

УДК 620.075.8

UDC 620.075.8

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРА, ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА РЕСУРСА И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

WIND CHARACTERISTICS, FEATURES OF THE CALCULATION OF RESOURCES AND ECONOMIC EFFICIENCY OF WIND POWER

Квитко Андрей Викторович
старший преподаватель,
9061870011@mail.ru

Kvitko Andrey Viktorovich
senior lecturer,
9061870011@mail.ru

Хицкова Алина Олеговна
аспирант
grigorasch61@mail.ru
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Hitskova Alina Olegovna
postgraduate student
grigorasch61@mail.ru
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

В статье раскрываются основные характеристики ветрового потока, а также рассматриваются особенности расчета ресурса ветровой энергетики и экономической эффективности применения ветроэлектрических станций

The article describes the main characteristics of the wind flow and also discusses the features of wind energy resource calculation and cost-effectiveness of wind power stations

Ключевые слова: ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, ВАЛОВЫЙ РЕСУРС, ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕСУРС

Keywords: RENEWABLE ENERGY SOURCES, WIND POWER STATIONS, WINDFARMS-INSTALL, GROSS RESOURCE TECHNICAL RESOURCE

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 электроэнергии раскрывают широкие перспективы по применению возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ).

Прогноз развития ВИЭ показывает, что их доля в мировом балансе энергопотребления к 2030 году может составить до 20% (без учета крупной гидроэнергетики). 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% [1].

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 вре-

мя 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 возобновляемых источников энергии.

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.

Уже к концу 2010 года общая установленная мощность ветроэлектрических станций (ВЭС) в мире составила свыше 60 тыс. МВт, в Европе более 30 тыс. МВт. Данные показатели энергетической и экономической эффективности сделали ветроэнергетические установки (ВЭУ) рыночно конкурентоспособными с традиционными источниками энергии. Оценка

мирового ветроэнергетического рынка составляет сейчас более 10 млрд долларов в год.

Одним из перспективных ВИЭ, для внедрения на территории Краснодарского края являются ветроэлектрические станции (ВЭС). Для повышения эффективности их внедрения необходимо знать основные характеристики ветра (ветрового потока).

Известно, что основной причиной возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности. Кроме того, земная поверхность неоднородна: суша, океаны, горы, леса обуславливают различное нагревание поверхности под одной и той же широтой. Вращение Земли также вызывает отклонения воздушных течений.

Для описания ветра как источника энергии используется совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, объединяемая понятием ветроэнергетического кадастра. К числу основных кадастровых характеристик ветра относятся:

- среднегодовая скорость ветра;
- годовой и суточный ход ветра;
- повторяемость скоростей ветра;
- повторяемость направлений ветра;
- максимальная скорость ветра;
- удельная мощность и удельная энергия ветра;
- ветроэнергетические ресурсы района.

Данные о среднегодовых скоростях ветра служат исходной характеристикой общего уровня интенсивности ветра. По величине среднегодовой скорости ветра в первом приближении можно судить о перспективности применения ветроэлектрических установок (ВЭУ) в том или ином районе. Однако необходимо иметь в виду, что скорость ветра зависит от рельефа местности, шероховатости поверхности, наличия затеняющих элементов, высоты над поверхностью земли. У разных станций эти условия могут су-

щественно отличаться. Поэтому для сопоставления средних скоростей ветра их необходимо приводить к сравнимым условиям. Как правило, за сравнимые условия принимают условия открытой ровной местности и высоту *10 м* от поверхности земли.

Годовой ход ветра – это сезонное изменение средних скоростей ветра.

Суточный ход ветра - это изменение средних скоростей ветра в течение суток. Наиболее четко он прослеживается в летнее время и мало проявляется зимой. В условиях снижения общего уровня интенсивности ветра в летнее время дневной максимум скоростей ветра является благоприятным для эффективного использования энергии ветра, поскольку именно в дневные часы, как правило, наблюдается повышенная потребность в энергии со стороны потребителя.

Повторяемость направлений ветра показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода (месяца, года) дули ветры того или иного направления. Правильный учет направлений ветра играет важную роль в определении оптимального расположения ВЭУ на местности.

Сведения о максимальных скоростях ветра являются важной составной частью ветроэнергетического кадастра. Они необходимы для выполнения расчетов на прочность отдельных узлов и элементов ВЭУ (башни, лопастей, устройств ориентации на ветер и др.). Ошибка в определении максимальных скоростей может привести либо к излишнему запасу прочности и утяжелению конструкции ВЭУ, либо наоборот, к созданию недостаточно прочных установок, следствием чего могут быть их разрушения.

Определение максимальной скорости базируется на результатах наблюдений за прошлое время и представляет собой по сути прогноз на будущее. В прикладной климатологии о максимальной скорости ветра принято говорить как о скорости, возможной один раз в заданное число лет.

На большей высоте скорости ветра возможны выше.

Технические ветроэнергоресурсы региона. Мощность ветрового потока пропорциональна плотности воздуха, площади поперечного сечения потока и скорости ветра в третьей степени. В силу кубической зависимости от скорости мощность ветра является крайне непостоянной величиной, изменяющейся в широких пределах.

Среднегодовая удельная энергия ветра (энергия, протекающая за год через поперечное сечение ветроколеса) является интегральной (осредняющей) характеристикой. Она зависит еще и от повторяемости скоростей ветра, т.е. от того, какую долю годового времени дул ветер с той или иной скоростью.

Располагая данными о среднегодовых скоростях ветра, вертикальном профиле ветра, а также о повторяемости скоростей ветра, можно дать энергетическую характеристику ветрового потока любой местности и на любой высоте.

При оценке энергетических ресурсов обычно рассматривают потенциальные, технические и экономические ресурсы.

Под потенциальными ветроэнергоресурсами понимается суммарная энергия движения воздушных масс, перемещающихся за год над данной территорией.

Под техническими ветроэнергоресурсами понимается та часть потенциальных ресурсов, которая может быть использована с помощью имеющихся в настоящее время технических средств. Они определяются с учетом неизбежных потерь при использовании ветровой энергии.

Согласно теории идеального ветроколеса в полезную работу может быть преобразована только часть энергии, проходящей через сечение ветроколеса.

Максимум полезной энергии оценивается коэффициентом использования энергии ветра максимальное значение которого, равно $0,593$. В

настоящее время у лучших образцов отечественных и зарубежных ветроколес этот параметр достигает значений $0,45 - 0,48$.

Кроме того, как показывает практика, существующими конструкциями ВЭУ полностью используется не весь диапазон скоростей ветра. При скоростях ветра ниже минимальной рабочей мощности ветроколеса не хватает даже на преодоление сил трения в узлах ВЭУ. В диапазоне скоростей от минимальной рабочей до расчетной, при которой ВЭУ развивает установленную мощность, использование энергии ветра осуществляется наиболее полно. При дальнейшем усилении ветра вплоть до максимальной рабочей скорости мощность ВЭУ поддерживается на постоянном уровне благодаря работе регулирующих устройств. При скоростях ветра выше максимальной рабочей во избежание поломки ВЭУ выводится из работы.

Скорость ветра является важнейшей характеристикой технических свойств ветра – это расстояние в метрах, проходимое массой воздуха в течение одной секунды.

Максимальный коэффициент использования энергии ветра не может быть больше $\xi = 0,192$.

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.

Валовый ресурс (потенциал) ветровой энергетики региона (страны) – это часть среднесуточной 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 – среднегодовое значение скорости 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 [1].

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 в конкретном регионе [2].

Наиболее острый вопрос ветроэнергетики - экономическая эффективность и экологичность ВЭУ. 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.

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 T - рассматриваемый период времени (чаще всего год, то есть $T = 8760$ ч); $P_{BЭУi}(k_h v)$ - 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 $P_{ВЭУ}$ (кВт) для заданной скорости ветра на высоте оси ветроколеса $k_h v$ (м/с) и диаметре ротора ВЭУ D_1 (м) определяется по формуле

$$P_{ВЭУ} = P_{y\partial} S_{ВЭУ} \eta_p \eta_g \sigma 10^{-3}, \quad (7)$$

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

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

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

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

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

$k_{hv},$ $м/с$	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.

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_T - 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_{CC} соотношением

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

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

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

Также технико-экономическое совершенство ВЭУ можно характеризовать таким параметром как коэффициент использования установленной мощности ветроустановки $K_{уcm}$. 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 $N_{ном}$

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

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

Исследования, проведенные в ряде стран, показали, что наиболее экономичными сейчас являются ВЭУ мощностью 100...300 кВт, ожидается в будущем 250...350 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 дизель-электрические станции (ДЭС).

Список литературы

1. Григораш О.В. Возобновляемые источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю. П. Степура, Р. А. Сулейманов и др. Краснодар, 2012, с. 272.

2. Григораш О.В. К расчету экономической эффективности ветроэлектрических установок / О. В. Григораш, Р. А. Сулейманов, А. В. Квитко и др. // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2011. Т.1. № 33. С. 192-195.

3. Григораш О.В. Автономные источники электроэнергии: Состояние и перспективы / О. В. Григораш, С. В. Божко, А. Ю. Попов и др. – Краснодар 2012. с. 174.

4. Григораш О. В. Стабилизатор напряжения и частоты ветроэнергетической установки / О. В. Григораш, А. В. Квитко, Ю. М. Петренко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2010. Т.1. № 26. С. 140-143.

5. Григораш О.В., Гарькавый К. А., Квитко А.В., и др. Устройство стабилизации напряжения и частоты ветроэнергетической установки / Патент на изобретение RUS 2443903. 12.05.2010.

6. Григораш О.В., Квитко А.В., Алмазов В.В. и др. Непосредственный трехфазный преобразователь частоты естественной коммутацией / Патент на изобретение RUS 2421867. 12.05.2010.

References

1. Grigorash O.V. Vozobnovljaemye istochniki jelektroenergii / O.V. Grigorash, Ju. P. Stepura, R. A. Sulejmanov i dr. Krasnodar, 2012, s. 272.

2. Grigorash O.V. K raschetu jekonomicheskoj jeffektivnosti vetrojelektricheskikh ustanovok / O. V. Grigorash, R. A. Sulejmanov, A. V. Kvitko i dr. // Trudy Kubansko-go gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. T.1. № 33. S. 192-195.

3. Grigorash O.V. Avtonomnye istochniki jelektroenergii: Sostojanie i perspektivy / O. V. Grigorash, S. V. Bozhko, A. Ju. Popov i dr. – Krasnodar 2012. s. 174.

4. Grigorash O. V. Stabilizator naprjazhenija i chastoty vetrojenergeticheskoj ustanovki / O. V. Grigorash, A. V. Kvitko, Ju. M. Petrenko // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2010. T.1. № 26. S. 140-143.

5. Grigorash O.V., Gar'kavyj K. A., Kvitko A.V., i dr. Ustrojstvo stabilizacii naprjazhenija i chastoty vetrojenergeticheskoj ustanovki / Patent na izobretenie RUS 2443903. 12.05.2010.

6. Grigorash O.V., Kvitko A.V., Almazov V.V. i dr. Neposredstvennyj trehfaznyj preobrazovatel' chastoty estestvennoj kommutaciej / Patent na izobretenie RUS 2421867. 12.05.2010.