Библиотека СОК



Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Учебное пособие

Р.А. Янсон

Ветроустановки

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Р.А. Янсон

Ветроустановки

Под редакцией *М.И. Осипова*

*Рекомендовано редсоветом МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве учебного пособия по курсам «Ветроэнергетика»,
«Энергетика нетрадиционных и возобновляемых
источников энергии», «Введение в специальность»*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2007

УДК 621.311.24; 621.548 (075.8)
ББК 31.62
Я65

Рецензенты: *П.П. Безруких, В.П. Сивков*

Янсон Р.А.

Я65 Ветроустановки: Учеб. пособие по курсам «Ветроэнергетика», «Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии», «Введение в специальность» / Под ред. М.И. Осипова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 36 с.: ил.

ISBN 5-7038-2919-4

Рассмотрены принципы работы и устройство ветроустановок различного типа, а также особенности их регулирования (управления).

Для студентов 5-го курса специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»; направления «Электроэнергетика».

Ил. 20. Табл. 1. Библиогр. 6 назв.

УДК 621.311.24; 621.548 (075.8)
ББК 31.62

Учебное издание

Ричард Александрович Янсон

Ветроустановки

Редактор *О.М. Королева*
Корректор *М.А. Василевская*
Компьютерная верстка *Е.В. Зимакова*

Подписано в печать 20.03.2007. Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печ. л. 2,25. Усл. печ. л. 2,15. Уч.-изд. л. 2,05. Тираж 100 экз.
Изд № 53. Заказ 391

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

ISBN 5-7038-2919-4

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007
© Р.А. Янсон

ВВЕДЕНИЕ

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

Суммарная мощность ветроустановок в различных странах мира достигла в 2005 г. 59 тыс. МВт. По оценкам международных ветроэнергетических организаций, прогноз развития ветроэнергетики на 2020 г. – это достижение 10 % доли ветровой энергии в мировом производстве электроэнергии. К сожалению, доля ветроэнергетики России сегодня составляет около 15 МВт, что объясняется явным невниманием соответствующих структур к развитию этой экологически чистой отрасли энергетики и отсутствием на сегодня финансовых возможностей приобретения и эксплуатации ветроустановок как организациями, так и населением. Несмотря на такое положение, как и ранее в Советском Союзе, так и сейчас в России в отечественных научно-исследовательских организациях и вузах, на ряде заводов постоянно велись и ведутся работы в области ветроэнергетических установок, разрабатывается их теория, создаются отдельные промышленные образцы. На сегодня в России имеется несколько десятков организаций, занимающихся развитием ветроустановок и могущих производить их во всем диапазоне мощностей от малого до мегаваттного уровня.

Данное учебное пособие представляет собой исходный материал, необходимый студенту при изучении отдельных разделов курсов, связанных с ветроэнергетикой. В пособии рассмотрены принципы работы и устройство ветроустановок различного типа, как современных, так и перспективных, а также особенности их регулирования.

Учебное пособие написано на основе материалов отечественных монографий и учебников Г.Х. Сабинина, Е.М. Фатеева,

К.П. Вашкевича, В.А. Андрианова, Я.И. Шефтера, П.П. Безруких и др. Наряду с устоявшимися подходами к анализу использованы современные отечественные и зарубежные журнальные публикации, материалы различных конференций, патентные и рекламные материалы, ГОСТы России.

Материал учебного пособия является основой для дальнейшего изучения студентами расчета и проектирования ветроагрегатов различного типа.

1. ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, ВЕТРОАГРЕГАТ И ВЕТРОДВИГАТЕЛЬ

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) представляет собой комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для преобразования энергии ветра в другие виды энергии (электрическую, механическую, тепловую и т. п.).

Ветроагрегат, являясь основной частью ВЭУ, состоит из ветродвигателя, системы передачи ветровой мощности на нагрузку (потребителю) и самого потребителя ветровой энергии (какого-либо устройства: электромашинного генератора, водяного насоса, нагревателя и т. п.).

Ветродвигатель является устройством для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию рабочего движения ветродвигателя. Рабочие движения, которые совершает ветродвигатель, могут быть разными. На существующих сегодня ветродвигателях в качестве рабочего движения используется круговое вращательное движение. Вместе с тем известны многочисленные предложения (иногда даже реализованные) по использованию других видов рабочего движения, например колебательного.

В пособии рассматриваются ветродвигатели, совершающие только круговое вращательное рабочее движение (ветротурбины). У таких ветродвигателей устройством, которое непосредственно воспринимает аэродинамические нагрузки от ветрового потока и преобразует энергию ветра в механическую энергию рабочего кругового вращательного движения, является лопастная система, называемая ветроколесом.

Лопастная система ветродвигателя (ветроколесо) может иметь различное конструктивное исполнение. У современных ветродвигателей лопастная система выполнена в виде жестких лопастей с крыловым профилем в поперечном сечении (иногда в этом случае используют термины «крыльчатые», или пропеллерные, ветродвигатели). Известны успешно работающие лопастные системы, в которых вместо лопастей используются вращающиеся цилиндры (использование эффекта Магнуса). Имеются предложения по созданию лопастной системы на основе различного типа лопастей с гибкими поверхностями (паруса). Таким образом, лопасть – это составная часть ветроколеса, создающая крутящий момент.

Лопастная система ветродвигателя с рабочим круговым вращательным движением может иметь горизонтальную или вертикальную оси вращения. Соответственно, согласно ГОСТ [1], горизонтально-осевым ветродвигателем называется ветродвигатель, у которого ось вращения ветроколеса расположена параллельно или почти параллельно вектору скорости ветра (рис. 1). Ветродвигатель, у которого ось вращения расположена перпендикулярно как вектору скорости ветра, так и земле, называется вертикально-осевым (рис. 2).

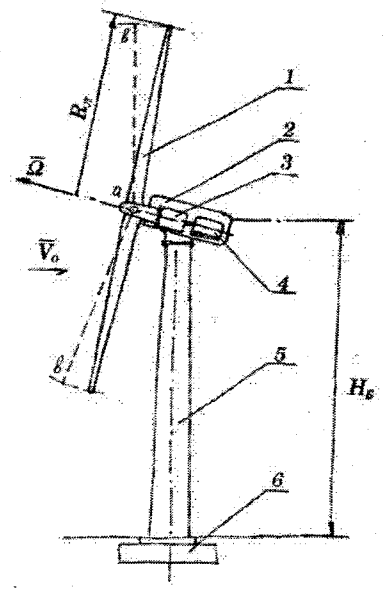


Рис. 1. Конструктивная схема горизонтально-осевого ветроагрегата:
1 – ветродвигатель; *2* – гондола; *3* – мультипликатор;
4 – нагрузка (электрогенератор); *5* – башня; *6* – фундамент

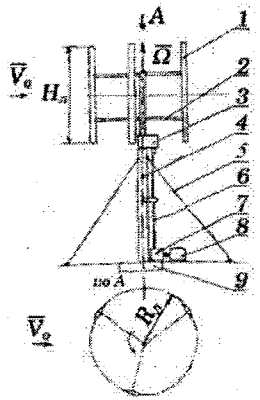


Рис. 2. Конструктивная схема вертикально-осевого ветроагрегата:
1 – ветродвигатель; *2* – силовые элементы; *3* – верхний редуктор; *4* – башня; *5* – силовая оттяжка; *6* – вал; *7* – нижний редуктор; *8* – электрогенератор; *9* – фундамент

Принятые в отечественной ветроэнергетике термины и определения, а также классификация ВЭУ изложены в ГОСТ Р 51237–98 и Р 51990–2002 [1, 2]. Требования этих стандартов определяют в значительной степени используемую далее терминологию.

При расчете и проектировании конкретного ветродвигателя помимо ветровых условий его работы необходим учет как особенностей ветроагрегата, так и всей ВЭУ. В связи с этим ВЭУ классифицируют по следующим признакам: виду вырабатываемой энергии, уровню мощности, назначению, областям применения, признаку работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса, способам управления, типу системы передачи ветровой мощности потребителю.

В зависимости от вида вырабатываемой энергии ВЭУ подразделяют на ветроэлектрические и ветромеханические. Электрические ВЭУ, в свою очередь, подразделяются на ветроустановки, вырабатывающие электроэнергию постоянного либо переменного тока. Механические ВЭУ служат для привода рабочих машин.

По уровню мощности ВЭУ подразделяют на четыре группы: очень малой мощности, менее 5 кВт; малой мощности, от 5 до 99 кВт; средней мощности, от 100 до 1 000 кВт; большой мощности, свыше 1 МВт. Ветроустановки каждой группы отличаются друг от друга прежде всего конструктивным выполнением, типом

фундамента, способом установки ветроагрегата на ветер, системой регулирования, системой передачи ветровой мощности, способом монтажа и способом обслуживания.

В зависимости от назначения электрические ВЭУ постоянного тока подразделяют на ветрозарядные, гарантированного электроснабжения потребителя, негарантированного электроснабжения. Электрические ВЭУ переменного тока подразделяют на автономные, гибридные, работающие параллельно с энергосистемой соизмеримой мощности (например, с дизельной установкой), сетевые, работающие параллельно с мощной энергосистемой.

Механические ВЭУ по назначению подразделяют на ветронасосные для привода водяных насосов и ветросиловые для работы с промышленными и бытовыми механизмами.

Классификация ВЭУ по областям применения определяется их назначением. При расчете и проектировании ветродвигателя и выборе его номинальных параметров необходим учет типа нагрузки (электрогенератор, водяной насос и т. п.), типа системы передачи ветровой мощности к потребителю, типа системы генерирования и аккумулирования электроэнергии. Система передачи ветровой мощности представляет собой определенный комплекс различных устройств для передачи мощности от вала ветроколеса к валу соответствующей машины ветроагрегата (потребителя) с повышением или без повышения частоты вращения вала этой машины. В современной ветроэнергетике чаще всего используют механический способ передачи мощности. Известны также гидравлический, пневматический и аэродинамический способы передачи ветровой мощности потребителю. Система генерирования электроэнергии представляет собой электромашинный генератор и комплекс устройств (устройства управления, силовой электроники, аккумулятор и т. д.) для подключения к потребителю со стандартными параметрами электроэнергии.

2. ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ РАБОТУ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ И ВЕТРОУСТАНОВКИ

На некотором расстоянии перед ветроагрегатом, где набегающий атмосферный поток равномерен, кинетическая энергия E массы m воздушного потока выражается величиной:

$$E = \frac{mV_0^2}{2},$$

где E – в Дж.

Величина $m = \rho V_0 A$ в сечении перед ветроагрегатом является массовым расходом воздуха, который мог бы пройти через ометаемую площадь ветроколеса A за единицу времени, имея плотность ρ. Ометаемая площадь ветроколеса – это геометрическая проекция площади ветроколеса на плоскость, перпендикулярную вектору скорости ветра V_0. В случае перпендикулярности вектора скорости ветра V_0 к ометаемой площади A величина $A = \pi D_л^2/4$ для горизонтально-осевого ветродвигателя (см. рис. 1) и $A = D_л H_л$ для вертикально-осевого ветродвителя (см. рис. 2). Здесь диаметр ветроколеса $D_л$ – это диаметр окружности, описываемой наиболее удаленными от оси вращения ветроколеса частями лопастей.

Располагаемая мощность воздушного потока $N_{ветро}$, натекающего на ветродвигатель (т. е. полная кинетическая энергия набегающей воздушной струи со скоростью V_0 и площадью поперечного сечения, равной площади, ометаемой его лопастной системой):

$$N_{ветро} = \frac{\rho V_0^3}{2} A.$$

Ветродвигатель извлекает из ветрового потока только часть этой мощности и передает ее затем потребителю, например электрогенератору. Обозначим мощность, развиваемую ветродвигателем, как $N_{вд}$. Отношение мощности ветродвигателя $N_{вд}$ (механической энергии, развиваемой ветроколесом) к располагаемой мощности ветрового потока $N_{ветро}$ (полной энергии, проходящей через ометаемую площадь ветроколеса)

$$C_P = \frac{N_{вд}}{N_{ветро}}$$

называют коэффициентом использования энергии ветра.

Таким образом, механическая мощность ветродвигателя:

$$N_{вд} = C_P \frac{\rho V_0^3}{2} A.$$

При ряде упрощающих допущений относительно структуры течения воздушного потока Н.Е. Жуковский и А. Бетц показали, что коэффициент использования энергии ветра C_P не может превысить значения 16/27.

Отношение окружной скорости конца лопасти на периферии U_R к скорости невозмущенного потока ветра V_0

$$X = \frac{U_R}{V_0} = \frac{\Omega R_л}{V_0}$$

называют коэффициентом быстроходности ветродвигателя (числом модулей). Здесь Ω – угловая скорость вращения ветродвигателя. Для текущего радиуса r пользуются понятием местного коэффициента быстроходности

$$x = \frac{U}{V_0} = \frac{\Omega r}{V_0}.$$

Коэффициентом крутящего момента $M_{кр}$, развиваемого ветродвигателем, называют величину

$$C_M = \frac{M_{кр}}{\pi R_л^3 \rho \frac{V_0^2}{2}}.$$

Величины C_P, C_M, X связаны между собой зависимостью

$$C_P = C_M X.$$

На ветроколесо действует сила осевого (лобового) давления, являющаяся суммарной аэродинамической нагрузкой на поверхность лопастей ветроколеса, образующаяся в результате осевого сопротивления профиля лопасти ветровому потоку. Отношение осевой силы P (силы лобового давления), действующей на лопастную систему ветродвигателя, к скоростному давлению (напору) $\frac{\rho V_0^2}{2} A$ на ометаемую лопастями поверхность называют коэффициентом осевого (лобового) давления

$$B = \frac{P}{\frac{\rho V_0^2}{2} A}.$$

Мощностной (энергетической) характеристикой ветроагрегата называется размерная зависимость мощности $N_{вд}$, развиваемой на валу ветродвигателя, от скорости ветра V_0 незаторможенного потока перед ним (рис. 3). Ветродвигатель под действием силы ветра начинает свое вращение без нагрузки с некоторого минимального значения скорости ветра V_{min} (скорость страгивания с места). Обычно эта скорость составляет 2,5...5 м/с. При достижении скорости потока, равной расчетной скорости ветра $V_{расч}$, ветродвигатель развивает номинальную мощность $N_{вд.ном}$. Номинальная мощность – это максимальное значение выходной мощности, на которую рассчитан ветроагрегат в длительном режиме работы. Обычно в диапазоне скоростей ветра от V_{min} до $V_{расч}$ регулирования ветродвигателя, кроме момента пуска, не происходит, но затем в диапазоне скоростей от расчетной скорости $V_{расч}$ до максимальной V_{max} вступает в действие система регулирования. Максимальная рабочая скорость ветра V_{max} – это скорость ветра, при которой расчетная прочность ветроагрегата позволяет ему работать (производить электроэнергию) без повреждений. Если регулирование осуществляется поворотом лопасти, то можно удерживать мощность ветродвигателя в этом диапазоне ветра, близкой к постоянной (кривая *2*, рис. 3). При достижении максимальной рабочей скорости ветра V_{max} (обычно 25...30 м/с) ветродвигатель останавливают и выводят из-под ветра, ставя его лопасти во флюгерное положение.

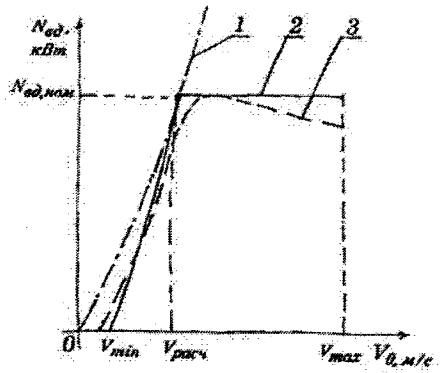


Рис. 3. Зависимость мощности ветродвигателя от скорости ветра:
1 – $N_{ветро}$ – мощность ветрового потока; *2* – $N_{вд}$ – мощность ветродвигателя, регулируемого поворотом лопасти; *3* – $N_{вд}$ – мощность ветродвигателя, регулируемого за счет срыва потока с лопасти

Значительная часть выпускаемых сегодня горизонтально-осевых ветроагрегатов мощностью $N_{вд} \geq 500$ кВт имеет неповорачивающиеся лопасти, что облегчает их конструктивное выполнение. В этом случае регулирование мощности ветродвигателя с ростом скорости ветра осуществляется за счет выполнения профиля лопасти изменяющимся вдоль радиуса специальным образом. В результате, начиная с некоторой скорости ветра, на периферии лопасти возникает срыв потока, охватывающий с ростом скорости ветра все большее расстояние, начиная от периферии лопасти в направлении к ее втулочной части. Наличие срыва уменьшает развиваемую ветродвигателем мощность, и мощностная характеристика принимает вид кривой *3* (см. рис. 3).

Технико-экономическое совершенство ветроустановки характеризуется рядом параметров, одним из которых является коэффициент $K_{уст}$ использования установленной мощности ветроустановки. Он представляет собой отношение действительной выработки электроэнергии за какой-либо период времени, например за год ($W_{год}$), к максимально возможной выработке ($W_{max} = 8760\, N_{ном}$) энергии в случае, если бы ветроустановка работала весь этот период времени на номинальной (т. е. 100 %) мощности $N_{ном}$:

$$K_{уст} = \frac{W_{год}}{8760\, N_{ном}}.$$

Величина коэффициента $K_{уст}$ установленной мощности зависит от работоспособности (надежности), графика нагрузки, времени ремонтов ветроустановки. Кроме того, $K_{уст}$ существенно зависит от местных условий: наличия ветра и его скорости. Обычно ВЭУ, подключенные к энергосистеме, работают с коэффициентом $K_{уст} = 0{,}2\ldots0{,}35$ (максимально до 0,5).

Другим интегральным параметром технико-экономического совершенства ветроэлектрической установки является среднегодовая удельная выработка электроэнергии на 1 м^2 ометаемой площади лопастной системы. Для лучших ВЭУ мощностью более 100 кВт эта величина составляет 1250...1500 кВт·ч/м^2, чаще всего средняя годовая удельная выработка находится в диапазоне 700...850 кВт·ч/м^2 при благоприятной ветровой обстановке.

В таблице приведены в качестве примера некоторые технические данные выпускаемых ВЭУ различной мощности. Следует отметить существенную зависимость от расчетной скорости ветра величины удельной мощности ветроустановки, получаемой с 1 м^2 ометаемой площади (последняя колонка).

Основные технические данные ветроагрегатов

Фирма, модель ВЭУ	Страна	Мощность номинальная, кВт	Диаметр ротора, м	Расчетная скорость, м/с	Число лопастей	Удельная мощность, кВт/м^2
Горизонтально-осевые ветроустановки						
REpower, 5M	Германия	5000	126	13,0	3	0,40
NORDEX №80/2500	Дания	2500	80	14,0	3	0,50
ГМКБ «Радуга» Р-1	Россия	1000	48	13,6	3	0,55
USW 56-100	Украина	100,7	17	13	3	0,44
ГМКБ «Радуга» Р-008	Россия	8,0	10	7,8	3	0,10
Вертикально-осевые ветроустановки						
НПО «Южное», ВТО 1250Б	Украина	1250	27	20	33	1,71
ФГУГ «КБ В.П. Макеева», ВЭУ30	Россия	30	11	4...30	3	0,27

Коммерческие показатели ВЭУ в настоящее время имеют тенденцию к сближению с их значением для традиционных установок. С 1981 по 2000 г. среднее значение удельной стоимости установленной мощности работающих на электрическую сеть зарубежных ВЭУ снизилось с 4 000 до 950 долл / кВт. Среднее значение стоимости электроэнергии, производимой на крупных

ВЭУ за этот же период времени, снизилось с 30 до примерно 4 цент / кВт при благоприятных ветровых условиях.

Удалось также решить проблему шума и низкочастотного шумового спектра, идущего от лопастной системы. В результате при расположении крупных ВЭУ на расстоянии не ближе 250 м от жилых домов уровень шума не превышает обычных бытовых децибелл.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ (ВЕТРОТУРБИН)

Классификация ветродвигателей возможна по ряду различных признаков, как основных, так и второстепенных. Одним из основных признаков классификации является ориентация вектора $\bar{\Omega}$ угловой скорости вращения ротора ветродвигателя относительно вектора $\bar{V}_0$ скорости ветра в свободном атмосферном потоке. По этому признаку ветродвигатели подразделяют на коллинеарные и ортогональные.

Коллинеарным называют ветродвигатель, для которого векторы $\bar{V}_0$ и $\bar{\Omega}$ параллельны или антипараллельны. Таким является горизонтально-осевой ветродвигатель.

Ортогональным в общем случае называют ветродвигатель, для которого векторы $\bar{V}_0$ и $\bar{\Omega}$ перпендикулярны. Возможны два частных случая вариантов их сочетания:

1) вектор вращения $\bar{\Omega}$ перпендикулярен поверхности земли; таким ветродвигателем является вертикально-осевой ветродвигатель, называемый иногда роторным, или карусельным;

2) вектор вращения $\bar{\Omega}$ параллелен поверхности земли; такой ветродвигатель называется иногда барабанным.

Возможен ветродвигатель, у которого угол между векторами $\bar{V}_0$ и $\bar{\Omega}$ острый (между 0 и 90°). Такой ветродвигатель можно назвать наклонно-осевым. Примером реализации этой схемы является шнековый ветродвигатель.

По другому основному признаку, по принципу силового аэродинамического взаимодействия лопастной системы ветродвигате-

ля с потоком набегающего на него воздуха, ветродвигатели можно подразделить на два типа:

1) ветродвигатели, которые используют во время движения лопастной системы подъемную силу, возникающую на рабочих элементах лопастной системы (жестких лопастях, вращающихся цилиндрах) и создающую крутящий момент;

2) ветродвигатели, которые используют во время движения лопастной системы различие в аэродинамических силах, возникающих на различных элементах лопастной системы (крыловых лопастях или каких-либо других поверхностях), в моменты движения этих поверхностей по направлению ветра и против направления ветра, т. е. различие в аэродинамическом сопротивлении, возникающем на элементах лопастной системы.

К ветродвигателям первого типа относятся ветродвигатели, изображенные на рис. 1. Примером ветродвигателя второго типа может служить чашечный анемометр, замеряющий скорость ветра.

Возможная классификация ветродвигателей (ветротурбин) с механической передачей на основе их различия по конструктивным признакам дана на рис. 4, 5. На рис. 6–8 приведены примеры конструктивных схем таких двигателей.



Рис. 4. Классификация коллинеарных ветродвигателей (ветротурбин) с механической передачей

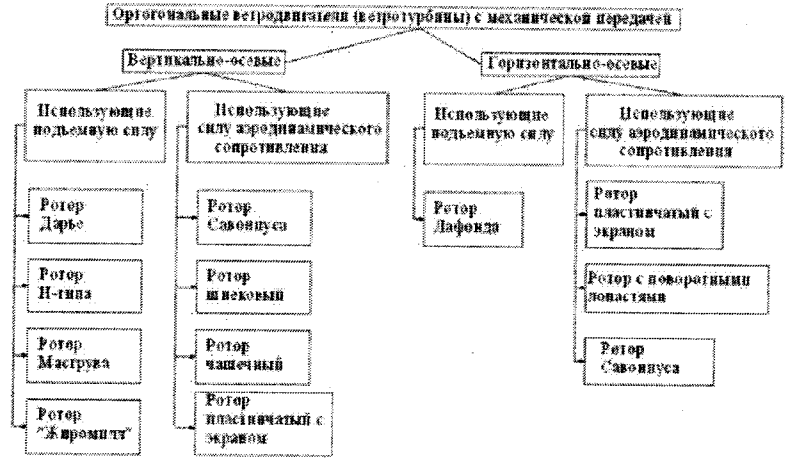


Рис. 5. Классификация ортогональных ветродвигателей (ветротурбин) с механической передачей

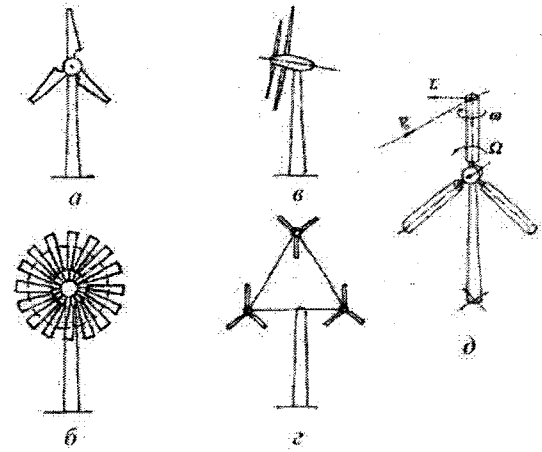


Рис. 6. Коллинеарные горизонтально-осевые ветродвигатели:
а – одноколесный малолопастный; *б* – одноколесный многолопастный; *в* – многоколесный одноосный; *г* – многоколесный многоосный; *д* – ротор Флетнера

Коллинеарные горизонтально-осевые ветродвигатели могут использовать как подъемную силу, возникшую при обтекании крылового профиля (рис. 6, *а* – *г*), так и подъемную силу, возни-

кающую на основе эффекта Магнуса при обтекании вращающегося цилиндра (рис. 6, *д*).

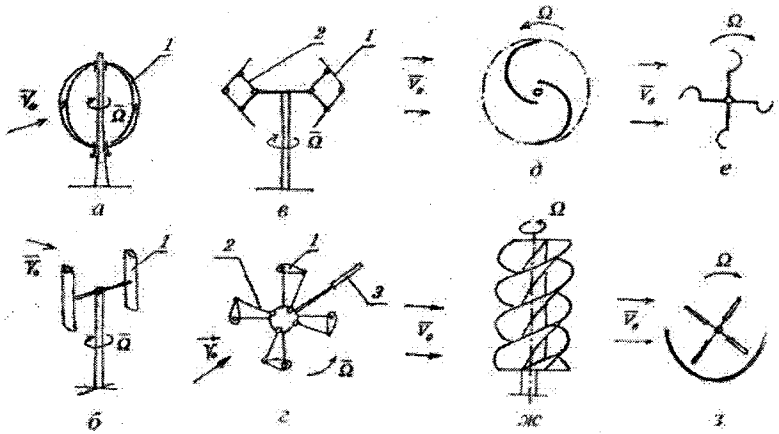


Рис. 7. Ортогональные вертикально-осевые ветродвигатели:
а – ротор Дарье; *б* – ротор Н-типа; *в* – ротор Масгроува (в полусложенном положении) с изменяемым положением лопастей; *г* – ротор «жиромилл» *(вид сверху)* с изменяемым углом установки лопастей; *д* – ротор Савониуса (*вид сверху*); *е* – ротор чашечный (анемометр, *вид сверху*); *ж* – ротор шнековый; *з* – ротор пластинчатый с экраном, карусельный (*вид сверху*); *1* – лопасть, *2* – механизм управления положения лопастей; *3* – флюгер

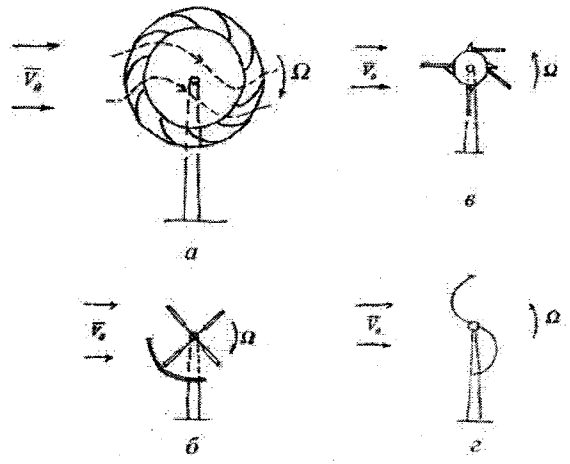


Рис. 8. Ортогональные горизонтально-осевые ветродвигатели:
а – ротор Лафонда; *б* – ротор пластинчатый с экраном (барабанный); *в* – ротор с поворотными лопастями; *г* – ротор Савониуса

В ортогональных вертикально-осевых ветродвигателях используется подъемная сила, которая возникает при обтекании крылового профиля (рис. 7, *а – г*), и сила аэродинамического сопротивления (рис. 8, *д – з*).

В ортогональных горизонтально-осевых ветродвигателях используется подъемная сила (рис. 8, *а*) и сила аэродинамического сопротивления (рис. 8, *б – г*).

4. РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ВЕТРОВОЙ МОЩНОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЮ

4.1. Механическая передача

Механическая передача мощности от ветродвигателя потребителю (рис. 9) является наиболее распространенной, поскольку достаточно проста в конструктивном отношении и обладает среди других способов передачи мощности наибольшим КПД, равным 0,85...0,95. Недостатком такой передачи является наличие повышающего редуктора (мультипликатора). В случае, если нагрузкой является электрогенератор, величина передаточного числа может находиться в диапазоне 40...70. Другой недостаток состоит в том, что колебания скорости ветрового потока, несмотря на сглаживающую инерционность ветроколеса, передаются на вал потребителя.

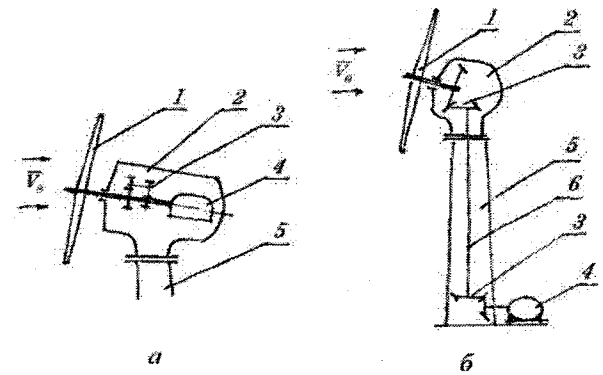


Рис. 9. Схемы механической передачи:
а – электрогенератор в гондоле; *б* – электрогенератор на земле;
1 – ветродвигатель; *2* – гондола; *3* – мультипликатор; *4* – электрогенератор;
5 – башня; *6* – вертикальный вал

Если электрогенератор находится в гондоле (рис. 9, *а*), то мультипликатор располагается там же, между ним и ветродвигателем. Если электрогенератор или какой-либо другой потребитель находятся на земле (рис. 9, *б*), используются два редуктора: один с коническими шестернями в гондоле, другой – на земле. Между ними находится вертикальный вал.

4.2. Гидравлическая передача

Схема гидравлической передачи допускает компоновку ветродвигателя и электрогенератора как в гондоле (рис. 10, *а*), так и раздельно, с расположением электрогенератора на земле (рис. 10, *б*). Гидропередача может иметь различные конструктивные модификации, чаще всего это соединение механической передачи с небольшим передаточным отношением и гидропередачи.

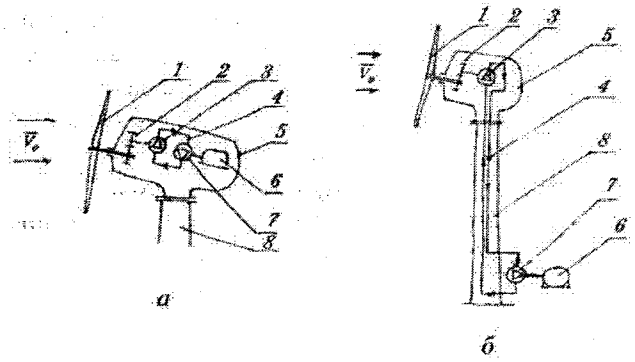


Рис. 10. Схемы гидравлической передачи:
а – неразделенная гидропередача, электрогенератор в гондоле;
б – разделенная гидропередача, электрогенератор на земле;
1 – ветродвигатель; *2* – механическая передача; *3* – гидронасос; *4* – гидромагистраль;
5 – гондола; *6* – электрогенератор, *7* – гидромотор; *8* – башня

Известны два типа гидропередачи: гидродинамическая и гидростатическая (объемная). Гидродинамическая передача не нашла применения в ветроэнергетике, так как ее элементы (центробежный насос и радиально-осевая гидротурбина) должны работать при значительных частотах вращения. Кроме того, при изменении частоты вращения КПД такой гидропередачи значительно снижается. Более приемлема схема с объемной гидравлической передачей, состоящей

из гидронасоса и гидромото́ра (винтового или поршневого типа). За счет изменения рабочего объема гидромотора гидропередача допускает изменение частоты вращения. Гидропередача позволяет обеспечить торможение ветроколеса за счет дросселирования рабочей жидкости с соответствующим выделением теплоты, а также ограничить развиваемую на выходном валу мощность при возрастании скорости ветра выше расчетной.

КПД неразделенной гидропередачи находится в диапазоне значений 0,85...0,95; для разделенной он меньше и равен 0,75...0,85.

4.3. Пневматическая передача

Пневматический способ передачи ветровой мощности к потребителю основан на принципе работы разделенной гидропередачи, при этом кинетическая энергия ветрового потока преобразуется ветродвигателем в потенциальную энергию перепада давления воздуха в пневмомагистрали.

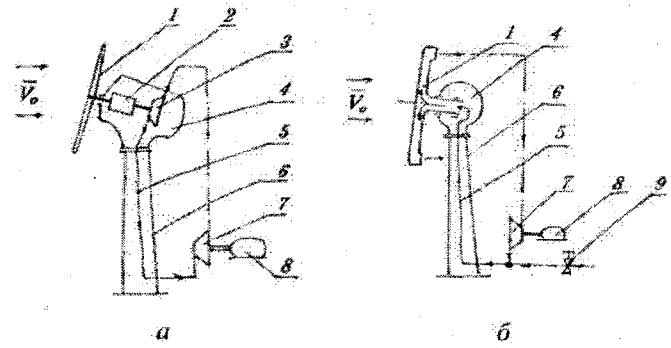


Рис. 11. Схемы пневматической передачи:
а – с компрессором в гондоле; *б* – с ветродвигателем, имеющим полые лопасти;
1 – ветродвигатель; *2* – мультипликатор; *3* – компрессор; *4* – гондола;
5 – пневмомагистраль; *6* – башня; *7* – воздушная турбина; *8* – электрогенератор;
9 – дополнительный ввод воздуха

Возможны различные конструктивные схемы пневмопередачи, две из них приведены на рис. 11, *а* и *б*. Атмосфера является в пневмопередаче «возвращающей» магистралью. Преимущество таких схем заключается в том, что электромеханическое оборудование располагается на земле. Это открывает широкие возможности по созданию новых, нетрадиционных, комбинированных энер-

гоустановок. Кроме того, пневмомагистраль гасит пульсации воздушного потока.

В схеме пневмопередачи по рис. 11, *а* компрессор, находящийся в гондоле, нагнетает по пневмомагистрали сжатый воздух в наземную воздушную турбину, которая вращает электрогенератор. Одним из преимуществ этой схемы является возможность подачи сжатого воздуха в контур тепловой машины, например газотурбинного двигателя, в результате чего можно в термодинамическом цикле газотурбинной установки исключить затраты мощности на сжатие воздуха.

В схеме пневмопередачи на рис. 11, *б* (схема Ж.Э. Андро) ветродвигатель имеет полые лопасти, лопастная система ветродвигателя выполняет функцию компрессора, прокачивая через себя атмосферный воздух. В пневмомагистрали создается разрежение, что дает возможность работать наземной воздушной турбине. Преимуществами схемы Андро являются: отсутствие мультипликатора; возможность более легкого запуска свободно вращающегося колеса; регулирование ветродвигателя поворотом соплового аппарата воздушной турбины или дополнительным вводом воздуха в пневмомагистраль за турбиной.

Негативным фактором, препятствующим широкому внедрению пневмопередачи, является пониженное значения ее КПД – около 0,50...0,55. Использование пневмопередачи в различных комбинированных ВЭУ позволяет ослабить влияние этого фактора. Наиболее значительной потерей в схеме Андро является потеря с кинетической энергией струй, выходящих из периферийных устройств полых лопастей. Утилизировать эту потерю можно различными способами, например, используя атмосферный диффузор.

4.4. Аэродинамическая передача

Аэродинамической передачей в отечественной литературе называют схему, предложенную русским исследователем А.Г. Уфимцевым. В таком ветроагрегате (рис. 12) на концах лопастей основного ветроколеса находятся вторичные ветроагрегаты (ветродвигатель и электрогенератор). Ветродвигатели вторичных ветроагрегатов обтекаются набегающим потоком воздуха, имеющим скорость существенно большую, чем скорость атмосферного ветра. В результате вторичные ветроагрегаты могут иметь увеличенную частоту вращения, что позволяет не использовать мультипликатор. На рис. 12 изображены двухколесные вторичные ветродвигатели.

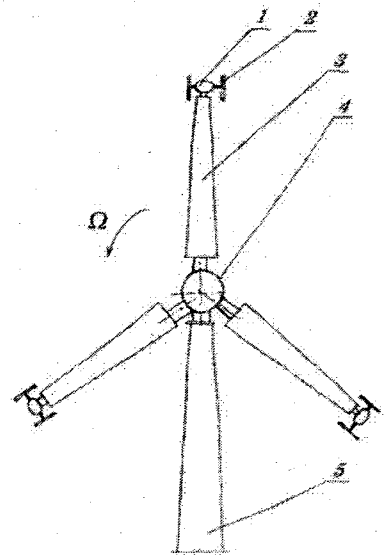


Рис. 12. Схема аэродинамической передачи:
1 – электрогенератор; *2* – вторичные ветродвигатели;
3 – основной ветродвигатель; *4* – гондола; *5* – башня

Несмотря на отсутствие электромеханического оборудования в гондоле, значительное конструктивное усложнение ветроколеса тормозит использование этой схемы передачи.

5. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Несмотря на многообразие теоретически возможных и практически реализованнх схем ВЭУ, современные ветроагрегаты независимо от уровня мощности являются либо пропеллерными горизонтально-осевыми, либо ортогональными вертикально-осевыми ветродвигателями (использующими подъемную силу на лопастях), поскольку именно эти два типа ветродвигателя обладают наиболее высокими технико-экономическими показателями.

Горизонтально-осевые ветродвигатели по сравнению с вертикально-осевыми имеют следующие преимущества:

возможность самостоятельного пуска без вспомогательного привода за счет изменения угла установки лопастей;

большее значение коэффициента использования энергии ветра;

большее значение коэффициента быстроходности X и, как следствие этого, бóльшую частоту вращения ветродвигателя, что позволяет уменьшить массогабаритные показатели электромеханического оборудования;

исключение необходимости в угловой передаче крутящего момента.

К основному недостатку пропеллерных горизонтально-осевых двигателей следует отнести необходимость в устройстве ориентации на направление ветра.

Ортогональные вертикально-осевые двигатели по сравнению с пропеллерными горизонтально-осевыми обладают следующими преимуществами:

независимостью функционирования от направления ветрового потока, что устраняет необходимость ориентирования ветродвигателя на это направление;

вертикальным валом, позволяющим размещать электромеханическое оборудование у основания ВЭУ, что снижает требования к прочности и жесткости опоры, не ограничивает массогабаритные показатели оборудования, упрощает техническое обслуживание и ремонт;

возможностью крепления лопастей к ротору в нескольких местах, что снижает требования по прочности и жесткости лопасти;

меньшим значением окружной скорости лопасти из-за меньших значений коэффициента быстроходности X;

относительной простотой изготовления лопастей.

К числу недостатков вертикально-осевых ветродвигателей следует отнести:

меньший коэффициент использования энергии ветра;

меньшую быстроходность.

Отметим, что ветроустановки, использующие подъемную силу, имеют окружную скорость концов лопастей больше скорости ветра (коэффициент быстроходности X лежит в диапазоне значений 2...10). Ветроустановки, использующие силу аэродинамического сопротивления, вращаются с линейной скоростью концов лопастной системы, меньшей скорости ветра.

Общее представление о соотносительных значениях коэффициента использования энергии ветра C_P для различных ветроустановок дает рис. 13.

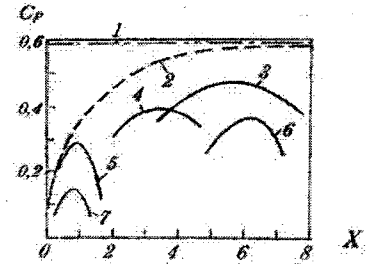


Рис. 13. Зависимость коэффициента использования энергии ветра C_P от коэффициента быстроходности X:

1 – критерий Жуковского–Бетца; *2* – идеальный ветродвигатель Глауэрта; *3* – двухлопастное горизонтально-осевое ветроколесо; *4* – трехлопастное; *5* – многолопастное; *6* – вертикально-осевое ветроколесо Дарье; *7* – ротор Савониуса

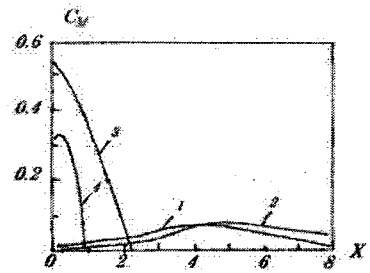


Рис. 14. Зависимость коэффициента крутящего момента C_M от коэффициента быстроходности X:

1 – двухлопастное горизонтально-осевое ветроколесо; *2* – трехлопастное; *3* – многолопастное; *4* – ротор Савониуса

Важной характеристикой ветродвигателя является развиваемый им крутящий момент. Из рис. 14 видно, что наибольший крутящий момент создают многолопастные горизонтально-осевые ветродвигатели (с числом лопастей 12...36) и ротор Савониуса. Это существенно в случае привода поршневых насосов, требующих увеличенный пусковой момент. Малолопастные горизонтально-осевые ветродвигатели имеют наименьшее значение относительного момента, но они быстроходны, и поэтому требуют мультипликатор с меньшим передаточным числом.

6. СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ С АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

6.1. Использование концентраторов воздушного потока

Этот способ обычно предлагается применять для горизонтально-осевых ветродвигателей. Известно, что в идеальном случае в свободном атмосферном потоке ветродвигатель может преобразовать в механическую мощность не более 16/27 кинетической энергии набегающей воздушной струи, которая имеет перед ветродвигателем площадь поперечного сечения, равную площади, ометаемой его лопастной системой.

Различными конструктивными устройствами можно увеличить аэродинамическое взаимодействие ветродвигателя с атмосферным воздушным потоком, если прямо или опосредственно заставить взаимодействовать с лопастной системой ветроколеса дополнительно массу воздушного потока, окружающего струю, проходящую через ветродвигатель. Тем самым в энергетическое взаимодействие с ветроколесом привлекается кинетическая энергия воздушного потока, окружающего ветродвигатель.

Физически усиление аэродинамического взаимодействия происходит как за счет увеличения количества воздуха, проходящего через ветроколесо, так и за счет увеличения перепада статического давления на ветроколесе.

В качестве концентраторов воздушного потока возможно использование различных воздуховодных устройств: воздухоотводящих (атмосферный диффузор), рис. 15 *а*, *б*; воздухоподводящих (воздухоприемный конфузор), рис. 15, *в*; комбинированных воздуховодных, рис. 15, *г*.

Практическое применение нашли ветроустановки с использованием атмосферных диффузоров. На рис. 15, *а* показана схема диффузора традиционного типа с щелевым вдувом наружного атмосферного воздуха на внутреннюю стенку диффузора для предотвращения возникающего отрыва потока. Такой вдув позволяет увеличить угол раскрытия диффузора, т. е. сократить его длину.

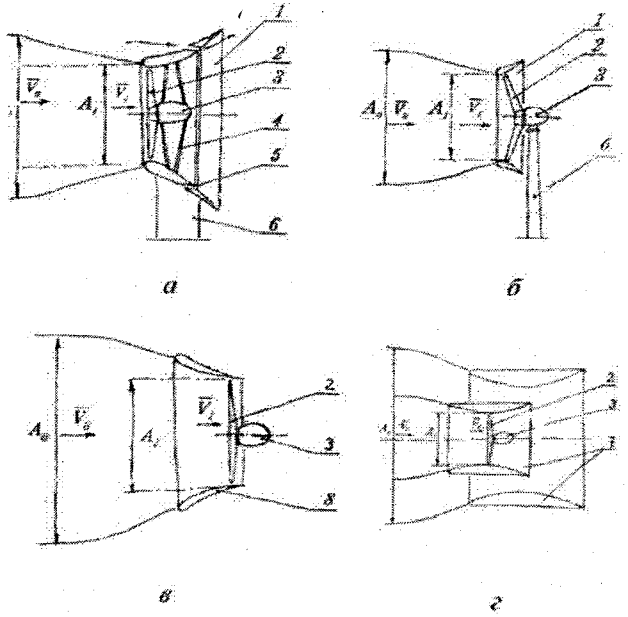


Рис. 15. Схемы горизонтально-осевых ветродвигателей с воздуховодными устройствами:
а – с атмосферным диффузором с щелевым вдувом; *б* – с диффузорным кожухом из крылового профиля; *в* – с воздухоподводящим конфузором; *г* – с комбинированным воздуховодным устройством;
1 – диффузор; *2* – ветроколесо; *3* – гондола; *4* – силовые стойки; *5* – щелевой вдув; *6* – опорное устройство; *7* – труба Вентури; *8* – конфузор

Атмосферный дозвуковой диффузор характерен тем, что статическое давление при выходе из него не может превысить атмосферное давление. Однако создаваемое им разрежение за ветроколесом приводит к росту скорости от V_0 в сечении далеко перед диффузором до скорости V_1 в сечении перед ветроколесом. Это увеличение скорости в зависимости от гидравлических потерь в диффузоре может достигать значений 1,5...1,8. В результате увеличивается расход воздуха через ветродвигатель и перепад давления на ветроколесе, а коэффициент использования энергии ветра C_P может достигать значения 1,0...1,5, что превышает критерий Жуковского–Бетца для ветродвигателя без диффузора в 2–3 раза.

Другим типом атмосферного диффузора является наружный кожух с крыловым профилем поперечного сечения (см. рис. 15, *б*).

Эффективность такого устройства меньше, чем предыдущего, но конструктивные проблемы решаются значительно проще.

Очевидные преимущества использования диффузора – это уменьшение диаметра ветроколеса и возможность использования ВЭУ в регионах с пониженными среднегодовыми скоростями ветра. Кроме того, наличие кожуха вокруг ветроколеса увеличивает его КПД за счет исчезновения концевых потерь от сходящих с концов лопастей вихревых шнуров.

Недостатки атмосферного диффузора: возникновение в нем отрыва потока (снижение эффективности) при увеличении угла натекания потока воздуха на диффузор свыше 10...15; увеличение осевого усилия на башню; усложнение ВЭУ.

На рис. 15, *в* показана схема горизонтально-осевого ветродвигателя с воздухоподводящим конфузором. В этом случае происходит захват ветроколесом дополнительной массы воздуха в результате воздействия на ветродвигатель перепада давления от скоростного напора набегающего потока.

На рис. 15, *г* изображена схема горизонтально-осевого ветродвигателя с комбинированным воздуховодным устройством с использованием двух коаксиальных труб Вентури. В минимальном сечении такой трубы возникает максимальное разрежение. Во внутренней трубе Вентури в месте максимального разрежения располагается ветроколесо, а во внешней трубе Вентури в минимальном сечении находится выходное сечение внутренней трубы. Таким образом, появляется возможность увеличить мощность ветродвигателя, используя дополнительный перепад давления на ветроколесе.

6.2. Использование вихревых структур

Для увеличения взаимодействия ветродвигателя и воздушного потока возможно использование вихревых структур, создаваемых как в свободной атмосфере, так и в специальных каналах. Такие генераторы закрученного потока подобны по своим свойствам природному смерчу, обладающему значительным запасом кинетической энергии.

Одной из наиболее разработанных конструкций ВЭУ с вихревыми структурами, ограниченными стенками, является вертикально-осевой пропеллерный ветродвигатель, над которым расположена торнадо-башня (рис. 16). Поток воздуха, закручиваясь, входит

внутрь башни через регулируемые направляющие лопатки. В приосевой зоне вихря возникают значительное разрежение и большие угловые скорости, что вызывает подсос дополнительных масс воздуха из окружающей среды. В результате скорость перед ветроколесом значительно превышает скорость атмосферного потока, а за самим ветроколесом создается значительное разрежение.

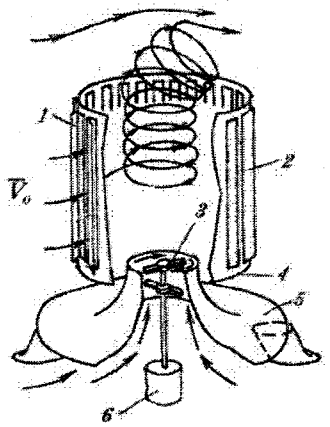


Рис. 16. Схема вертикально-осевого ветродвигателя с торнадо-башней:
1 – регулирующие вертикальные открытые жалюзи; *2* – закрытые жалюзи; *3* – ветротурбина; *4* – вертикальная башня; *5* – подводящее опорное устройство; *6* – электрогенератор

Способность вихревых структур концентрировать в своей осевой части энергию из окружающего пространства позволяет использовать такие ВЭУ в регионах с низкими скоростями ветра. В рассмотренной схеме ВЭУ отпадает также необходимость в установке ветродвигателя на направление ветра.

7. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ (УПРАВЛЕНИЯ) ВЕТРОДВИГАТЕЛЕЙ

7.1. Особенности управления работой ветродвигателей

Для любых мощностей, типов и конструкций ветроустановок требуется их функционирование на следующих режимах работы: пуск, генерирование мощности, торможение (как штатное, так и аварийное), останов. В том или ином виде это обеспечивается сис-

темой управления, регулирования, контроля и защиты механических и электрических параметров ветроустановки. В зависимости от мощности и типа ветроустановки эта система может быть весьма сложной или чрезвычайно простой, автоматизированной или нет. Структура системы определяется, в частности, способом, законом и программой регулирования ветроустановки.

Управление горизонтально-осевым двигателем включает в себя процесс ориентации оси ротора ветродвигателя на направление ветра и собственно процесс регулирования параметров ветродвигателя (частота вращения, мощность).

Управление вертикально-осевым ветродвигателем не требует ориентации на направление ветра, а требует только регулирования параметров ветродвигателя.

Способы регулирования (управления) такими параметрами, как частота вращения и мощность ветродвигателя, сводятся к следующим основным схемам: поворот лопасти (или ее части) вокруг вертикальной оси; пропуск ветрового потока мимо ветродвигателя; введение дополнительного аэродинамического или механического сопротивления на ветродвигателе.

Следует отметить еще раз, что на участке энергетической характеристики (см. рис. 3) от момента начала генерирования мощности до момента достижения расчетной скорости ветра, регулирование ветродвигателя, как правило, не осуществляется. Процесс регулирования, т. е. ограничение мощности ветродвигателя на номинальном уровне с ростом скорости ветра, происходит, как правило, в диапазоне скоростей ветра от расчетной до максимальной.

7.2. Ориентация горизонтально-осевого ветродвигателя на направление ветра

Особенности и требования к системе ориентации. Различают два типа системы ориентации ротора горизонтально-осевых ветродвигателей на направление ветра: активную самоориентацию (за счет взаимодействия элементов ветроустановки с ветровым потоком), применяемую на ветроустановках малой и иногда средней мощности; пассивную (за счет внешнего приводного устройства), применяемую на ветроустановках средней и большой мощности.

Основные требования к системе ориентации ветроустановок на направление ветра следующие.

Точность ориентации должна быть на менее 4…5°, ибо при отклонении в 5° потеря мощности может быть до 10 %.

Скорость поворота гондолы (головки) не должна превышать 0,2…0,3 об/мин, чтобы не вызывать чрезмерного гироскопического момента

$$M_{гир} = J\Omega\omega,$$

где J – момент инерции ротора; Ω и ω – угловые скорости вращения ветродвигателя и поворота гондолы.

При всех режимах работы должна соблюдаться устойчивость положения гондолы в потоке, т. е. ориентация должна выполняться только при существенном и относительно долговременном изменении направления ветра, а не при случайных его пульсациях.

Активная система ориентации. Активная система ориентации осуществляется следующими способами: хвостовым оперением (рис. 17, *а*); виндрозами (поворотными ветрячками, рис. 17, *б*); расположением ветродвигателя за башней (рис. 17, *в*).

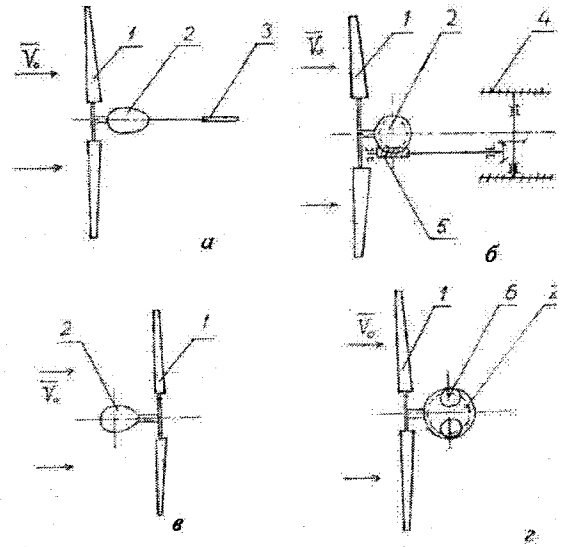


Рис. 17. Схемы устройств ориентации горизонтально-осевых ветродвигателей на направление ветра (*вид сверху*):

а – при помощи хвостового оперения; *б* – при помощи виндроз; *в* – расположением за башней; *г* – при помощи электромеханического привода; *1* – лопасть; *2* – гондола; *3* – хвост; *4* – виндроза; *5* – червячное зацепление; *6* – шестерня электромеханического привода

Ориентация при помощи флюгера («хвоста») отличается большой точностью, простотой конструкции, но имеет повышенную скорость поворачивания головки, увеличивает ее вес, усложняет уравновешивание.

Ориентация при помощи виндроз основана на том, что пока направление скорости ветра параллельно плоскости их вращения (оси ветродвигателя), виндрозы неподвижны. Они представляют собой небольшие ветроколеса, расположенные перпендикулярно к плоскости вращения основного ветроколеса. При направлении ветра под углом к оси ветродвигателя, на лопастях виндроз возникает крутящий момент, и они начинают вращаться. Через механизм конических шестерен и червячной пары вращение передается на систему поворота головки ветродвигателя, пока она не встанет параллельно ветру, после чего вращение виндроз прекращается. Эту систему ориентации характеризует компактность, небольшие скорости поворота головки, высокая чувствительность, но конструкция ветроустановки усложняется.

Ориентация при помощи расположения ветродвигателя за вертикальной осью его поворота основана на том, что вращающееся ветроколесо играет как бы роль флюгера, и при этом специальный механизм ориентации отсутствует. Эта схема ориентации характеризуется повышенной скоростью поворота головки, т. е. увеличением гироскопического момента, неустойчивостью ее положения в потоке, воздействием аэродинамического следа от башни на лопасти при их вращении.

Пассивная система ориентации. Приводная (пассивная) система ориентации гондолы ветродвигателя на направление ветра используется на всех современных ветроустановках мощностью более 100 кВт (рис. 17, *г*). Обычно используется сдвоенный электромеханический привод из двух электродвигателей, соединенных с шестеренчатыми редукторами. Сдвоенный привод обеспечивает бóльшую жесткость между зубьями шестеренчатого колеса на опоре (башне) и на гондоле, что необходимо для уменьшения вибрации. Еще большую контактную жесткость обеспечивает гидропривод. Сигнал на начало и окончание вращения поступает от специальных устройств, измеряющих направление и скорость ветра и расположенных наверху гондолы, на ее подветренной стороне.

7.3. Регулирование горизонтально-осевого ветродвигателя

Регулирование горизонтально-осевого ветродвигателя поворотом лопасти. Поворот лопасти (или ее периферийной части) как способ регулирования ветродвигателя является одним из наиболее употребительных для ветродвигателей малой и средней мощности. Однако для ветроагрегатов мегаваттного уровня мощности механизм поворота становится сложным и громоздким. Регулирование ветроагрегатов большой мощности чаще всего осуществляется посредством предусмотренного расчетом срыва потока с неповоротной лопасти.

У ветродвигателей средних мощностей поворот лопастей выполняется механизмами с электрическим или гидравлическим приводом, размещаемыми в башне. Сигналом для такого поворота служит информация об изменении скорости ветра, частоты вращения, крутящего момента.

У ветродвигателей малых мощностей поворот лопасти осуществляется за счет воздействия ветрового потока на лопасть (аэродинамические системы регулирования различных модификаций) и воздействия центробежных сил как самой лопасти, так и специальных грузов, устанавливаемых либо на самой лопасти, либо на главном валу ветродвигателя (центробежные системы регулирования различных модификаций).

Дополнительно на валу ветродвигателя может находиться пружина, которая через систему рычагов воздействует на положение лопасти.

При совместном использовании сил ветрового и центробежного воздействия образуются центробежно-аэродинамические системы регулирования.

На рис. 18 схематически изображены силы и моменты, действующие на лопасть относительно ее продольной оси вращения, проходящей через точку 0. Центробежные силы, действующие на вращающуюся лопасть, имеют составляющую $F_{цл}$, которая создает момент $M_{цл}$ центробежных сил лопасти, стремящейся повернуть лопасть в плоскость τ вращения ветроколеса. Аэродинамическая сила L, приложенная в центре давления профиля A и перпендикулярная относительной скорости потока $\bar{W}_1$, натекающего на лопасть, создает момент M_a аэродинамических сил. Момент M_a аэродинамических сил стремится повернуть ло-

пасть во флюгерное положение, в плоскость оси вращения ветроколеса *n*.

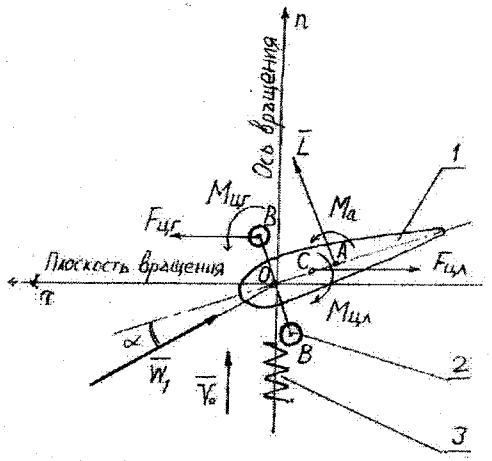


Рис. 18. Схематическое изображение моментов сил, действующих на вращающуюся лопасть ветродвигателя: *1* – профиль лопасти; *2* – компенсирующие грузы; *3* – пружина

Дополнительно на жесткой связи *OB* с осью поворота лопасти могут располагаться компенсирующие грузы *B*. Возникающая при вращении лопасти центробежная сила $F_{щ}$ этих грузов создает момент $M_{щ}$, от которого компенсирующий груз стремится встать в плоскость τ вращения ветроколеса. Тем самым компенсируется (или перекомпенсируется) действие момента центробежных сил лопасти.

В зависимости от совместного воздействия на лопасть моментов $M_а$, $M_{цл}$, $M_{цб}$ и пружины (на рис. 18 система ее рычагов не показана) может быть разработана та или иная система регулирования.

В англоязычной терминологии регулирование поворотом лопасти именуется «pitch regulation».

Регулирование горизонтально-осевого ветродвигателя введением дополнительного сопротивления на роторе. Современные ветроустановки большой мощности регулируются методом заранее рассчитанного (при увеличении скорости ветра и соответственно при увеличении угла атаки α) срыва потока с определенных участков лопасти, жестко закрепленной на роторе. В отечественной литературе ранее использовался термин «аэродинамическое саморегулирование», в современной англоязычной терминологии это «stall regulation».

Для реализации этого метода регулирования необходим специальный профиль лопасти, который должен обладать следующим свойством: при увеличении скорости ветра срыв потока с профиля лопасти должен начинаться с кормы профиля, а затем область срыва должна монотонно увеличиваться и продвигаться к передней части профиля. В результате зависимость коэффициента подъемной силы C_L от угла атаки α будет иметь вид кривой *1* на рис. 19. Прекращение роста коэффициента C_L с ростом угла атаки α ограничивает рост мощности ветродвигателя и сохраняет его значение на достаточно постоянном уровне (см. рис. 3, *а*, кривая *3*). У традиционных крыловых профилей зависимость C_L от α подобна кривой *2* на рис. 19, что приводит к снижению мощности с ростом скорости ветра в случае их использования для аэродинамического саморегулирования.

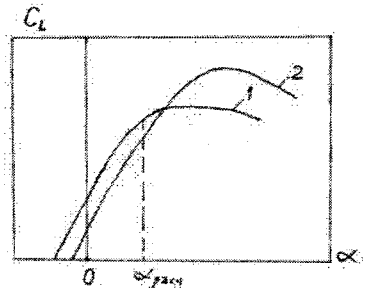


Рис. 19. Зависимость коэффициента подъемной силы C_L от угла атаки α: *1* – профиль, используемый для регулирования срывом потока; *2* – традиционный крыловой профиль

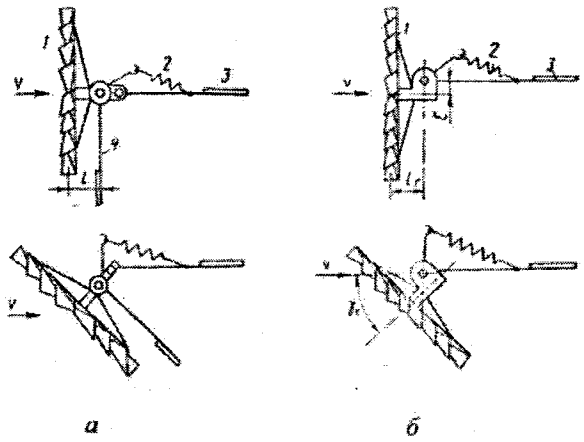
Следует отметить, что регулирование срывом потока с лопасти применяется на ВЭУ большой мощности с асинхронным генератором. Частота вращения электрогенератора определяется зависимостью крутящего момента электрогенератора от оборотов.

На двигателях малой мощности можно встретить регулирование при помощи установки на конце лопасти нескольких небольших тормозных поверхностей (открылков), аэродинамически тор-

мозящих ветродвигатель за счет их поворота от действия центробежного механизма, размещенного внутри лопасти.

Регулирование горизонтально-осевого ветродвигателя пропуском ветрового потока мимо ветроколеса. Этот способ регулирования благодаря своей простоте нашел применение в ветроустановках малой мощности с многолопастными ветроколесами. При выводе ветроколеса из-под ветра, т. е. при косой обдувке (в англоязычной терминологии – «yaw control») через него проходит меньшее количество воздуха. Кроме того, из-за изменения угла атаки на лопасти уменьшается подъемная сила.

Автоматический вывод ветроколеса из-под ветра осуществляется двумя способами: во-первых (рис. 20, *а*), с помощью боковой поверхности («лопаты») *4*, расположенной непосредственно за ветроколесом на специальном кронштейне, жестко закрепленном на головке ветродвигателя; во-вторых (рис. 20, *б*), смещением оси вращения ветроколеса на некоторое малое расстояние ε от вертикальной оси поворота головки.



а *б*

Рис. 20. Схема регулирования ветродвигателя выводом из-под ветра:
а – при помощи боковой поверхности; *б* – за счет эксцентриситета;
1 – ветроколесо; *2* – пружина; *3* – флюгер; *4* – боковая поверхность

В первом случае (см. рис. 20, *а*) при увеличении скорости ветра выше расчетной возникающее на «лопате» усилие поворачивает ветроколесо на некоторый угол γ. Во втором случае (см. рис. 20, *б*) поворот ветроколеса происходит от действия на него осевого давления. В обоих случаях «хвост» *3* под действием ветрового потока находится в положении, параллельном направлению ветра, а пружина *2* растягивается, обеспечивая равновесное положение ветроколеса.

Другой способ уменьшения массы воздуха , идущей через ветроколесо, состоит в том, что лопасти закреплены на вращающейся втулке шарнирно и имеют возможность поворачиваться под действием специального механизма навстречу ветру, занимая положение *а–в* на рис. 1. В результате уменьшается площадь, ометаемая лопастной системой, и поглощаемая ветродвигателем ветровая мощность.

7.4. Регулирование вертикально-осевого ветродвигателя

Для регулирования вертикально-осевого ветродвигателя с Н-ротором Дарье (см. рис. 7, *б*) наиболее часто используется поворот лопасти вокруг ее вертикальной оси. Механизм поворота может управляться центробежным регулятором, расположенным на основном вертикальном валу, или электрогидроприводом.

Способ регулирования пропуском ветрового потока мимо лопастной системы ветродвигателя реализован в схеме с ротором Масгроува (см. рис. 7, *в*). В этом случае каждая пара полулопастей из вертикального положения может сложиться в горизонтальное положение.

Введение дополнительного сопротивления на ветродвигателе может быть осуществлено при помощи различного вида тормозных закрылок, в том числе и поворотом всей задней части профиля лопасти.

Другой метод аэродинамического торможения использует несимметричное крепление каждой лопасти с ротором в центральной ее части при помощи горизонтального торсиона (см. рис. 7, *б*). В случае увеличения частоты вращения выше номинальной лопасть под действием центробежных сил поворачивается вокруг горизонтальной оси торсиона и закручивает торсион, отклоняясь от своего вертикального положения. Наклонное положение лопасти (отклонение от вертикального положения) вызывает увеличение ее аэродинамического сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 51237–98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 51990–2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Классификация.
3. ГОСТ Р 51991–2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования.
4. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких и др. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
5. Концепция использования ветровой энергии в России / Под ред. П.П. Безруких. М.: Книга – Пента, 2005. 128 с.
6. *Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.)*. Что может дать энергия ветра: Ответы на 33 вопроса. М.: Недра, 2002. 39 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Ветроэнергетическая установка, ветроагрегат и ветродвигатель 4
2. Параметры, характеризующие работу ветродвигателя и ветроустановки 7
3. Классификация ветродвигателей (ветротурбин) 13
4. Различные способы передачи ветровой мощности потребителю 17
   4.1. Механическая передача 17
   4.2. Гидравлическая передача 18
   4.3. Пневматическая передача 19
   4.4. Аэродинамическая передача 20
5. Основные особенности ветродвигателей различных типов 21
6. Способы увеличения аэродинамического взаимодействия ветродвигателя с атмосферным воздушным потоком 24
   6.1. Использование концентраторов воздушного потока 24
   6.2. Использование вихревых структур 26
7. Способы регулирования (управления) ветродвигателей 27
   7.1. Особенности управления работой ветродвигателей 27
   7.2. Ориентация горизонтально-осевого ветродвигателя на направление ветра 28
   7.3. Регулирование горизонтально-осевого ветродвигателя 31
   7.4. Регулирование вертикально-осевого ветродвигателя 35
Список литературы 36