

## ОЦЕНКА ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ВЭУ-6

О.И. Родькин, канд. биол. наук, доцент, В.А. Пашинский, канд. техн. наук, доцент, А.А. Бутько, ст. преподаватель (МГЭУ им. А.Д. Сахарова)

### Аннотация

*В статье представлены результаты прогнозной выработки электроэнергии ветроагрегатом ВЭУ-6, установленным на территории учебно-научного комплекса «Волма» МГЭУ им. А.Д. Сахарова.*

*The article presents the results of a possible generation of electricity by wind-power plant «WEI-6» which has been installed on the territory of educational and scientific complex «Volma» at the International Sakharov Environmental University.*

### Введение

На территории учебно-научного комплекса (УНК) «Волма» МГЭУ им. А.Д. Сахарова установлена ветроэнергетическая установка ВЭУ-6, предназначенная для преобразования энергии ветра в механическую энергию вращательного движения, а затем в электрическую энергию. ВЭУ представляет собой комплекс оборудования для аккумуляции производимой ветроагрегатом энергии, и может быть использована в качестве источника электропитания однофазных потребителей, напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

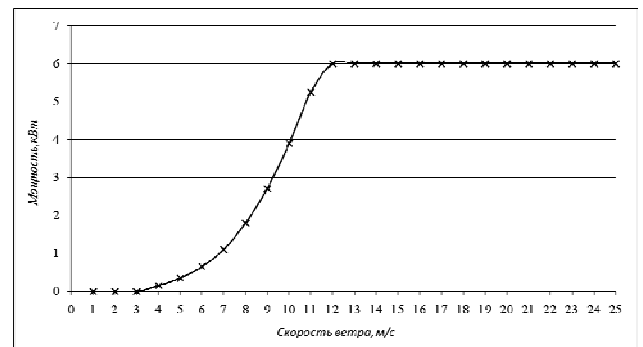
Данная ветроэнергетическая установка оснащена трехлопастным ветроколесом с горизонтальной осью вращения, которое располагается с наветренной стороны опоры.

Преобразование энергии ветрового потока в электрическую энергию происходит за счет появления аэродинамической силы на лопастях турбины. Крутящий момент от аэродинамической силы передается через центральный вал посредством двухступенчатой зубчатой ременной передачи на валы двух генераторов, в качестве которых используются автомобильные генераторы. Установка оснащена центробежной системой регулирования угла поворота лопасти, которая осуществляет разворот лопастей таким образом, чтобы ограничить частоту вращения ветроколеса. Ориентация ветроколеса на ветер обеспечивается применением стабилизатора. Ветроколесо снабжено тормозным устройством, приводимым в действие вручную с земли. Основные технические характеристики установки представлены в табл. 1, а ее мощность, в зависимости от скорости ветра, представлена на рис. 1.

Потребитель, независимо от скорости ветра, имеет мощность, ограниченную мощностью инвертора и емкостью аккумуляторных батарей. Потребители соединены с блоком аккумуляторных батарей через инвертор, который преобразует энергию, запасенную в аккумуляторных батареях (4 последовательно соединенных аккумулятора напряжением 12 В, 180 А/ч), в напряжение 220 В, частотой 50 Гц.

**Таблица 1. Основные технические характеристики ВЭУ-6**

Наименование параметра	Единица измерения	Величина
Номинальная мощность генератора	кВт	2×3
Максимальная скорость вращения ветроколеса	об/мин	200
Диаметр ветроколеса	м	6
Скорость срагивания с места	м/с	2
Минимальная рабочая скорость ветра	м/с	3
Расчетная скорость ветра	м/с	11
Максимальная рабочая скорость	м/с	25
Буревая расчетная скорость ветра	м/с	45
Уровень шума	дБ	< 80



**Рис. 1. Характеристика мощности ветроагрегата ВЭУ-6**

### Основная часть

При проектировании ветроэнергетических установок необходимо производить оценку ожидаемой выработки электроэнергии на основании ветроэнер-

гетического потенциала в местах их предполагаемого размещения.

Наиболее распространенной функцией, отражающей повторяемость скорости ветра по градациям, является распределение Вейбулла, которое описывается следующими выражениями:

– дифференциальная повторяемость [1,2]

$$f(v) = \frac{k}{a} \cdot \left(\frac{v}{a}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^k\right];$$

– интегральная повторяемость [1,2]

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{a}\right)^k\right], \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий форму кривой (параметр формы,  $k > 0$ );

$a$  – коэффициент, характеризующий масштаб изменения функции распределения по оси скоростей (параметр масштаба,  $a > 0$ );

$v$  – градация скорости ветра ( $v \geq 0$ ).

Математическое ожидание (среднее арифметическое) и среднеквадратическое отклонение для распределения Вейбулла определяется выражениями [1]:

$$\bar{v} = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right);$$

$$\sigma = a\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма-функция,  $\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} t^{x-1} \exp^{-t} dt$

или  $\Gamma(x) = \sqrt{2\pi} x^{x-1} e^{-x} \left[1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{228x^2} + \dots\right]$  использовать аппроксимационное выражение Стирлинга [1].

Коэффициент, характеризующий форму кривой, определяется по формуле [1]:

$$k = \left(\frac{0,9874}{c_v}\right)^{1,0983}, \quad (3)$$

где  $c_v = \frac{\sigma}{\bar{v}}$  – коэффициент вариации;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение определяется по формуле [3]:

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (v_i - \bar{v})^2 m_i} \quad \text{или} \quad \sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (v_i - \bar{v})^2 p_i}, \quad (4)$$

где  $n$  – общее число значений ряда;  $v_i$  – среднее значение интервала;  $m_i$  – частота градации;  $p_i$  – относительная частота (эмпирическая вероятность);  $\bar{v}$  – математическое ожидание скорости ветра определяется по формуле [3]:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i x_i. \quad (5)$$

Мера асимметрии определяется следующим выражением [3]:

$$A(v) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{3/2}}. \quad (6)$$

В качестве характеристики крутости используется коэффициент эксцесса, определяемый по формуле [3]:

$$K(v) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{4}{k}\right) - 4\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^2} + \dots$$

$$\dots + \frac{6\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - 3\Gamma^4\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^2} - 3 \quad (7)$$

Коэффициент, характеризующий масштаб изменения функции распределения по оси скоростей, определяется по формуле [4, 5]:

$$a = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{или} \quad a = \bar{v} \left(0,568 + \frac{0,434}{k}\right)^{\frac{1}{k}}. \quad (8)$$

Изменение скорости ветра в вертикальном профиле определяется на основании статистических зависимостей, которые описываются аппроксимацией в виде степенной или логарифмической функции:

– функция степенной аппроксимации [5]:

$$v(h_2) = v(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^m, \quad (9)$$

где  $v(h_1)$  – скорость ветра на высоте регулярных данных наблюдений;

$h_2$  – расчетная высота оси ветроколеса;

$m$  – степенной коэффициент Хелмана, учитывающий влияние орографии (шероховатости), подстилающей поверхности на скорость ветра, определяется по формуле [5]:

$$m = \frac{1}{\ln \frac{\sqrt{h_1 \cdot h_2}}{z_0}}, \quad (10)$$

где  $z_0$  – коэффициент, характеризующий шероховатость подстилающей поверхности, рассчитываемый по формуле:

$$z_0 = e^{\frac{v(h_1)\ln(h_2) - v(h_2)\ln(h_1)}{v(h_1) - v(h_2)}}; \quad (11)$$

– логарифмическая функция [1]

$$v(h_2) = v(h_1) \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}.$$

Удельная теоретическая мощность ветрового потока для конкретных градаций скорости ветра определяется по формуле [3]:

$$N_{e(град)} = \frac{1}{2} \rho v^3 f(v), \quad (12)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $v$  – скорость ветра, соответствующая данной градации, м/с;  
 $f(v)$  – относительная (дифференциальная) повторяемость скорости ветра в данной градации.

С целью уточнения расчета удельной теоретической мощности ветрового потока определяется средняя месячная плотность воздуха, которая вычисляется по соответствующим средним значениям давления, температуры и массовой доле водяного пара (удельной влажности) по следующей формуле [3]:

$$\rho = \frac{p}{RT(1 + 0,605s \cdot 10^{-3})}, \quad (13)$$

где  $p$  – атмосферное давление, Па;  
 $R$  – удельная газовая постоянная сухого воздуха, Дж/кг·К;  
 $T$  – абсолютная температура воздуха, К;  
 $s$  – массовая доля водяного пара, г/кг, определяется по формуле [7]:

$$s = \frac{621,98e}{p - 0,378e}, \quad (14)$$

где  $e$  – парциальное давление, гПа.  
При отсутствии фактических данных атмосферного давления и массовой доли водяного пара плотность воздуха определяется по формуле [1, 4]:

$$\rho(h) = \frac{p_0}{RT} \exp\left(\frac{-gh}{RT}\right), \quad (15)$$

где  $p_0$  – стандартное атмосферное давление на уровне моря, соответствующее плотности воздуха – 1,225 кг/м<sup>3</sup>, Па;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $h$  – высота над уровнем моря, м.

Общая мощность суммарного (полного) ветрового потока  $N_n$  оценивается по формуле [6]:

$$N_n = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 S, \quad (16)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\bar{v}^3$  – средняя скорость ветра, определяемая по данным наблюдений, м/с;  
 $S$  – площадь сечения ветрового потока, м<sup>2</sup>.

Общая (полная) энергия ветра за период  $T$  составит [6]:

$$\bar{Q}_n = \frac{1}{2} \rho \bar{v}_n^3 S T. \quad (17)$$

Тогда, средняя производительность ветроагрегата  $\bar{A}$  с номинальной мощностью  $N_e$ , начальной ско-

ростью ветроколеса  $v_0$ , скоростью регулирования  $v_{ном}$  и максимальной скоростью  $v_{макс}$  будет равна [6]:

$$\bar{A} = \frac{\bar{v}_{v_0-v_{ном}-v_{макс}}^3}{\bar{v}_{НОМ}^3}. \quad (18)$$

Суммарное время работы ветроагрегата  $t_p$  находится по формуле [6]:

$$t_p = \frac{f(v \geq v_0)T}{100}, \quad (19)$$

где  $f(v \geq v_0)$  – вероятность превышения начальной скорости ветроагрегата, %;

$T$  – период превышения, ч (год – 8760, полугодие – 4380, месяц – 720 и т.д.).

Для определения суммарной длительности простоев ВЭУ  $t_n$  используется соотношение [6]:

$$t_n = T - t_p. \quad (20)$$

Данные о скорости ветра, полученные на метеорологических станциях, характеризуют режим ветра на площадке, где установлен анемометр. Степень затененности местоположения (степень открытости) определяется по классификации В.Ю. Милевского. Степень открытости станции указывается по всем восьми румбам. Общая степень открытости местоположения рассчитывается как средний балл и называется масштабом класса открытости  $M$  [6].

Таким образом, если определен масштаб класса открытости метеостанции с известными ветровыми условиями и масштаб класса открытости участка для ВЭУ, то по полученным зависимостям можно уточнить расчет ожидаемой выработки энергии на предполагаемом месте установки ВЭУ.

На основании регулярных данных скорости ветра за 2006-2010 гг., полученных на метеорологической станции (МС) «Воложин» (54,10° с.ш. и 26,50° в.д., высота над у.м. – 229 м), определены значения параметра формы  $k$ , параметра масштаба  $a$  и математического ожидания скорости ветра  $\bar{v}$  (табл. 2), позволяющие определить дифференциальную (рис. 2) и интегральную (рис. 3) повторяемость скорости ветра на высоте 10 м.

Распределение климатической характеристики ветра по градациям приведено в табл. 3.

Ход температуры воздуха и атмосферного давления атмосферы на МС «Воложин» за анализируемый период представлен на рис. 4, 5.

Расчетные значения плотности атмосферного воздуха на высоте анемометра (239 м над уровнем моря) представлены на рис. 6.

Оценка открытости МС «Воложин» и фактического места установки ВЭУ-6 на УНК «Волма» по классификации В.Ю. Милевского определена визуально и приводится в табл. 4, 5.

Среднее значение масштаба класса открытости в данных условиях по таблицам 3, 4 составляет – 6,6 и 7,5 соответственно.

Зависимость энергетического коэффициента  $K_e$  от

**Таблица 2. Значения  $k$ ,  $a$  и  $\bar{v}$  метеорологической станции «Воложин» за 2006-2010 гг.**

месяц	2006			2007			2008			2009			2010		
	$k$	$a$	$\bar{v}$	$k$	$a$	$\bar{v}$	$k$	$a$	$\bar{v}$	$k$	$a$	$\bar{v}$	$k$	$a$	$\bar{v}$
I	1,55	2,48	2,23	1,88	4,60	4,08	2,39	3,82	3,38	1,46	2,37	2,15	1,98	3,36	2,98
II	1,25	2,04	1,90	1,76	2,82	2,51	1,60	3,51	3,15	1,66	2,33	2,08	1,82	2,63	2,34
III	1,23	1,89	1,77	1,57	2,86	2,57	1,75	3,10	2,76	1,41	2,45	2,23	1,86	3,17	2,81
IV	1,41	2,00	1,82	1,50	3,24	2,92	1,64	3,19	2,85	1,52	2,84	2,55	1,65	2,75	2,46
V	1,71	2,84	2,53	1,62	2,78	2,48	1,37	2,63	2,40	1,51	2,92	2,63	1,98	2,71	2,40
VI	1,71	2,06	1,83	1,37	2,35	2,15	1,26	1,97	1,83	1,75	3,08	2,74	1,81	2,75	2,44
VII	1,06	1,77	1,73	1,48	2,66	2,40	1,31	2,26	2,08	1,50	2,02	1,82	1,96	2,40	2,13
VIII	1,38	2,12	1,93	1,56	2,47	2,22	1,43	2,61	2,37	1,44	2,11	1,92	1,49	2,32	2,10
IX	1,05	1,72	1,68	1,42	2,43	2,20	1,71	2,90	2,58	1,27	1,94	1,80	1,79	3,02	2,69
X	1,39	2,09	1,91	1,72	2,56	2,28	1,46	2,71	2,45	1,37	3,16	2,89	1,69	2,69	2,40
XI	1,51	2,46	2,22	1,89	3,00	2,66	1,66	3,19	2,85	1,49	2,88	2,60	—	—	—
XII	1,80	3,54	3,14	1,89	3,21	2,85	1,96	2,94	2,61	1,89	3,20	2,83	—	—	—
год	1,35	2,25	2,06	1,54	2,91	2,61	1,56	2,90	2,61	1,45	2,60	2,35	1,76	2,78	2,47

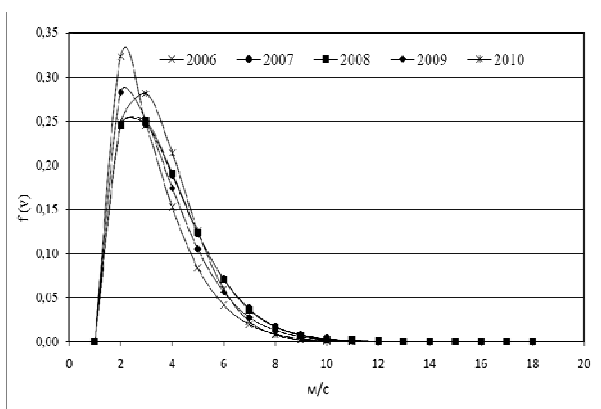


Рис. 2. Дифференциальная повторяемость скорости ветра

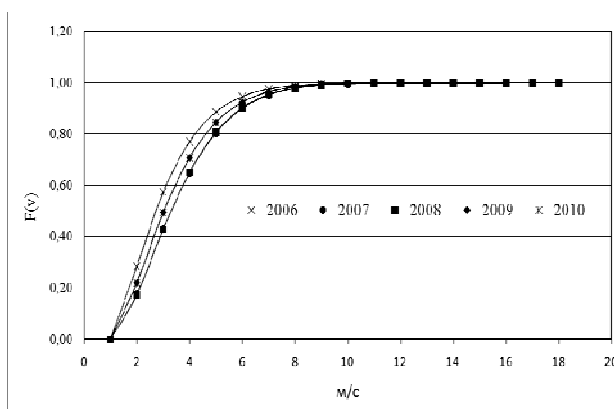


Рис. 3. Интегральная повторяемость скорости ветра

**Таблица 3. Климатическая характеристика ветра на МС «Воложин» за 2006-2010 гг**

	Градации скорости ветра, м/с									
	0-1	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	$\Sigma$
$n$	4685	5896	2524	681	84	7	5	0	2	13884
$f(v)$	35,26	42,45	16,86	4,43	0,86	0,13	$16 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$13 \cdot 10^{-5}$	100,0
$N_{e(град)}$	0,17	4,14	8,86	6,97	3,02	0,86	0,18	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	24,22

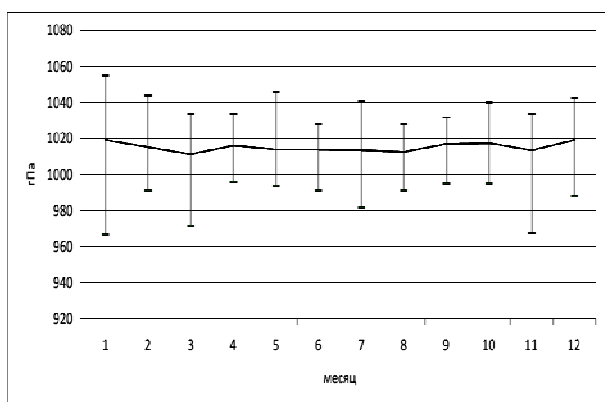


Рис. 4. Ход температуры воздуха

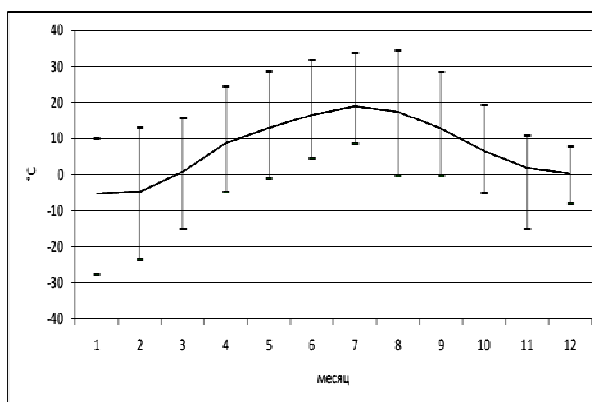


Рис. 5. Ход атмосферного давления

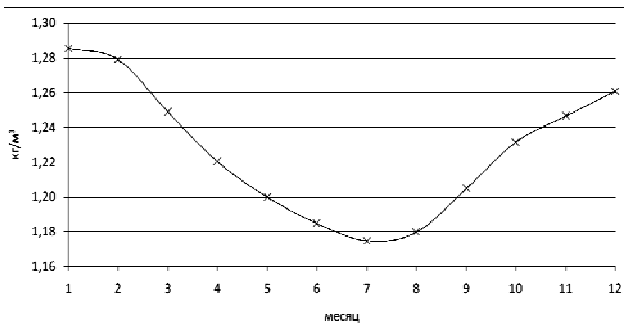


Рис. 6. Значения плотности атмосферы

**Таблица 4. Оценка открытости  
МС «Воложин»**

Показатель	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Класс от-крытости	7а	6а	6а	6а	4б	6б	5б	5б
Масштаб открытости	11	8	8	8	1	7	5	5

**Таблица 5. Оценка открытости места  
установки ВЭУ-6 на УНК «Волма»**

Показатель	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Класс от-крытости	6в	6в	7а	7а	5б	6б	6б	6б
Масштаб открытости	6	6	11	11	5	7	7	7

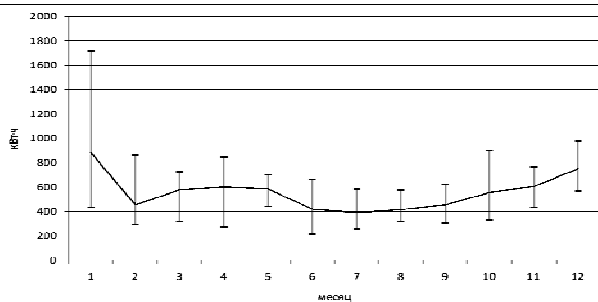


Рис. 7. Средняя месячная выработка энергии ВЭУ-6 в УНК «Волма» за 2006-2010 гг.

масштаба открытости  $M$ , при номинальной скорости ветра 11 м/с, характеризующего реальную удельную мощность ветрового потока, описывается уравнением:

$$K_3 = -0,001M^2 + 0,050M + 0,009,$$

где  $M$  – среднее значение класса открытости;

$K_3$  – энергетический коэффициент.

Для масштаба открытости 6,6 и 7,5 при номинальной скорости ветра 11 м/с энергетические коэффициенты равны соответственно – 0,295 и 0,328. Следовательно, расчетная выработка энергии ветроэнергетической установки на выбранной площадке по сравнению с выработкой в условиях метеостанции будет больше в 1,14 раза.

На основании климатической характеристики ветра, орографии и энергетических коэффициентов, ожидаемая средняя месячная выработка ВЭУ-6 за

2006-2010 гг. в УНК «Волма» составляет 575 кВт·ч/месяц, варьируя в диапазоне от 220 до 1763 кВт·ч/месяц (рис. 7), годовая выработка составляет около 6900 кВт·ч/год.

Средняя производительность ветроагрегата  $\bar{A}$  за расчетный месяц с номинальной мощностью  $N_e$ , начальной скоростью ветроколеса  $v_0$ , скоростью регулирования  $v_{ном}$  и максимальной скоростью  $v_{макс}$  описывается следующим уравнением:

$$N_{ВЭУ} = 0,082n^6 - 3,459n^5 + 56,67n^4 - 455,9n^3 + 1855n^2 - 3544n + 2998,$$

где  $n$  – расчетный месяц года.

Суммарная длительность простоя ветроагрегата  $t_n$  в среднем за год составляет 3405 ч. Средний месячный простой ветроагрегата описывается уравнением:

$$t_n = -0,019n^6 + 0,843n^5 - 14,07n^4 + 115,3n^3 - 476,5n^2 + 918,3n - 346$$

### Заключение

Полученные результаты за время эксплуатации ВЭУ-6 (октябрь 2006 – ноябрь 2010 гг.) согласуются с теоретической оценкой ожидаемой выработки электроэнергии. Суммарная выработка электроэнергии составила 22,8 МВт·ч, средняя месячная – 575 кВт·ч, что очевидно объясняется тем, что суммарная среднегодовая длительность простоя ветроагрегата – 3405 ч. Годовая экономия топлива составляет – 1,5 т у.т., при этом сокращение эмиссии парниковых газов в пересчете на диоксид углерода составляет около 2,58 т/год.

### ЛИТЕРАТУРА

- Burton, T. Wind energy. UK/ T. Burton, D Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi// John Wiley & Sons Ltd, 2001. – P. 643.
- IEC 61400-12-1 Ed.1: Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- Кобышева, Н.В. Климатологическая обработка метеорологической информации/ Н.В. Кобышева, Я.Г. Наровлянский. – Лн.: Гидрометеиздат, 1978. – 292 с.
- Manwell, J.F. Wind energy explained. Theory, design and application. Amherst/ J.V. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers// John Wiley & Sons Ltd, 2002. – P. 590.
- Quaschnig, V. Regenerative Energiesysteme. 3/ V. Quaschnig// Aufl. München: Hanser, 2003. – P. 345.
- Проведение изыскательских работ по оценке ветроэнергетических ресурсов для обоснования схем размещения и проектирования ветроэнергетических установок. Методические указания: РД 52.04.275-89. – М.: Гос. комитет СССР по Гидрометеорологии, 1989. – 34 с.
- World Meteorological Organization, Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, Appendix 4B, WMO-No. 8 (CIMO Guide), Geneva 2008.