

31.6
Б 40

Л.П. Безруких

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ВЕТРА

ТЕХНИКА
ЭКОНОМИКА
ЭКОЛОГИЯ

СА-302644



КОЛОС

Глава 3

Энергетические характеристики и конструкции ветроустановок

3.1. Классификация ветроэнергетических установок

Ветроэнергетическая установка (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 электричес-

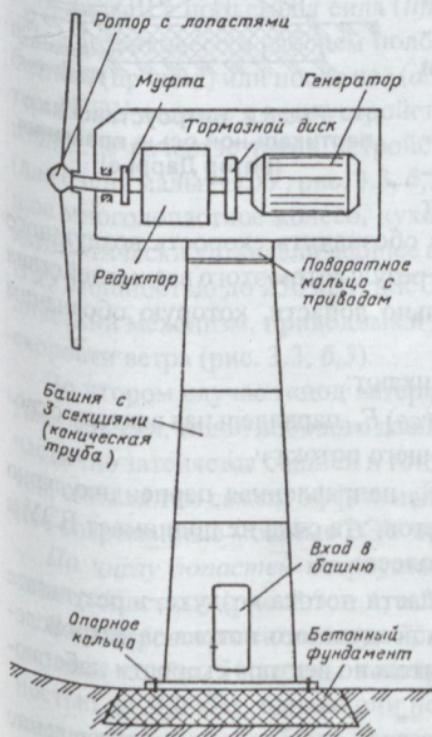


Рис 3.1. Ветроустановка с горизонтальной осью вращения

кое 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 нагрузки.

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 взаимодействии 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_{α} .

При этом взаимодействия возникают:

- сила сопротивления (drag force) F_c , параллельная вектору относительной скорости набегающего потока v_{α} ;
- подъемная сила (lift force) F_n , направленная перпендикулярно силе F_c . В отличие от самолетов, эта сила не поднимает ВЭУ, заставляет вращаться ветроколесо;
- 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 ;
- турбулизация потока воздуха, т.е. хаотическое распределение скорости отдельных его частей по величине и направлению.

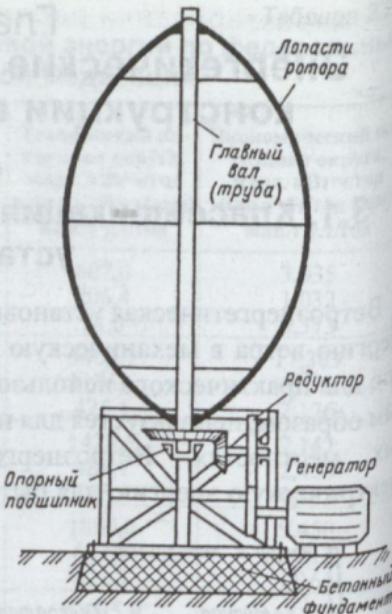


Рис 3.2. Ветроустановка с вертикальной осью вращения (ротор Дарье)

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,держивающее её в этом положении. В качестве таких устройств служат: флюгер или хвостовик (для очень малых ВЭУ, рис. 3.3, б, 1); 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, б, 2); электрический или гидравлический механизм, приводимый в движение датчиком направления скорости ветра (рис. 3.3, б, 3).

Во втором случае («под ветер») ветроколесо устанавливается автоматически, силой лобового давления (рис. 3.3, б, 4), 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, а, 1; а, 2; а, 3 и а, 4, 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 трехлопастные ветроколеса, обеспечива-

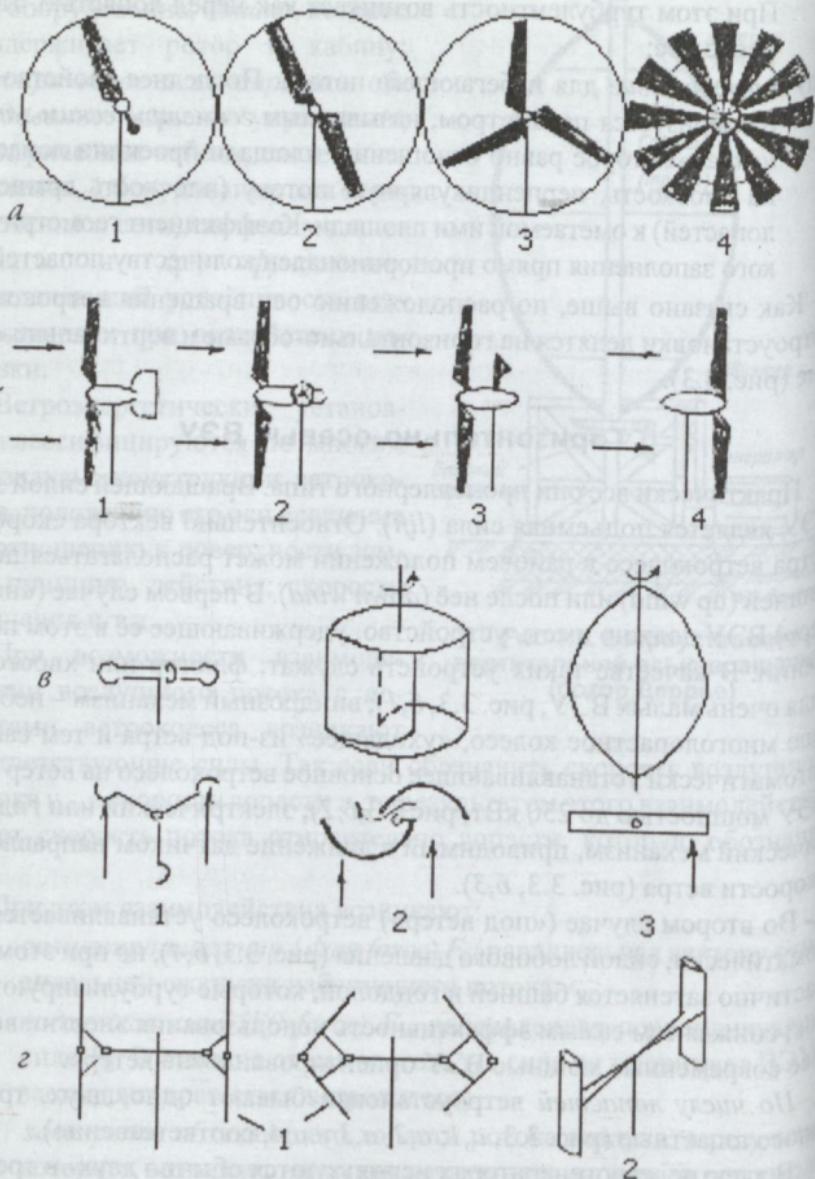


Рис. 3.3. Типы ветроколес

ющие плавность вращения и минимизирующие моменты, воздействующие на ось ветроколеса.

Многолопастные ветроколеса развивают больший 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:

- a) большая подверженность усталостным разрушениям, из-за частоты возникающих автоколебательных процессов;
- b) пульсация крутящего момента, приводящая к пульсациям мощности и других параметров генераторов;
- b) 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 продолжаются.

Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Чашечный ротор (анемометр, рис. 3.3, в, 1). Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления, форма чашечной лопасти обеспечивает почти линейную зависимость частоты вращения ветроколеса от скорости ветра в большем диапазоне скоростей: от 0 до 80 м/с. Этим обстоятельством и объясняется использование данного ветроколеса в измерительных приборах, в качестве датчика скорости ветра.

Ротор Савониуса (рис. 3.3, в, 2). Это ветроколесо также вращается силой сопротивления. Его лопасти отличаются простотой и дешевиз-

ной. Первое ветроколесо автора изобретения финского инженера Савониуса (S.I. Savonius, 1922) вообще представляло собой бочку, разрезанную на две части, посаженные на ось, как показано на рис. 3.3, в.2. 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 больший начальный момент, что необходимо для водоподъемных механизмов.

Ротор Даррье (рис. 3.3, в.3). В конструкции французского инженера Даррье (*Darrieus*) 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.

Начать вращаться самостоятельно ротор Даррье 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 Масгрева (рис. 3.3, г.1). 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, г.2). 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.

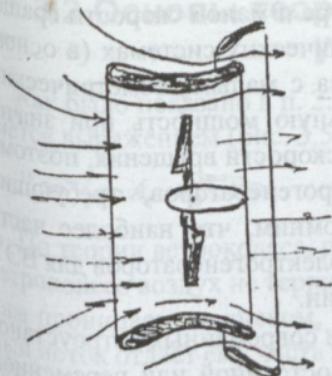


Рис. 3.4. Концентратор ветрового потока

Концентраторы. Мощность ветроустановки в свободном потоке существенным образом 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 го-

ризонтально-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 получили. По мнению автора, область применения таких ВЭУ ограничена в лучшем случае мощностью в 20–30 кВт. Так как 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 мощ-

ность 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.

- 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% 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 флюктуации мощности ветра.

3.4. Элементы конструкции ветроустановок

При кажущейся простоте ветроустановки, особенно средней и большой мощности, являются примером оборудования, вовравшего многие последние достижения науки и техники.

Приведем лишь некоторые примеры.

Наиболее ответственной частью ВЭУ, определяющей в значительной степени эффективность её работы, являются лопасти ветроколеса, имеющие в современных мощных ВЭУ длину 30×50 м. Представить себе изделие длиной в половину футбольного поля не так-то просто. Этому изделию необходимо обеспечить устойчивость от усталостных напряжений, поскольку оно подвергается воздействию изменяющегося момента во время одного оборота от минимума (нижнее положение лопасти) до максимума (верхнее положение лопасти). При этом срок службы должен составлять 20 лет.

Основные трудности в технологии изготовления лопасти состоят в необходимости обеспечения расчетного профиля лопасти, изменяющегося по длине. Кроме того, в лопасть необходимо «вмонтировать» проводник молниепровода, а также обеспечить прохождение тока молнии помимо подшипника. Лопасть, снабженная механизмом поворота, иногда действующего на поворот всей лопасти или её конечной части. Для лопасти применяют самые современные материалы (пластик, углепластик), обеспечивающие прочность и минимально возможный вес.

Другим примером использования высоких технологий является система управления ВЭУ. Установка полностью автоматизирована с использованием самой современной элементной базы и компьютерной техники и программ. Все основные операции совершаются без участия человека.

Назовем основные функции системы управления:

- пуск и останов в нормальном режиме ВЭУ от датчика скорости ветра;
- останов ВЭУ при аварийных режимах;
- изменение скорости вращения (для ВЭУ с постоянным или ступенчатым изменением скорости вращения);
- включение в сеть и набор мощности;

- регистрация и накопление данных о скорости ветра, мощности в выработке электрической энергии в различных временных разрезах: сутки, месяц, год;
- регистрация и сигнализация о всех неисправностях;
- передача данных в центр управления энергосистемы, а во многих случаях – и в офис изготовителя;
- поворот ветроколеса на ветер и раскрутка кабеля.

Рассмотрим далее основные конструктивные решения ветроустановок. На рис. 3.12 представлена компоновка оборудования ВЭУ Wind 900S, мощностью 900 кВт. Компоновка типична для многих ВЭУ и характерна наличием длинных валов. Рассмотрим назначение показанных на рис. 3.12 узлов, начиная с лопасти, о которой сказано выше. Роль обтекателя ясна из названия. Его назначение – снизить турболизацию потока ветра в плоскости ветроколеса и после ВЭУ. К головку, представляющему литое изделие сложной формы, крепятся лопасти, в нем расположен привод поворота лопастей и подшипники лопастей. Привод лопастей бывает либо гидравлический, либо механический. Оголовок соединен с валом, передающим мощность от ветроколеса к редуктору. Легко себе представить нагрузку на подшипник вала, имея в виду пульсирующий момент, на него воздействующий при вращении ветроколеса.

Редуктор, часто называемый мультипликатором, необходим для увеличения скорости вращения до значения, принятого при конструировании генераторов, обычно 750–1000–1500 об/мин.

При всей кажущейся изученности такого рода механизмов (имеется в виду и опыт сооружения вертолетов, где этот механизм является одним из основных узлов), исполнение такого механизма для ветроустановок оказалось весьма трудным делом. Видимо, все дело в том, что вертолетные редукторы предназначены для непрерывной работы в течение нескольких часов, а в ВЭУ они должны работать непрерывно в течении многих лет. Трудности в разработке надежных конструкций редукторов в настоящее время преодолены. Во всяком случае, в настоящее время редукторы снабжаются самостоятельной системой смазки с охлаждением масла, наличием насосов и соответствующих приборов, что существенно усложняет компоновку кабины и обслуживание ВЭУ, но обеспечивает надежность ее работы.

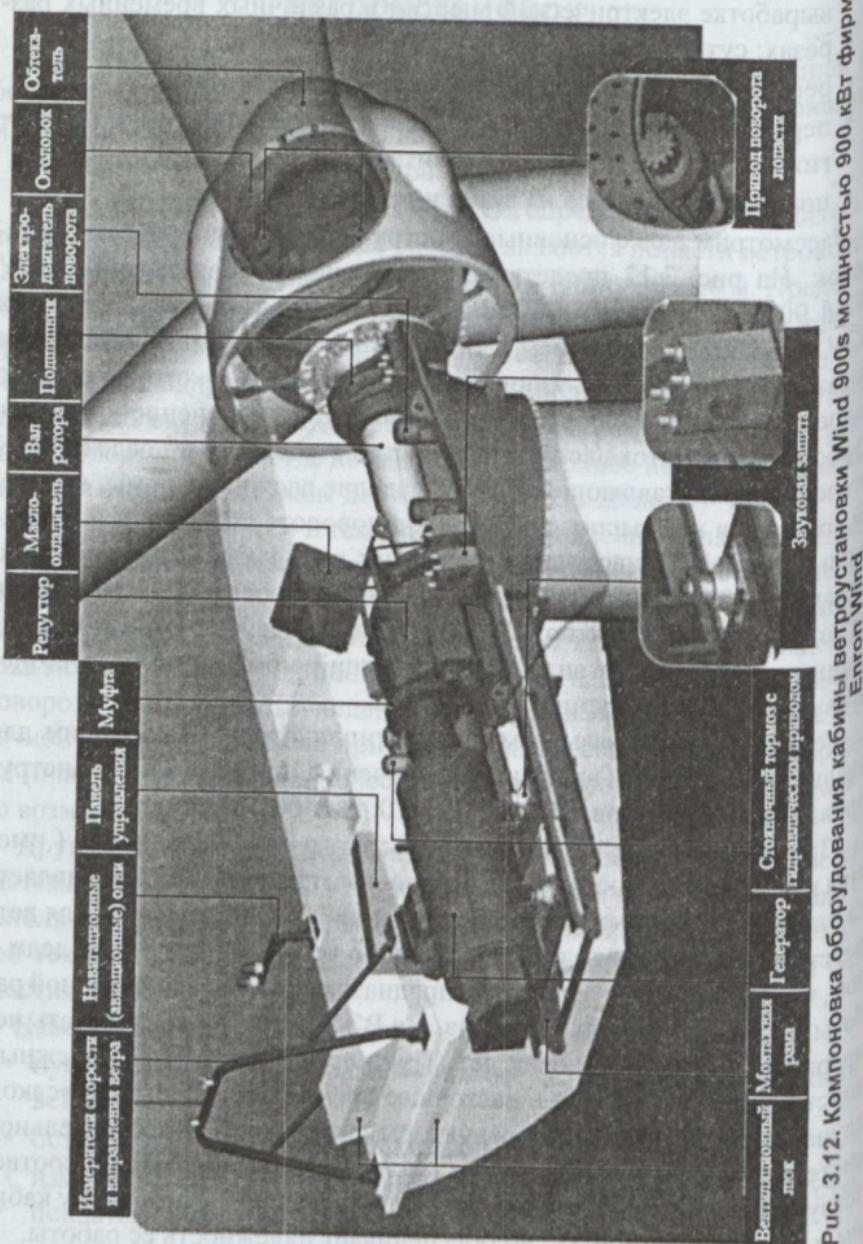


Рис. 3.12. Компоновка оборудования кабинны ветроустановки 900 кВт фирмы Enron Wind

Муфта, соединяющая вал генератора и выходной вал редуктора, бывает разной конструкции, часто она совмещается с тормозным диском межмеханического (стояночного) тормоза с гидравлическим приводом. Этот узел подобен тормозам передних колес современных автомобилей, только размеры диска и цилиндров существенно больше. Назначение остальных элементов, показанных на рис. 3.12, ясно из названий.

Остановимся более подробно на механизме поворота кабины. Кабина с лопастями, представляющая многотонную конструкцию, должна поворачиваться на ветер, направление которого может меняться достаточно быстро. Вся эта конструкция опирается на опорную поверхность башни (плиту), которая совместно с поворотным кольцом кабины и опорным кольцом башни является своего рода гигантским подшипником. Вращение башни осуществляется электрическим двигателем через зубчатую передачу. Число электродвигателей в зависимости от мощности ВЭУ и различных конструкций узла поворота колеблется от одного до восьми. Гибкий электрический кабель, передающий электроэнергию от генератора к щиту, расположенному внизу башни, может закручиваться, если кабина будет поворачиваться в одну сторону, что вполне возможно. Поэтому, когда число оборотов в одну сторону достигает расчетного значения (4–6), система управления дает сигнал на прекращение вращения кабины в эту сторону с дальнейшей раскруткой в обратную сторону. Изменение направления ветра фиксируется флюгером, расположенным на крыше кабины, от него импульс передается в систему управления и в дальнейшем – на пуск электродвигателя поворота. Чтобы часто не дергать кабину при изменении направления ветра, система управления делает выдержку времени (5–10 мин), после которой дается командный импульс на двигатель поворота. Узел поворота также снабжен тормозной системой, т.к. необходимо фиксировать кабину.

Более наглядно система поворота представлена на рис. 3.13 на примере ВЭУ TW 600 мощностью 600 кВт. Как видим, в этой конструкции принята другая (компактная) компоновка оборудования. Здесь генератор приподнят над основанием гондолы на специальной платформе. Вал генератора с выходным (высокоскоростным) валом редуктора соединяется с помощью эластичной муфты, демпфирующей толчки мощности, идущие от ветроколеса. В конструкции применены два механических тормоза. Один – стояночный (вторичный) – на

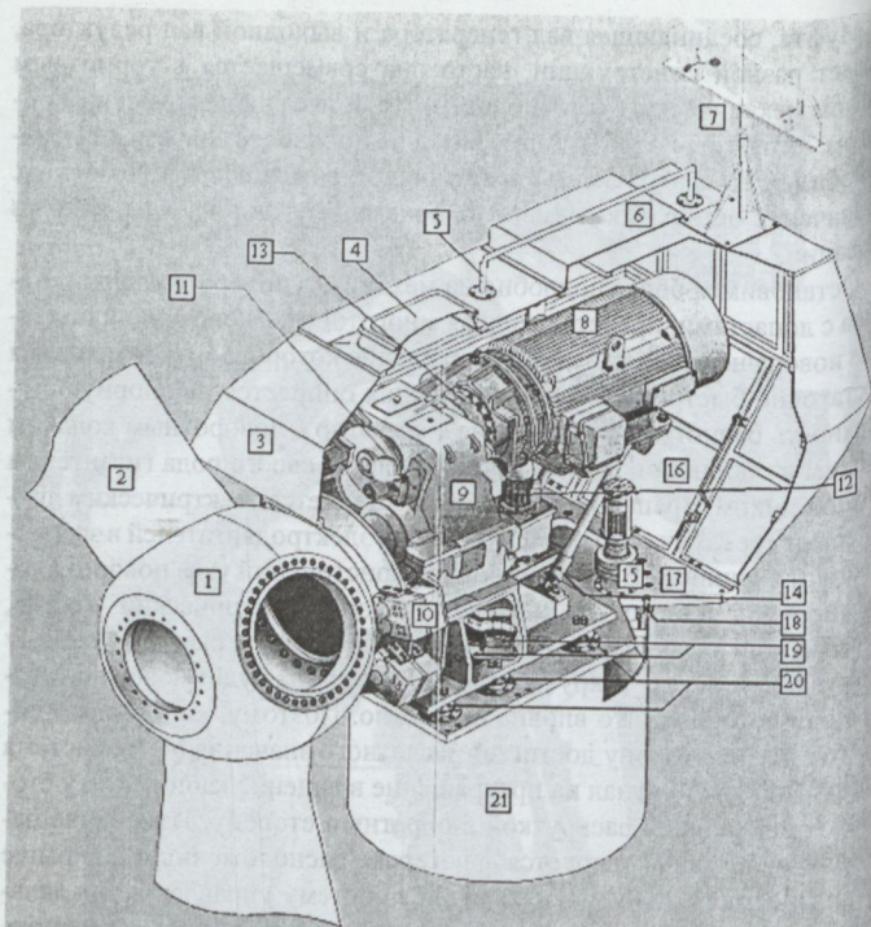


Рис. 3.13. Компоновка оборудования кабины ветроустановки TW 600 мощностью 600 кВт фирмы Tacke Windtechnik: 1 — оголовок ротора; 2 — лопасть; 3 — звукоизолированная гондола; 4 — стеклянная крышка; 5 — ограждение безопасности; 6 — вентиляционный люк; 7 — метеостанция: датчики скорости и направления ветра, молниепровод; 8 — генератор; 9 — редуктор; 10 — рабочий тормоз; 11 — вторичный тормоз; 12 — гидравлический агрегат; 13 — эластичная муфта; 14 — крепление генератора; 15 — двигатель поворота гондолы; 16 — люк для обслуживания; 17 — основание гондолы (плита); 18 — болты; 19 — тормоз поворотного механизма; 20 — гасители вибрации; 21 — башня.

высокооборотном валу редуктора 11, другой — основной (рабочий) — на низкооборотном валу, идущем от ветроколеса к редуктору 10. Оба тормоза дискового типа, с гидравлическим приводом.

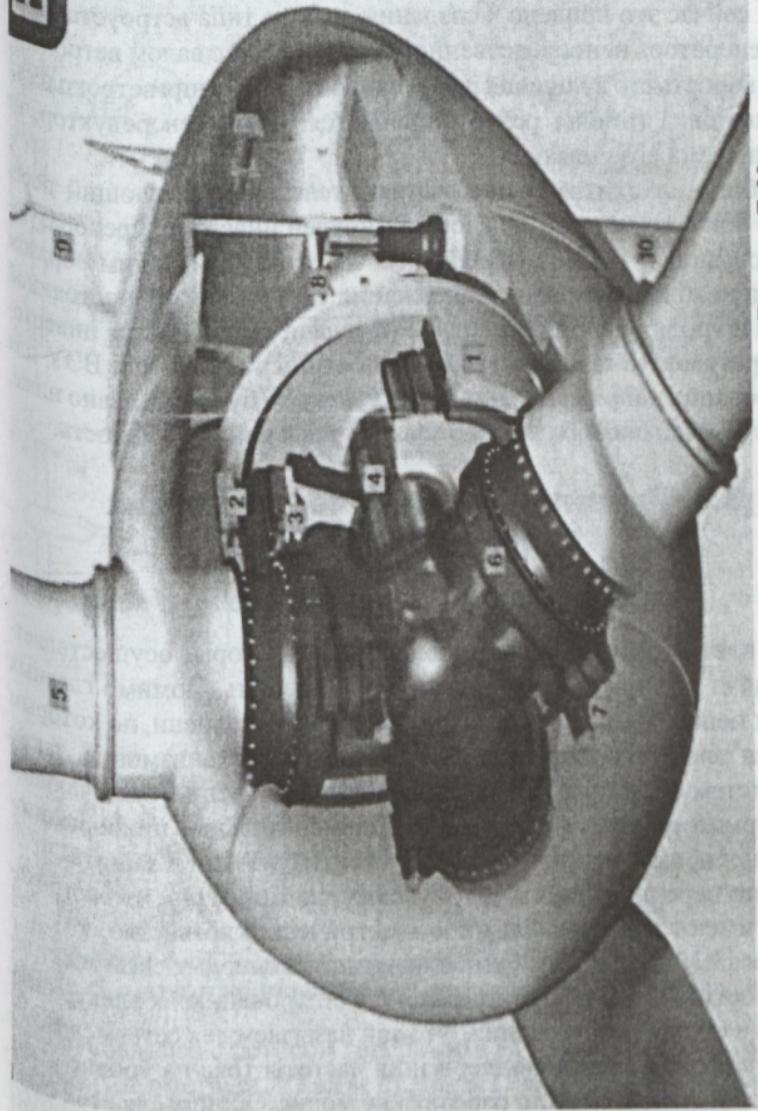


Рис. 3.14. Компоновка оборудования кабинны ветроустановки Enercon E-30 мощностью 300 кВт фирмы Enercon GmbH: 1 — генератор; 2 — статор генератора; 3 — ротор генератора; 4 — поворотный шкворень; 5 — лопасть ветроколеса; 6 — фланцевый подшипник лопасти; 7 — привод установки угла лопасти; 8 — несущая рама; 9 — анемометр; 10 — башня

На рис. 3.14 представлена компоновка кабины ВЭУ Enercon E-30 мощностью 300 кВт, типичная для всей серии ВЭУ этой фирмы, мощностью 600, 1000, 2000 и 4500 кВт. Это так называемая безредукторная система. Её основа — многополюсный тихоходный генератор, необходимость создания которого подвергалась сомнениям еще 10 лет назад, а сейчас это привело к созданию нового типа ветроустановок. Ротор генератора непосредственно соединяется и с валом ветроколеса, т.е. скорость его вращения равна скорости вращения ветроколеса.

Компоновка кабины резко упрощается: не нужен редуктор, не нужна система его смазки.

В кабине находится также выпрямитель, преобразующий переменный ток в постоянный, далее установлен инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный с частотой сети, таким образом исчезает необходимость в поддержании на генераторе постоянной частоты и уровня напряжения, т.к. эти задачи выполняются инвертором. В результате появилась возможность использования ВЭУ для регулирования напряжения, поскольку, как это будет показано ниже, такая установка способна вырабатывать реактивную мощность.

3.5. Главные схемы электрических соединений ВЭУ

3.5.1. Схемы сетевых ВЭУ

Речь идет о главных силовых цепях, через которые осуществляется передача электрической энергии от ВЭУ в сеть. Помимо главных силовых цепей, здесь не рассматриваются силовые цепи, по которым питаются электродвигатели исполнительных механизмов, а также цепи системы возбуждения; измерительные цепи, включающие трансформаторы тока и напряжения и измерительные приборы, вторичные цепи, включающие устройства сигнализации и защиты.

Уже по перечислению электрических схем понятно, что ветроустановки имеют довольно сложное электрическое хозяйство.

На рис. 3.15. *a*, *b*, *в*, *г* изображены варианты силовых схем электрических соединений современных ВЭУ, подключенных к электрическим сетям общего пользования. Это так называемые «сетевые» ВЭУ. Они лишены устройства поддержания частоты тока на уровне стандартов, поэтому автономно работать не могут. Общим для всех схем является наличие ветроколеса (ВК), вал которого через редуктор (P)