

35. Сравнить мощность, теряемую водой при падении с Ниагарского водопада ($H = 48$ м, $Q = 5730$ м³/с) и водопада Виктория ($H = 120$ м, $Q = 1400$ м³/с).

Ответ: Мощность, теряемая водой Ниагарского водопада, в 1,64 раза превосходит мощность, теряемую водой водопада Виктория.

36. Сколько энергии вырабатывает ГЭС, построенная на Ниагарском водопаде за год, если КПД преобразования мощности падающей воды $\eta = 74$ %. Расход потока $Q = 5730$ м³/с, $H = 48$ м.

Ответ: $W = 17,52$ ТВт·час.

5. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

5.1. ВВЕДЕНИЕ

Современная ветроэнергетика с её техническим оснащением является вполне сложившимся направлением энергетики. Ветроэнергетические установки мощностью от единиц киловатт до нескольких мегаватт серийно производятся в Европе, США, России и других странах мира. Основная часть таких установок применяется для производства электроэнергии как в единой энергосистеме, так и в автономных системах.

Как будет показано далее, при скорости ветра U_0 и плотности воздуха ρ ветроколесо, ометающее площадь A , развивает мощность:

$$P = C_p A \frac{\rho U_0^3}{2}, \quad (5.1)$$

где C_p – параметр, характеризующий эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и называемый коэффициентом мощности. Обычно среднегодовая мощность, снимаемая с единицы площади ветроколеса, пропорциональна C_p , плотности воздуха и кубу средней скорости, т.е. $P \sim C_p \rho (\bar{u})^3$.

Максимальная проектная мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ) рассчитывается для некоторой стандартной скорости ветра. Обычно эта скорость равна примерно 12 м/с. В таком случае с 1 м² ометаемой площади снимается порядка 300 Вт при значении C_p от 0,35 до 0,45. В табл. 5.1 представлено классификация и основные характеристики ВЭУ различных классов. В районах с благоприятными ветровыми условиями среднегодовое производство электроэнергии составляет 25...33 % его максимального проектного значения.

Таблица 5.1

Параметры ВЭУ различной проектной мощности
при скорости ветра 12 м/с

Класс ВЭУ	Расчетная (проектная) мощность, кВт	Диаметр ветроколеса	Период вращения Т, с
Малые	10...25	6,4...10	0,3...0,4
Средние	10...100...150	14...20...25	0,6...0,9...1,1
Большие	250...500...1000	32...49...64	1,4...2,1...3,1
Очень большие	2000...3000...4000	90...110...130	3,9...4,8...5,7

Примечание: Параметры рассчитаны для коэффициента мощности $C_p=30\%$, плотности воздуха $1,2 \text{ кг/м}^3$, быстроходности $Z = 6$. Расчетная мощность $P = 0,5 (\pi D^2 / 4) C_p U_0^3$.

Срок службы ВЭУ обычно составляет 15...20 лет, а их стоимость колеблется от 1000 до 1500 долларов США за 1 кВт проектной мощности. Одно из основных условий при проектировании ВЭУ – обеспечение их защиты от разрушения очень сильными случайными порывами ветра. Ветровые нагрузки пропорциональны квадрату скорости ветра, а один раз в 50 лет бывают ветры со скоростью, превышающей в 5...10 раз среднюю, поэтому установки приходится проектировать с большим запасом прочности.

Кроме того, скорость ветра очень сильно колеблется во времени, что может привести к усталостным разрушениям, а для лопастей к тому же существенны переменные гравитационные нагрузки (порядка 10^7 циклов за 20 лет работы).

Причиной возникновения ветров является поглощение земной атмосферой солнечного излучения, приводящего к расширению воздуха и появлению конвективных течений. В глобальном масштабе на эти тепловые явления накладывается эффект вращения Земли, приводящий к появлению преобладающих направлений ветра. Кроме синоптических закономерностей многое в этих процессах определяется местными особенностями, обусловленными определенными географическими факторами. Скорость ветров увеличивается с высотой, а их горизонтальная компонента значительно больше вертикальной.

Суммарная кинетическая энергия ветров оценивается величиной порядка $1,2 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$, что равно примерно 1 % поглощенной энергии солнечного излучения.

Достоверно оценить, какая доля энергии ветра может быть использована, вряд ли возможно. Однако в ряде стран, например в Германии и Великобритании, доля ветроэнергетики в производстве всей электроэнергии доходит до 20 %.

Автономные ветровые энергоустановки весьма перспективны и уже вытесняют дизельные электростанции, в особенности, в отда-

ленных районах и на островах вследствие дороговизны доставки органического топлива.

5.2. КРАТКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) классифицируются по двум основным признакам – геометрии ветроколеса и его положению относительно направления ветра. На рис. 5.1 показаны взаимодействия воздушного потока с лопастью ветроколеса и возникающие при этом силы.

Если воздушный поток, имеющий скорость u , набегают на лопасть, перемещающуюся со скоростью V , то скорость потока относительно лопасти будет V_2 . При взаимодействии потока с лопастью возникают:

1) сила сопротивления F_0 , параллельная вектору относительной скорости набегающего потока V_2 ;

2) подъемная сила F_L , перпендикулярная силе F_D . Слово «подъемная», разумеется, не обозначает, как в аэродинамике, что эта сила направлена вверх;

3) завихрение обтекающего лопасти потока;

4) турбулизация потока, т.е. хаотические возмущения его скорости по величине и направлению. Турбулентность возникает как за колесом, так и перед ним, в результате лопасть часто оказывается в потоке, возмущенном другими лопастями;

5) препятствие для набежавшего потока. Это его свойство характеризуется параметром, называемым геометрическим заполнением и равным относительно площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку, к ометаемой ими площади. Так, например, при одинаковых лопастях четырехлопастное колесо имеет вдвое больше геометрическое заполнение, чем двухлопастное.

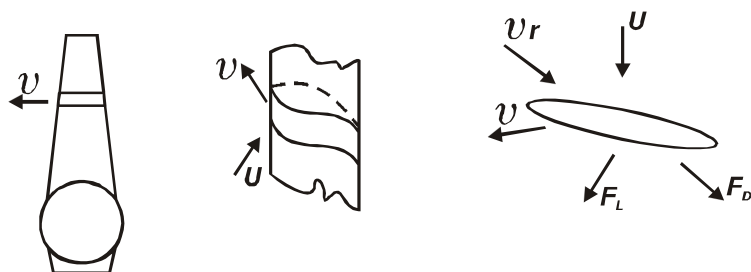


Рис. 5.1. Скорости элемента лопасти и действующие на него силы (U – скорость ветра; V – скорость элемента лопасти, V_r – скорость элемента лопасти относительно ветра; F_D – сила лобового сопротивления,

действующая в направлении скорости V_r ; F_L – подъемная сила, перпендикулярная силе F_D

Чаще всего ВЭУ классифицируют по следующим признакам (рис. 5.2):

1. По расположению оси ветроколеса по отношению к потоку ветра, ось вращения ветроколеса может быть параллельна или перпендикулярна воздушному потоку. В первом случае установка называется горизонтально-осевой, во-втором – вертикально-осевой.

2. По типу вращающей силы; установки использующие силу сопротивления, как правило, вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра, а установки, использующие подъемную силу, имеют линейную скорость концов лопастей, которая существенно больше скорости ветра.

3. По геометрическому заполнению ветроколеса; для основной массы установок оно определяется числом лопастей. ВЭУ с большим геометрическим заполнением ветроколеса развивают значительную мощность при относительно слабом ветре, и максимум мощности достигается при небольших оборотах колеса. ВЭУ с малым заполнением достигают максимальной мощности при больших оборотах и требуют большего времени для выхода на этот режим. Поэтому первые установки используются в качестве приводов водяных насосов, и даже при слабом ветре сохраняют работоспособность, вторые – в качестве приводов электрогенераторов, которым требуется высокая частота вращения.

4. По заданной цели; установки для непосредственного выполнения механической работы часто называют *ветряной мельницей* или *турбиной*; установки для производства электроэнергии, т.е. сопряженные турбина и электрогенератор называются *ветроэлектрогенератором*, *аэрогенератором*, или *установками с преобразованием энергии*.

5. От частоты вращения ветроколеса; существуют два вида ВЭУ, подключенных к мощной энергосистеме, частота вращения постоянна вследствие эффекта автосинхронизации, но такие установки менее эффективно используют энергию ветра, чем установки с переменной частотой вращения.

6. По типу сопряжения ветроколеса с электрогенератором; если ветроколесо связано напрямую с генератором, то такое соединение называется жестким; а если через буфер, роль которого играет промежуточный накопитель энергии, то такое соединение называют частично развязанным соединением.

Наличие буфера уменьшает влияние флуктуаций частоты вращения ветроколеса и позволяет более эффективно использовать энергию ветра и мощность электрогенераторов, т.е. не жесткое соединение, наряду с инерцией ветроколеса, уменьшает влияние флуктуаций скорости ветра на выходные параметры электрогенератора. Уменьшить это влияние позволяет также упругое соединение лопастей с осью ветроколеса, например с помощью подпружинных шарниров.

Приведенная классификация ВЭУ на основе перечисленных признаков изображена на рис. 5.2, но этим не исчерпывается все многообразие конструкций этих аппаратов.

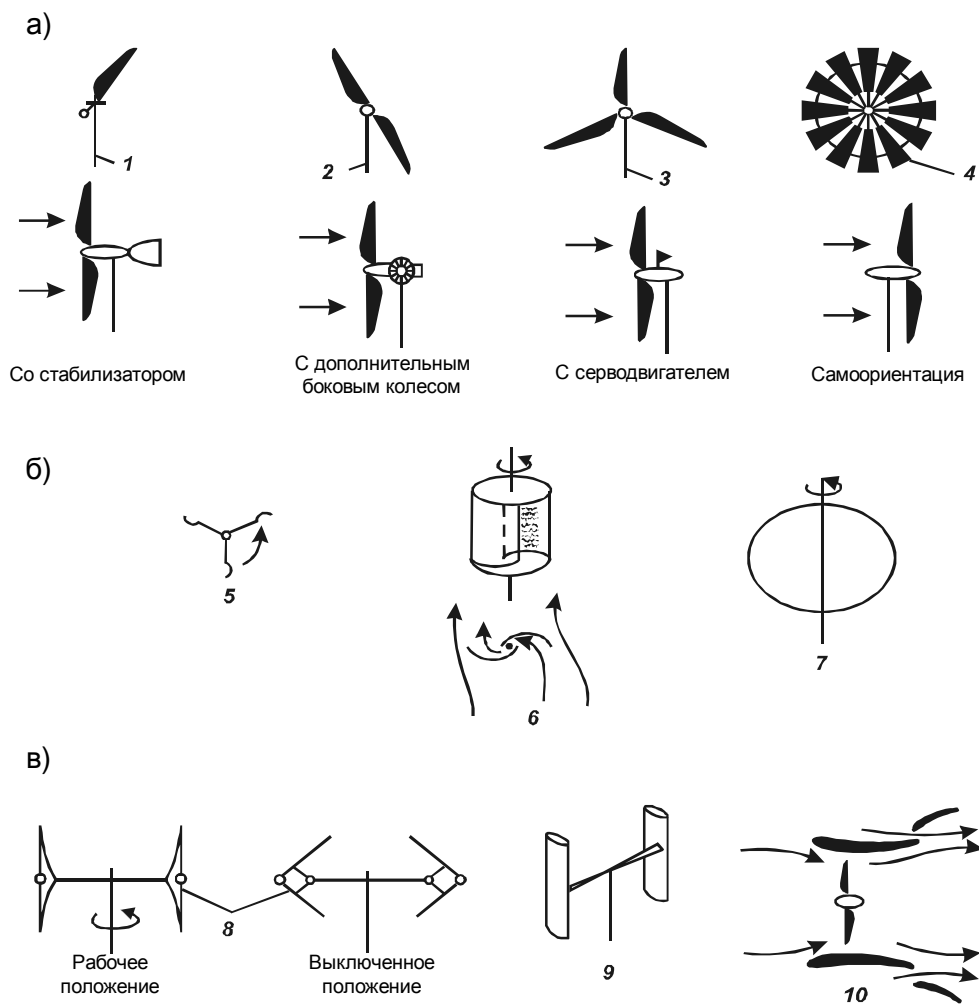


Рис. 5.2. Классификация ветроколес: с горизонтальной осью (а); с вертикальной осью (б); с концентраторами (усилителями) ветрового потока (в); 1 – однолопастное колесо; 2 – двухлопастное; 3 – лопастное; 4 – многолопастное; 5 – чашечный анемометр; 6 – ротор Савониуса; 7 – ротор Дарье; 8 – ротор Масгрува; 9 – ротор Эванса; 10 – усилитель потока

5.3. ВЕТРОУСТАНОВКИ С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ

Рассмотрим вначале ВЭУ с горизонтальной осью вращения, так называемый пропеллерный тип, наиболее широко распространенный на практике.

Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила. Относительно ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед опорной башней или за ней. При переднем расположении ветроколесо может иметь аэродинамический стабилизатор, удерживающий его в рабочем положении.

При заднем расположении башни оно частично затеняет ветроколесо и турбулизует набегающий на него поток. При работе колеса в таких условиях возникают – уменьшение нагрузки, повышающей шум, и флуктуации выходных параметров ВЭУ. Направление ветра может измениться довольно быстро, и ветроколесо должно четко отслеживать эти изменения. Поэтому у ВЭУ мощностью более 50 кВт для этой цели используются электрические серводвигатели.

В ВЭУ обычно применяется двух- или трехлопастные ветроколеса; последние отличаются очень плавным ходом. После ветроколеса стоит редуктор, соединенный с электрогенератором, все это расположено наверху опорной башни, в поворотной головке. Все это удобнее размещать в самом низу, у основания башни, но возникающие при этом сложности с передачей крутящего момента уменьшают все преимущества такого размещения.

Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении. Кроме того, такая схема позволяет только за счет удлинения вала установить редуктор с генератором у подножия башни.

Основными недостатками таких установок являются:

- 1) гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов;
- 2) пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора. Поэтому подавляющее число ВЭУ выполнено по схеме горизонтально-осевых установок, однако исследования вертикально-осевых установок все же продолжаются.

Кратко опишем основные типы вертикально-осевых ВЭУ (рис. 5.2).

Чашечный ротор (анемометр). Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления. Форма лопасти обеспечивает практически линейную зависимость частоты вращения колеса от скорости ветра.

Ротор Савониуса. Он вращается силой сопротивления. Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, т.е. довольно просты и дешевы. Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выпуклой сторонами лопастей ротора. Ввиду большого геометрического заполнения это ветроколесо обладает большим крутящим моментом и часто используется для приведения в действие водяных насосов.

Ротор Дарье. В этой установке вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль.

Подъемная сила максимальна в тот момент, когда лопасть с большой скоростью пересекает набегающий воздушный поток. Ротор Дарье чаще других используется в ветрогенераторах. Раскручиваться самостоятельно он, как правило, не может, поэтому для его пуска обычно используется генератор, работающий в режиме двигателя.

Ротор Эванса. В этом устройстве лопасти имеют возможность поворачиваться вокруг оси, тем самым создается возможность управления скоростью вращения ротора.

Мощность ветроэнергетических установок зависит от эффективности использования энергии воздушного потока. Одним из способов ее повышения является использование специальных концентраторов воздушного потока (рис. 5.2). Для горизонтально-осевых ВЭУ разработаны или предложены различные варианты таких усилителей потока. Это могут быть диффузоры или конфузоры, направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади большей, чем площадь ометаемой поверхности ветроколеса. Однако в промышленных ВЭУ концентраторы не получили распространения.

5.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Далее в этом подразделе получим соотношения для мощности, крутящего момента и силы сопротивления, действующих на ветроколесо. В этом анализе будем использовать линейное приближение.

В отсутствие турбулентности объем воздуха, проходящего в единицу времени через поперечное сечение ветроколеса площадью A (рис. 5.3), обладает кинетической энергией, равной:

$$P_0 = 0,5(\rho A_1 U_0)U_0^2 = 0,5\rho A_1 U_0^3 . \quad (5.2)$$

где ρ и U_0 – плотность и скорость набегающего воздушного потока. Таким образом, P_0 есть кинетическая энергия ветрового потока.

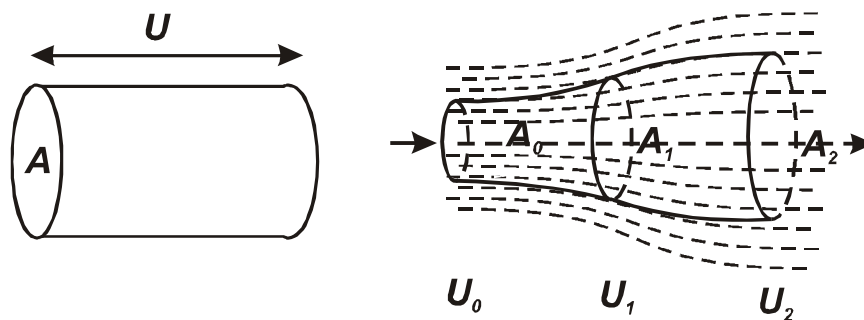


Рис. 5.3. К расчету мощности ветрового потока (а) и модель взаимодействия ветрового потока с ветроколесом (б)

Плотность воздуха ρ зависит от высоты над поверхностью Земли, а также метеорологических условий. Скорость ветра увеличивается с высотой, зависит от местных географических условий и довольно сильно меняется во времени. Для расчета будем считать, что скорость ветра U_0 и плотность ρ являются постоянными во времени и в любом поперечном сечении воздушного потока. На уровне моря плотность воздуха равна $1,2 \text{ кг/м}^3$, а необходимая для эффективной работы ветроустановки скорость ветра – порядка 10 м/с . При этих данных энергия ветра $P_0 = 600 \text{ Вт/м}^2$. При штормовом ветре $U_0 \sim 25 \text{ м/с}$, тогда $P_0 \sim 10000 \text{ Вт/м}^2$.

В теории ветроколеса предполагается, что проходящие через него линии тока не претерпевают разрыва, а само колесо заменяется таким проницаемым диском, при взаимодействии с которым воздушный поток отдает ему часть энергии, в силу чего давление в потоке и его импульс уменьшаются. Кроме того, в процессе взаимодействия в набегающий ламинарный поток вносятся различные возмущения, но здесь и в дальнейшем мы ими можем пренебречь.

На рис. 5.4, б величина A_1 – площадь, ометаемая ветроколесом, A_0 и A_2 – площади поперечных сечений проходящего через ветроколесо потока соответственно до и за ним, причем сечение A_0 расположено за пределами возмущенной ветроколесом области, а сечение A_2 – в месте наименьшей скорости потока. Положение площадей A_0 и A_2 можно определить по результатам экспериментальных измерений поля скоростей в окрестности ветроколеса. Непосредственно в сечении A_1 провести такие измерения нельзя из-за вращения ветроколеса.

Действующая на ветроколесо сила F_1 , равна изменению количества движения массы проходящего через него в единицу времени воздуха ρQ , то есть можно считать, что

$$F = \rho Q U_0 - \rho Q U_2. \quad (5.3)$$

Эта сила действует на ветроколесо со стороны протекающего через него воздушного потока, который можно считать однородным и имеющим скорость U_1 . Мощность, развиваемая этой силой, будет иметь вид:

$$P = F U_1 = \rho (U_0 - U_2) U_1. \quad (5.4)$$

Но эта мощность P есть энергия, теряемая в единицу времени ветровым потоком, взаимодействующим с ветроколесом, которая равна:

$$P_w = 1/2 \rho (U_0^2 - U_2^2). \quad (5.5)$$

Приравнявая (5.4) и (5.5), получим:

$$(U_0 - U_2) U_1 = 0,5 (U_0^2 - U_2^2) = 0,5(U_0 - U_2) (U_0 + U_2). \quad (5.6)$$

Из этого соотношения следует

$$U_1 = \frac{(U_0 + U_2)}{2}. \quad (5.7)$$

То есть из линейной теории следует, что скорость воздушного потока в плоскости ветроколеса не может быть меньше половины скорости набегающего потока.

Масса воздуха, проходящего через поверхность A_1 , ометаемой ветроколесом в единицу времени,

$$\dot{m} = \rho A_1 U_1. \quad (5.8)$$

Тогда (5.4) примет вид:

$$P = \rho A_1 U_1^2 (U_0 - U_2). \quad (5.9)$$

А после замены U_2 из (5.7) получим

$$P = \rho A_1 U_1^2 (U_0 - (2U_1 - U_0)) = 2 \rho A_1 U_1^2 (U_0 - U_1). \quad (5.10)$$

Обозначим через a величину:

$$a = (U_0 - U_1) / U_0, \quad (5.11)$$

называемую **коэффициентом торможения потока**.

Тогда величина скорости будет иметь вид:

$$U_1 = (1 - a) / U_0. \quad (5.12)$$

Но с учетом (5.7) и (5.11)

$$a = (U_0 - U_2) / (2 U_0). \quad (5.13)$$

Очень часто величину a также называют **коэффициентом индукции** или **возмущения**.

Подставляя U_1 из (5.12) в (5.10), получим:

$$P = 2\rho A_1(1-a)^2 U_0^2 [U_0 - (1-a) U_0] = 0,5\rho A_1 U_0^3 [4a(1-a)^2] . \quad (5.14)$$

Сопоставляя это выражение с (5.2), получим для мощности

$$P = C_p P_0 , \quad (5.15)$$

где P_0 – мощность набегающего потока; C_p – часть этой мощности, передаваемая ветроколесу (эту часть называют коэффициентом мощности), равная:

$$C_p = 4 a (1 - a^2) . \quad (5.16)$$

Иногда вместо коэффициента a применяют коэффициент $b = U_2/U_0$, также называемый **коэффициентом торможения потока**.

Легко показать, что максимальное значение коэффициента C_p имеет величину (рис. 5.4):

$$C_{p\max} = 16/27 = 0,59 . \quad (5.17)$$

Таким образом, в лучшем случае только немногим более половины энергии набегающего ветрового потока можно использовать для преобразования кинетической энергии потока в энергию вращения ветроколеса. Это объясняется тем, что воздушный поток должен обладать определенной кинетической энергией, чтобы покинуть область ветроколеса. Равенство (5.17) называется критерием Бетца.

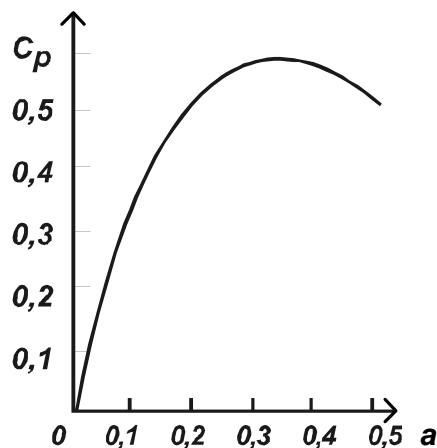


Рис. 5.4. Зависимость коэффициента мощности C_p от коэффициента торможения потока a

Этот критерий справедлив для любой энергетической установки, обтекаемой свободным потоком газа или жидкости. В традиционных ГЭС турбина обтекается не свободным, а ограниченным стенками водовода потоком, поэтому данный критерий здесь не приемлем. В лучших промышленных ВЭУ коэффициент мощности достигает 0,4. Так как максимальное значение коэффициента мощности равно 0,59, то можно считать, что КПД таких генераторов равно $0,4/0,59 = 0,68$.

Коэффициент мощности C_p характеризует эффективность преобразования ветрогенератором энергии воздушного потока, проходящего через ометаемую ветроколесом площадь A_1 (рис. 5.2, б)

Удельная мощность ветрового потока, т.е. мощность, снимаемая с единицы его поперечного сечения, будет больше, если поперечным сечением считать сечение A_0 , а не A_1 , так как $A_0 < A_1$.

Можно показать, что удельная мощность в этом случае, используемая ветроустановкой, составит примерно 0,89 удельной мощности ветрового потока, т.е. максимальное значение КПД ВЭУ равно 89%. Эту особенность в определении КПД следует иметь в виду при сравнении удельных характеристик ВЭУ различных типов.

5.5. ЛОБОВОЕ ДАВЛЕНИЕ НА ВЕТРОКОЛЕСО

Течение идеального газа (или жидкости) описывается уравнением Бернулли. Воспользуемся этим уравнением для определения нагрузки, испытываемой ветроколесом с горизонтально-осевым расположением генератора. Эта нагрузка возникает вследствие разности давлений Δp в набегающем потоке непосредственно до и после ветроколеса (рис. 5.5), которое, как и раньше, будем считать пронизываемым диском площадью A_1 .

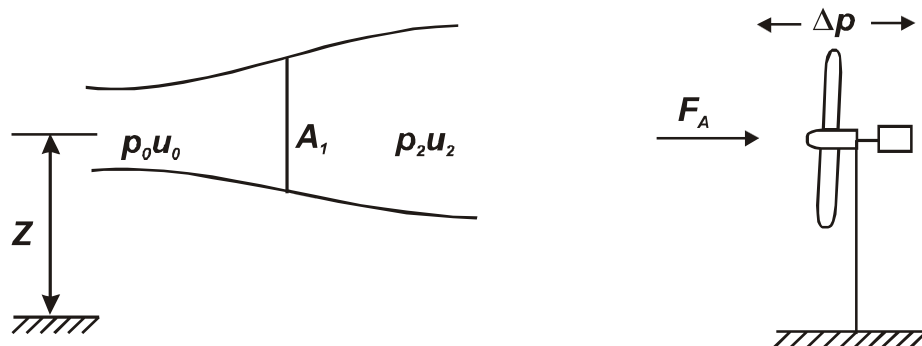


Рис. 5.5. Лобовое давление на ветроколесо: U – скорость ветрового потока; P – давление; Z – высота; F_A – осевая нагрузка; Δp – разность давлений

Максимальный перепад давления будет в случае, если $U_2 = 0$. Таким образом,

$$\Delta p_{\max} = 0,5 \rho U_0^2, \quad (5.20)$$

а максимальная нагрузка, действующая на ветроколесо, будет

$$F_{A \max} = 0,5 \rho A_1 U_0^2. \quad (5.21)$$

В горизонтально-осевых ВЭУ эта сила действует по оси ветроколеса и называется *лобовым давлением*.

Очевидно, действуя на ветроколесо, сила равна скорости изменения количества давления набегающего воздушного потока:

$$F_A = \rho A_1 (U_0 - U_1) \cdot \dot{V} \quad (5.22)$$

Используя (5.8), (5.11) и (5.13), получим

$$F_A = (\rho A_1 U_1)(2U_0 a) = \rho A_1 (1 - a) U_0 (2U_0 a) = 0,5 \rho A_1 U_0^2 \cdot 4a (1 - a). \quad (5.23)$$

В приближении предлагаемой модели член $0,5 \rho A_1 U_0^2$ равен силе, действующей на находящийся в потоке непроницаемый диск площадью A_1 .

Силу, действующую на заданное ветроколесо, можно представить так:

$$F_A = C_F \rho A_1 U_0^2 / 2,$$

где C_F – коэффициент лобового давления, зависящий от параметров ветроколеса, и, как видно из (5.23), имеет вид:

$$C_F = 4 a (1 - a). \quad (5.24)$$

При $a = 0,5$ величина $C_F = 1$, что соответствует значению $U_2 = 0$. Согласно критерию Бетца, максимальный КПД ветроколеса достигается при $a = 0,33$, и ему соответствует значение $C_F = 8/9$.

Из-за краевых эффектов коэффициент лобового сопротивления непроницаемого диска на самом деле превышает единицу и равен примерно 1,2. Тем не менее, применяющаяся здесь линейная теория показывает, что представление ветроколеса почти непроницаемым диском в теоретических расчетах вполне оправдано. Представление об обтекании ветроколеса, как о течении невозмущенного потока воздуха в промежутках между лопастями, является неточным.

Особенно неприемлемо такое представление при работе ветроколеса с высоким КПД, когда оно оказывает максимальное сопротивление ветровому потоку.

Величина $0,5 \rho A_1 U_0^2$ в (5.23) и соответствующая ветровая нагрузка быстро возрастают с увеличением скорости ветра и, как правило, ветроколеса не выдерживают нагрузок со скоростью выше ~ 20 м/с. Для предупреждения их разрушения в этом случае используют следующие способы:

- а) поворот ветроколеса или его лопастей в нерабочее положение;
- б) уменьшение снимаемой мощности и соответственно лобового давления;
- в) применение лопастей такого профиля, чтобы они способствовали самоторможению при такой скорости ветра;

г) принудительную остановку ветроколеса.

Использование в ветроколесе неподвижных самотормозящихся лопастей – это наиболее простой и дешевый способ, обеспечивающий безаварийную работу ВЭУ, однако при этом не всегда удается достичь высоких значений КПД при нормальных ветровых условиях.

5.6. Крутящий момент

Для определения крутящего момента (момента силы) на выходе ветроколеса можно воспользоваться результатами расчетов лобового давления. При таком подходе не используется закон сохранения момента импульса в системе ветроколесо – набегающий поток, который здесь использовать довольно затруднительно.

Максимальный крутящий момент ветроколеса T , очевидно, не может превышать значения, равного произведению максимальной действующей на ветроколесо силы на максимальный радиус R , т.е.

$$T_{\max} = F_{\max} \cdot R , \quad (5.26)$$

так как величина максимальной силы определяется сопротивлением (5.21), т.е.

$$F_{\max} = \rho A_1 U_0^2 / 2 . \quad (5.27)$$

Следовательно,

$$T_{\max} = 0,5 \rho A_1 U_0^2 R . \quad (5.28)$$

В общем случае крутящий момент ветроколеса T можно представить в виде

$$T = C_T T_{\max} , \quad (5.29)$$

где C_T – коэффициент крутящего момента.

Введем в рассмотрение параметр Z , называемый **быстроходностью ветроколеса**, равный отношению окружной скорости конца лопастей V_r к невозмущенной скорости набегающего потока U_0 , т.е.

$$Z = V_r / U_0 = R \omega / U_0 , \quad (5.30)$$

где ω – угловая скорость вращения ветроколеса.

Тогда, заменяя в (5.28) значение R его выражением из (5.30), получаем:

$$T_{\max} = \rho A_1 U_0^2 (U_0 Z) / 2 \omega = P_0 Z / \omega , \quad (5.31)$$

где P_0 – мощность ветрового потока из (5.2).

Так как мощность на валу есть мощность, развиваемая ветроколесом P , то

$$P = T \omega . \quad (5.32)$$

Но согласно (5.15) $P = C_p P_0$, или, с учетом уравнений (5.29) и (5.31) равенство (5.32) примет вид:

$$C_p P_0 = C T_{\max} \omega; C_p P_0 = C_T P_0 Z; C_p = Z C_T . \quad (5.33)$$

Отметим, что на практике коэффициенты C_p и C_T не постоянны, являются функциями Z .

Согласно критерию Бетца (5.17), максимальное значение коэффициента C_p равно 0,59, поэтому в идеальном случае имеем

$$(C_T)_{\max} = 0,59/Z . \quad (5.34)$$

На рис. 5.6 представлены характеристики реальных ветроколес.

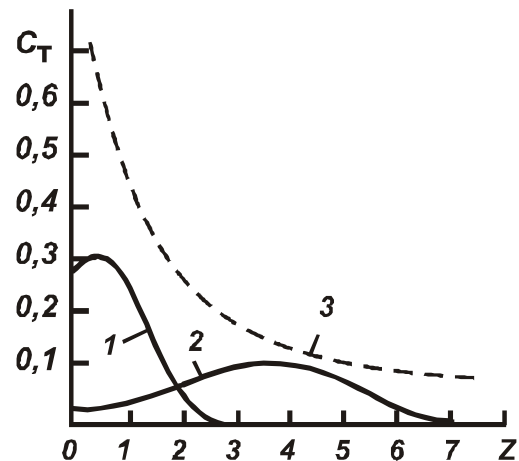


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента крутящего момента C_T от безразмерной скорости Z для ветроколес с высоким геометрическим заполнением (1), низким (2) и критерий Бетца (3)

Из рис. 5.6 видно, что ветроколеса с высоким геометрическим заполнением развивают большой крутящий момент при относительно низких линейных скоростях, и, наоборот, ветроколеса с небольшим заполнением (например, с двумя лопастями) имеют небольшой крутящий момент, и даже иногда не могут самостоятельно раскрутиться. С увеличением значений Z коэффициент момента, а следовательно, и сам момент стремится к нулю. Максимальные значения коэффициента C_T для одних типов ветроколес реализуются при высоких скоростях ветра, при которых лобовые давления велики – вплоть до разрушительных. Необходимо также отметить, что максимальным значениям крутящего момента и КПД соответствуют различные значения Z .

5.7. НЕКОТОРЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВЕТРОКОЛЕСА

Ветроколесо, в отличие от гидротурбины, обтекается практически неограниченным потоком воздуха, поэтому здесь нет возможности от-

вести прошедший через ветроколесо поток за пределы набегающего потока, и это определенным образом ограничивает эффективность ветроустановок. Наиболее существенное ограничение связано с тем, что прошедший через ветроколесо воздушный поток должен обладать определенной скоростью, чтобы покинуть окрестность ветроколеса, не создавая помех набегающему потоку. Согласно критерию Бетца, ветроколесо может преобразовывать не более 59 % энергии набегающего потока, но представленный ранее вывод этого критерия не позволяет определить условий работы ветроколеса, необходимых для достижения такого энергосъема. Поэтому в данном подразделе рассмотрим подробно определение этих условий и их качественный анализ.

Эффективность преобразования ветроколесом энергии ветрового потока (рис. 5.7) будет ниже оптимальной, если: 1) лопасти расположены так тесно, или ветроколесо вращается так быстро, что каждая лопасть движется в потоке, турбулизованном расположенными впереди лопастями; 2) лопасти расположены так редко, или ветроколесо вращается так медленно, что значительная часть воздушного потока будет проходить через поперечное сечение ветроколеса, практически не взаимодействуя с его лопастями.

Отсюда следует, что для достижения максимальной эффективности частоты вращения ветроколеса заданной геометрии она (частота) должна соответствовать скорости ветра.

Эффективность работы ветроколеса зависит от соотношения двух характерных видов времени: времени τ_b , за которое лопасть перемещается на расстояние, отделяющее ее от соседней лопасти, и времени τ_w , за которое создаваемая лопастью область сильного возмущения переместится на расстояние, равное её характерной длине.

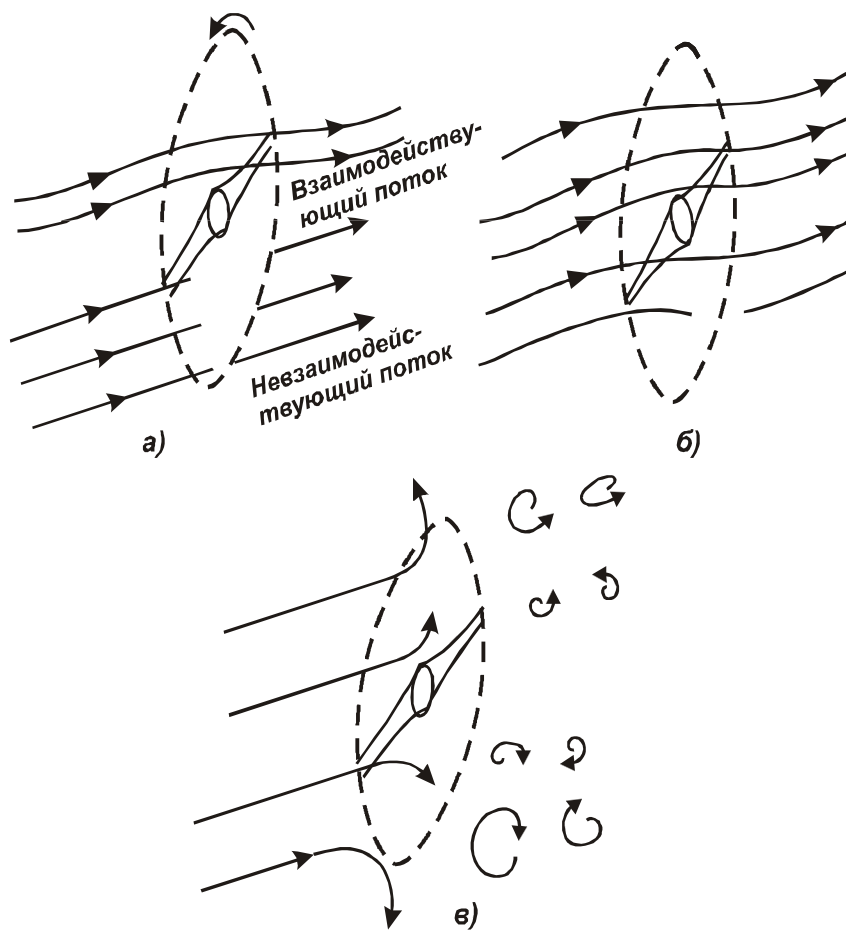


Рис. 5.7. Взаимодействие ветрового потока с ветроколесом при различной частоте его вращения: частота вращения мала, поэтому часть ветрового потока проходит через плоскость ветроколеса, не взаимодействуя с его лопастями (а); частота вращения оптимальна, весь поток взаимодействует с ветроколесом (б); частота вращения слишком велика, в этом случае ветровой поток интенсивно турбулизуется, т.е. его энергия рассеивается (в)

Время τ_w зависит от размера и формы лопастей и изменяется обратно пропорционально скорости ветра.

Характерное время τ_b для n -лопастного ветроколеса, вращающегося с угловой скоростью ω , равно:

$$\tau_b \approx \frac{2\pi}{n\omega} . \quad (5.34)$$

Характерное время существования в плоскости ветроколеса, создаваемого лопастью возмущения τ_w , примерно равно:

$$\tau_w \approx \frac{d}{U_0} , \quad (5.35)$$

где U_0 – скорость набегающего потока воздуха; d – характерная длина возмущений лопастью области.

Эффективность использования ветроколесом энергии ветра максимальна, когда на конце лопастей выполняется условие $\tau_w \approx \tau_B$, или, с учетом (5.34) и (5.35), получим:

$$n\omega / U_0 \approx 2\pi/d . \quad (5.36)$$

Применяя выражение для коэффициента быстроходности

$$Z = \frac{R\omega}{u_0} \quad (5.37)$$

и умножая обе части (5.36) на радиус ветроколеса R , получаем условие, определяющее максимальную эффективность его работы:

$$Z \approx \frac{2\pi}{n}(R/d) . \quad (5.38)$$

Из общих соображений следует ожидать, что $d \approx kR$, и при $k \approx 1$ оптимальная быстроходность ветроколеса будет:

$$Z_0 \approx (2\pi/kn) . \quad (5.39)$$

Опыт и практика показывает, что в действительности $k \approx 0,5$, поэтому для n – лопастного ветроколеса оптимальная быстроходность

$$Z_0 \approx 4\pi/n . \quad (5.40)$$

Например, для двухлопастного ветроколеса коэффициент мощности C_p максимален при $Z_0 \approx 4\pi/2 \approx 6$, а для четырехлопастного – при $Z_0 \approx 3$.

Приведенные выше рассуждения не совсем строги, но, тем не менее, полученные с их помощью результаты вполне достоверны. Например, у ветроколеса, с тщательно спрофилированными лопастями, оптимальный коэффициент быстроходности примерно на треть выше данного формулой (5.40).

В общем случае условием максимально эффективной работы конкретного ветроколеса является обеспечение постоянства оптимального для него угла атаки φ при любой скорости ветра.

При выводе критерия Бетца не учитывались динамические эффекты взаимодействия потока с ветроколесом. Одним из наиболее ценных здесь результатов является критерий Глауэрта, связывающий максимальное значение коэффициента мощности C_p с быстроходностью Z . На рис. 5.8 представлены критерии Бетца и Глауэрта, а также зависимость C_p от Z для различных типов ветроколес. При проектировании очень быстроходных колес следует учитывать, что

скорость обтекания концов лопастей должна быть меньше скорости звука (330 м/с) – во избежание образования ударных волн, что возможно, например, для достаточно совершенного двухлопастного ветроколеса при скорости ветра порядка 50 м/с.

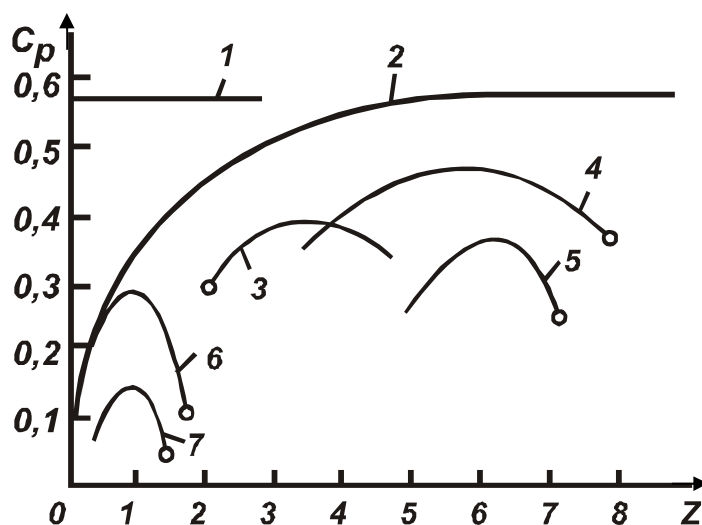


Рис. 5.8. Зависимость коэффициента мощности C_p от быстроходности Z : 1 – критерий Бетца; 2 – критерий Глауэрта; 3 – трехлопастное колесо; 4 – двухлопастное; 5 – вертикальноосевые колеса типа Дарье; 6 – многолопастные ветроколеса; 7 – ротор Савониуса

Быстроходность ветроколеса является, пожалуй, самым важным для их характеристики параметром, зависящим от трех основных переменных: радиуса ометаемой ветроколесом окружности, его угловой скорости вращения и скорости ветра. Как безразмерная величина, он является основным параметром подобия при исследовании и конструировании ВЭУ.

5.8. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЕТРОВ И ИХ АНАЛИЗ

Во всех странах имеются метеорологические службы, которые занимаются регистрацией и распространением метеосводок, в том числе и данных о направлении и силе ветра. Как правило, параметры ветра регистрируются на одной стандартной высоте – 10 м. Поэтому эти данные можно использовать лишь для грубой оценки ветроэнергетических ресурсов изучаемого района, но их чаще всего недостаточно для принятия конкретных технических решений, например, для выбора оптимальной конструкции ВЭУ. Для этого, как правило, необходимы более детальные наблюдения в большом числе точек местности и на разных высотах в различные месяцы го-

да. Результаты этих наблюдений можно сравнить со стандартными метеоданными и в дальнейшем учитывать корреляцию между ними.

Скорость ветра подразделяется метеослужбами по исторически сложившейся шкале Бофорта, в основе которой лежат визуальные наблюдения (см. [3,5]).

Скорость ветра при стандартных метеорологических измерениях определяется осреднением показателей анемометра, находящегося на 10-метровой высоте. Эти измерения могут повторяться каждый час, но обычно они проводятся значительно реже, поэтому по ним трудно судить о флуктуациях скорости ветра и его направлениях, что необходимо для расчета характеристик ветроустановок.

Скорости ветра на разных высотах различны, поэтому различны и воздействия ветра на ветроколесо, расположенное на разной высоте. На рис. 5.9 показано распределение скорости ветра по высоте Z с уровня земли до высоты примерно 100 м.

На поверхности земли ($Z = 0$) скорость ветра всегда равна нулю.

Затем до высоты, примерно равной высоте, расположенных в данном месте различных препятствий (зданий, деревьев и т.д.), скорость ветра увеличивается очень сложным образом, при этом его направление может изменяться практически случайно. Выше этой области зависимость скорости ветра от высоты имеет вид:

$$Z - d = Z_0 \exp (U_z / V) \quad (5.41)$$

или в явном виде относительно U_z :

$$U_z = V \ln \left(\frac{Z - d}{Z_0} \right), \quad (5.42)$$

где d – смещение нулевого уровня, значение которого несколько меньше высоты местных препятствий; Z_0 – высота препятствий относительно смещенного нулевого уровня; V – характерная скорость.

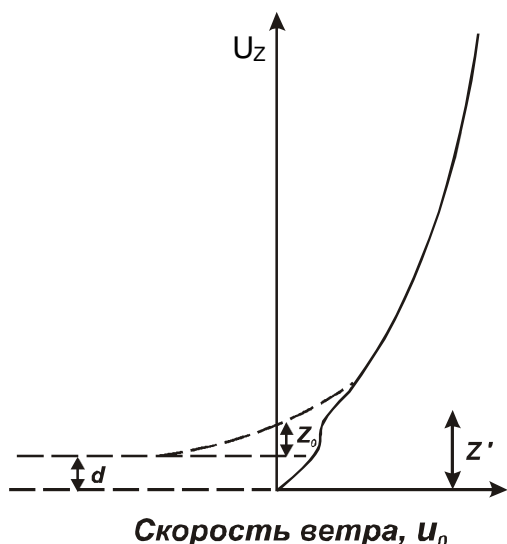


Рис. 5.9. Зависимость скорости U_0 ветра над поверхностью земли (Z' – высота местных препятствий)

Опыт показывает, что наилучшим местом для размещения ВЭУ является гладкая, куполообразная, ничем не затененная возвышенность. Вообще желательно, чтобы ветроустановка в радиусе нескольких сот метров была окружена полями или водной поверхностью.

Как правило, головки ветроустановок находятся от 5 до 50 м. Для определения скорости U_z на этих высотах часто используют зависимость, в которую входит значение стандартной скорости ветра U_s , измеренное на высоте 10 м. Она имеет вид

$$U_z = U_s \left(\frac{Z}{10 \text{ м}} \right)^{b'}. \quad (5.43)$$

Как показывает опыт, для открытых мест параметр $b' = 0,14$. Чем меньше значение параметра b' , тем меньше будут различаться нагрузки, испытываемые лопастью ветроколеса в нижнем и верхнем положениях. Очевидно, что значения параметра b' различны в разное время года, и даже в течение одного дня, поэтому формулой (5.42) следует пользоваться очень осторожно и осмотрительно, особенно для высоты $Z > 50$ м.

В большинстве задач ветроэнергетики гораздо важнее знать не суммарное количество энергии, которое может выработать ветроагрегат, например, за год, а ту мощность, которую она может обеспечивать постоянно. При сильном ветре, большем, например, 12 м/сек, ветроустановки вырабатывают вполне достаточно электроэнергии, поэтому часто в этих условиях её приходится сбрасывать или запасать.

Основные трудности возникают в периоды длительного затишья или слабого ветра.

Поэтому для ветроэнергетики является законом считать районы со средней скоростью более 8 м/с – очень хорошими. Но независимо от этого во всех случаях требуется тщательный выбор параметров ветроустановки применительно к местным метеословиям.

Для детального аналитического расчета режимов работы ветроустановки следует предварительно провести или математическую обработку массивов экспериментальных данных о скорости ветра в течение года, или, пользуясь определенной теоретической функцией распределения Φ_u для вероятности скорости ветра, найти аналитическое выражение, соответствующее экспериментальным данным.

Второй случай более предпочтителен, так как, во-первых, резко сократилось бы необходимое количество замеров скорости ветра и, во-вторых, появилась бы возможность аналитического расчета характеристик ВЭУ.

Величина $\Phi_{u>u'}$ – это часть времени года, в течение которого будут ветра со скоростью большей u' . Эта величина безразмерная. Часто пользуются величиной $P_0\Phi_u$ – это мощность ветрового потока единичного сечения (удельная мощность) Величину $\Phi_{u>u'}$ можно описать так:

$$\Phi_{u>u'} = \int_{u=u'}^{\infty} \Phi_r(u)du = 1 - \int_0^{u'} \Phi du. \quad (5.44)$$

Откуда следует, что

$$\frac{d\Phi_{u>u'}}{du'} = -\Phi_u. \quad (5.45)$$

График $\Phi_u = f(u)$ изображен на рис. 5.10.

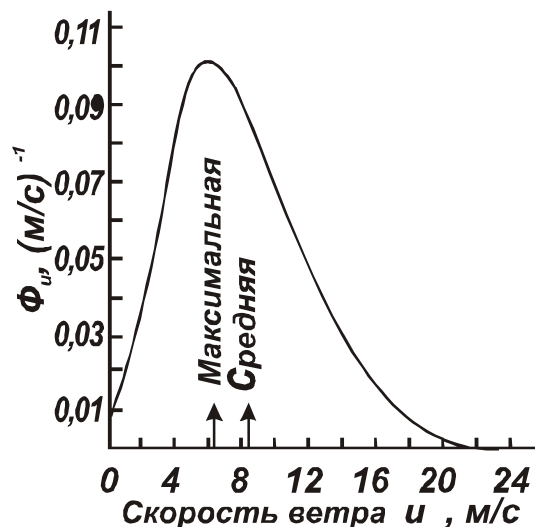


Рис. 5.10. Функция распределения скорости ветра

Практика показывает, что очень хорошо функцию $\Phi_{u>u'}$ аппроксимирует так называемая функция Вейбулла (рис. 5.11), записанная в виде:

$$\Phi_{u>u'} = \exp\left[-\left(\frac{u'}{C}\right)^k\right], \quad (5.46)$$

или

$$\Phi_U = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right], \quad (5.47)$$

где u – скорость ветра, u' – величина скорости меньше заданной.

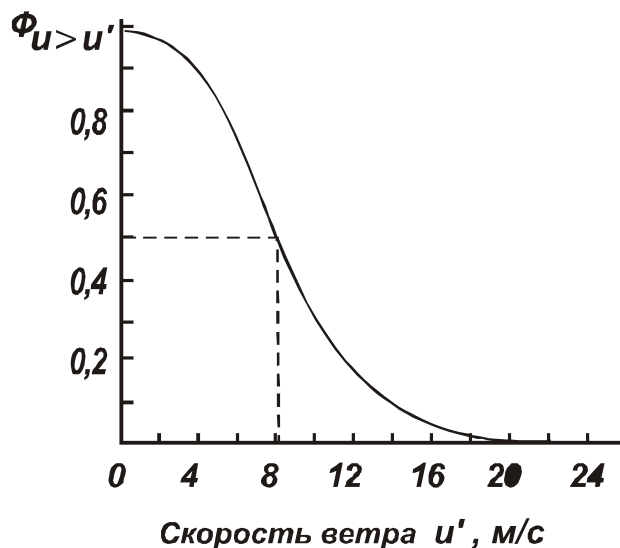


Рис. 5.11. Функция вероятности скорости ветра, большей u' (для плотности вероятности, вычисленной по рис. 5.10)

Более точное соответствие экспериментальным данным получается при значениях параметра $k = 1,8...2,3$ и параметра C , близкого к значению средней скорости ветра \bar{u} .

Во многих случаях выражение (5.47) можно ещё более упростить – свести к одному параметрическому так называемому распределению Рэля (или X – квадратичному распределению), полагая $k = 2$:

$$\Phi_u = \frac{2u}{c^2} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^2\right]. \quad (5.48)$$

Выразим среднее значение скорости ветра \bar{u} через функцию:

$$\bar{u} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_u u du}{\int_0^{\infty} \Phi_u du}. \quad (5.49)$$

Подставляя в (5.49), например, функцию Вейбулла, получаем:

$$\bar{u} = \frac{\int_0^{\infty} u u^{k-1} \exp[-(u/c)^k] du}{\int_0^{\infty} u^{k-1} \exp[-(u/c)^k] du} . \quad (5.50)$$

Обозначим $(u/c)^k = v$, тогда $dv = (k/c^k)u^{k-1}du$, и уравнение (5.50) примет вид

$$\bar{u} = \frac{c \int_0^{\infty} v^{\frac{1}{k}} \exp(-v)^k du}{\int_0^{\infty} \exp(-v)^k du} . \quad (5.51)$$

В этом выражении знаменатель равен единице, а числитель – стандартная функция, именуемая гамма-функцией, или факториалом, обозначаемая как

$$\Gamma(Z+1) = Z! = \int_0^{\infty} v^Z e^{-v} dv . \quad (5.52)$$

Так как аргумент в гамма-функции принято обозначать $(Z+1)$, а не Z , то (5.52) следует представить в виде

$$\bar{u} = C \Gamma(1 + 1/k) = C [(1/k)!] . \quad (5.53)$$

Используя известные свойства гамма-функции, нетрудно вычислить среднее значение переменной u^n , где n – целое или дробное число. В общем случае для функции Вейбулла имеем

$$\bar{u}^n = C^n \Gamma(1 + n/k) . \quad (5.54)$$

При $n = 3$ имеем

$$\bar{u}^3 = C^3 \Gamma(1 + 3/k) . \quad (5.55)$$

Откуда можно получить выражение для энергии ветра.

Значения параметров c и k определяются из аппроксимации конкретных данных метеонаблюдений распределением Вейбулла. Но если, например, известны \bar{u} и \bar{u}^3 , то параметры c и k определяются системой уравнений (5.53) и (5.55). Современные методы первичной обработки метеоинформации позволят достаточно просто определить \bar{u} и \bar{u}^3 , не обращаясь к результатам многочисленных отдельных измерений.

5.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕТРОКОЛЕСОМ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

Величина коэффициента мощности C_p зависит, главным образом, от быстроходности ветроколеса Z . Выбор характеристик ВЭУ в конкретных ветровых условиях определяется теми целями, которые перед ней ставятся. Обычно руководствуются одним из двух основных требований: оптимизировать производство энергии за год, чтобы, например, уменьшить потребление топлива электростанциями единой энергосистемы, или обеспечить производство определенного минимума энергии, даже при слабом ветре, чтобы, к примеру, сохранить работоспособность насосов системы водоснабжения.

Кроме того, при выборе характеристик ветроколеса следует учитывать характеристики агрегатов (насосов, электрогенераторов), с которыми они непосредственно стыкуются. Таким образом, задача эффективного использования ветроустановкой энергии ветрового потока достаточно сложна, зависит от многих факторов, и на практике выбор ветроустановки определяется еще и сложившимися в этой области традициями.

Энергией, передаваемой ветровыми потоками ветроустановке, является энергия на валу ветроколеса. Пусть E – энергия потока, переданная ветроколесу за время T , а E_u – часть этой энергии, переданная ветровым потоком со скоростью u в единичном скоростном интервале, тогда

$$E = \int_0^{\infty} E_u du = \int_0^{\infty} [0,5\rho u^3 C_p(\Phi_u T) du] . \quad (5.56)$$

Если плотность воздуха считать постоянной, то средняя мощность на валу ветроколеса определяется выражением

$$\bar{P} = \frac{E}{T} = \frac{\rho}{2} \int_0^{\infty} \Phi_u u^3 C_p du . \quad (5.58)$$

Чтобы вычислить величину этого интеграла, надо знать зависимость коэффициента C_p от скорости набегающего потока. Для этого разобьем, как обычно делают, весь интервал скоростей на четыре характерных участка (рис. 5.12).

1. Скорость ветра меньше скорости u_{ci} , при которой ветроустановка включается. В этом диапазоне

$$E_u = 0 . \quad (5.58)$$

2. Скорость ветра больше номинальной скорости u_R , поэтому величина энергии определяется соотношением

$$E_u = \Phi_{u>u_R} P_R T . \quad (5.59)$$

3. Скорость ветра больше скорости u_{ci} , при которой ветроустановка отключается, тогда

$$E_u = 0. \quad (5.60)$$

На практике большая часть ветроустановок при сильном ветре не отключается, а продолжает работать, но с низкой эффективностью.

4. Скорость ветра находится в интервале $u_{ci}-u_R$. Выходная мощность в этом диапазоне зависит от скорости ветра и типа ветроколеса. Для большинства ветроустановок эта зависимость имеет вид:

$$P \approx au_0^3 - bP_R, \quad (5.61)$$

где a и b – константы, определяемые из условий:

а) в момент включения ветроустановки $P = 0$, поэтому

$$u_{ci}^3 = bP_R / a;$$

б) при $u = u_R$ мощность $P = P_R$, откуда

$$u_R^3 = (1 + b)P_R / a.$$

Из этих условий следует

$$(u_{ci} / u_R)^3 = b / 1 + b. \quad (5.62)$$

Таким образом, коэффициенты a и b можно выразить через u_{ci} , u_R и P_R . На практике ветроустановкам часто приходится работать в этом малоэффективном диапазоне скоростей.

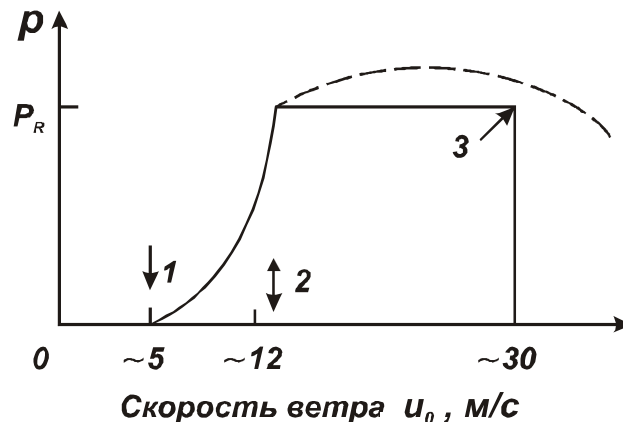


Рис. 5.12. Режимы работы ветроустановки (сплошная кривая – стандартная характеристика, штриховая – реальная характеристика большинства установок): 1 – включение, 2 – расчетная скорость, 3 – выключение

В работе ветроустановки можно выделить два предельных режима (рис. 5.13).

1. Режим с постоянным коэффициентом быстроходности Z и, следовательно, с постоянным коэффициентом мощности C_p в заданном рабочем диапазоне скоростей ветра из (5.57) следует

$$\bar{P} = \frac{\rho C_p}{2} \left(\int_{u_{Ci}}^{u_R} \Phi_u u_0^3 du + \Phi_{u_R < u_0 < u_{Ci}} P_R \right). \quad (5.63)$$

Если использовать для Φ_U распределение Рэля и достаточно большую скорость U_0 , то

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{\rho C_p}{2} \int_{u_{Ci}}^{u_R} \frac{\pi u^4}{2u^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{u_0}{u}\right)^2\right] du + P_R \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{u_R}{u}\right)^2\right] = \\ &= \frac{\rho C_p}{2} \frac{6}{\pi} (\bar{u})^3 + P_R \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{u_R}{u}\right)^2\right]. \end{aligned} \quad (5.64)$$

2. Режим с постоянной частотой вращения ветроколеса ω , следовательно, с переменным коэффициентом C_p .

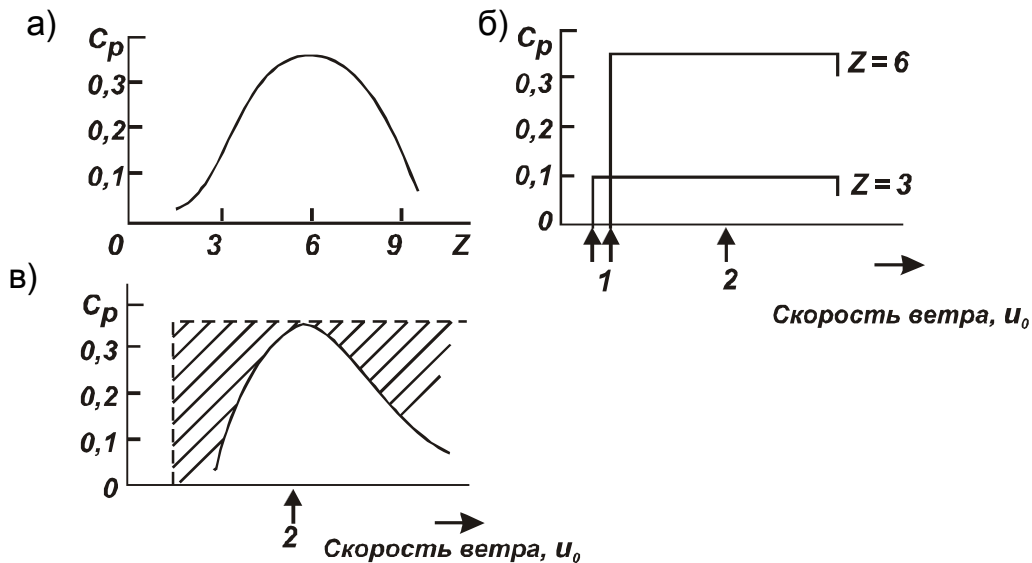


Рис. 5.13. Зависимости коэффициента мощности C_p от быстроходности – Z (а); от скорости ветра при постоянной быстроходности (б); от скорости ветра при постоянной скорости вращения ветроколеса (в); 1 – включение; 2 – расчетная скорость. Заштрихованная область соответствует потере мощности из-за непостоянства Z

На рис. 5.13, б и в коэффициент C_p представлен в виде функции от скорости набегающего потока u_0 . В этом случае мощность ветроколеса можно определить численным интегрированием. В режиме с

постоянной частотой вращения, как видно из рис. 5.14, в не при всех скоростях ветра его энергия преобразуется эффективно. Это особенно проявляется при скоростях ветра, значительно превышающих скорость, соответствующую максимальному значению коэффициента C_p .

5.10. ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Использование ветроэнергетических установок (ВЭУ) для производства электроэнергии является наиболее эффективным способом преобразования энергии ветра. Эффективность преобразования механической энергии в электрическую в электрогенераторе составляет обычно 95%, а потери электрической энергии при передаче не превышают 10%. Предъявляемые при этом требования к частоте и напряжению вырабатываемой электроэнергии зависят от особенностей потребителей этой энергии. Эти требования жесткие при работе ВЭУ в рамках единой энергосистемы и не очень – при использовании энергии ВЭУ в осветительных и нагревательных установках. К настоящему времени разработано большое число проектов ВЭУ, включая и электрогенераторы к ним. В России существуют, по крайней мере более 10 компаний разрабатывающих и производящих такие установки. Их название и производимые ими ВЭУ указаны в справочниках [31].

Очевидно, что в будущем, с превращением ветроэнергетики в самостоятельную отрасль энергетики, появятся принципиально новые конструкции ВЭУ.

При проектировании ВЭУ надо учитывать их следующие особенности.

1. Для обеспечения максимальной эффективности работы ветроколеса следует изменять частоту его вращения при изменении скорости ветра, сохраняя постоянным коэффициент быстроходности, в то же время для максимально эффективной работы электрогенератора необходима практически постоянная частота вращения.

2. Механические системы управления частотой вращения ветроколеса достаточно сложны и дороги. Гораздо эффективнее и дешевле управлять частотой его вращения, изменяя электрическую нагрузку электрогенератора.

3. Оптимальная частота вращения ветроколеса тем меньше, чем больше его радиус, поэтому только очень малые ветроколеса (радиусом до 2 м) удастся соединять с генератором напрямую. При больших размерах ветроколеса приходится использовать повы-

шающие редукторы, которые увеличивают как стоимость ВЭУ, так и обслуживания. Здесь заменителем редуктора могут быть новые типы многополосных генераторов, работающих при меньших частотах вращения.

4. В конструкции ВЭУ, как правило, предусматривается возможность отключения генератора от ветроколеса и вращение его от химического или механического аккумулятора энергии; поэтому систему управления генератором не связывают с работой ветроколеса. При отсутствии такой связи, даже при «мягком» соединении генератора с ветроколесом, необходимы специальные демпфирующие устройства для того, чтобы исключить механические удары, перегрузки или броски напряжений на выходе генератора, особенно при резких порывах ветра или при шторме.

Кроме того, следует учитывать специфические требования, предъявляемые к выходным параметрам ВЭУ, а именно:

1. Наиболее благоприятные ветровые условия существуют, как правило, в малонаселенных регионах, на островах, на побережье морей. Требования к электроэнергии в таких районах весьма специфичны, но почти наверняка ее здесь требуется гораздо меньше, чем развитых промышленных регионах.

2. Анализ потребителей электроэнергии показывает, что лишь 5...10 % из них предъявляют определенные требования к ее параметрам (например, к частоте). Поэтому целесообразно так строить систему электроснабжения, чтобы она могла обеспечивать потребителей как дешевой электроэнергией с нестабилизированными параметрами (пример, для отопления), так и относительно дорогой, но со стабильными параметрами.

3. Энергосистемы в сельской местности обычно маломощные и относительно низковольтные (менее 35 кВ), при передаче энергии на большие расстояния возникает много проблем, связанных с ее потерями, поэтому подключение ВЭУ к таким системам нецелесообразно.

4. Так как периоды безветрия неизбежны, то для исключения перебоев в электроснабжении ВЭУ должны иметь аккумуляторы энергии, или быть зарезервированы электроэнергетическими установками других типов.

Совершенно очевидно, что развитие ветроэнергетики будет способствовать прогрессу во всей электроэнергетике, в том числе и в традиционном энергомашиностроении.

5.11. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Различают три класса ветроэлектрических установок – в зависимости от относительной мощности ветроустановки в сравнении с полной мощностью энергосистемы, к которой они подключены. Эти классы представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Классы ветроэнергетических систем

Класс	Мощность	Степень автономности ВЭУ	Способы управления
А	$P \gg P_G$	Автономная	1) шагом ветроколеса 2) нагрузкой
В	$P \approx P_G$	Ветро-дизельная	1) раздельная работа ВЭУ и дизель-генераторов 2) совместная работа ВЭУ и дизель-генератора
С	$P \ll P_G$	Подключенные к мощной энергосистеме	1) параметрами генератора постоянного тока 2) преобразованием постоянного тока в переменный 3) изменением коэффициента скольжения

Примечание. P – мощность ВЭУ; P_G – мощность других генераторов энергосистемы.

Класс А.

Мощность ветрогенераторов в энергосистеме является определяющей, т.е. $P \gg 5P_G$.

В основном к этому классу относятся отдельно стоящие одно-генераторные ветроустановки, не подключенные к какой-либо энергосистеме. Они могут не иметь никаких других источников энергии или иметь, например, дополнительный ветрогенератор меньшей мощности. Мощность таких ветроустановок, предназначенных для использования в отдаленных регионах в целях освещения, питания маяков, средств связи и т.д., не превышает обычно 5 кВт. Если электроэнергия таких ВЭУ используется более широко, например, и для отопления, то их мощность может достигать 20...50 кВт.

Эффективность работы ветроустановки и ее стоимость во многом зависят от правильности выбора системы управления генератором, которая схематически показана на рис. 5.14.

При оптимальном управлении генератором напряжение на его выходе (и частота – в случае генератора переменного тока) будет нестабильным.

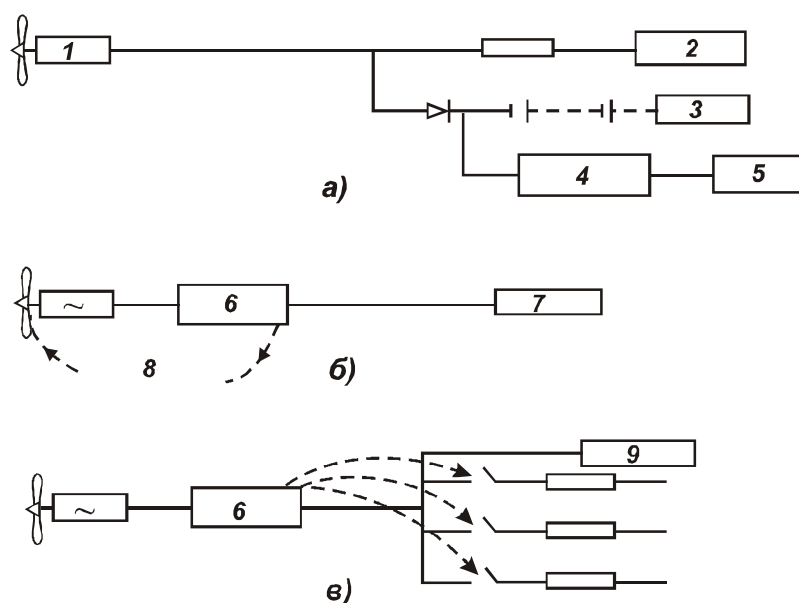


Рис. 5.14. Возможные схемы согласования ветроустановки с потребителями: 1 – нестабилизированное напряжение или частота; 2 – нагревательный элемент; 3 – аккумуляторная батарея; 4 – преобразователь постоянного напряжения в переменное; 5 – стабилизированное напряжение и частота; 6 – регулятор; 7 – стабилизированный постоянный ток; 8 – обратная связь; 9 – приоритетная нагрузка

Электроснабжение с такими параметрами можно непосредственно применять для обогрева домов, а также в выпрямителях для последующего использования (рис. 5.14, а).

Как правило, такие ветроустановки вполне удовлетворяют потребителей. Относительно небольшие потребности в электроэнергии со стабилизированными параметрами (например, 220В / 50 Гц) можно получить от преобразователей, питаемых от аккумуляторных батарей. Получаемая таким способом энергия ограничивается лишь стоимостью аккумуляторных батарей и преобразователей.

В некоторых случаях желательно стабилизировать частоту всей вырабатываемой генератором электроэнергии. Для этого существуют два различных способа.

Первый. Механическое управление лопастями ветроколеса с целью сохранения угловой скорости его вращения. При таком управлении шаг лопастей (или угол атаки) ветроколеса при изменении скорости ветра изменяется так, чтобы частота его вращения оставалась постоянной (рис. 5.14, б). Недостатком метода являются большие потери энергии ветра, сложность и невысокая надежность.

Второй. Электрическое управление, при котором постоянство частоты вращения ветроколеса и генератора поддерживается изменением электрической нагрузки на выходе генератора (рис. 5.14, в)

При таком способе стабилизации частоты энергия ветра используется гораздо эффективнее, так как лопасти ветроколеса работают в оптимальном режиме.

Использование современного электронного оборудования делает его также и более дешевым, и надежным по сравнению с механическим управлением.

В автономных ВЭУ применяются генераторы разных типов. В небольших установках (до 10 кВт) широко распространены многополюсные генераторы с постоянными магнитами. Генераторы постоянного тока могут иметь устройства для сглаживания пульсаций тока, а ток можно использовать для зарядки аккумуляторов. Для генерации переменного тока широко используют синхронные генераторы с нестабилизированными и стабилизированными параметрами на выходе. Иногда применяются также и асинхронные генераторы переменного тока, которые могут быть как самостоятельными, так и со вспомогательным возбуждающим генератором.

Класс В.

В этом случае мощность ВЭУ одного порядка с мощностью других генераторов системы, т.е. $P \approx P_G$.

Чаще всего «посторонним» генератором является дизельный электрогенератор. В этом случае использование ВЭУ позволяет экономить дизельное топливо. Дизельный генератор может включаться только в безветрие и может работать параллельно с ВЭУ при слабом ветре. В ветроустановке этого класса **используются две различные схемы** распределения вырабатываемой энергии, изображенные на рис. 5.15.

1. **Одноканальная схема.** В такой схеме, имеющей один выход (обычно трехфазной; бытовые потребители питаются от какой-то одной фазы), поддерживается стабилизированное напряжение определенной величины – в зависимости от потребностей потребителя (рис. 5.15, а). Круглосуточное снабжение электроэнергией без учета ее потребления требует длительной работы (как правило, не менее полусуток) дизельного генератора в периоды безветрия. Дизель при этом или работает непрерывно (особенно для освещения), или включается только при очень сильном ветре. На практике в такой схеме при сильном ветре иногда более 70 % энергии ВЭУ гасится на балластных сопротивлениях.

2. **Многоканальная схема.** Целью этой схемы является максимально полное использование ветрового потенциала. Это достигается снижением цены электроэнергии для определенных потребителей – в зависимости от ее качества (рис. 5.15, б). При слабом ветре потребители дешевой электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, автоматически отключаются, уменьшая тем самым нагрузку на энергосистему. Частоту вращения энергогенератора в такой системе можно также регулировать одним из описанных выше способов,

тогда он также будет источником стабилизированной электроэнергии. В периоды безветрия электроэнергией снабжаются только потребители от дизельных генераторов, которые значительно дороже ВЭУ. Преимуществом такой схемы распределения энергии является максимальное использование в любой момент времени энергии ветра.

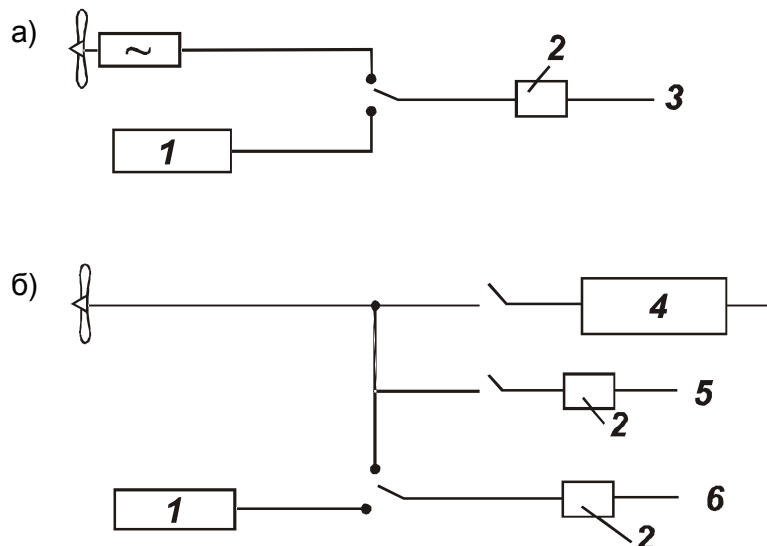


Рис. 5.15. Одноканальная (а) и многоканальная (б) схемы согласования ветродизельной энергоустановки с потребителями: 1 – дизельный электрогенератор; 2 – счетчик; 3 – единая стоимость электроэнергии; 4 – накопитель энергии; 5 – дешевая электроэнергия; 6 – дорогая электроэнергия

Класс С

ВЭУ подключена к энергосистеме, значительно более мощной, чем его собственная мощность, т.е. $5P \ll P_G$.

Это наиболее распространенный случай работы ВЭУ любой мощности в районах, где имеются другие энергосистемы большой мощности (рис. 5.16). При этом энергия ВЭУ используется непосредственно, а ее излишки подаются в энергосистему. При слабом ветре и в безветрие потребители снабжаются электроэнергией от энергосистемы. Наиболее дешевым и, возможно, безопасным типом ветрогенератора в этом случае является асинхронный генератор переменного тока, подключенный непосредственно в энергосистему. При этом частота вращения ветроколеса может превышать частоту энергосистемы не более чем на 10%. При слабом ветре, чтобы исключить работу ВЭУ в режиме электродвигателя, его отключают от сети. Необходимость стабилизации частоты вращения ветроколеса при прямом включении ветрогенератора в сеть не позволяет поддерживать постоянной быстроходность ветроколеса, т.е. снижает

его КПД. Поэтому в небольших ВЭУ часто применяют два агрегата различной мощности, например 5 и 30 кВт, автоматически включающихся соответственно при слабом и сильном ветре.

Используются и другие приемы, позволяющие изменять частоту вырабатываемой генератором электроэнергии:

- 1) увеличение числа полюсов генератора за счет перекоммутации его обмоток при падении частоты вращения ветроколеса;
- 2) выпрямление переменного тока ВЭУ и затем преобразование его в переменный ток с заданными стабилизированными параметрами;
- 3) увеличение допустимого отклонения частоты вращения ветроколеса от номинальной за счет включения активной нагрузки в обмотку асинхронного генератора.

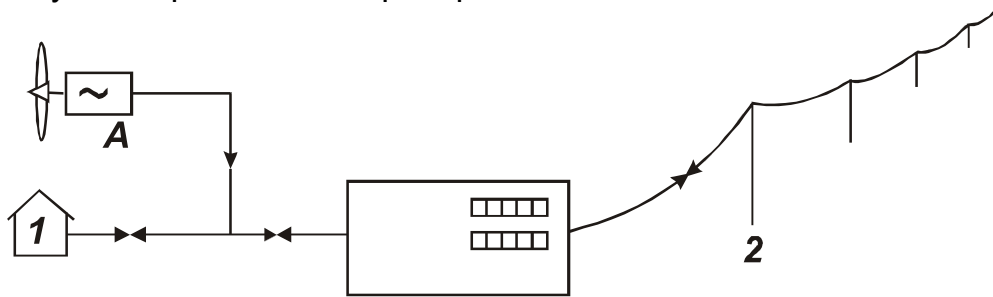


Рис. 5.16. Схема присоединения ВЭУ к более мощной энергосистеме: 1 – жилые дома и т.д.; 2 – линия электропередачи.

5.12. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Ветроэнергетическая установка при любой скорости ветра поддерживает постоянным коэффициент быстроходности $Z = 6$. При какой скорости ветра скорость концов лопастей ветроколеса достигнет скорости звука?

Решение

Пусть V – скорость звука. Но $V = ZU_0$, где U_0 – скорость ветра, Z – быстроходность.

Тогда $U_0 = V/Z = 330/6 = 55$ м/с.

Задача 2. Зная, что оптимальная быстроходность ветроколеса определяется соотношением $Z = 4\pi/n$, где n – количество лопастей. Вычислить Z_0 для двухлопастного, трех- и четырехлопастного ветроколеса.

Решение

$$Z_0 = 4\pi/2 \sim 6,28 \sim 6$$

$$Z_0 = 4\pi/3 = 4,18 \sim 4;$$

$$Z_0 = 4\pi/4 = \pi \sim 3.$$

Задача 3. Вычислить скорость ветра на высоте $Z = 50$ м, если на высоте $h = 10$ м скорость ветра равна 8 м/с; параметр $b' = 0,14$.

Решение

Для определения скорости ветра на высоте z воспользуемся соотношением

$$U_z = U_s (Z/h)^{b'} \quad (1)$$

Здесь $U_s = 8$ м/с, $Z = 50$ м, $h = 10$ м, $b' = 0,14$.

Подставив в (1) числовые данные, получим:

$$U_z = 8 (50/10)^{0,14} = 8 \cdot 5^{0,14} = 8 \cdot 1,25 = 10,02 \text{ м/с} \sim 10 \text{ м/с}.$$

Задача 4. Вычислить диаметр ветроколеса для ВЭУ большой мощности $P = 1000$ кВт, если плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³, скорость ветра 8 м/с и $C_p = 0,59$.

Решение

Расчетная или проектная мощность ВЭУ определяется выражением (3.12) или (3.13) т.е.

$$P = 0,5 \rho A C_p U_0^3 \quad (2)$$

Из (2) имеем

$$A = P / 0,5 \rho C_p U_0^3 \quad (3)$$

используя выражение $A = 0,25 \pi D^2$, получаем $D = 83$ м.

5.13. Задачи

1. Какую мощность развивает ветроколесо, если скорость ветра $U_0 = 10$ м/с при плотности воздуха $\rho = 1,29$ кг/м³. Площадь, сметаемая ветроколесом $A = 5$ м², коэффициент мощности $C_p = 0,5$.

Ответ: $P = 1612,5$ Вт.

2. Найти коэффициент торможения потока a , если известно что мощность набегающего ветрового потока $P_0 = 1000$ кВт, а мощность передаваемая колесу $P = 500$ Вт.

Ответ: $a = 0,125$.

3. Определить радиус ветроколеса при быстроходности $Z_0 = \pi$, частоте вращения $\nu = 3$ Гц и скорости набегающего на лопасть потока $U_0 = 10$ м/с.

Ответ: $R = 15$ м.

4. Определить мощность P ВЭС, состоящей из 10 установок при средней скорости ветра $V = 10$ м/с, если каждое колесо ометает площадь $A = 5$ м², а коэффициент мощности $C_p = 0,5$.

Ответ: $P = 16$ кВт.

5. Для небольшой станции требуется мощность $P = 10$ кВт и известно, что средняя скорость ветра в данном районе $V = 10$ м/с, какого радиуса R должно быть ветроколесо, чтобы обеспечить эту станцию электроэнергией. Принять, что $C_p = 0,5$.

Ответ: $R = 3,57$ м.

6. Для снабжения поселка Березовка (Хабаровский край) электроэнергией требуется мощность $P = 5$ МВт. Известно, что площадь, необходимая для установки одного ветряка $S_0 = 10$ м², площадь ометаемая этим колесом $A = 4,5$ м². Определить площадь, занимаемую для застройки ВЭУ, если известно, что средняя скорость ветра в этом районе $U_0 = 12$ м/с, коэффициент быстроходности $C_p = 0,5$ при данной скорости ветра.

Ответ: $S = 257200$ м².

7. Сколько лопастей n должно содержать ветроколесо, чтобы достигнуть оптимальную быстроходность при скорости ветра U_0 и радиусе ветроколеса $R = 1$ м, если угловая скорость вращения ветроколеса $\omega = 84$ Гц.

Ответ: $n = 3$.

8. Ветроколесо, установленное в Находке, имеет длину лопасти $L = 1$ м, число лопастей на колесе $n = 3$. При какой скорости ветра U_0 колесо будет работать в оптимальном режиме, если оптимальная угловая частота вращения $\omega = 54$ Гц.

Ответ: $U_0 = 13$ м/с.

9. Определить, на какой высоте h_{\min} от поверхности земли должен находиться центр ветроколеса, если скорость ветра $V = 15$ м/с, количество лопастей колеса $n = 3$, и угловая скорость вращения колеса $\omega = 6$ рад/с.

Ответ: $h_{\min} = 10,3$ м, если ветроколесо перпендикулярно поверхности земли.

10. Какова скорость набегающего потока U_0 при максимально лобовой нагрузке, действующей на ветроколесо $F_{\text{лmax}} = 600$ Н? Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³, площадь, ометаемая колесом $A = 10$ м².

Ответ: $U_0 = 10$ м/с.

11. Определить максимальный крутящий момент T_{max} , если радиус ветроколеса $R = 3$ м, скорость ветра $U_0 = 15$ м/с, плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³, площадь ометаемого потока $A = 25$ м².

Ответ: $T_{\text{max}} = 3375$ Н.

12. Максимальный крутящий момент ветроколеса $T_{\max} = 600 \text{ Н}$, скорость ветра $U_0 = 10 \text{ м/с}$, плотность воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, площадь, ометаемая ветроколесом $A = 6 \text{ м}^2$. Найти радиус ветроколеса R и максимальную силу лобового давления на ветроколесо $F_{\text{лmax}}$, действующего на ветроколесо.

Ответ: $R = 1,67 \text{ м}$, $F_{\text{лmax}} = 360 \text{ Н}$.

13. Определить коэффициент быстроходности колеса Z , если известна угловая скорость вращения $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$, скорость потока, набегающего на лопасть $U_0 = 9 \text{ м/с}$, плотность воздуха, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, ометаемая площадь $A = 7 \text{ м}^2$, а максимальный крутящий момент $T_{\max} = 700 \text{ Н}$.

Ответ: $Z = 0,68$.

14. Коэффициент быстроходности ветроколеса $Z = 0,5$, период за который ветроколесо совершает полный оборот $T = 0,50 \text{ с}$, радиус ветроколеса $R = 3 \text{ м}$. Определить скорость ветра, набегающего на лопасть.

Ответ: $U_0 = 19 \text{ м/с}$.

15. Определить плотность воздуха в горах, где установлена ветроустановка, если коэффициент быстроходности колеса $Z = 0,5$, радиус колеса $R = 4 \text{ м}$, угловая скорость вращения $\omega = 3 \text{ с}^{-1}$, ометаемая площадь $A = 2,5 \text{ м}^2$, сила лобового давления на ветроколесо $P_{\text{лmax}} = 80 \text{ Н}$.

Ответ: $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$.

16. Определить оптимальную быстроходность для трех- и четырехлопастных ветроколес.

Ответ: Для трехлопастного $Z_0 \sim 4,2$, для четырехлопастного $Z_0 \sim \pi$.

17. Крупная ВЭУ имеет ветроколесо диаметром 100 м , вращающееся с постоянной угловой скоростью. При какой угловой скорости вращения скорость вращения лопастей достигнет скорости звука?

Ответ: $\omega = 6,6 \text{ рад/с}$, $\nu = 1,1 \text{ Гц}$.

18. Определить скорость набегающего потока на ветроколеса, если быстроходность данного ветроколеса $Z = 7$, радиус ветроколеса $R = 6 \text{ м}$, угловая скорость вращения $\omega = 10 \text{ рад/с}$.

Ответ: $U_0 = 8,6 \text{ м/с}$.

19. Определить быстроходность ветроколеса, если скорость набегающего потока $U_0 = 25 \text{ м/с}$, радиус колеса $R = 10 \text{ м}$, угловая скорость $\omega = 5 \text{ рад/с}$.

Ответ: $Z = 2$.

20. Определить мощность ветроколеса, если мощность набегающего ветрового потока $P_0 = 1,5$ кВт, а коэффициент торможения потока $a = 0,2$.

Ответ: $P = 768$ Вт.

21. Определить мощность ветрового потока, если мощность ветроколеса 2 кВт, а коэффициент торможения потока $a = 0,4$.

Ответ: $P_0 = 3,47$ кВт.

22. Определить максимальное значение крутящего момента, если скорость ветра 15 м/с, а скорость концов лопастей ветроколеса 45 м/с.

Ответ: $(C_T)_{\max} = 0,2$.

23. Определить значение оптимальной быстроходности ветроколеса при $k = 0,5$. Ветроколесо имеет 3 лопасти.

Ответ: $Z = 4$.

24. Построить график зависимости коэффициента мощности C_p от коэффициента торможения потока a в пределах $0 \leq a \leq 0,5$.

25. Определить угловую скорость вращения ВЭУ, если скорость набегающего потока $U_0 = 16$ м/с, а радиус ветроколеса $R = 3$ м. Коэффициент быстроходности $Z = 1$.

Ответ: $= 5,333$ рад/с.

26. Ветроэлектрическая установка при любой скорости ветра поддерживает постоянный коэффициент быстроходности, равный 8 . При какой скорости ветра скорость концов лопастей ветроколеса достигнет скорости звука?

Ответ: $U_0 = 41$ м/с.

27. Скорость концов лопастей ВЭУ 200 м/с. Определите угловую скорость вращения, если ветроколесо имеет диаметр 10 м.

Ответ: $\omega = 4$ рад/с.

28. Определить мощность набегающего потока P_0 при скорости ветра $U_0 = 12$ м/с, если мощность ветроколеса $P = 1$ кВт, ометающего площадь $A = 10$ м².

Ответ: $P_0 = 8640$ Вт.

29. Какую суммарную площадь ометают ветроколеса установки, развивающей мощность $P=100$ кВт при скорости ветра $U_0= 17$ м/с, $C_p= 0,5$?

Ответ: $A = 81,42$ м².

30. Какова мощность набегающего потока P_0 , приходящаяся на 1 м^2 площади ветроколеса, если самая эффективная установка с диаметром ветроколеса 2,5 м может развить мощность $P = 3\text{ кВт}$?

Ответ: $P_0 / \Delta S = 1036\text{ Вт/м}^2$.

31. Постройте зависимость коэффициента быстроходности от числа лопастей и окружной скорости ветроколеса при скорости ветра $U_0 = 15\text{ м/с}$.

32. Какова будет скорость ветра, если лобовое давление стало в 2 раза больше, чем лобовое давление при скорости ветра 10 м/с ?

Ответ: $14,14\text{ м/с}$.

33. Определить коэффициент лобового давления трехлопастного ветроколеса, если при скорости ветра 15 м/с лобовое давление на ветроколесо составляло 1200 Н . Площадь, сметаемая ветроколесом, 10 м^2 .

Ответ: $C_F = 8/9$.

34. Построить зависимость оптимальной скорости ветра от числа лопастей в колесе при частоте вращения ветроколеса 1 Гц . Радиус ветроколеса $R_k = 1\text{ м}$.

35. С какой оптимальной частотой должно вращаться ветроколесо радиусом 1 м при скорости ветра 10 м/с и трёх лопастях?

Ответ: $\nu = 6,6(6)\text{ Гц}$.

36. Определить частоту вращения колеса турбины ν , если ее мощность $P = 1\text{ кВт}$, сила лобового давления на ветроколесо $P_{\text{лmax}} = 200\text{ Н}$ и радиус колеса турбины $R = 1\text{ м}$.

Ответ: $\nu = 2,5\text{ Гц}$.

37. Очень часто при оценке ветроэнергетических ресурсов заданного района используют двухпараметрическую функцию распределения Вейбулла для скорости ветра, которая имеет вид

$$\Phi_u = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right]. \quad (4)$$

Более точное соответствие экспериментальным результатам получается, если $k = 1,8 - 2,3$; а параметр $c = U$, где U – среднее значение скорости ветра в данном регионе.

Φ_u имеет размерность $[\text{м/с}]^{-1}$. Построить график зависимости $\Phi_u = \Phi(U)$ в интервале $1 \leq U \leq 30\text{ м/с}$ через 1 м/с ; принять для $c = 8,2\text{ м/с}$. Вычислить скорость, соответствующую максимуму распределения функции скорости ветра Φ_u . Расчеты сделать на компьютере.