

УДК 620.075

UDC 620.075

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**К РАСЧЁТУ ЭКОНОМИЧЕСКОГО
ПОТЕНЦИАЛА ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И
ВЫБОРА ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК****TO THE CALCULATION OF THE ECONOMIC
POTENTIAL OF WIND ENERGY AND THE
CHOICE OF WIND POWER PLANTS**

Винников Анатолий Витальевич
к.т.н., доцент, декан

Vinnikov Anatoly Vitalyevich
Cand.Tech.Sci., senior lecturer, dean

Денисенко Евгений Александрович
к.т.н., старший преподаватель
denisenko_88@mail.ru
РИНЦ SPIN-код: 4263-0056

Denisenko Evgeniy Alexandrovich
Candidate of engineering sciences, senior teaching
denisenko_88@mail.ru
RSCI SPIN-code: 4263-0056

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

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

Для определения целесообразности использования ветроэлектрических установок необходимо провести оценку экономической эффективности ветровой энергетики региона. При этом первым этапом должен быть анализ аэрологических и энергетических характеристик ветра. Следующим этапом необходимо определить энергетический ресурс ветровой энергетики (теоретический, технический и экономический потенциал). Основной подход к расчёту экономических показателей должен включать определение эффективности ветроэлектрических установок в конкуренции с традиционными источниками электроэнергии в конкретном регионе. Здесь важны следующие показатели: срок окупаемости; экономическая эффективность. Если экономический потенциал ветровой энергетики удовлетворяет требованиям, то следующим этапом необходимо изучить технические требования, предъявляемые к ветроэлектрическим станциям. Для предварительной оценки местности раскрыта последовательность мероприятий, которые необходимо выполнить для оценки эффективности установки ветроэлектрических систем. Раскрыты достоинства и недостатки основных типов ветроэлектрических установок и особенности выбора их основных функциональных узлов. Рассмотренные в статье аналитические выражения для расчёта оценки экономической эффективности ветровой энергетики, технические требования к основным параметрам ветроустановок, а также основные их достоинства, недостатки и особенности работы, позволят на этапе проектирования проводить предварительную оценку эффективности применения ветроэлектрических станций для конкретного региона и местности, конкретных типов потребителей с учётом их режимов работы и

To determine the feasibility of using PV systems we should assess the economic efficiency of wind energy in the region. At the same time, the first step should be an analysis of upper-air and power characteristics of the wind. The next stage is to determine the energy source of wind power (theoretical, technical and economic potential). The basic approach to the calculation of economic indicators should include a determination of the effectiveness of wind power installations in competition with traditional energy sources in a particular region. There are important following indicators: the payback period and economic efficiency. If the economic potential of wind power satisfies the requirements, the next step is to study the technical requirements applicable to wind power stations. For a preliminary assessment of the terrain, the article discloses a sequence of events that must be performed to assess the effectiveness of the installation of wind power systems. We have listed advantages and disadvantages of the main types of wind power plants, and other ramifications of choosing of basic functional units. The considered in an article analytical expressions for calculating the evaluation of economic efficiency of wind energy, the technical requirements for the basic parameters of wind turbines and their main advantages, disadvantages and features the work will allow at the design stage to carry out a preliminary assessment of effectiveness of the wind power stations for a particular region and locality, specific types consumers in view of their modes of operation and the quality requirements of electricity

требований к качеству электроэнергии

Ключевые слова: ВЕТРОВАЯ ЭНЕРГЕТИКА, ПОТЕНЦИАЛ ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Keywords: WIND POWER, WIND ENERGY POTENTIAL, WIND POWER STATION, WIND-POWER INSTALLATIONS

Для определения целесообразности использования ветроэлектрических установок (ВЭУ) необходимо провести оценку экономической эффективности ветровой энергетики региона. При этом первым этапом должен быть анализ аэрологических и энергетических характеристик ветра. К числу таких характеристик относятся: среднегодовая скорость ветра; годовой и суточный ход ветра; повторяемость скоростей ветра; повторяемость направлений ветра; ветроэнергетические ресурсы района; удельная энергия ветра; максимальная скорость ветра [1, 2].

Целесообразно остановится на каждой из характеристик в отдельности.

Значение среднегодовой скорости ветра служат исходной характеристикой, определяющий общий уровень интенсивности ветра. По среднегодовой скорости ветра можно судить о перспективах применения ветроэлектрических установок (ВЭУ) в том или ином районе. Однако необходимо учитывать тот факт, что скорость ветра зависит от рельефа местности, размещения на ней лесных массивов, зданий, сооружений, и высоты над поверхностью земли. Как правило, среднегодовая скорость ветра измеряется на открытой местности на высоте 10 м от поверхности земли.

Если годовой ход ветра – это сезонное изменение средних скоростей ветра, то суточный ход ветра – это изменение средних скоростей ветра в течение суток. Известно, что он существенно прослеживается в летнее время и мало зимой. В летнее время дневной максимум скоростей ветра

является благоприятным для эффективного использования ветроэнергетических станций (ВЭС).

Характеристика повторяемости направления ветра показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода дули ветры с разным направлением. От точности этой характеристики зависит оптимальное расположение ВЭУ на местности.

Одной из важных характеристик является максимальная скорость ветра. Она необходима для расчетов определяющих прочность отдельных узлов и элементов ВЭУ (фундамента, башни, лопастей). Не точность в расчётах определения максимальных скоростей ветра может привести к излишнему запасу прочности конструкции ВЭУ или к разработке недостаточно прочных установок. В первом случае это приводит к завышенным экономическим затратам, а во втором может привести к аварийной ситуации.

Ветроэнергетический ресурс определяется величиной технического ресурса определяется по известной формуле и зависит от мощности ветрового потока, плотности воздуха, площади поперечного сечения потока и скорости ветра [3]. Важным является тот факт, что мощность ветрового потока является непостоянной величиной и изменяющейся в широких пределах.

Удельная энергия ветра – это энергия, протекающая за год через поперечное сечение ветроколеса является осредняющей характеристикой. Она зависит также и от повторяемости скоростей ветра.

Таким образом, 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, как правило, рассматривают теоретические, технические и экономические ресурсы. Под теоретическими

ветроэнергоресурсами понимается суммарная энергия движения воздушных масс, перемещающихся за год над данной территорией, а под техническими ветроэнергоресурсами понимается та часть теоретических 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 в полезную работу может быть преобразована только часть энергии ветра, проходящая через сечение ветроколеса. При этом, максимум полезной энергии оценивается коэффициентом использования энергии ветра максимальное значение которого, равно 0,593. В настоящее время у лучших образцов зарубежных ветроколес этот параметр находится в пределах 0,4 – 0,5.

Максимальная скорость ветра также является важнейшей характеристикой технических свойств ветрового потока. При расчётах необходимо учитывать, что максимальный коэффициент использования энергии ветра не может быть больше $= 0,192$.

Следующим этапом анализа перспектив использования ВЭУ является определение экономического потенциала ветровой энергетики.

В отличие от других видов возобновляемые источники энергии (ВИЭ) определение потенциала ветровой энергетики имеет свои особенности, заключающиеся в определении валового (теоретического), технического и экономического ресурса (потенциала) [3].

Валовый потенциал (ресурс) 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/м³; T – число часов в году; S – площадь территории, м²; v – среднегодовая скорость ветра в диапазоне i ; t – вероятность нахождения скорости в диапазоне i .

Технический ресурс ветровой энергетики

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

где N_C – средняя мощность ВЭУ

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

где $\eta_{ВЭУ}$ – общий КПД ВЭУ

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

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

Таким образом, как видно из (2) и (3) технический потенциал зависит от средней скорости ветра и мощности ВЭУ, которая определяется диаметров ветроколеса [3].

Проблема широкого использования ВЭУ в настоящее время связана с их экономической эффективностью в сравнении с экономической эффективностью традиционных источников энергии. Основной подход к расчёту экономических показателей ВЭУ включает определение эффективности ВЭУ в конкуренции с традиционными источниками электроэнергии в конкретном регионе.

Срок окупаемости ВЭУ

$$T_{OK} = \frac{P_{ВЭУ} C}{TKC_{ТНЭ} - \gamma P_{ВЭУ} C}, \quad (5)$$

где $P_{ВЭУ}$ – региональный экономический фактор стоимости ВЭУ; C – удельная стоимость установленной мощности ВЭУ, руб/кВт ч; T – срок службы ВЭУ, год; K – коэффициент использования установленной мощности, %; $C_{ТНЭ}$ – стоимость электроэнергии от традиционных источников, руб.

Экономический эффект от использования ВЭУ

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = nQT_{\text{сл}}(T_{\text{сл}} - T_{\text{ок}})(E_{\text{СТ}} - I_{\text{ЭКС}})(C_{\text{П}} - C_{\text{Т}}), \quad (6)$$

где n – число ВЭУ в составе ВЭС; Q – годовой дефицит электроэнергии в регионе, кВт ч/год; $C_{\text{Т}}$ – удельная стоимость производства электроэнергии от традиционных источников (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. больше критического значения ККР.

В общем случае экономический потенциал ветровой энергетики

$$W_{\text{э}} = \frac{KQ \left(\frac{C_{\text{П}}}{C_{\text{Т}}} - 1 \right)}{K_{\text{КР}} - K}. \quad (7)$$

Если экономический потенциал ветровой энергетики удовлетворяет требованиям, то следующим этапом необходимо изучить технические требования, предъявляемые к ВЭУ и ветроэлектрическим станциям (ВЭС) в комплексе. К этим требованиям относятся: требования по назначению; требования по конструкции; требования к электрическим параметрам; требования по надёжности и безопасности; требования по охране окружающей среды.

Требования к назначению. Для конкретного типа ВЭУ в технических условиях и эксплуатационной документации должны быть кроме значений расчётной, буревой, минимальной рабочей и максимально рабочей скоростей ветра, приведены сведения о назначении ВЭУ. К, примеру, для

работы с электронасосами, электронагревательной нагрузкой и т. п. Здесь важное значение имеет тип нагрузки (активная, активно-индуктивная) и требования к качеству электроэнергии, в том числе, требования потребителей по бесперебойности электроснабжения. В последнем случае в составе ВЭУ должны быть предусмотрены аккумуляторные батареи.

Требования к конструкции. Особенностью конструкции ВЭУ массой более 1 т является наличие мест для крепления тросов при монтаже и демонтаже ВЭУ различными способами. В нижней части башни (мачты) должна быть предусмотрена установка соединительной коробки (щита) для подключения к внешней электрической сети.

Требования к электрическим параметрам. Допустимая перегрузка генератора ВЭУ по току и мощности и время работы при перегрузках должны соответствовать требованиям стандартов или технических условий на генератор конкретного типа. При этом, мощность собственных нужд не должна превышать 10% установленной мощности генераторов ВЭУ.

Установившееся отклонение частоты тока при работе на нагрузку в рабочем диапазоне скоростей ветра и изменении нагрузки от холостого хода до мощности, удовлетворяющей расчётной характеристике ВЭУ при соответствующей скорости ветра, не должна быть более 5% для автономных мощностью до 5 кВт и более 3% для автономных систем мощностью свыше 5 кВт.

Установившееся отклонение напряжения на выходе ВЭУ в рабочем диапазоне скоростей ветра при снижении и увеличении нагрузки от холостого хода до мощности, удовлетворяющей расчётной характеристике ВЭУ при соответствующей скорости ветра, не должно быть более 10% для автономных систем мощностью до 5 кВт и более $\pm 8\%$ для автономных мощностью свыше 5 кВт.

Один из основных показателей качества коэффициент несинусоидальности кривой выходного напряжения должен быть не более 5% для ВЭУ трёхфазных систем частотой 50 Гц и $\pm 8\%$ для ВЭУ однофазного тока трёхфазного тока частотой свыше 50 Гц.

Требования надёжности. Значения показателей надёжности должны быть установлены в технических заданиях и технических условиях на ВЭУ конкретных видов. Для ВЭУ устанавливают следующие основные показатели надёжности: средний срок службы; средний ресурс до капитального ремонта; средняя наработка до отказа; среднее время восстановления.

Требования безопасности. Требования к безопасности, как известно, в основном связаны с электро и противопожарной безопасностью. Кроме того, ВЭУ мощностью выше 4 кВт должны иметь как минимум две независимые системы торможения ветроагрегата – рабочую и аварийную.

Требования охраны окружающей среды. Здесь основным требованием является требование к уровню звука, который в жилых и общественных помещениях вблизи работающих ВЭУ не должен превышать 60 дБА, инфразвука – 100 дБА.

На эксплуатационно-технические характеристики ВЭУ и выбор их основных функциональных узлов (генератора, инвертора, аккумуляторных батарей (АБ), коммутационной аппаратуры и т.д.) также оказывают влияние такие показатели как выходная мощность, время непрерывной работы и время заряда АБ [1].

Выходная мощность (пиковая нагрузка) определяется мощностью преобразователя (инвертора) и не зависит от скорости ветра, емкости аккумуляторов. Величина выходной мощности определяет максимальное количество потребителей электроэнергии, которые могут быть одновременно подключены к ВЭУ. Когда потребление электроэнергии происходит редко, но в больших количествах, то необходимо применять

один инверторов. Если же потребление электроэнергии происходит постоянно и количество потребителей постоянно изменяется, тогда целесообразно чтобы система электроснабжения содержала несколько инверторов, работающих параллельно, и при необходимости отключались или, наоборот включались для увеличения выходной мощности.

Время непрерывной работы (при слабом ветре или его отсутствии) определяется ёмкостью АБ и зависит от мощности и длительности потребления. Если потребление электроэнергии происходит редко, но в больших количествах, то необходимо выбрать АБ с большой ёмкостью. Время заряда АБ зависит в основном от мощности генератора электроэнергии. При этом, как правило, мощность генератора определяется с учётом работы на максимальную нагрузку и одновременный заряд АБ.

При определении времени непрерывной работы ВЭУ и заряда АБ с экономической точки зрения необходимо учитывать тот факт, что иногда выгоднее вместо АБ использовать резервный источник, к примеру, газопоршневую станцию или, если есть такая возможность, подключить питание потребителей от внешней сети.

Таким образом, с учётом рассмотренных требованиям для предварительной оценки местности на предмет установки ВЭУ и выбора функциональных узлов необходимо выполнить следующие мероприятия:

1. Определить место, в котором ветер, по наблюдениям, наиболее сильный, при этом, рядом не должны быть высокие строения и лесные массивы.

2. Получить статистические данные о ветре в предполагаемом месте установки ВЭУ в ближайшей метеорологической станции или в аэропорту.

3. Для выбора генератора электроэнергии оценить потребность в электроэнергии. Здесь необходимо знать также годовое потребление электроэнергии по месяцам и пиковые нагрузки (для выбора инвертора).

4. Определить желаемое время автономной работы энергосистемы в безветренные периоды (для выбора ёмкости АБ).

5. Провести оценку электроприборов по степени важности (категории потребления). От этого будет зависеть сложность схемы ВЭС, в том числе ее надежность и стоимость.

В общем случае при выборе ВЭУ необходимо знать их квалификационные признаки. ВЭУ имеют большое разнообразие классификационных признаков [3]. Однако самыми распространёнными являются два – мощность и вид вырабатываемой электроэнергии.

По мощности не зависимо от рода тока ВЭУ делятся на четыре группы:

- 1) большой мощности – свыше 1 МВт;
- 2) средней мощности – от 100 кВт до 1 МВт;
- 3) малой мощности – от 5 до 99 кВт;
- 4) очень малой мощности – менее 5 кВт.

Известно, что по виду вырабатываемой электроэнергии ВЭУ подразделяют на постоянного и переменного тока. ВЭУ постоянного тока в конструкции содержат генератор постоянного тока или генератор переменного тока с выпрямителем. ВЭУ переменного тока, как правило, выполняются на синхронных и реже на асинхронных генераторах.

Основным достоинством ВЭУ постоянного тока является то, что они имеют не сложные системы стабилизации напряжения, кроме того, они позволяют не сложными структурно-схемными решениями, обеспечить параллельную работу нескольких ВЭУ, при необходимости наращивания установленной мощности, и обеспечить бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей, за счёт применения в составе системы электроснабжения резервных источников – АБ. Их основными недостатками является повышенная стоимость, заниженные показатели

надёжности и КПД, из-за необходимости применения инверторов, зарядных устройств и непосредственно АБ [4].

Достоинства ВЭУ переменного тока связаны, прежде всего, с улучшенными показателями надёжности и низкой стоимостью в сравнении с ВЭУ постоянного тока. Недостатки ВЭУ переменного тока: сложность реализации системы стабилизации напряжения и частоты тока, а также системы включения ВЭУ на параллельную работу; в безветрие необходимо применять резервные источники переменного тока (дизель-электрические станции, газопоршневые станции и т. п.) [4].

При выборе источника и стабилизатора параметров электроэнергии необходимо учитывать, что расчётную мощность и номинальные значения напряжения и частоты тока ВЭУ вырабатывают в большинстве конструкций лишь при скорости от 8 м/с. Но реально ВЭУ начинают вырабатывать энергию уже при скоростях ветра 4 – 5 м/с. Такие перепады частоты вращения ветроагрегата приводят к значительным колебаниям напряжения и частоты тока [5, 6].

При выборе инверторов необходимо учитывать то, что один тип инверторов обеспечивает синусоидальное выходное напряжение, а второй – прямоугольной или трапециидальной формы. При этом, первый тип инверторов в 1,5 – 2 раза дешевле. Для большинства бытовых приборов можно использовать сигнал несинусоидальной формы. Даже блоки питания персональных компьютеров содержат входные фильтры и локальные устройства стабилизации напряжения [7, 8].

Важным является вопрос при выборе источников, преобразователей и стабилизаторов параметров электроэнергии ВЭУ их электромагнитная совместимость. Как известно, электромагнитная совместимость – это способность источников и преобразователей электроэнергии работать совместно так, чтобы при возникновении дестабилизирующих факторов, обеспечивалось электроснабжение потребителей с заданным качеством

электроэнергии. Основные требования при выборе и монтаже электрооборудования для обеспечения электромагнитной совместимости, в том числе уменьшения уровня электромагнитных помех, рассмотрены в [9, 10].

Таким образом, рассмотренные аналитические выражения для расчёта оценки экономической эффективности ветровой энергетики, технические требования к основным параметрам ВЭУ, а также основные их достоинства, недостатки и особенности работы, позволят на этапе проектирования проводить предварительную оценку эффективности применения ВЭУ для конкретного региона и местности, конкретных типов потребителей с учётом их режимов работы и требований к качеству электроэнергии.

Список литературы

1. Никитенко Г.В., Коноплёв Е.В. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения. Ставрополь АГРУС. 2008. С.152.
2. Никитенко Г.В. Коноплёв Е.В., Коноплёв П.В. Оценка вариантов автономного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей. Техника в сельском хозяйстве. 2012. № 1. С. 16-17.
3. Григораш О.В., Степура Ю.П., Сулейманов Р.А. и др. Возобновляемые источники электроэнергии. Краснодар. 2012. С. 272.
4. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е., Квитко А.В. Возобновляемые источники электроэнергии: термины, определения, достоинства и недостатки. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 32. С.189-192.
5. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. Краснодар. 2012. С.174.
6. Григораш О.В. Асинхронные генераторы в системах автономного электроснабжения. Электротехника. 2002. № 1. С 30-34.
7. Григораш О.В., Божко С.В., Нормов Д.А. и др. Модульные системы гарантированного электроснабжения. Краснодар. 2005. С. 306.
8. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии. Краснодар. 2006. С.264.
9. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости узлов САЭ. Промышленная энергетика. 2001. № 2. С.44-47.
10. Богатырев Н.И., Григораш О.В. Курзин Н.Н. и др. Преобразователи электрической энергии: основы теории, расчёта и проектирования. – Краснодар, 2002, с. 358.

References

1. Nikitenko G.V., Konopljov E.V. Vetrojenergeticheskie ustanovki v sistemah avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Stavropol' AGRUS. 2008. S.152.
2. 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.
3. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Sulejmanov R.A. i dr. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenergii. Krasnodar. 2012. S. 272.
4. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E., Kvitko A.V. Vozobnovljaemye istochniki jelektrojenergii: terminy, opredelenija, dostoinstva i nedostatki. Trudy Kubanskogo gosudartvennogo agrarnogo universiteta. 2011. № 32. S.189-192.
5. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr. Avtonomnye istochniki jelektrojenergii: sostojanie i perspektivy. Krasnodar. 2012. S.174.
6. Grigorash O.V. Asinhronnye generatory v sistemah avtonomnogo jelektrosnabzhenija. Jelektrotehnika. 2002. № 1. S 30-34.
7. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Normov D.A. i dr. Modul'nye sistemy garantirovannogo jelektrosnabzhenija. Krasnodar. 2005. S. 306.
8. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. Staticheskie preobrazovateli jelektrojenergii. Krasnodar. 2006. S.264.
9. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovmestivosti uzlov SAJe. Promyshlennaja jenergetika. 2001. № 2. S.44-47.
10. Bogatyrev N.I., Grigorash O.V. Kurzin N.N. i dr. Preobrazovateli jelektricheskoy jenerгии: osnovy teorii, raschjota i proektirovanija. – Krasnodar, 2002, s. 358.