

УДК 620.075.8

UDC 620.075.8

**РАСЧЁТ МОЩНОСТИ И ВЫБОР ОСНОВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

**CALCULATION OF POWER AND CHOICE OF BASIC FUNCTIONAL UNITS OF WIND POWER ELECTRIC-INSTALLATION**

Квитко Андрей Викторович  
старший преподаватель, [9061870011@mail.ru](mailto:9061870011@mail.ru)

Kvitko Andrey Viktorovich  
senior lecturer, [9061870011@mail.ru](mailto:9061870011@mail.ru)

Гончаров Анатолий Андреевич  
студент, [4323139@mail.ru](mailto:4323139@mail.ru)  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

Goncharov Anatoliy Andreevich  
student, [4323139@mail.ru](mailto:4323139@mail.ru)  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье рассматриваются основные аналитические выражения по расчёту мощности генераторов и особенности выбора основных функциональных узлов ВЭУ, позволяющие на этапе проектирования проводить предварительную оценку эффективности ветроэлектрических станций, обеспечивающих электроснабжение конкретных потребителей электроэнергии

This article discusses the basic analytical expressions for the calculation of power generators and select features basic functional units of wind turbines, allowing the design phase to conduct a preliminary assessment of the effectiveness of wind power stations, which supplies specific consumers of electric power

Ключевые слова: ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, ПРИВОД ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ, ПРИВОД ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ, НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Keywords: WINDFARMS INSTALLATION, WIND-FARMS STATION, DRIVE OF CONSTANT SPEED, DRIVE OF CONSTANT FREQUENCY, DIRECTLY FREQUENCY INVERTER

Известно, что выходная мощность генератора ветроэлектрической установки (ВЭУ) зависит от конструкции лопастей и кинетической энергии ветра [1]. Кинетическую энергию воздушного потока, со средней скоростью  $V$ , проходящего через поперечное сечение с площадью  $S$ , перпендикулярно скорости ветра, и массу воздуха  $m$  определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{кин} = \frac{mV^2}{2}, \tag{1}$$

где  $m = \rho VS$ ;  $\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха соответствующая нормальным климатическим условиям:  $t = 15^\circ\text{C}$ , давление равно  $760 \text{ мм рт. ст}$  ( $101,3 \text{ кПа}$ );  $S$  – ометаемая площадь ветроколеса (ВК) с горизонтальной осью вращения, определяется по формуле

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \tag{2}$$

где  $D$  – диаметр ветроколеса.

Если в (1) подставить значение массы воздуха  $m$  и ометаемой площади ветроколеса  $S$ , получим формулу для определения механической мощности ВЭУ

$$N_{BK} = 0,5\rho\xi D^2V^3, \quad (3)$$

где  $\xi = 0,4 \dots 0,45$  – коэффициент использования энергии ветра.

Электрическая мощность ВЭУ

$$P_{ВЭУ} = N_{BK}\eta_{мех}\eta_{Г}, \quad (4)$$

где  $\eta_{мех} = 0,8 \dots 0,9$  – механическое КПД ветроагрегата;  $\eta_{Г} = 0,7 \dots 0,9$  – КПД генератора электроэнергии с учётом КПД стабилизатора напряжения.

После подстановки всех указанных средних значений коэффициентов в (4) и (3) получается ориентировочная формула для определения электрической мощности генератора ВЭУ

$$P_{ВЭУ} = 0,68D^2V^3. \quad (5)$$

Как видно из формулы (5) электрическая мощность генератора ВЭУ в основном зависит от диаметра ВК и скорости ветра. Известно также, что мощность генератора ВЭУ также зависит от формы и профиля лопастей [2]. В настоящее время широкое распространение получили ВЭУ с крыльчатками ВК и горизонтальной осью вращения.

Основными преимуществами ВЭУ с горизонтальной осью вращения ВК является то, что условия обтекания лопастей воздушным потоком постоянны, не изменяются при повороте ВК, а определяются только скоростью ветра. Благодаря этому, а также достаточно высокому значению коэффициента использования энергии ветра, ВЭУ крыльчатого типа в настоящее время получили наибольшее распространение. Здесь основным критерием является экономическая эффективность ВЭУ [3].

Мощность генератора ВЭУ пропорциональна скорости ветра в третьей степени (5). Поэтому при изменении скорости ветра в широком диапазоне происходят большие потери энергии в генераторах вследствие их

низких КПД на малых нагрузках, а в асинхронных генераторах возникают, кроме того, большие реактивные токи, которые необходимо компенсировать. Для исключения этого недостатка в некоторых ВЭУ применяют два генератора с номинальными мощностями 100% и 20 – 30% от номинальной мощности ВЭУ. При слабых ветрах первый генератор отключается. В некоторых ВЭУ малый генератор обеспечивает также возможность работы установки при малых скоростях ветра при пониженных оборотах с высоким значением коэффициента использования энергии ветра.

На выбор основных функциональных узлов ВЭУ (генератора, инвертора, аккумуляторных батарей (АБ), коммутационной аппаратуры и т.д.) и оказывают влияние три основных фактора.

1) Выходная мощность (кВт), определяется только мощностью преобразователя (инвертора) и не зависит от скорости ветра, емкости аккумуляторов. Ещё её называют «пиковой нагрузкой». Этот параметр определяет максимальное количество электроприборов, которые могут быть одновременно подключены к системе электроснабжения. Не возможно одновременно потреблять больше электроэнергии, чем позволяет мощность инвертора. Для увеличения выходной мощности возможно одновременное подключение нескольких инверторов.

2) Время непрерывной работы при отсутствии ветра или при слабом ветре 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 емкостью.

3) Скорость заряда АБ зависит от мощности самого генератора. Также этот показатель зависит от скорости ветра, высоты мачты, рельефа местности. Чем мощнее генератор, тем быстрее будут заряжаться АБ, а это значит, что быстрее будет потребляться электроэнергия из батарей. Более мощный генератор следует брать в том случае, если ветра в месте установ-

ки слабые или потребители потребляют электроэнергию постоянно, но в небольших количествах.

С учетом перечисленных выше для выбора основных функциональных узлов ВЭУ необходимы ответы еще на три вопроса:

1) Какое среднее количество электроэнергии, необходимо электроприёмникам ежемесячно? Эти данные необходимы для выбора генератора. Их можно взять из коммунальных счетов на оплату электроэнергии или рассчитать.

2) Какое предельное время автономной работы энергосистемы в безветренные периоды или периоды, когда потребление энергии из АБ будет превышать скорость зарядки АБ генератором? Данный параметр определяет количество и емкость АБ.

3) Какая максимальная нагрузка на сеть в пиковые моменты (измеряется в киловаттах)? Необходимо для подбора инвертора переменного тока.

Кроме того, для определения возможностей установки ВЭУ необходимо оценить ветровые потоки местности, где предполагается установить ВЭУ, определить суммарную мощность электрической нагрузки (электроприборов) и построить график нагрузок (эксплуатации).

Для предварительной оценки необходимо также выполнить следующие мероприятия.

1. Осуществить выбор места, в котором ветер, по наблюдениям, наиболее сильный. Это должно быть высокое и открытое для ветра место. Рядом должны отсутствовать высокие строения и лесные массивы.

2. Собрать данные о ветре в предполагаемом месте установки ВЭС. Эти данные можно получить в ближайшей метеорологической станции или в аэропорте. Кроме того, среднюю скорость ветра можно измерить самостоятельно с помощью прибора «Анемометр». Чем длительное наблюдение (желательно по месяцам и в течении суток), тем точнее измерения.

Необходимо также помнить, что высота измерений должна находиться в пределах 5 – 10 м.

3. Оценить потребность в электроэнергии. Здесь необходимо знать:

– годовое потребление электроэнергии ( $kWh$ ) по месяцам;

– пиковые нагрузки ( $kWh$ ) – это максимальное количество энергии, которое может быть потребовано в любое время.

Эти данные помогут установить счётчик электроэнергии. Но возможно их определить самостоятельно. Для этого нужно составить список всех электроприемников (освещение, телевизор, холодильник, кондиционер, оргтехника и т.п.) и суммировать их мощности ( $kWh$ ). Далее необходимо оценить максимальную нагрузку, для этого необходимо посчитать мощность электроприборов ( $kWh$ ), которые могут быть включены одновременно.

4. Провести оценку электроприборов по степени важности. От этого будет зависеть сложность схемы ВЭС, в том числе ее надежность и стоимость.

После проведения такой оценки по установке можно обращаться в соответствующие организации для приобретения и установки ВЭУ.

Выбор АБ осуществляется исходя из наиболее вероятной продолжительности штiria.

Перед выбором инверторов необходимо учесть, что известны две группы инверторов, которые различаются по стоимости примерно в 1,5 раза.

Первая группа более дорогих инверторов обеспечивает синусоидальное выходное напряжение.

Вторая группа обеспечивает выходное напряжение в виде упрощенного сигнала, заменяющего синусоиду, как правило, прямоугольной или трапециидальной формы.

Для подавляющего большинства бытовых приборов можно использовать упрощенный сигнал. Синусоида важна только для некоторых телекоммуникационных приборов.

Выбор инвертора производится исходя из пиковой мощности энергопотребления стандартного напряжения  $220\text{ В}/50\text{ Гц}$ . Существует два режима работы инвертора. Первый режим – это режим длительной работы. Данный режим соответствует номинальной мощности инвертора. Второй режим – это режим перегрузки. В данном режиме большинство моделей инверторов в течении нескольких десятков минут (до  $30\text{ мин}$ ) могут отдавать мощность в  $1,5$  раза больше, чем номинальная. В течение нескольких секунд большинство моделей инверторов могут отдавать мощность в  $2,5$  –  $3,5$  раза большую чем номинальная. Сильная кратковременная перегрузка возникает, например, при включении холодильника. Как правило, мощность инвертора примерно равна расчетной мощности ВЭУ.

При выборе источника и стабилизатора параметров электроэнергии ВЭУ необходимо учитывать специфическую особенность работы ветроагрегатов, связанную с непостоянством во времени развиваемой мощности, а также провести анализ известных способов и устройств стабилизации параметров электроэнергии.

В настоящее время известно большое количество методов и устройств стабилизации частоты тока генераторов ВЭУ. Методы получения стабильной частоты генерируемой электроэнергии при нестабильной скорости ветрового потока классифицируются по конструктивным признакам:

– нестабильная энергия ветрового потока преобразуется в стабильную частоту вращения ветроколеса – аэромеханическая стабилизация (АМС);

– переменная частота вращения ветроколеса преобразуется в постоянную частоту вращения генератора с помощью стабилизирующих устройств – привод постоянной скорости (ППС);

– нестабильная частота вращения ветроколеса преобразуется с помощью генератора в стабильную частоту – привод постоянной частоты (ППЧ);

– переменная частота на выходе генератора, преобразуется с помощью преобразователей частоты в стабильную (ПЧ).

При аэромеханической стабилизации частоты вращения ветроколеса способ изменения угла установки лопасти нашел широкое применение в системах автоматического регулирования частоты вращения ветроколеса.

В ППС осуществляется двукратное преобразование энергии. По виду промежуточной энергии, используемой в процессе преобразования, все ППС разделяют на механические, гидравлические, пневматические и электромашинные.

В механических ППС применяется мультипликатор (редуктор) с изменяющимся передаточным отношением. Механические ППС имеют сравнительно низкий КПД, повышенные массогабаритные показатели и невысокие показатели надежности.

В гидравлических приводных устройствах используют две одинаковые гидравлические машины - гидронасос и гидромотор. Регулирование частоты вращения осуществляется изменением производительности гидронасоса. Гидравлический привод не нашел широкого распространения из-за высокой стоимости и сложности изготовления.

В пневматических приводах применяются компрессор и турбина. Частота регулируется изменением расхода воздуха, проходящего через турбину. Основные недостатки пневматических приводов: жесткая механическая характеристика, затрудняющая стабилизацию частоты вращения, и низкий КПД (до 0,5).

В электромашинных приводах используются электромагнитные муфты различных конструкций. Частоту вращения ротора генератора регулируют изменением скольжения муфты. Основной недостаток привода: большие потери энергии (пропорциональны скольжению).

В ППЧ преобразование частоты осуществляется непосредственно с помощью управляемых генераторов постоянной частоты. Однако системы с ППЧ обладают всеми недостатками электрических машин со щёточным узлом, имеют сложную систему управления, что значительно понижает показатели её надежности.

Применение ПЧ на выходе генераторов позволяет эксплуатировать ВЭУ в режиме с изменяемой частотой вращения. Электромашинные ПЧ имеют низкий КПД и низкие показатели надежности. Статические ПЧ разделяются на две группы-преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока и ПЧ с непосредственной связью (НПЧ). Основным недостатком преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока (генератор-выпрямитель-инвертор) является двойное преобразование электроэнергии, что приводит к уменьшению КПД и увеличению массы и габаритов преобразователя.

НПЧ в сравнении с преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока имеют более высокую надежность, способны независимо плавно регулировать частоты тока и напряжения независимо от величины и характера нагрузки.

По способу управления различают НПЧ с естественной коммутацией силовых вентилях и НПЧ с искусственной коммутацией силовых вентилях. Последние способны изменять угол сдвига фаз на входе преобразователя независимо от параметров нагрузки и при этом обеспечивать стабилизацию частоты тока и напряжения. Это их положительное свойство позволяет уменьшить массу конденсаторов, используемых для компенсации реак-



тивной мощности асинхронных генераторов и синхронных генераторов с постоянными магнитами [4].

Для улучшения технических характеристик ВЭУ в их конструкции необходимо применять бесконтактные генераторы электроэнергии: асинхронные генераторы с емкостным возбуждением и синхронные генераторы с постоянными магнитами [5,6].

Поскольку ВЭУ начинают вырабатывать энергию при скоростях ветра  $4 - 5$  м/с, то значительную часть времени они работают с дефицитом первичной мощности, который приводит к колебаниям напряжения и частоты тока в значительных пределах.

Перспективным, в том числе выгодным, является направление применение ВЭУ в сельскохозяйственном производстве для электроснабжения потребителей, которые допускают работу при колебаниях частоты тока в широких пределах. К числу таких потребителей относятся: электронагревательные приборы, центробежные, вихревые и вибрационные насосы, опреснительные агрегаты. ВЭУ при слабых ветрах используются также для заряда АБ, поскольку заряд можно производить при значительных колебаниях тока и потребляемой мощности.

Таким образом, рассмотренные аналитические выражения по расчёту мощности генераторов и особенности выбора основных функциональных узлов ВЭУ, позволят на этапе проектирования проводить предварительную оценку эффективности ветроэлектрических станций, обеспечивающих электроснабжение конкретных потребителей электроэнергии.

### Литература

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

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

### References

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

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

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.