

УДК 620.075.8

UDC 620.075.8

**К РАСЧЁТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПОТЕНЦИАЛА И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОВОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ**

**TO THE QUESTION OF CALCULATION OF
THE ENERGY POTENTIAL AND COST-
EFFECTIVENESS OF WIND ENERGY**

Григораш Олег Владимирович
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой,
grigorasch61@mail.ru

Grigorash Oleg Vladimirovich
Doctor of engineering sciences, professor, head of the
chair, grigorasch61@mail.ru

Корзенков Павел Геннадьевич
магистр

Korzenkov Pavel Gennadyevich
Masters Degree

Кондратенко Юлия Евгеньевна
студент
*Кубанский государственный аграрный
университет, Краснодар, Россия*

Kondratenko Yulija Evgenyevna
student
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье рассматриваются основные аналитические выражения для расчёта энергетического потенциала и экономической эффективности ветровой энергетики

This article discusses the basic analytical expressions for calculation the energy potential and cost-effectiveness of wind energy

Ключевые слова: ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ВЕТРОВАЯ
ЭНЕРГЕТИКА, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СТАНЦИИ, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ

Keywords: RENEWABLE ENERGY SOURCES,
WIND ENERGY, WIND POWER STATION,
WINDFARMS INSTALLATION

Ограниченность природных запасов топлива для традиционной энергетики и в связи с этим практически ежегодное повышение тарифов на электроэнергию, а также отрицательные экологические последствия традиционных источников энергии раскрывают широкие перспективы по применению возобновляемых источников энергии (ВИЭ), и, прежде всего, ветроэлектрических станций (ВЭС) на территории Российской Федерации [1, 2].

Как известно, об эффективность применения ВЭС можно говорить, если среднегодовая скорость ветра превышает 3 м/с. Кроме того, использование энергии ветра посредством ВЭС связано с определенными проблемами. Неравномерность и непостоянство ветрового потока приводит к значительному изменению частоты вращения ветроколеса ветроэлектрической установки (ВЭУ) и, соответственно, колебаниям напряжения, частоты тока и отдаваемой мощности. Сброс или

подключение нагрузки также являются дестабилизирующими факторами. Таким образом, обеспечение требуемого качества электроэнергии также определяет конкурентоспособность ВЭС [3].

Современная ветроэнергетика во многих развитых странах мира является частью энергетических систем, а в ряде стран – одной из главных составляющих альтернативной энергетики на ВИЭ. К сожалению, в настоящее время доля нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (включая и ветроэнергетику) составляет в энергобалансе нашей страны лишь 1,5 %. Однако в России имеются объективные ресурсные, социально-экономические и экологические предпосылки для широкомасштабного использования как ветроэнергетики, так и других ВИЭ [4].

Прогноз развития ВИЭ показывает, что их доля в мировом балансе энергопотребления к 2030 году может составить до 20%. Однако прогнозы будут сбываться при условии как можно более быстрого и широкого внедрения этих источников энергии: каждый новый источник требует от 30 до 50 лет для того, чтобы его доля в общем энергобалансе возросла с 1 до 10% [2, 4].

Сегодня во всем мире наблюдается интенсивный прирост мощности возобновляемой энергетики. Немаловажным фактором ее опережающего развития в различных странах, независимо от размеров, географического положения, экономического состояния и ресурсной базы энергетики, являются экологические преимущества этих источников и постоянно развивающиеся технологии повышения экологической безопасности установок на основе ВИЭ, отсутствие эмиссии парниковых газов.

Во многих странах происходит выравнивание стоимостей энергии традиционных источников и ВИЭ, прежде всего в связи с ужесточением экологических требований и повышением стоимости энергии традиционных электростанций, особенно угольных, а стоимость

оборудования возобновляемой энергетики столь же непрерывно снижается за счет технологического совершенствования.

По состоянию на 1 января 2010 года общая установленная мощность ВИЭ в мире (без крупной гидроэнергетики) составила по электроэнергии свыше 300 ГВт, а к 2015 году должна возрасти примерно в два раза. Развитие использования ВИЭ приняло ускоренный характер, особенно быстрыми темпами развиваются ветроэнергетика и фотоэлектричество.

Оценка мирового ветроэнергетического рынка составляет сейчас более 10–12 млрд долларов в год. К 2015 году суммарная установленная мощность ВЭС в мире должна приблизиться к 160 ГВт, к 2020 году – к 1200 ГВт, а к 2040 году – к 3100 ГВт [0].

Наиболее острый вопрос ветроэнергетики – экономическая эффективность. Обоснование параметров ВЭУ, ее размеров, типа, возможного количества электроэнергии производится на основе технико-экономических расчетов и инженерного проектирования с учетом требований потребителя, структуры его электрохозяйства, связи с энергосистемой, количества потребляемой электроэнергии, затрат на оплату этой энергии, а также местоположения объекта энергоснабжения и природно-климатических характеристик в этом районе.

В отличие от других видов ВИЭ в определение валового потенциала ветровой энергетики входит условие возможности её использования, поскольку ветер занимает огромные объёмы в атмосфере Земли над регионом, так что даже теоретически возможно использовать только малую часть общего ресурса ветровой энергетики. Поэтому определение валового (теоретического) ресурса (потенциала) для ветровой энергетики следующее [2, 5].

Валовый ресурс (потенциал) ветровой энергетики региона (страны) – это часть среднелетней суммарной ветровой энергии,

которая доступна для использования на площади региона (страны) в течение одного года.

Валовый потенциал ветровой энергетики определяется по формуле

$$W_B = 0,025 \rho T S \sum_{i=1}^n v_i^3 t_i, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, $кг/м^3$; $T = 8760$ – число часов в году; S – площадь территории, $м^2$; v – среднемноголетняя скорость ветра в диапазоне i ; t – вероятность нахождения скорости в диапазоне i .

Технический ресурс ветровой энергетики региона (страны) это часть валового потенциала ветровой энергетики, которая может быть использована при современном уровне развития технических средств и соблюдения экологических норм.

Технический ресурс ветровой энергетики

$$W_T = 0,01 \frac{N_C}{D^2} T S, \quad (2)$$

где N_C – средняя мощность ВЭУ, которая определяется по формуле

$$N_C = \frac{\pi D^2}{8} \rho \sum_{i=1}^n v_i^3 \eta_{ВЭУ} t_i, \quad (3)$$

где $\eta_{ВЭУ}$ общий КПД ВЭУ, который определяется по формуле

$$\eta_{ВЭУ} = c_p \eta_{мех} \eta_{эл}, \quad (4)$$

где c_p – коэффициент использования ветра; $\eta_{мех}$ – механический КПД ВЭУ; $\eta_{эл}$ – электрический КПД ВЭУ.

Как видно из (2) и (3) технический потенциал зависит только от средней скорости ветра и её распределения. Однако, учитывая, что скорость ветра, принимаемая в указанных формулах, зависит от высоты, а высота башни выбирается в зависимости от мощности (диаметра ветроколеса), то таким образом технический потенциал зависит также и от мощности ВЭУ [2].

Количество ветровой энергии, которую можно получить в каждом конкретном месте, характеризуется техническим ветроэнергетическим потенциалом, зависящим от скорости ветра. За основу принимаются средние многолетние значения скоростей ветра на высоте флюгера, пересчитанные на высоту ветроагрегата.

Выработка электроэнергии ВЭУ определяется по формуле

$$\mathcal{E} = 0,01T \sum_{i=v_0}^{v_{omk}} P_{BЭУi}(k_h v) f_i(v), \quad (5)$$

где $P_{BЭУi}(k_h v)$ – зависимость полезной мощности ВЭУ от скорости ветра на высоте оси ветроколеса, при i , меняющемся в диапазоне от скорости включения v_0 до скорости отключения v_{om} с шагом 0,5–1 м/с; $k_h v$ – скорость ветра на высоте оси ветроколеса, м/с, где k_h – поправочный коэффициент, учитывающий разницу высот

$$k_h = \left(\frac{h_{ocu}}{h_{\phi}} \right)^n, \quad (6)$$

где h_{ocu} – высота оси ветроколеса относительно основания башни, м; h_{ϕ} – высота флюгера, м; n – степенной коэффициент, учитывающий характер изменения скорости ветра с высотой; $f_i(v)$ – интегральная повторяемость скорости ветра, %.

Для расчетов в указанном диапазоне скоростей ветра полезную мощность ВЭУ $P_{BЭУ}$ (кВт) для заданной скорости ветра на высоте оси ветроколеса $k_h v$ (м/с) и диаметре ротора ВЭУ D_l (м) определяется по формуле

$$P_{BЭУ} = P_{y0} S_{BЭУ} \eta_p \eta_e \sigma 10^{-3}, \quad (7)$$

где P_{y0} – удельная мощность ветрового потока со скоростью $k_h v$ через единичную площадь, определяется по формуле (с учетом, что ρ – плотность воздуха, кг/м³)

$$P_{y\partial} = 0,5\rho(k_h v)^3, \text{ Вт/м}^2, \quad (8)$$

$S_{BЭУ}$ – отметаемая площадь ВЭУ с горизонтальной осью вращения, вычисляется по формуле

$$S_{BЭУ} = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (9)$$

D – диаметр ветроколеса; σ – коэффициент мощности (в практических расчетах принимают равным 0,45), отн. ед.; η_p – КПД ротора ВЭУ (порядка 0,9), отн. ед.; η_g – КПД генератора (порядка 0,95), отн. ед.

В ветроэнергетике обычно используют рабочий диапазон скоростей ветра, не превышающих 25 м/с. Эта скорость соответствует 9-му ветру (шторм) по 12-балльной шкале Бофорта.

В таблице 1 приведены значения удельной мощности $P_{y\partial}$ для указанного рабочего диапазона скоростей ветра.

Таблица 1 – Зависимость удельная мощности $P_{y\partial}$ от $k_h v$,

$k_h v,$ м/с	2	3	4	5	10	14	18	20	23	25
$P_{y\partial},$ Вт/м ²	4,9	16,55	39,2	76,6	613	1682	3575	4904	7458	9578

Выполнив расчеты по (5) – (9) для нескольких ВЭУ, полученные значения выработки энергии ВЭУ следует сравнить с графиком потребления энергии объектом и назначать установленную мощность ВЭУ таким образом, чтобы производство энергии обеспечивало покрытие значительной части графика потребления. Тогда большую часть года ВЭУ будет работать в режиме экономии энергии и минимальное время передавать энергию во внешнюю сеть.

Экономическая эффективность использования ВЭУ для энергоснабжения небольших потребителей определяется имеющимся

ветроэнергетическим потенциалом, тарифом на электроэнергию у потребителя, стоимостью используемой ВЭУ, техническими условиями на подключение и рядом других факторов [6].

Срок окупаемости при внедрении ветроагрегата может быть определен по формуле

$$t_{ок} = \frac{P \cdot c}{\mathcal{E} \cdot C_T - I_{экс}}, \quad (10)$$

где $P \cdot c$ – общая стоимость установки (капитальные затраты) с учетом стоимости агрегата, транспортировки, таможенных расходов, проектных и строительно-монтажных работ, руб; \mathcal{E} – электроэнергия, вырабатываемая установкой в год, кВт·ч/год; C_m – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч; $I_{экс}$ – издержки эксплуатации, руб/год.

Стоимость энергии, вырабатываемой ВЭУ руб/(кВт·ч) связана со сроком службы установки $t_{сс}$ соотношением

$$C = \frac{P \cdot c + I_{экс} \cdot t_{сс}}{\mathcal{E} \cdot t_{сс}}. \quad (11)$$

Общая прибыль от использования ВЭУ может быть определена как ежегодная прибыль от сэкономленной электроэнергии, произведенной установкой, умноженная на период ее работы после срока окупаемости с учетом ежегодной корректировки тарифа и издержек эксплуатации

$$\Pi = (t_{сс} - t_{ок}) \sum_{i=t_{ок}} (\mathcal{E}_i C - I_{экс}). \quad (12)$$

Также технико-экономическое совершенство ВЭУ можно характеризовать таким параметром как коэффициент использования установленной мощности ветроустановки $K_{уст}$. Он представляет собой отношение действительной выработки электроэнергии за какой-либо период времени, например за год ($W_{год}$), к максимально возможной

выработке ($W_{max} = 8760P_{ном}$) энергии в случае, если бы ВЭУ работала весь этот период времени на номинальной (т. е. 100 %) мощности $N_{ном}$

$$k_{уст} = \frac{W_{год}}{8760P_{ном}}. \quad (13)$$

Примерные расчеты различных объектов показали, что срок окупаемости объектов может составлять 3,5–5 лет и снижается в условиях роста тарифа на электроэнергию.

Ветровая энергетика является одним из дешёвых ВИЭ. Проблема широкого использования ВЭУ в настоящее время связана с их экономической эффективностью с традиционными источниками энергии.

Стоимость ВЭС, в том числе и ВЭУ зависит от их мощности, стоимости производства соответствующего оборудования, расходов на транспортировку и стоимости строительства.

Основной подход к расчёту экономических показателей ВЭУ включает определение эффективности ВЭУ в конкуренции с традиционными источниками электроэнергии (ТИЭ) в конкретном регионе.

Стоимость вырабатываемой электроэнергии ВЭУ

$$C_{ЭЭ} = \frac{P_{ВЭУ}C(1 + \gamma T_{сл})}{T_{сл}TK}, \quad (14)$$

где $P_{ВЭУ}$ – региональный экономический фактор стоимости ВЭУ в регионе; C – удельная стоимость установленной мощности ВЭУ, руб/кВт ч; $\gamma=0,05$ – коэффициент нормы эксплуатационных издержек; $T_{сл}$ – срок службы ВЭУ, год; K – коэффициент использования установленной мощности, % (см. таблицу 2).

Срок окупаемости ВЭУ

$$T_{ок} = \frac{P_{ВЭУ}C}{TKC_{ТИЭ} - \gamma P_{ВЭУ}C}, \quad (15)$$

где $C_{ТИЭ}$ – стоимость электроэнергии от традиционных источников, руб.

Таблица 2 – Срок окупаемости ВЭУ, T_{OK} (год, 30 руб = 1 долл)

Стоимость электроэнергии $C_{ЭЭ}$, руб/кВт ч	Коэффициент использования установленной мощности K , %					
	20	30	40	50	70	100
0,3						27
0,6				27	13	8
1,5	27	12	8	6	3,8	2,6
3	8	5	3,3	2,6	1,8	1,2

Экономический эффект от использования ВЭУ

$$\mathcal{E}_{\text{ЭФ}} = nQT_{\text{СЛ}}(T_{\text{СЛ}} - T_{\text{ОК}})(EC_T - I_{\text{ЭКС}})(C_{\text{П}} - C_T), \quad (16)$$

где n – число ВЭУ в составе ВЭС; Q – годовой дефицит электроэнергии в регионе, кВт ч/год; C_T – удельная стоимость производства электроэнергии от ТИЭ (региональный тариф), руб/кВт ч; $E = NT$ – электроэнергия, вырабатываемая ВЭУ в год, кВт ч/год; $I_{\text{ЭКС}} = \gamma K$ – издержки эксплуатации, руб; K – капитальные затраты (общая стоимость ВЭУ), руб.

Анализ данных по времени окупаемости показал, что для экономической целесообразности использования ВЭУ необходимо, чтобы срок службы установки был больше срока её окупаемости, т.е. необходимо, чтобы выполнялось условие

$$T_{\text{СЛ}} \geq T_{\text{ОК}}. \quad (17)$$

Для выполнения этого условия необходимо, чтобы коэффициент использования установленной мощности K ветроустановки был больше критического значения, которое определяется по формуле

$$K \geq K_{\text{КР}} = \frac{(1 + \gamma T_{\text{СЛ}})P_{\text{ВЭУ}}C}{T_{\text{СЛ}}T_{\text{ЭФ}}C_{\text{ЭЭ}}}. \quad (18)$$

В общем случае экономический потенциал ветровой энергетики

$$W_{\text{э}} = \frac{KQ \left(\frac{C_{\text{П}}}{C_{\text{Т}}} - 1 \right)}{K_{\text{КР}} - K}. \quad (19)$$

Таким образом, значение экономического потенциала ветровой энергетики увеличивается при повышении значения коэффициента использования установленной мощности K .

Исследования, проведенные в ряде стран, показали, что наиболее экономичными сейчас являются ВЭУ мощностью $100\text{--}300 \text{ кВт}$, ожидается в будущем $250\text{--}350 \text{ кВт}$. Рентабельность ВЭУ средней мощности может быть обеспечена при разработке комбинированных систем бесперебойного электроснабжения, в состав которых входят солнечные электростанции или минигидроэлектростанции, или, где в качестве резервного источника электроэнергии используются газопоршневые электростанции (ГПЭ) [2, 7].

Электрический КПД ГПЭ считается высокий, в сравнении с дизельными электростанциями, и при работе на качественном природном газе составляет $39\text{--}44\%$ [8].

Важной особенностью ГПС является то, что они способны работать в режиме когенерации, то есть как тепловые электростанции. Температура выхлопных газов на выходе из силовой машины ГПЭ – $390 \pm 10^\circ\text{C}$. При этом, электроэнергию и тепловую энергию ГПЭ вырабатывают одновременно, соотношение выдачи электрической и тепловой энергии $1 : 1$.

Несмотря на довольно высокую, в настоящее время, стоимость фотоэлектрических батарей, их использование совместно с ВЭУ в некоторых случаях может быть эффективным. Поскольку в зимнее время существует большой потенциал ветра, а летом в ясные дни максимальный эффект можно получить, используя солнечную фотоэлектрическую станцию, то сочетание этих ресурсов оказывается выгодным с экономической точки зрения для потребителей.

Таким образом, рассмотренные в статье аналитические выражения для расчёта энергетического потенциала и экономической эффективности ветровой энергетики, а также перспективы ВЭС в составе систем бесперебойного электроснабжения, повысят эффективность предпроектных работ по созданию автономных систем электроснабжения на базе ВИЭ в комплексе [9].

Список литературы

1. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. – М.: КолосС, 2003. – 532 с.
2. Григораш О.В., Ступура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. – Краснодар: КубГАУ, 2012, – 272 с.
3. Никитенко Г. В. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев. Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь АГРУС. – 2008.
4. Никитенко Г.В., Коноплев Е.В., Коноплев П.В. Оценка вариантов автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 1. – С. 16–17.
5. Григораш О.В. Автономные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии / О.В. Григораш, П.Г. Корзенков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №09(093). С. 364 – 376. – IDA [article ID]: 0931309024. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/24.pdf>.
6. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения. – Краснодар: Б/И. – 2001. – 333 с.
7. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. – Краснодар: КВВАУЛ. – 2005. – 306 с.
8. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии. Краснодар, 2012. 174 с.
9. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Казаков Д.А. Математический аппарат для оценки эффективности систем гарантированного электроснабжения. Под редакцией Н.И. Богатырева. Краснодар. 2002. 285 с.

References

1. Amerhanov R.A. Optimizacija sel'skhozjajstvennyh jenergeticheskikh ustanovok s ispol'zovaniem vozobnovljaemyh vidov jenerгии. – М.: KolosS, 2003. – 532 s.
2. Grigorash O.V., Stupura Ju.P., Sulejmanov R.A. i dr. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenergii. – Krasnodar: KubGAU, 2012, – 272 s.
3. Nikitenko G. V. Vetrojenergeticheskie ustanovki v sistemah avtonomnogo jelektrosnabzhenija / G. V. Nikitenko, E. V. Konoplev. Stavropol'skij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. – Stavropol' AGRUS. – 2008.

4. Nikitenko G.V., Konoplev E.V., Konoplev P.V. Ocenka variantov avtonomnogo jelektrosnabzhenija sel'skohozjajstvennyh potrebitelej. Tehnika v sel'skom hozjajstve. – 2012. – № 1. – S. 16–17.

5. Grigorash O.V. Avtonomnye sistemy jelektrosnabzhenija na vozobnovljaemyh istochnikah jenergii / O.V. Grigorash, P.G. Korzenkov // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2013. – №09(093). S. 364 – 376. – IDA [article ID]: 0931309024. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2013/09/pdf/24.pdf>.

6. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N. Sistemy avtonomnogo jelektrosnabzhenija. – Krasnodar: B/I. – 2001. – 333 s.

7. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija. – Krasnodar: KVVAUL. – 2005. – 306 s.

8. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr. Avtonomnye istochniki jelektrojenergii. Krasnodar, 2012. 174 s.

9. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Kazakov D.A. Matematicheskij apparat dlja ocenki jeffektivnosti sistem garantirovannogo jelektrosnabzhenija. Pod redakciej N.I. Bogatyreva. Krasnodar. 2002. 285 s.