически останавливалась во избежание поломки. Если скорость ветра была ниже 20 м/с снова происходил пуск ВЭУ.

Экспериментальные данные по U , входящей в (2), обобщены с использованием функции распределения Вейбулла–Гнеденко [7, 11], предложенной для описания отказов механических систем в начальный период эксплуатации, расчета их долговечности [12, 13]:

$$F(U) = 1 - \exp[-(U / c)^k], \quad (3)$$

где k – параметр формы, а c – параметр, близкий к средней скорости ветра U_c , значение которой можно найти по формуле:

$$U_c = c \Gamma(1 + 1/k). \quad (4)$$

В работе [6] приведена аппроксимационная зависимость для $F(U)$, предложенная Г.А. Гриневичем, которая содержит четыре параметра.

Средняя удельная мощность ветрового потока (мощность, отнесенная к единице площади ветроколеса):

$$P_{0c} = 0,5 \rho c^3 \Gamma(1 + 3/k), \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, равная 1,2 кг/м³; $\Gamma(x)$ – гамма-функция [14], определяемая так:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) t^{x-1} dt.$$

С целью обеспечения реализации описанного алгоритма на Турбо Паскале для вычисления $\Gamma(x)$ выбрано интерполяционное выражение, имеющее погрешность менее 10^{-4} при значениях $x < 60$ [14]:

$$\Gamma(x) \cong \frac{\sqrt{(2\pi / y)} \exp\{y[\ln(y) - 1] + 1/(12y)\}}{x(x+1)(x+2)(x+3)(x+4)(x+5)},$$

где $y = x + 6$.

Такой подход был использован в ходе автоматизации расчета показателей надежности объектов, подчиняющихся распределению Вейбулла–Гнеденко [15].

Номинальная мощность выбранной ВЭУ должна примерно соответствовать значению:

$$P_{nm} \approx \eta_p \eta_g C_p S P_{0c}, \quad (6)$$

где S – площадь ветроколеса; $\eta_p = 0,9$ – КПД ротора ветроколеса; $\eta_g = 0,95$ – КПД электрогенератора; $C_p = 0,45$ – коэффициент мощности, учитывающей долю получаемой ветродвигателем мощности ветрового потока, найденной по формуле (5).

Метеослужбы регистрируют параметры ветра на стандартной высоте флюгера $h_f = 10$ м. Оси ветроколес современных ВЭУ находятся на высоте от 10 до 100 м [7, 8]. Для определения средней скорости ветра на этих высотах часто используется приближенная формула [7]:

$$U_{hc} = U_{fc} (h / h_f)^b, \quad (7)$$

где U_{fc} – средняя скорость ветра на высоте флюгера; параметр $b = 1/7 = 0,143$ для открытых мест.

Как отмечено в [7], значения b различны в разное время года и даже в течение одного дня, поэтому формулой (7) следует пользоваться очень осмотрительно, особенно для высот $z > 50$ м.

Средняя производительность ВЭУ за период времени T составляет:

$$W_c = \varphi_c N_{nm} T, \quad (8)$$

где φ_c – среднее значение рабочей характеристики, имеющей смысл коэффициента располагаемой мощности ВЭУ [8]. При использовании функции распределения (3):

$$\varphi_c = (c/U_{nm})^3 [\gamma(a, U_{nm}) - \gamma(a, U_0)] + \exp[-(U_{nm}/c)^3] - \exp[-(U_{mx}/c)^3]. \quad (9)$$

Здесь $a=1+3/k$, $\gamma(a, x)$ – неполная гамма-функция [12], представляющая определенный интеграл:

$$\gamma(a, x) = \int_0^x \exp(-t) t^{a-1} dt.$$

Для нахождения значений $\gamma(a, x)$ в настоящей работе применялся численный метод интегрирования по формуле Уэддла, обеспечивающий высокую точность [16]. При этом использовалось только семь значений подынтегральной функции [17]. Тестирование выбранного алгоритма путем сравнения определенных значений $\gamma(a, x)$ с табличными подтвердило его эффективность.

Таким образом, расчет производительности ВЭУ сводится к определению по формуле (9) φ_c , т. е. к статистической оценке параметров функции Вейбулла–Гнеденко k и c при заданных скоростях U_0 , U_{nm} и U_{mx} выбранной ВЭУ.

Результаты многолетних измерений скорости ветра в данной местности для каждого месяца и в целом за год приводятся в виде таблиц, в которых для каждого интервала, на которые разбит весь промежуток изменения U , даются относительные частоты попадания скорости в данный интервал, выраженные в процентах.

Методика обработки статистических данных

Опишем участок алгоритма, в котором излагается методика обработки статистических данных [8]. Обозначим n число измерений скорости ветра за данный период, принимаемое равным 100, что является средним за много лет наблюдений; m – число интервалов для скорости ветра; U_{li} и U_{2i} – левая и правая границы i -го интервала; U_{ci} – середина i -го интервала; n_i – частота попадания скорости ветра в i -й интервал; $w_i = n_i/n$ – относительная частота.

Выборочные средняя скорость ветра и дисперсия вычисляются по известным формулам [8, 12]:

$$U_{bc} = \sum_{i=1}^m w_i U_i, \quad D_b = \sum_{i=1}^m w_i (U_i - U_{bc})^2. \quad (10)$$

Приравняв U_{bc} и D_b из (10) математическому ожиданию и дисперсии распределения Вейбул-

ла–Гнеденко, получено трансцендентное уравнение относительно параметра k [8]:

$$f(k) = \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) / \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) - \frac{D_b}{U_{bc}^2} - 1 = 0. \quad (11)$$

Решение его было осуществлено методом бисекции. Затем по формуле (4) вычислялся параметр c :

$$c = U_{bc} / \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right). \quad (12)$$

Далее с помощью критерия согласия Пирсона выполнялась проверка гипотезы о том, что использованные результаты измерения скорости ветра согласуются с функцией распределения Вейбулла–Гнеденко.

Наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона вычисляется так [12]:

$$\chi_n^2 = n \sum_{i=1}^m (w_i - p_i)^2 / p_i, \quad (13)$$

где p_i – вероятность попадания скорости ветра в i -й интервал [8, 18]:

$$p_i = \begin{cases} F(U_{2i}) - F(U_{1i}), & i = 1, 2, \dots, m-1 \\ 1 - F(U_{1i}), & i = m. \end{cases} \quad (14)$$

При использовании критерия Пирсона число степеней свободы подсчитывается по формуле $k_c = s - 1 - r$, где s – число разрядов; r – число параметров, оцениваемых по выборке [12].

Для обеспечения автоматизации проверки гипотезы в работе [19] вместо табличных значений критических точек [12] распределения χ_p^2 была использована упрощенная аппроксимация Корниша–Фишера, обладающая достаточной точностью и справедливая для произвольного значения числа степеней свободы [19]:

$$\chi_p^2(k) = k + u_p \sqrt{2k} + \frac{2u_p(u_p - 1)}{3} + \frac{u_p(u_p - 7)}{9\sqrt{2k}}. \quad (15)$$

Квантиль уровня стандартного нормального распределения u_p , входящий в (15), находился по следующей формуле [20]:

$$u_p = 4,91[(1 - p)^{0,14} - p^{0,14}], \quad (16)$$

с относительной погрешностью менее 0,03 %.

Если в ходе расчета эмпирическое значение χ_n^2 , вычисленное по формулам (13) и (14), оказывается меньше теоретического значения χ_p^2 , то считается подтвержденной выдвинутая гипотеза.

Результаты расчетов. Выводы

Тестирование программы на Турбо Паскале проверки гипотезы о распределении Вейбулла–Гнеденко по критерию Пирсона осуществлялось решением примеров, рассмотренных в пособии [12].

В табл. 1 приведены результаты расчетов параметров: U_{bc} , D_b , c , χ_n^2 и χ_p^2 по формулам (10), (12), (13) и (15), k – из уравнения (11), (вторая строка) и представленные в работе [8] (третья строка).

Таблица 1. Результаты расчетов**Table 1.** Results of calculation

U_{bc}	D_b	k	c	χ_n^2	χ_p^2
10,452	59,09	1,38	11,442	7,73	26,09
10,453	43,63	1,62	11,672	2,57	26,22

Различие в значениях D_b и χ_n^2 обусловлено, вероятно, небрежностью проведения расчетов, допущенной в работе [8]. При $D_b=59,09$ из решения трансцендентного уравнения (11) получено значение $k=1,38$. Несущественное отличие в значениях χ_p^2 подтверждает применимость аппроксимаций (15) и (16).

Поскольку $\chi_n^2 < \chi_p^2$, то функция Вейбулла–Гнеденко может быть использована для описания характеристик ветра в пунктах с умеренными и сильными ветрами.

Расчет для высоты $h=40$ м показал следующее: $U_c=12,74$ м/с; $c=14$, 23 м/с; $U_{mx}=23,35$ м/с. Тогда условия эффективной ВЭУ приняли вид [5]:

$$\begin{cases} U_0 < 12,74 \text{ м/с}; 12,74 \text{ м/с} < U_n \leq 23,35 \text{ м/с}; \\ U_{mx} > U_{nm}; P_{nm} \approx 0,18d^2U_{nm}^3. \end{cases}$$

Для оценки выбраны параметры, характерные для современных ВЭУ: $U_0=3$ м/с; $U_{nm}=16$ м/с; $U_{mx}=25$ м/с; $d=50$ м. Тогда номинальная мощность ВЭУ по формуле (6) равна 1,84 МВт, а коэффициент использования располагаемой мощности $\phi_c=0,505$, т. е. при использовании данной ВЭУ можно за год получить 50,5 % от ее установленной мощности [8]. В этой работе отсутствует информация о том, как вычислялись полная и неполная гамма-функции.

Расчет с помощью разработанной программы показал, что $\phi_c=0,270$, следовательно, и средняя производительность ВЭУ, найденная по формуле (8), за период времени T будет примерно в два раза меньше, чем в [8].

Результаты параметрического анализа представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Влияние на производительность ВЭУ начальной скорости ветра, при которой начинает вращаться колесо**Table 2.** Influence of initial wind speed, at which the wheel starts running, on wind turbines performance

U_0 , м/с	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
ϕ_c	0,270	0,270	0,269	0,270	0,269
P_c , МВт	0,502	0,502	0,502	0,501	0,499

Таблица 3. Влияние на производительность ВЭУ максимальной скорости ветра, при которой установка выводится из рабочего режима**Table 3.** Influence of maximum wind speed, at which the unit is out of operating condition, on wind turbines performance

U_{mx} , м/с	21,0	23,0	25,0	27,0	29,0
ϕ_c	0,232	0,253	0,270	0,284	0,296
P_c , МВт	0,430	0,469	0,502	0,528	0,549

Как видно из полученных результатов, варьирование U_0 в диапазоне возможных скоростей, практически не влияет на значения ϕ_c и P_c . Напротив, повышение U_{mx} от 21 до 29 м/с привело к увеличению ϕ_c от 0,232 до 0,296, а P_c от 0,43 до 0,55 МВт.

Таким образом, усовершенствована и автоматизирована методика расчета производительности ветроэнергетической установки большой мощности, упрощающая проведение параметрического анализа. В ней с помощью критерия Пирсона осуществляется проверка статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла–Гнеденко, находят параметры распределения путем численного решения трансцендентного уравнения с определением значений гамма-функции по интерполяционной формуле; в ходе вычисления среднего значения рабочей характеристики значения неполной гамма-функции находятся численным интегрированием по формуле Уэддла. Вся методика или ее части могут быть использованы в проектных организациях и учебном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 458 с.
2. Wind power in power systems / ed. by T. Ackermann. – Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2012. – 1049 p.
3. Mukund R. Patel. Wind and solar power. – Washington D.C., CRC Press, 2006. – 448 p.
4. Федянин В.Я., Шарипов Н.Б. Возможности использования возобновляемых источников энергии для повышения эффективности систем теплоснабжения зданий в условиях юга Западной Сибири // Ползуновский вестник. – 2014. – № 1. – С. 202–206.
5. Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – С. 4–13.
6. Минин В.А., Степанов И.Р. Ветроэнергетический кадастр Европейского Севера СССР // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 1. – С. 106–114.
7. Twidell J., Weir T. Renewable energy resources. – New York, Taylor & Francis, 2006. – 601 p.
8. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Выбор ветроэнергетической установки и оценка ее производительности // Изв. вузов: Проблемы энергетики. – 2005. – № 11–12. – С. 48–52.
9. Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. – 2011. – № 2. – С. 25–30.
10. Минин В.А., Дмитриев Г.С. Опыт монтажа и эксплуатации сетевой ветроэнергетической установки около г. Мурманска // Электрические станции. – 2004. – № 2. – С. 71–73.
11. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind energy explained: theory, design and application. – Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2008. – 577 p.
12. Кузнецов Н.Л. Сборник задач по надежности электрических машин. – М.: ИД МЭИ, 2008. – 408 с.
13. Голдаев С.В. Примеры и задачи по надежности систем теплоснабжения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 172 с.

14. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица, И. Стигана. – М.: Наука, 1979. – 818 с.
15. Голдаев С.В., Коровина А.М., Радюк К.Н. Автоматизация расчета показателей надежности объектов, подчиняющихся распределению Вейбулла–Гнеденко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. XVI Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 333–335.
16. Голдаев С.В. Математическое моделирование и расчеты теплотехнических систем на ЭВМ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 188 с.
17. Крылов В.И., Шульгина Л.Т. Справочная книга по численному интегрированию. – М.: Физматлит, 1966. – 372 с.
18. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Оценка производительности ветроэнергетической установки с помощью функции распределения Вейбулла // Изв. вузов: Проблемы энергетики. – 2006. – № 11–12. – С. 76–79.
19. Голдаев С.В., Радюк К.Н. Проверка с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Вейбулла–Гнеденко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. XX Всеросс. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 127–130.
20. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

Поступила 13.03.2015 г.

UDC 621.311.24

CALCULATING THE PERFORMANCE OF HIGH-POWER WIND TURBINE BY THE IMPROVED METHODOLOGY

Sergey V. Goldaev,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: SVGoldaev@tpu.ru

Karina N. Radyuk,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: radyuk@tpu.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the imperfection of existing methodology of predicting the characteristics of wind turbines.

The main aim of the study is to improve the existing methodology of calculating the performance of the high-power wind turbine, parametric analysis, comparing the results with those given by other authors.

Methods. In the improved methodology of calculation using Pearson's chi-squared test the statistical hypothesis on the distribution of the general totality of air velocities by Weibull–Gnedenko is tested. The distribution parameters are found by numerical solution of the transcendental equation with the definition of the gamma function interpolation formula. The values of the operating characteristic of the incomplete gamma function are defined by numerical integration using Weddle's rule. The methodology is automated for Turbo Pascal.

Results. The paper introduces the results of calculating the characteristics of the high-power wind turbine, found by using the improved parts of the methodology connecting with testing the statistical hypothesis on the distribution of the general totality of air velocities by Weibull–Gnedenko, the exact calculations of the values of the gamma function and incomplete gamma function. The comparison of the calculated results using the proposed methodology with those obtained by other authors found significant differences in the values of the sample variance and empirical Pearson. The authors have analyzed the initial and maximum wind speed influence on performance of the wind turbine.

Conclusions. The Weibull–Gnedenko function can be used to describe wind characteristics in the areas with moderate and strong winds. Varying the wind speed in the range of possible rates does not affect the average value of the operating characteristic and performance of the wind turbine. Increasing the maximum wind speed leads to a significant increase in these parameters. The improved methodology of calculating the performance of high-power wind turbines can be used in the design organizations and educational process.

Key words:

Wind turbine, wind speed, standard height of a weather vane, electrical power, average efficiency, operating characteristic, sample variance, distribution function of the Weibull–Gnedenko, air density, Pearson's chi-squared test, gamma function.

REFERENCES

1. Udalov S.N. *Vozobnovlyayemye istochniki energii* [Renewable energy sources]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2014. 458 p.
2. *Wind power in power systems*. Ed. by T. Ackermann. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2012. 1049 p.
3. Mukund R. Patel. *Wind and solar power*. Washington D.C., CRC Press, 2006. 448 p.
4. Fedyanin V.Ya. *Vozmozhnosti ispolzovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii dlya povysheniya effektivnosti sistem teplosnabzheniya zdaniy v usloviyakh yuga Zapadnoy Sibiri* [Use of renewable energy to improve heating systems of buildings in Southern West Siberia]. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 1, pp. 202–206.
5. Fortov V.E., Popel O.S. *Sostoyanie razvitiya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v mire i v Rossii* [The state of development of renewable energy sources in the world and in Russia]. *Thermal Engineering*, 2014, no. 6, pp. 4–13.
6. Minin V.A., Stepanov I.R. *Vetroenergeticheskiy kadastr Evropeyskogo Severa SSSR* [Wind energy cadastre of the European North of the USSR]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport*, 1983, no. 1, pp. 106–114.

7. Twidell J., Weir T. *Renewable energy resources*. New York, Taylor & Francis, 2006. 601 p.
8. Konstantinov V.N., Abdrakhmanov R.S. Vybór vetroenergeticheskoy ustanovki i otsenka ee proizvoditelnosti [The choice of winds energy installations and the electric capacity evaluation]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2005, no. 11–12, pp. 48–52.
9. Obukhov S.G., Surkov M.A., Khoshnau Z.P. Metodika vybora vetroenergeticheskikh ustanovok maloy moshchnosti [Methods of choosing low-power wind turbines]. *Elektro*, 2011, no. 2, pp. 25–30.
10. Minin V.A., Dmitriev G.S. Opyt montazha i ekspluatatsii setevoy vetroenergeticheskoy ustanovki okolo g. Murmansk [The experience of installation and operation of the network wind turbine near Murmansk]. *Elektricheskie stantsii*, 2004, no. 2, pp. 71–73.
11. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. *Wind energy explained: theory, design and application*. Chichester, John Wiley & Sons, Ltd., 2008. 577 p.
12. Kuznetsov N.L. *Sbornik zadach po nadezhnosti elektricheskikh mashin* [Collection of tasks on reliability of electrical machines]. Moscow, Publ. House MEI, 2008. 408 p.
13. Goldaev S.V. *Primery i zadachi po nadezhnosti sistem teploenergosnabzheniya* [Examples and problems of heat and power systems reliability]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 172 p.
14. *Spravochnik po spetsialnym funktsiyam* [Handbook of special functions]. Ed. by M. Abramovits, I. Stigan. Moscow, Nauka Publ., 1979. 818 p.
15. Goldaev S.V., Korovina A.M., Radyuk K.N. Avtomatizatsiya rascheta pokazateley nadezhnosti obektov, podchinyayushchikhsya raspredeleniyu Veybulla–Gnedenko [Automation of reliability indices calculation of objects submitting to Weibull–Gnedenko distribution]. *Materialy XVI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost»* [Proc. of All-Russian Scient. and Tech. Conf. Energy: ecology, reliability, safety]. Tomsk, 2011. pp. 333–335.
16. Goldaev S.V. *Matematicheskoe modelirovanie i raschety teploekhnicheskikh sistem na EVM* [Mathematical modeling and computing heat engineering systems]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 188 p.
17. Krylov V.I., Shulgina L.T. *Spravochnaya kniga po chislennomu integrirvaniyu* [Handbook of numerical integration]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1966. 372 p.
18. Konstantinov V.N., Abdrakhmanov R.S. Otsenka proizvoditelnosti vetroenergeticheskoy ustanovki s pomoshchyu funktsii raspredeleniya Veybulla [Evaluation of wind turbine performance using Weibull distribution]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2006, no. 11–12, pp. 76–79.
19. Goldaev S.V., Radyuk K.N. Proverka s pomoshchyu kriteriya Pirsona statisticheskoy gipotezy o raspredelenii generalnoy sovoкупности po zakonu Veybulla–Gnedenko [Testing the statistical hypothesis on the distribution of the general totality by Weibull–Gnedenko using Pearson’s chi-squared test]. *Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost»* [Proc. of All-Russian Scient. and Tech. Conf. Energy: ecology, reliability, safety]. Tomsk, 2014. pp. 127–130.
20. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 816 p.

Received: 13 March 2015.