

31.6я2

Б40

ЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО

П.П. Безруких

Ветроэнергетика

(Справочное и методическое пособие)



СА-342903

Москва 2010 г.

П.П. Безруких

УДК 621.47

ББК 31.63

Ветроэнергетика

(Справочное и методическое пособие)

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ КУЛЬТУРЫ
"ОРЕНБУРГСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
ИМ. Н. К. КРУПСКОЙ"

Москва
2010

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Этапы развития	4
1.1. От древности до XIX века	4
1.2. Развитие ветроэнергетики за период: XIX век – 80е годы XX века	5
1.3. Ветроэнергетика конца XX века – начала XXI века	9
Глава 2. Основы ветроэнергетики	30
2.1. Ветер, как явление природы	30
2.2. Ветер, как энергетический ресурс	32
2.2.1 Климатологические характеристики ветровой энергии	32
2.2.2 Энергетические характеристики ветра	47
2.2.3 Распределение ресурсов ветровой энергии по федеральным округам Российской Федерации	51
Глава 3. Энергетические характеристики и элементы конструкций ветроустановок	54
3.1 Классификация ветроустановок	54
3.2 Основы теории ветроэнергетических установок	62
3.3 Мощность и энергия вырабатываемые ветроустановкой	72
3.4 Элементы конструкции ветроустановок	77
3.5 Главные схемы электрических соединений ВЭУ	83
3.5.1 Схемы сетевых ВЭУ	83
3.5.2 Схемы электрических соединений ВЭС	87
3.5.3 Ветродизельные системы	90
3.5.4 Малые ветроустановки и их использование	91
Глава 4. Экономика ветроэнергетики	94
4.1 Капитальные вложения	96
4.2 Себестоимость производства электроэнергии	99

	4.3 Способ предварительной оценки срока окупаемости ВЭС	108
Глава 5.	Ветроустановка и окружающая среда	112
	5.1 Постановка задачи	112
	5.2 Среда обитания человека	113
	5.3 Негативные факторы влияния ВЭС на среду обитания человека и их оценка	113
	5.4 Экологические преимущества ветроэнергетики	127
	5.4.1 Общая оценка	127
	5.4.2 Определение объемов предотвращения загрязнения среды обитания человека вредными выбросами	129
	5.4.3 Использование воды	130
	5.4.4. Потребность в земле	130
	5.5. Заключение	132
Глава 6.	Ветроэнергетика в вопросах и ответах	134
	6.1. Ветроэнергетика и энергетика	134
	6.2. Ветроэнергетика и промышленность	143
	6.3. Ветроэнергетика и экономика	146
	6.4. Ветроэнергетика – селу	151
	6.5. Ветроэнергетика и среда обитания человека (экология)	154
	6.6. Ветроэнергетика и ее влияние на социальные условия жизни населения.	162
Приложения		167
1.1.	Постановление Совета Министров СССР.	168
1.2.	Развитие морских (оффшорных) ветростанций в странах Европы.	174
2.1.	Ветроэнергетические ресурсы о. Харлов, Мурманской области.	181
2.2.	Ветроэнергетические ресурсы п. Мезень, Архангельской области.	186
3.1.	Компоновка оборудования ветроустановки фирмы Wind World.	190

3.2.	Технические характеристики ВЭУ мощностью свыше 100 кВт.	19
3.3.	Технико-экономические характеристики ветроустановок Германии в 2002 году.	23
3.4.	Технические данные ветроустановок Европейских производителей в 1993-2000 годах.	24
4.1.	Технико-экономические характеристики зарубежных ВЭУ малой мощности.	26
4.2.	Технико-экономические характеристики ВЭУ малой мощности отечественных производителей.	28
5.1.	Обобщенные шумовые данные ветроустановок средней мощности.	29
5.2.	Требования к шуму по СН 2.2.4/2.1.8. 562-96.	29
6.	К вопросу об устойчивости ветроустановок к штормовому ветру	30
7.	Наиболее употребляемые термины ветровой энергетики на английском, немецком и русском языках.	30
	Список использованной литературы	310
	Содержание	312

ГЛАВА 3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОУСТАНОВОК

3.1. Классификация ветроустановок

Ветроустановка (ВЭУ) преобразует кинетическую энергию ветра в механическую или электрическую энергию, удобную для практического использования. Механическая энергия, главным образом, используется для подъема воды в сельских или удаленных местностях. Ветроэнергетические установки производят электрическую энергию для бытовых или промышленных нужд, работают в общей электрической сети или автономно, или совместно с другими автономными электростанциями. Существует два основных вида установок: ветроустановки с горизонтальной осью вращения (рис. 3.1) и ветроустановки с вертикальной осью вращения (рис. 3.2). Ветроустановки с горизонтальной осью составляют около 98% всех ветроустановок, подключенных к сетям энергосистем.

Ветроустановка включает следующие основные элементы и узлы: ротор или ветроколесо, который преобразует энергию ветра в энергию вращения вала; кабину или гондолу, в которой обычно расположен редуктор (некоторые турбины работают без редуктора), генератор и другое механическое и электрическое оборудование; башню, которая поддерживает ротор и кабину; электрическое и электронное оборудование: панели управления, электрические кабели, система заземления, оборудование для подключения к сети, система молниезащиты и др.; фундамент, определяющий устойчивость ветроустановки при воздействии нагрузок.

Ветроэнергетические установки классифицируются по многим признакам: конструкции ветроколеса, положению его оси вращения по отношению к поверхности земли; принципу действия; скорости вращения и т.д.

При возможности взаимодействия воздушного потока с лопастями ветроколеса возникают соответствующие силы. Так если обозначить скорость воздушного потока v_0 , а скорость лопасти v , то результатом этого взаимодействия будет скорость потока относительно лопасти, которую обозначим v_{ϕ} . При этом взаимодействия возникают: а) сила сопротивления F_c (drag force), параллельная вектору относительной скорости набегающего потока v_{ϕ} ; б) подъемная сила (lift force) F_n , направленная перпендикулярно силе F_c . В отличие от самолетов эта сила не поднимает ВЭУ, а заставляет вращаться ветроколесо; в) завихрение обтекающего лопасти потока воздуха, в результате которого возникает закрутка воздушного потока за ветроколесом, т.е. его вращение относительно вектора скорости набегающего потока v_0 ; г) турбулизация потока воздуха, т.е. хаотическое распределение скорости отдельных его частей по величине и направлению. При этом турбулентность возникает как перед лопастью, так и после неё; д) препятствие для набегающего потока. Последнее свойство характеризуется параметром, называемым геометрическим заполнением, которое равно отношению площади проекции лопастей на плоскость, перпендикулярную потоку (плоскость вращения лопастей) к ометаемой ими площади. Коэффициент геометрического заполнения прямо пропорционален количеству лопастей.

Как сказано выше, по расположению оси вращения ветроколеса ветроустановки делятся на горизонтально-осевые и вертикально-осевые (рис. 3.3).

Горизонтально-осевые ВЭУ

Практически все они пропеллерного типа. Вращающей силой этих ВЭУ является подъемная сила (lift). Относительно вектора скорости ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед башней (up wind) или после неё (down wind). В первом случае (“на ветер”) ВЭУ должно иметь устройство, удерживающее её в этом положении. В качестве таких устройств служат; флюгер или хвостовик (для очень малых ВЭУ, рис. 3.3 б1), виндрозный механизм – небольшое многолопастное колесо “уходящее” из-под ветра и тем самым автоматически устанавливающее основное ветроколесо на ветер (для ВЭУ мощностью до 250 кВт, рис 3.3. б2); электрический или гидравлический механизм, приводимый в движение датчиком направления скорости ветра (рис. 3.3 б3).

Во втором случае (“под ветер”) ветроколесо устанавливается автоматически, силой лобового давления (рис. 3.3 б4), но при этом оно частично затеняется башней и гондолой, которые турбулизируют поток, снижая тем самым эффективность использования энергии ветра. Все современные мощные ВЭУ ориентированы “на ветер”.

По числу лопастей ветроустановки бывают одно, двух, трех и многолопастные (рис. 3.3 а1, а2, а3 и а4 соответственно).

В электроветрогенераторах используются обычно двух- и трехлопастные колёса. Известны конструкции однолопастных ВЭУ мощностью до 300 кВт, однако они не получили распространения. Работами датских ученых было показано, что для мощных ВЭУ наиболее целесообразными являются 3-х лопастные ветроколеса, обеспечивающие плавность вращения и минимизирующие моменты воздействующие на ось ветроколеса.

Многолопастные ветроколеса развивают большой начальный момент при слабом ветре, поэтому используются для подъема воды. В них через кривошипный механизм вал ветроколеса связан со штангой поршневого насоса, чем и объясняется необходимость большого начального момента трогания. При увеличении скорости ветра эффективность таких ветроколес существенно снижается. В свою очередь все горизонтально-осевые ВЭУ по направлению вращения ветроколеса делятся на вращающиеся по часовой стрелке (clockwise) и против часовой стрелки (anti clockwise), если стать лицом к ветроколесу. Выбор направления вращения определяется в основном конструктивными решениями механизмов поворота лопастей и редуктора.

Вертикально-осевые ВЭУ

Такого рода ВЭУ не требуют ориентации на ветер и в этом их существенное преимущество. Второе преимущество – возможность располагать все механизмы внизу, а стало быть отсутствие необходимости сооружения мощной башни.

Однако у них имеются и принципиальные недостатки:

а) гораздо большая подверженность усталостным разрушениям, из-за часто возникающих автоколебательных процессов;

б) пульсация крутящего момента приводящая к пульсациям мощности и других параметров генераторов;

в) как показали последние результаты испытаний ВЭУ типа Даррье и Н-ротора мощностью 5 МВт, главной слабостью является подпятник– подшипник главного вала ВЭУ. Именно благодаря его разрушению прекращены попытки сооружения мощных ВЭУ с вертикальной осью. Хотя разработки ВЭУ небольшой мощности успешно продолжают.

Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Чашечный ротор (анемометр, рис. 3.3 в1). Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления, форма чашечной лопасти обеспечивает почти линейную зависимость частоты вращения ветроколеса от скорости ветра в большом диапазоне скоростей: от 0 до 80 м/сек. Этим обстоятельством и объясняется использование данного ветроколеса в измерительных приборах, в качестве датчика скорости ветра.

Ротор Савониуса (рис. 3.3 в2). Это ветроколесо также вращается силой сопротивления. Его лопасти отличаются простотой и дешевизной. Первое ветроколесо автора (1922 год) изобретения финского инженера Савониуса (S.I. Savonius) вообще представляло собой разрезанную на две части бочку, посаженные на ось, как показано на рис. 3.3 в2. Вращающийся момент создается благодаря разнице моментов сопротивления, оказываемых воздушному потоку вогнутой и выпуклой относительно него лопастями ветра. Ветроколесо имеет большое геометрическое заполнение, а значит и большой начальный момент, что необходимо для водоподъемных механизмов.

Ротор Даррье (рис. 3.3 в2). В конструкции французского инженера (Dargrieus) вращающийся момент создается подъемной силой. Ротор представляет собой две или три тонких изогнутых лопасти, имеющие аэродинамический профиль. Подъемная сила максимальна когда лопасть пересекает набегающий воздушный поток и минимальна когда лопасть движется параллельно потоку. Таким образом за один оборот лопасть дважды подвергается максимальному и минимальному моменту, что и является причиной большинства усталостных разрушений.

Ротор Даррье начать вращаться самостоятельно не может, поэтому для его запуска используется либо генератор в режиме двигателя, либо специальный двигатель. Необходимость иметь независимый источник питания для запуска существенно снижает возможности распространения данного типа ВЭУ.

Ротор Масгрува (рис. 3.3 г1). Вращающийся момент создается также подъемной силой. Две лопасти ротора, имеющие аэродинамический профиль, в начальный стартовый момент расположены вертикально. По мере увеличения скорости ветра лопасти начинают складываться, уменьшая подъемную силу за счет уменьшения ометаемой площади. И при максимальной расчетной скорости ветра ветроколесо останавливается при полном складывании лопастей. Как и ротор Даррье, этому ротору необходимо дать начальное вращение.

Ротор Эванса или Н-ротор (рис. 3.3 г2). Вращающий момент создается также подъемной силой двух вертикально расположенных лопастей с аэродинамическим профилем. Для его запуска также требуется раскрутка, а для остановки используется поворот лопастей на 90 градусов вокруг вертикальной оси. Как сказано выше, попытки сооружения ВЭУ 5 МВт с Н-ротором закончились неудачей, однако исследования продолжаются.

Концентраторы. Мощность ветроустановки в свободном потоке существенно ограничивается физической сущностью процесса. Предельное значение коэффициента использования ветра в этом случае равно 0,593 (см. 3.2).

Одним из способов повышения эффективности использования ветра является применение специальных концентраторов (ускорителей) воздушного потока (рис. 3.4), на процессы в которых не распространяется указанное выше ограничение. Для горизонтально-осевых ветроэнергетических установок были предложены различные виды концентраторов: диффузоры или конфузоры (дефлекторы), в конечном счете направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади большей, чем ометаемая ветроколесом. Однако существенного распространения такого типа ВЭУ не получали. По мнению автора область применения таких ВЭУ ограничена в лучшем случае двумя – тремя десятками кВт. Т.к. размеры концентратора увеличивают “парусность” гондолы, что приводит к необходимости усиления башни и фундамента и в конечном счете к повышению их стоимости. Неизбежно возникнут трудности с ориентацией ВЭУ на ветер.

В заключение рассмотрим еще несколько общих замечаний и классификаций.

* Установки, использующие силу сопротивления (drag-машины) вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра, а в установках, использующих подъемную силу (lift-машины), линейная скорость концов лопастей существенно выше скорости ветра. Эта ситуация подобна ситуации с парусными судами, которые могут двигаться быстрее ветра;

* Геометрическое заполнение ветроколеса, зависящее в основном от количества лопастей, является важным параметром, определяющим эксплуатационные качества ВЭУ. Ветроколесо с большим геометрическим заполнением развивает значительную мощность при относительно слабом ветре и малой скорости вращения, поэтому используется в механических системах (в основном для водоподъема). Ветроколеса с малым геометрическим заполнением развивают максимальную мощность при значительной скорости ветра и большой скорости вращения, поэтому используются для привода электрогенераторов, требующих большой скорости вращения. Напомним, что наиболее часто встречающаяся скорость вращения электрогенераторов: для ВЭУ 500 – 750 – 1000 – 1500 и 3000 об/мин.

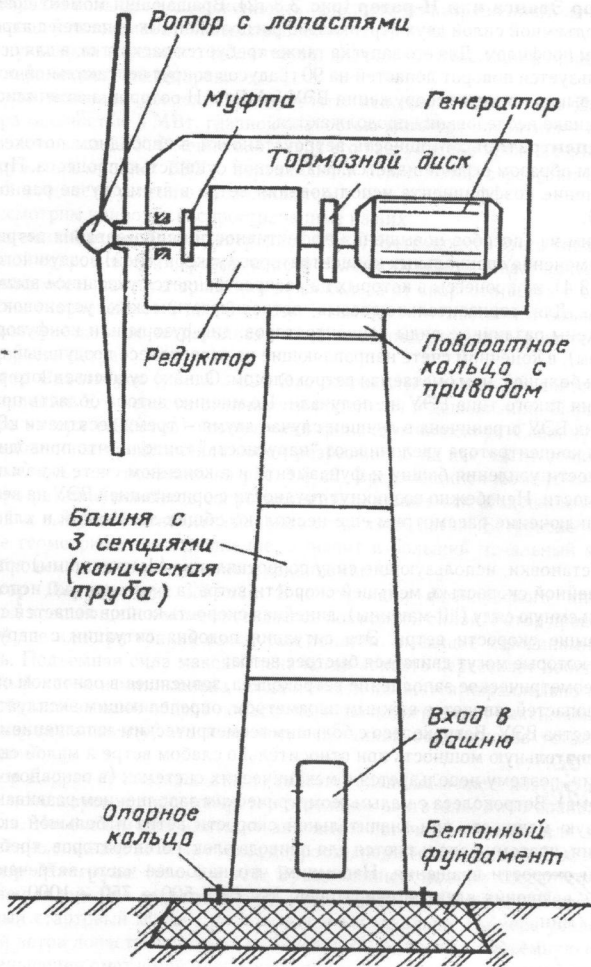


Рис. 3.1. Ветроустановка с горизонтальной осью вращения

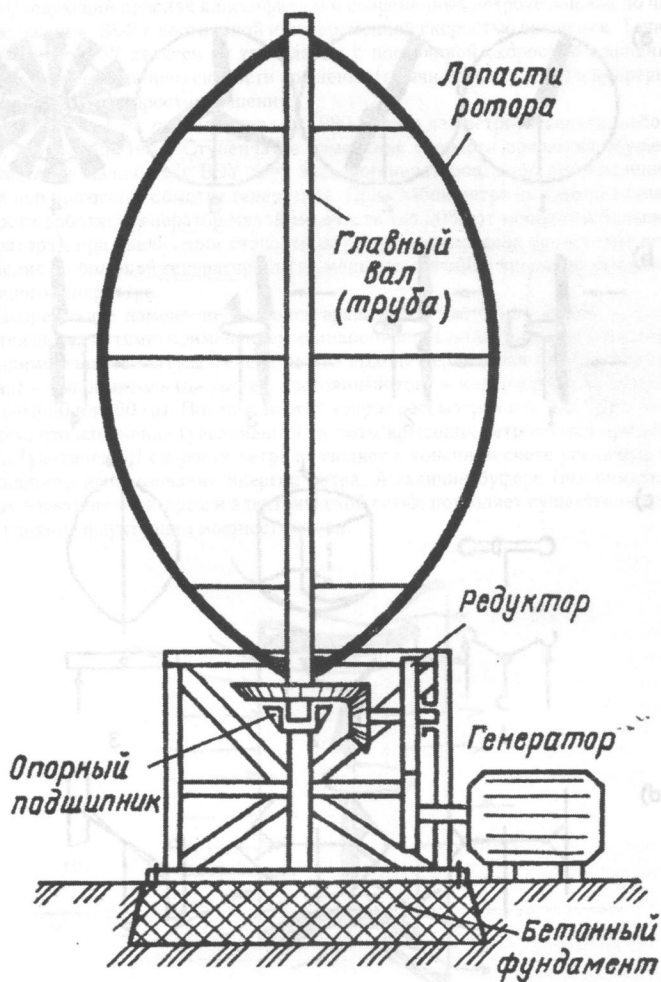


Рис. 3.2. Ветроустановка с вертикальной осью вращения
(ротор Даррье)

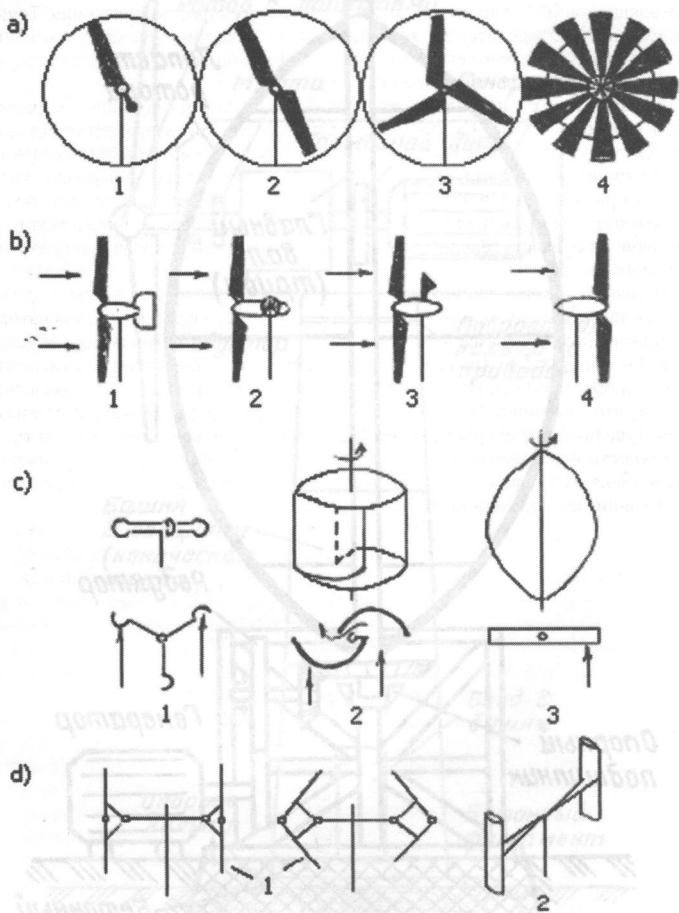


Рис. 3.3. Типы ветроколес

* Следующий признак классификации современных ветроустановок по частоте вращения: ВЭУ с постоянной или переменной скоростью вращения. Точнее современные ВЭУ делятся на три класса: с постоянной скоростью вращения; ступенчатым изменением скорости вращения (обычно две ступени) и непрерывным изменением скорости вращения.

Первый тип ВЭУ превалировал до 1980-х годов для ветроустановок, работающих в энергосистеме. Ступенчатое изменение скорости вращения осуществляется либо наличием у ВЭУ двух электрогенераторов; либо перечислением числа пар полюсов в обмотке генератора. При слабом ветре на первой ступени скорости работает генератор малой мощности (до 20% от мощности большого генератора), при увеличении скорости до расчетного предела происходит переключение на большой генератор или на меньшее значение числа пар полюсов у основного генератора.

Непрерывное изменение скорости вращения в настоящее время осуществляется двумя путями: применением асинхронизированных электрогенераторов или применением системы: генератор (на выходе переменная частота и напряжение) – выпрямитель (на выходе постоянный ток) – инвертор (на выходе частота сети 50 или 60 гц). Подробнее этот вопрос рассмотрен в п. 3.5. Здесь лишь укажем, что изменение (увеличение) частоты вращения ветроколеса при изменении (увеличении) скорости ветра позволяет в конечном счете увеличить эффективность использования энергии ветра. А наличие буфера (выпрямителя) между электрогенератором и электрической сетью позволяет существенно снизить влияние флуктуации мощности ветра.

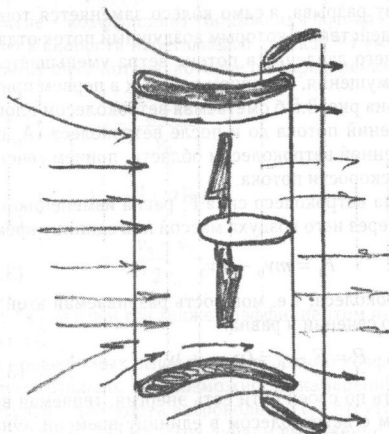


Рис. 3.4. Концентратор ветрового потока