

Электротехника

УДК 621.313

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАТОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

А.С. Ануфриев, Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Ветровые электростанции обеспечивают основную долю в годовой выработке электроэнергии в те периоды времени, когда скорость ветра превышает 8 м/с. Поэтому при проектировании синхронного генератора ветроэнергетических установок необходимо обеспечить максимум КПД для частот вращения ротора, соответствующих таким значениям скорости ветра. В генераторах ВЭУ или микро-ГЭС известное соотношение равенства постоянных и переменных потерь, обеспечивающее максимум КПД в номинальном режиме, целесообразно не соблюдать. Для повышения энергоэффективности установки генератор следует проектировать так, чтобы точка максимума КПД смещалась в зону максимальных нагрузок и частот вращения – вправо от номинальной точки.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, синхронный генератор, постоянные потери, переменные потери, КПД.

Особенностью, отличающей генераторы ветроэнергетических установок (ВЭУ) малой мощности от традиционных генераторов, является их частая работа в ненормальном режиме. Ветровая нагрузка очень непостоянна, и максимальная скорость ветра, обеспечивающая номинальную частоту вращения генератора и, соответственно, номинальную входную мощность, бывает относительно редко.

Так, по данным [1] среднегодовая частота распределения ветра в западных районах Казахстана имеет вид кривой, близкой к нормальному распределению (рис. 1). Аналогичные зависимости для иных регионов приводятся и другими авторами [2–4]. Отличие состоит лишь в среднем и максимальном значении силы ветра и расположении модальной точки.

Кривая нормального распределения описывается выражением

$$p(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_v} \cdot e^{-\frac{(v-m_v)^2}{2\sigma_v^2}}, \quad (1)$$

Андрей Сергеевич Ануфриев, аспирант.

Юрий Александрович Макаричев (д.т.н.), заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

Юрий Валентинович Зубков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

где m_v – математическое ожидание;

σ_v – среднее квадратическое отклонение.

Для того чтобы воспользоваться выражением (1) при расчете энергетической эффективности генератора ВЭУ, необходимо знать зависимости мощности ветроколеса в функции от скорости ветра. Эти зависимости для каждого типа ветроустановок индивидуальны. По ряду критериев, приведенных в [5], для рассматриваемого класса мощностей и частот вращения оптимальным был признан синхронный генератор с многополюсной системой возбуждения от постоянных магнитов.

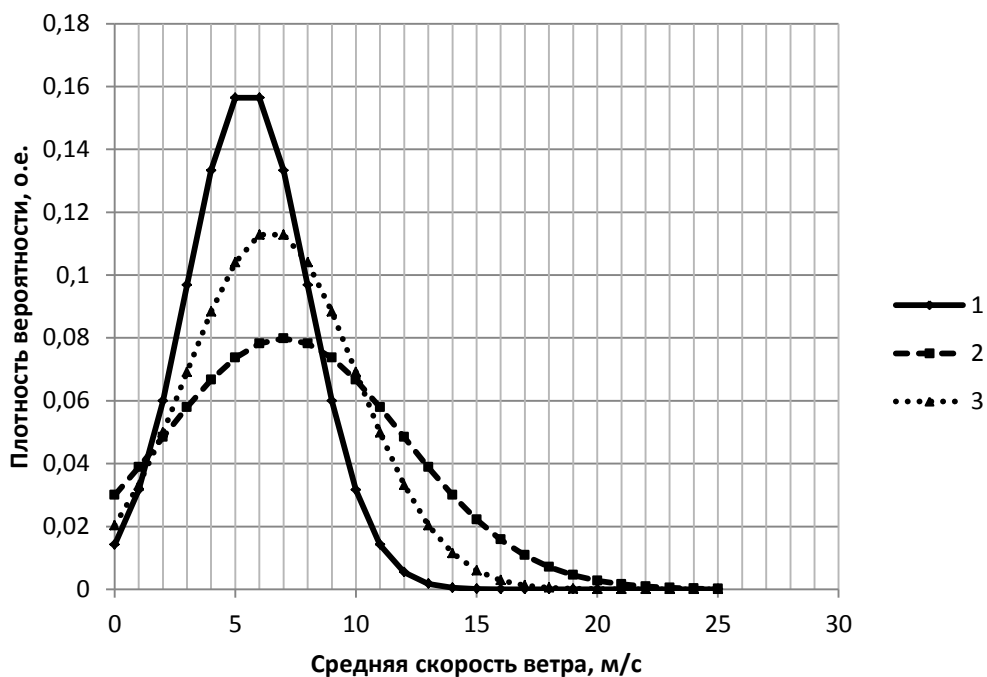


Рис. 1. Распределение плотности вероятности средней силы ветра для некоторых регионов:

1 – западные районы Казахстана [1] $m_v = 5,5$ м/с; 2 – северное побережье европейской части [4] $m_v = 7$ м/с; 3 – степные районы Самарской и Саратовской областей $m_v = 6,5$ м/с

Многополюсный низкоскоростной генератор наилучшим образом согласуется с ветроколесом, имеющим вертикальную ось вращения (ротор Дарье). Такая конструкция позволяет располагать генераторную часть на поверхности земли, что существенно упрощает доступ к ней при монтаже, обслуживании и ремонте. Исследования, проведенные авторами совместно со специалистами НПО «Шторм» (г. Самара), позволили получить энергетические характеристики нескольких типов опытных ВЭУ малой мощности. На рис. 2 в качестве примера показана зависимость частоты вращения ветроколеса и его отдаваемой мощности в функции скорости ветра для ВЭУ номинальной мощностью 2 кВт.

Для всех типоразмеров характерна кубическая зависимость отдаваемой механической мощности (для генератора это потребляемая мощность) от скорости воздушного потока. При скоростях ветра 10 м/с и выше рост отдаваемой мощности замедляется. Это связано с особенностью работы ВЭУ с ротором Дарье – при превышении номинальной скорости ветра частота вращения ротора стабилизи-

руется и в дальнейшем увеличивается незначительно. Это положительное свойство ротора Дарье позволяет в ВЭУ малой мощности отказаться от тормозных устройств, защищающих установку от угонных скоростей.

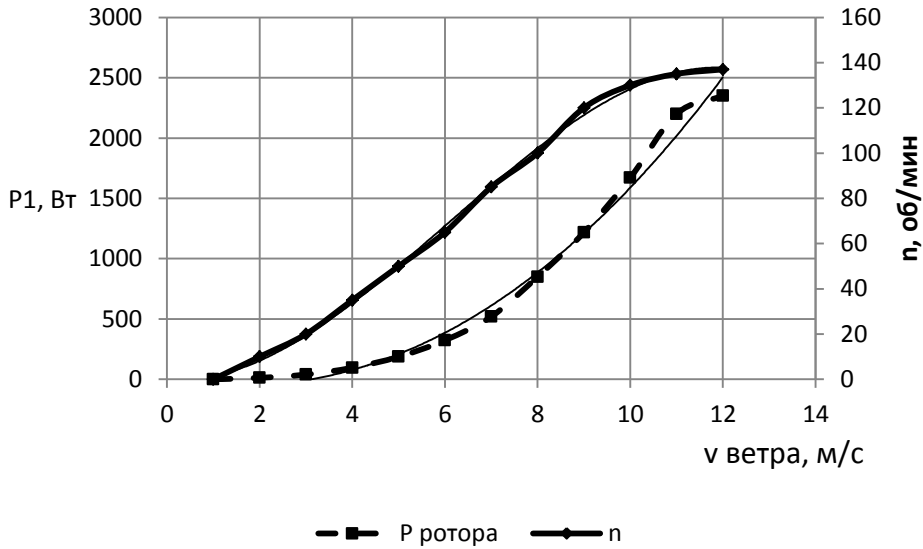


Рис. 2. Энергетические характеристики стационарной ВЭУ 2000 Вт

Проведем анализ прогнозируемой выработки электроэнергии на примере ВЭУ номинальной мощностью 2000 Вт. Для этого совместим диаграмму распределения плотности вероятностей средней силы ветра для степных районов Самарской и Саратовской областей с энергетической характеристикой ВЭУ2000 (рис. 3).

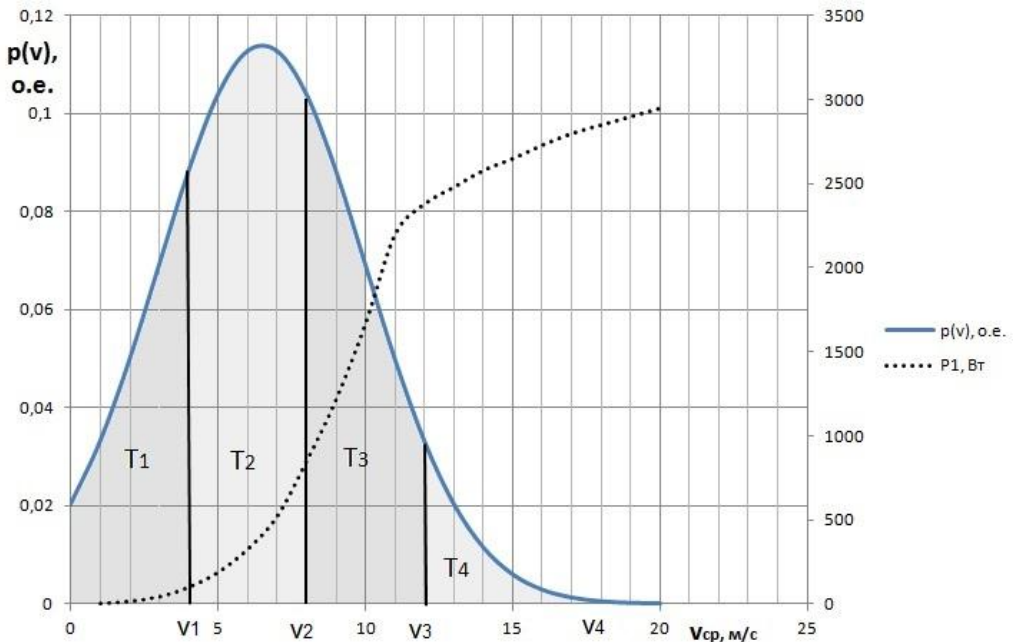


Рис. 3. Зависимость мощности ВЭУ 2000 от скорости ветра и плотности вероятности по интервалам интенсивности ветра

Разобьем диапазон средних значений скорости ветра на четыре интервала:

- 1) 0–4 м/с – слабый;
- 2) 4–8 м/с – умеренный;
- 3) 8–12 м/с – сильный;
- 4) более 12 м/с – очень сильный.

Вероятностные периоды времени в течение года, соответствующие этим интервалам скорости ветра, будут определяться интегралами вида

$$T_i = \int_{v_{i-1}}^{v_i} p(v) \cdot dv = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_v} \cdot \int_{v_{i-1}}^{v_i} e^{-\frac{(v-m_v)^2}{2\sigma_v^2}} \cdot dv. \quad (2)$$

Геометрической интерпретацией интеграла (2) является площадь криволинейной трапеции, ограниченной кривой $p(v)$ на интервале $[v_{i-1}, v_i]$.

Результаты вычисления определенных интегралов (2) сведены в таблицу и представлены в виде диаграммы (рис. 4).

Вероятностные значения энергии, выработанной ВЭУ за каждый период времени в течение года, были рассчитаны по выражению

$$\mathcal{E}_i = \int_{T_{i-1}}^{T_i} P_1 \cdot dt \approx P_{1cp,i} \cdot (t_i - t_{i-1}), \text{ кВт час.} \quad (3)$$

Количество энергии, выраженное в процентах от суммарной годовой выработки $\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i$:

$$\mathcal{E}_{i\%} = \frac{\mathcal{E}_i}{\sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Вероятностные периоды средней скорости ветра и соответствующей мощности и выработанной энергии

№ интервала, i	v_{cp} , м/с	T_i , о.е.	$P_{срi}$, Вт	\mathcal{E}_i , кВт час	\mathcal{E}_i , %
1	0–4	0,22	80	154,2	2,0
2	4–8	0,41	300	1077	13,9
3	8–12	0,29	1800	4573	58,8
4	>12	0,08	2800	1962	25,3
Σ	–	1,00	–	7766	100,0

На диаграмме (см. рис. 4) в графическом виде показаны соотношения периодов времени для выбранных интервалов средних скоростей ветра. На рис. 5 представлена диаграмма вероятностных объемов энергии по каждому интервалу средних скоростей ветра.

Из анализа приведенных диаграмм следует, что более половины расчетной выработки электроэнергии (58,8 %) ВЭУ дает при скорости ветра от 8 до 12 м/с и еще 25,3% – при $v > 12$ м/с (сумма 84,1 %). Несмотря на то, что умеренные ветры дуют 41 % по времени за год, выработка электроэнергии ВЭУ при такой скорости ветра не превышает 14 % от годовой. Поэтому очевидно, что для повышения энергоэффективности генератора при его проектировании необходимо ми-

минимизировать потери в режимах работы при частоте вращения, соответствующей скорости ветра, превышающей 8 м/с, и полной электрической нагрузке. Это означает, что точку максимума КПД нужно «сдвинуть» в сторону перегрузки генератора и больших частот вращения.

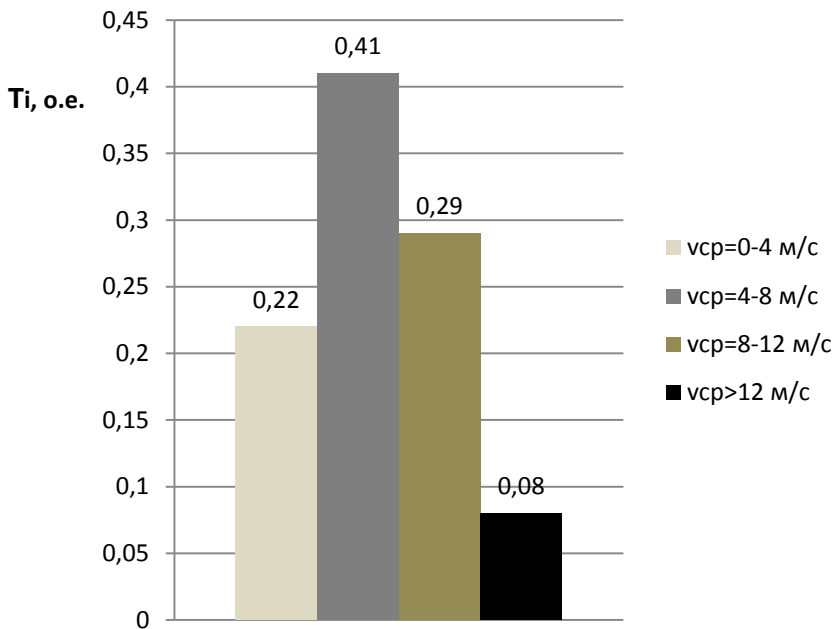


Рис. 4. Диаграмма периодов времени для выбранных диапазонов средней скорости ветра в течении года

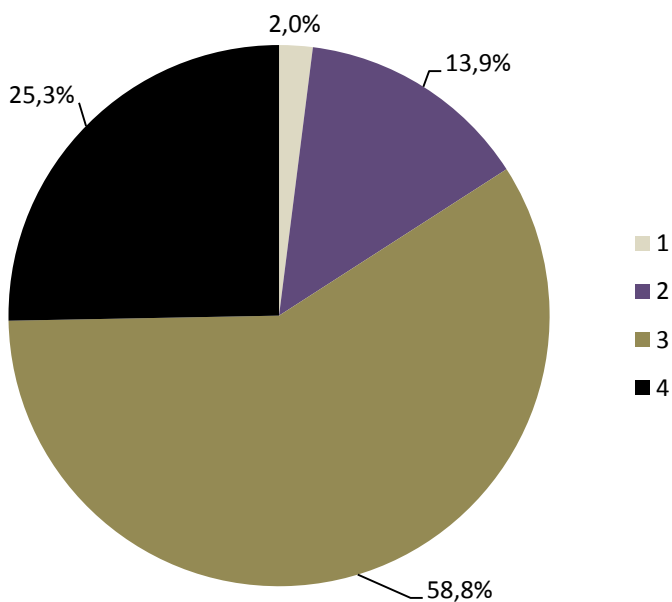


Рис. 5. Диаграмма расчетной выработки электроэнергии ВЭУ в зависимости от средней скорости ветра:

1 – $v_{cp} = 0-4$ м/с; 2 – $v_{cp} = 4-8$ м/с; 3 – $v_{cp} = 8-12$ м/с; 4 – $v_{cp} > 12$ м/с

Выводы

1. Основную долю в годовой выработке электроэнергии, до 84 %, ВЭУ обеспечивает в периоды времени, когда скорость ветра превышает 8 м/с. Поэтому при проектировании целесообразно обеспечить максимум КПД генератора для частот вращения ротора, соответствующих таким значениям скорости ветра.

2. В генераторах, предназначенных для работы в условиях переменной частоты приводного двигателя и отдаваемой мощности, например в ВЭУ или микро-ГЭС, известное соотношение равенства постоянных и переменных потерь, обеспечивающее максимум КПД в номинальном режиме, целесообразно не соблюдать. Для повышения энергоэффективности установки генератор следует проектировать так, чтобы точка максимума КПД смещалась в зону максимальных нагрузок и частот вращения – вправо от номинальной точки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Орынбаев С.А.* Совершенствование автономной ветроэнергетической установки малой мощности горизонтально-осевого типа: Дисс. ... докт. филос. (PhD). Алматы, 2015. 142 с.
2. *Соломин Е.В.* Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 10–15.
3. *Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Серадская О.В., Троицкий А.О.* Обзор мировой ветроиндустрии за 2000–2016 годы. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2017 (10–12). – С. 33–44.
4. *Твайделл Дж., Уэйр А.* Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. *Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Ануфриев А.С., Певчев В.П.* Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 3(55). – С. 66–74.

Статья поступила в редакцию 26 января 2018 г.

ENERGY EFFICIENCY OF THE GENERATOR OF THE WIND POWER ENGINEERING UNIT IN THE CONDITIONS OF CHANGING RATE OF ROTATION

A.S. Anufriev, Yu.A. Makarichev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The main share in the annual electricity generation wind farms provide during the periods when the wind speed exceeds 8 m/s. Therefore, when designing a synchronous generator of wind power plants, it is necessary to provide maximum efficiency for rotor rotation frequencies corresponding to such values of wind speed. In the generators of wind turbines or micro hydroelectric power stations, it is not advisable to observe the known ratio of equality of constant and variable losses, which ensures the maximum efficiency in the nominal conditions. To increase the energy efficiency of the unit, the generator should be designed so that the maximum efficiency point is shifted to the zone of maximum loads and rotation frequencies - to the right of the nominal point*

Keywords: *wind power plant, synchronous generator, permanent losses, variable losses, efficiency.*

*Andrei S. Anufriev, Postgraduate student.
Yuri A. Makarichev (D.(Techn.)), Professor.*