





.....	4
NABD.....	5
..... h h	14
..... h	15
.....	17
.....	19
.....	20
MKHKHLK?©:1%.....	22
.....	22
Dh :LQVR.....	23
=ha - h.....	24
J hab.....	28
.....	29
.....	30
L?BM?OD??AKB.....	33
BEWDM:L:BB HLK?G	
©:1%.....	35
.....	35
.....	38
HLHNBAMQBXKHK<	
BVBI?CKB?BAE?E	
.....	40
Лабораторная работа №1. е и работы гори онтал но	
.....	40
Лабораторная работа №2. лияние ре исти но нагру ки на	
ре и работы гори онтал -о	
.....	44
Лабораторная работа №3. е и ы работы гори онтал- но	
..... 1	51
.....	59

Ветроэнергетика является второй по масштабам развития отраслью возобновляемой энергетики после гидроэнергетики. Её развитие в последние десятилетия обусловлено несколькими факторами. Основной из них – развитие технологий с использованием современных, более эффективных и дешевых материалов, позволяющих существенно увеличить единичную мощность ветроэнергетических установок и снизить затраты на их сооружение. Поскольку ветроэнергетические установки занимают немного места, их можно размещать на территориях, предназначенных для других целей, например, для сельского хозяйства. Существенное влияние на развитие ветроэнергетики оказало государственное субсидирование, покрывающее в ряде стран, например, в Дании, до 30% капитальных затрат на установку ветроагрегатов.

Ветроэнергетические установки для автономного энергообеспечения удаленных и изолированных территорий могут быть размещены практически во всех климатических зонах, что определяет перспективы их использования на объектах добычи, подготовки, транспорта и переработки углеводородного сырья.

Кафедра термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина совместно с учеными ведущего европейского университета – Королевского технологического института Стокгольма (Швеция), проводит исследования различных видов альтернативной энергии. В рамках этой работы создан лабораторный стенд для изучения физико-технических основ ветроэнергетики. Удачи Вам, уважаемые друзья, в изучении этого нового и очень перспективного направления энергетики.

Авторы выражают благодарность выпускникам 2015 года кафедры термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина за участие в запуске и тестировании лабораторного стенда «Wind Lab».

Энергия ветра является производной от энергии Солнца и образуется за счет неравномерного нагревания поверхности Земли. Около 1–2 % солнечной энергии преобразуется в энергию ветра. Этот показатель в 50–100 раз превышает количество энергии, преобразованной в биомассу всеми растениями Земли. Последние 10–15 лет характеризуются бурным развитием ветроэнергетики. В 2014 году 3% электроэнергии, сгенерированной в мире, было получено с помощью ветрогенераторов, причем в ряде стран ветрогенераторы становятся основным источником электроэнергии. Так, например, ежегодно в Дании с помощью ветрогенераторов генерируется 42 % всего электричества; в Португалии – 27 %; в Испании – 20 %; Ирландии – 19 %; в Германии – 8 % [1,2].

Крупнейшая ветряная электростанция находится в городе Роско (Roscoe), США и запущена в 2009 году немецким энергоконцерном E.ON. Она состоит из 627 ветряных турбин производства Mitsubishi, General Electric и Siemens. Полная мощность – около 780 МВт, площадь – не менее 400 км<sup>2</sup> [1].

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) преобразует кинетическую энергию ветра в механическую или электрическую. В мире существуют три основных технологии для использования энергии ветра.

1. *Наземные ветроэнергетические установки.* Часто возводятся на побережьях или вблизи них, преимущественно на вершинах гор или возвышенностях. Для достижения высокой производительности разработаны турбины с высокими башнями и диаметром ротора до 250 м. Тенденция роста использования энергии наземных установок, по всей видимости, сохранится на междуна-

родных рынках в будущем, в частности, благодаря повышению рентабельности ВЭУ.

2. *Оффшорные ветроэнергетические установки.* Могут вырабатывать энергии на 100 % больше наземных ветряных электростанций благодаря существенно большей скорости ветра на море. Системные издержки при строительстве оффшорных ветроэнергетических установок (существенное удорожание проекта, зависимость строительства от погодных условий, сложность технического обслуживания и пр.) пока в значительной степени превышают аналогичные наземных установок.

3. *Малые ветроэнергетические установки.* Хорошо подходят для самообеспечения электроэнергией или децентрализованного производства электроэнергии. Средняя мощность от 5 до 10 кВт, высота башни не более 20 м. Именно такого рода установки представляют интерес для предприятий нефтегазовой промышленности, как вспомогательные источники электроэнергии, и могут использоваться в сочетании с другими технологиями получения возобновляемой энергии, например, фотовольтаикой.

Существует два основных вида ветроэнергетических установок (рис. 1.1): с горизонтальной осью вращения (горизонтально-осевая ВЭУ) и с вертикальной (вертикально-осевая ВЭУ). Первых насчитывается 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, где расположены коробка передач (некоторые ветроустановки работают без коробки передач), генератор и другое механическое и электрическое оборудование;







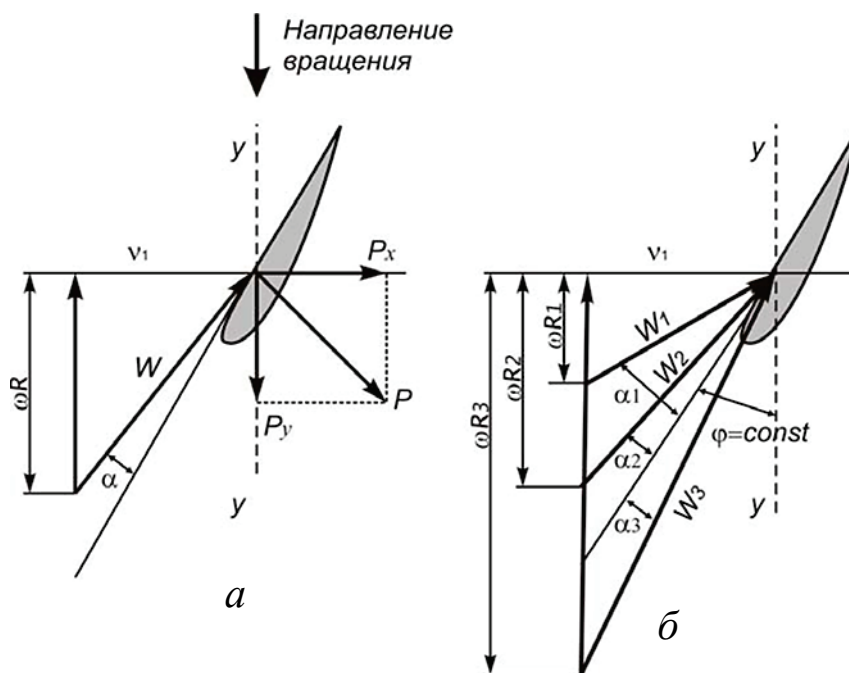


Рис. 1.3:  $a$  – схема действия сил воздушного потока на элемент лопасти;  $b$  – графическое изображение относительного потока, набегающего на элементы лопасти, на разных радиусах ветроколеса

на относительного потока к поверхности лопасти. Если относительная скорость  $W$  возрастает, то одновременно убывает угол атаки  $\alpha$ , и при некоторой скорости  $\omega R$ , где  $\omega$  угловая скорость, этот угол  $\alpha_3$  станет отрицательным (рис. 1.3б). Следовательно, не все элементы крыла будут иметь максимальную подъёмную силу [4,5].

Все современные мощные горизонтально-осевые ВЭУ ориентированы на ветер, то есть направлены лопастями (ветроколесом) к нему. По числу лопастей горизонтально-осевые ветроустановки бывают одно, двух, трех и многолопастные. В электроэнергетике 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, обеспечивающие плав-

ность 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 кривошипно-шатунный механизм вал ветроколеса связан со штангой поршневого насоса, чем и объясняется необходимость большого начального момента страгивания. При увеличении скорости ветра эффективность таких ветроколес существенно снижается.

Вертикально-осевые ветроэнергетические установки не требуют ориентации на ветер и в этом их существенное преимущество. Другое преимущество – возможность располагать все механизмы внизу, и значит нет необходимости сооружать мощную башню. Однако у них имеются и принципиальные недостатки:

- подверженность усталостным разрушениям из-за часто возникающих автоколебаний;
- пульсация крутящего момента, воздействующая на мощность и другие параметры генератора.

#### *Наиболее распространенные вертикально-осевые ВЭУ [5,6]*

1. Чашечный ротор (анемометр) (рис. 1.4). 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/с. Этим и объясняется использование такого ветроколеса в измерительных приборах в качестве датчика скорости ветра.

2. Ротор Савониуса (рис. 1.5а). Ветроколесо также вращается силой сопротивления. Его лопасти отличаются простотой и недо-



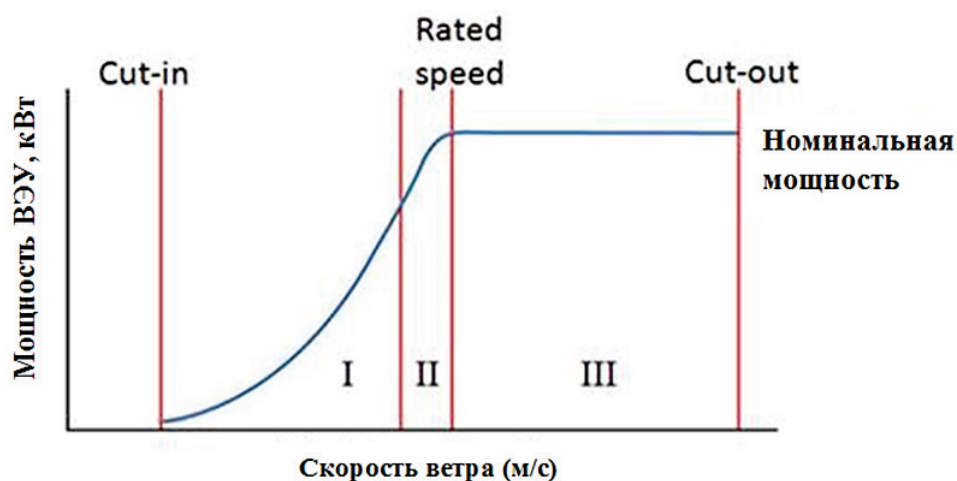
3. Ротор Дарье (рис. 1.5б). В конструкции французского инженера вращающий момент создается подъемной силой. Ротор представляет собой две или три тонких изогнутых лопасти, имеющие аэродинамический профиль. Подъемная сила максимальна, когда лопасть пересекает набегающий воздушный поток, и минимальна, когда лопасть движется параллельно ему. Таким образом, за один оборот лопасть дважды подвергается максимальному и минимальному моменту, что и является причиной большинства усталостных разрушений. Ротор Дарье не может начать вращаться самостоятельно, 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.

Установки, использующие силу сопротивления, вращаются с линейной скоростью, меньше скорости ветра, а в установках, использующих подъемную силу, линейная скорость концов лопастей существенно выше скорости ветра.

Для горизонтально-осевой ветроустановки характерны следующие скорости ветра (рис. 1.6) [7]:

- *стартовая* (cut-in speed) – обычно в диапазоне от 2,5 м/с до 4,0 м/с, при которой горизонтально-осевая ВЭУ начинает вращение;
- *номинальная* (rated speed) – обычно от 10 м/с до 14 м/с, при которой мощность горизонтально-осевой ветроустановки достигает номинального значения;
- *максимальная* (cut-out speed) – при которой горизонтально-осевая ветроустановка отключается от сети и останавливается, обычно в диапазоне 20–25 м/с.

Существует еще так называемая «буревая скорость ветра». Это скорость, при которой остановленная ветроустановка не



Вк

Фk dZ

ВWM

Вk dZ

-

должна разрушаться (обычно от 60 м/с до 80 м/с). Ветроустановка рассчитывается на определенную мощность, например, 1 МВт. При скорости 12–13 м/с мощность генератора достигает номинального значения 1 МВт и в диапазоне 13–25 м/с остается постоянной, то есть уже значительная мощность ветропотока не используется, поскольку нельзя перегружать генератор выше его номинальной мощности. Дальнейшее увеличение рабочего диапазона нецелесообразно, так как скорости ветра более 25 м/с маловероятны, а давление ветра на ветроколесо при его вращении пропорционально площади ометаемой поверхности (площади круга). Эта сила давления пытается опрокинуть ВЭУ, и приходится усиливать фундамент и его крепление к башне. Тогда как при остановленной ветроустановке площадь, на которую давит ветер, равна сумме площадей лопастей. Эта сумма в десятки раз меньше площади ометаемой поверхности (площади круга). Поэтому остановленные ВЭУ спокойно переносят штормовые ветры [5,7].

Чтобы определить мощность, вырабатываемую ветроустановкой, необходимо знать распределение скорости ветра по диапазонам и характеристику мощности ветроустановки.



Скоростью ветра называют расстояние в метрах, проходимое массой воздуха в течение одной секунды. Она постоянно меняется по величине и направлению из-за неравномерного нагревания земной поверхности и неровности рельефа.

Скорость ветра является важнейшей характеристикой технических его свойств. Поток ветра с поперечным сечением  $S$  обладает кинетической энергией, определяемой выражением [5]:

$$E = \frac{mV^2}{2} . \tag{1.1}$$

Масса воздуха, протекающая через поперечное сечение  $S$  со скоростью  $V$ , равна:

$$m = \rho \cdot S \cdot V . \tag{1.2}$$

Энергия ветра изменяется пропорционально кубу его скорости:

$$E = \frac{mV^2}{2} = \frac{\rho SV^3}{2} . \tag{1.3}$$

Теория идеального ветряка Н.Е. Жуковского устанавливает, что максимальный коэффициент использования энергии ветра идеальной ветроустановкой равен 0,593 (критерий Жуковского-Бетца). Таким образом, введя понятие коэффициента использования энергии ветрового потока  $C_p$ , можно рассчитать мощность любого ветроколеса по формуле [5,7]:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S \cdot C_p \tag{1.4}$$

где  $P$  – установленная мощность ВЭУ, Вт;  $S$  – ометаемая площадь ветроколеса (для горизонтально-осевых ВЭУ башенного типа  $S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$ );  $V$  – скорость ветра, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха,

кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветрового потока.

Для серийных современных горизонтально-осевых ВЭУ, в соответствии с техническим паспортом фирм-производителей, максимальная величина  $C_p$  равна 0,45–0,52 [4,5].

Для получения электрической мощности горизонтально-осевых ВЭУ выражение (1.4) необходимо умножить на произведение механических (коробка передач, подшипники и т.п.) и электрических (генератор, трансформатор и т.п.) КПД элементов силового тракта ВЭУ. Обычно для современных ВЭУ суммарный КПД элементов можно принимать в диапазоне 0,90–0,95 [4,5].

Таким образом, окончательная формула выходной электрической мощности горизонтально-осевых ВЭУ имеет вид [5,8]:

$$P_{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot D^2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}} \quad (1.5)$$

$$\text{или } P_{\text{ВЭУ}} = 0,3925 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}}, \quad (1.6)$$

где  $P_{\text{ВЭУ}}$  – выходная электрическая мощность горизонтально-осевых ВЭУ, Вт;  $D$  – диаметр ветроколеса, м;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха (при нормальных условиях  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>), кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – коэффициент использования энергии ветрового потока;  $\eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{эл}}$  – суммарный КПД механических (коробка передач, подшипники и т.п.) и электрических (генератор, трансформатор и т.п.) элементов силового тракта ВЭУ.

Курбана

И

И

По способу регулирования мощности все горизонтально-осевые ветроустановки делятся на stall-регулирование и pitch-регулирование.

Первый способ заключается в том, что профиль лопасти выполняется различным по длине. В результате при увеличении скорости ветра на отдельных частях лопасти наступает срыв потока, и ее «подъемная» сила уменьшается. Таким образом, при скорости ветра выше номинальной удается держать мощность горизонтально-осевой ветроустановки равную номинальной. Способ называется stall (stall – застревать), то есть часть потока ветра как бы застревает и не производит работу. В ветроустановках такого типа принудительно регулировать мощность нельзя, и это их недостаток. Но их достоинство состоит в том, что не нужен сложный механизм поворота лопастей. Тем не менее, практически во всех мощных ВЭУ используется второй способ регулирования.

Второй способ регулирования осуществляется поворотом лопасти относительно направления ветра, изменяя угол атаки, то есть такой, под которым ветер набегаёт на лопасть и от которого зависит её «подъемная» сила, которая преобразуется во вращение. Этот способ по-английски называется pitch (pitch – ставить), то есть лопасть принудительно ставится в определенное положение. Ветроустановки с поворотом лопастей можно использовать для регулирования мощности в зависимости от скорости ветра или задания диспетчера. При этом наибольшая возможная мощность определяется скоростью ветра [3,7].

На рисунке 1.7 показаны характеристики мощности двух горизонтально-осевых ветроустановок. Одна с pitch-регулированием, где на всех ветроустановках такого рода номинальная мощность поддерживается с большой точностью (рис. 1.7б). Другая со stall-регулированием, причем регулирование мощности существенно хуже, что указывает на недостаточную проработанность профиля лопасти (рис. 1.7а).

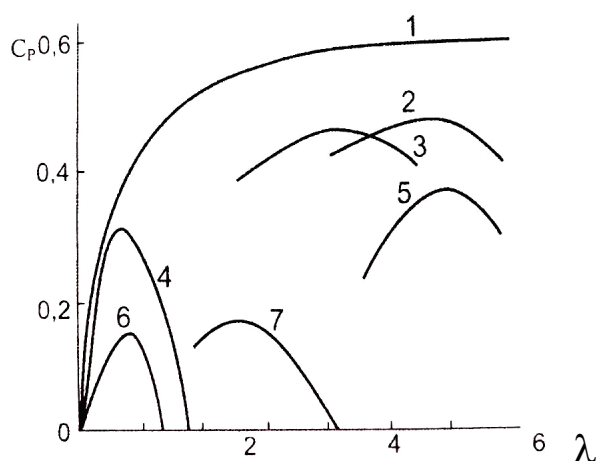




размеры. Кроме того, с увеличением быстроходности ветроколеса частота вырабатываемого электрического тока ближе к стандартной в энергосистеме ( $\sim 50$  Гц).

По сравнению с другими энергетическими установками, ВЭУ являются тихоходными. Таким образом, даже для самых быстроходных ветроколес частота вращения генератора может быть недостаточной для выработки качественного по частоте тока. В современной практике частоту вырабатываемого тока увеличивают с помощью коробки передач, повышающей частоту вращения вала генератора, а также с помощью многополюсных генераторов большого диаметра. Используют также электрические схемы, повышающие частоту переменного тока. Однако все эти технические решения связаны с увеличением материалоемкости ВЭУ, поэтому быстроходность остается определяющим критерием для выбора типа ВЭУ.

На рисунке 1.8 представлены зависимости коэффициента использования энергии ветрового потока  $C_p$  от быстроходности



**Рис. 1.8. Зависимости коэффициента использования энергии ветрового потока  $C_p$  от быстроходности  $\lambda$  для различных типов ветроколес**

1 – идеальное ветроколесо; 2, 3 и 4 – двух-, трех- и многолопастные горизонтально-осевые ветроколеса; 5 – ротор Дарье (вертикально-ориентированное ветроколесо, использующее подъемную силу); 6 – ротор Савониуса (вертикально-ориентированное ветроколесо, использующее силу сопротивления); 7 – четырехлопастное деревянное ветроколесо мельницы

ветроколеса  $\lambda$  различных модификаций [7, 9], которые позволяют достаточно определенно судить об их возможностях. Условием максимально возможного «съема» энергии ветра является поддержание коэффициента использования энергии ветрового потока в зоне наибольшего значения, то есть необходимо обеспечить (более или менее) постоянную быстроходность.

Из рисунка понятно, почему в современной ветроэнергетике для получения электроэнергии в подавляющем большинстве случаев применяют трехлопастные горизонтально-осевые ВЭУ, использующие подъемную силу ( $C_p$  равен 0,4–0,5).

Ветроколеса, использующие подъемную силу, в отличие от использующих силу сопротивления, имеют больший коэффициент использования энергии ветрового потока. Так вертикально-осевые ветроустановки типа Савониуса имеют максимальное значение  $C_p = 0,15$ , что в 4 раза меньше критерия Жуковского-Бетца ( $C_p = 0,593$ ).

**Длнннпкн**      **в**      **ВЭУ**

Очень важным параметром в проектировании ВЭУ является коэффициент использования установленной мощности ( $K_{\text{иум}}$ ), дающий представление об эффективности работы ВЭУ. Это отношение средней выработки генерирующего устройства к максимально возможной. Большинство современных ВЭУ имеют  $K_{\text{иум}}$  от 25% до 35% [4,5]. У электростанций, работающих на невозобновляемых источниках энергии, этот коэффициент – от 40% до 80%. Коэффициент использования установленной мощности ветростанций в Европе в среднем составляет 0,2-0,3, но зависит, в основном, от ветровых условий (есть ветростанции, где он равен 0,4 и выше).



гах Черного, Азовского и Каспийского морей на юге и Белого моря на северо-западе. К благоприятным зонам развития ветроэнергетики относятся следующие субъекты РФ: Архангельская, Астраханская, Волгоградская, Калининградская, Камчатская, Ленинградская, Магаданская, Мурманская, Новосибирская, Пермская, Ростовская, Сахалинская, Тюменская области, Краснодарский, Приморский, Хабаровский края, Дагестан, Калмыкия, Карелия, Коми, Ненецкий автономный округ, Хакасия, Чукотка, Якутия, Ямало-Ненецкий автономный округ.

Лабораторный стенд «Wind Lab» представляет собой ветроэнергетическую установку для демонстрационных, образовательных и научно-исследовательских целей, и помогает понять принцип работы полноразмерных промышленных ветроэнергетических установок и проблемы, связанные с выработкой энергии с помощью ветра.

Стенд оснащен программируемым источником ветра – вентилятором, который создает поток воздуха и приводит лопасти установки в движение. Ветроэнергетическая установка находится в хорошо просматриваемой аэродинамической трубе. Установка включает лопасти, угол поворота которых можно менять, коробку передач, трехфазный электрический генератор и анемометр. Все сигналы с датчиков стенда поступают в систему сбора данных и выводятся на виртуальную панель оператора.

Лабораторный стенд «Wind Lab» предназначен для лабораторных работ по изучению устройства и принципа действия ветроэнергетических установок, их основных технических параметров и функций оператора.



Вентилятор (не ветроустановка!) создает поток воздуха с определенной скоростью, чтобы привести в движение горизонтально-осевую ветроустановку (рис. 2.1). Он приводится в действие электродвигателем, который управляется с помощью частотно-регулируемого привода. Диапазон скоростей потока воздуха определяется оператором с помощью контроллера Wind Speed Control. Оператор может регулировать скорость потока





















2) присвоить имя файлу, затем нажать «ОК»;

3) добавить комментарий в появившемся окне, затем нажать «ОК».

Полученные данные сохраняются в виде текстового файла в формате .txt. Файл содержит данные о скорости потока воздуха, частоте вращения ротора ветроустановки, частоте вращения ротора генератора; силе тока и напряжении на фазах А, В, С, мощности, вырабатываемой ветроустановкой, частоте тока.

Полученный файл с данными необходимо перенести в программу MS Excel для дальнейшего анализа результатов исследования и построения графиков.





?

Воздух проходит через аэродинамическую трубу в направлении «слева направо» относительно оператора, стоящего лицом к панели управления. Его скорость достигает 7 м/с, поэтому перед началом работы убедитесь, что вблизи зоны всасывания воздуха в аэродинамическую трубу нет легких предметов, во избежание их всасывания и поломки лопастей вентилятора и ветроустановки.

Уровень шума лабораторного стенда невелик, лишь слабое жужжание. При возникновении постороннего шума необходимо отключить установку и обратиться к лаборанту.

Перед началом работы убедитесь, что колесики для передвижения лабораторного стенда заблокированы, и установка неподвижна.

Защитная сетка должна находиться на своем штатном месте. Запуск установки при ее отсутствии запрещен.

Не вставляйте пальцы или посторонние предметы в генератор, особенно когда он под напряжением или работает.

Лабораторный стенд необходимо подключить к электросети напряжением 220–240 В и с частотой 50/60 Гц.

### *Эксплуатационные ограничения*

Лабораторный стенд «Wind Lab» имеет эксплуатационные ограничения, которые не должны быть нарушены во время работы. Во время работы следите за следующими параметрами:

- 1) не превышайте 80% напряжения возбуждения генератора (максимальное напряжение возбуждения генератора равно 14 В);
- 2) не допускайте, чтобы напряжение на каждой фазе резистивной нагрузки превышало 10 В, иначе дисплей, где отображается напряжение на фазе, начнет мигать;

3) частота вращения ротора ветроустановки не должна превышать 550 об/мин, иначе дисплей начнет мигать.

**⚠** ! Напряжение возбуждения генератора станет активным, когда частота вращения ротора ветроустановки достигнет 120 об/мин. При этом напряжение возбуждения генератора будет равно 3 В. Без резистивной нагрузки и малом значении напряжения возбуждения частота вращения ротора генератора начнет быстро увеличиваться до критического значения. Чтобы этого не происходило, необходимо увеличить напряжение возбуждения генератора с помощью реостата, расположенного на панели оператора.

**⚠** ! Если частота вращения ротора ветроустановки становится меньше 120 об/мин, то напряжение возбуждения генератора автоматически отключается. При этом частота вращения ротора генератора начнет быстро увеличиваться до критического значения. Чтобы этого не происходило, необходимо уменьшить скорость потока воздуха с помощью контроллера Wind Speed Control, расположенного на панели оператора.

















### 5.1.2. Задание для подготовки отчета по лабораторной работе

- Данные, полученные в ходе работы, сохраняются в виде текстового файла в формате .txt. Файл содержит данные о:

- 1) скорости потока воздуха;
- 2) частоте вращения ротора ветроустановки;
- 3) частоте вращения ротора генератора;
- 4) силе тока и напряжении на фазах А, В, С;
- 5) мощности, вырабатываемой ветроустановкой;
- 6) частоте тока.

- Файл с данными необходимо перенести в программу MS Excel для дальнейшего анализа полученных экспериментальных данных и построения графиков.

- В программе MS Excel выберите тип диаграммы «График» (без точек).

Постройте графики для каждого технического параметра режима работы горизонтально-осевой ветроустановки, где ось абсцисс – скорость потока воздуха, ось ординат – частота вращения ротора ветроустановки; частота вращения ротора генератора; сила тока и напряжение на фазах А, В, С; мощность, вырабатываемая ветроустановкой.

- Полученные графики должны быть представлены в отчете.

- Проанализируйте полученные графики и объясните, как меняются технические параметры режима работы горизонтально-осевой ветроустановки, в зависимости от скорости ветрового потока при отсутствии нагрузки на фазы А, В, С и напряжения возбуждения генератора.

- Сделайте вывод о режиме работы горизонтально-осевой ветроустановки при отсутствии нагрузки на фазы А, В, С и напряжения возбуждения генератора.

### 5.1.3. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как она достигается.
2. Назовите основные элементы лабораторного стенда и объясните их назначение.
3. Назначение, устройство и основные элементы горизонтально-осевой ветроустановки лабораторного стенда «Wind Lab».
4. Назначение напряжения возбуждения генератора горизонтально-осевой ветроустановки лабораторного стенда «Wind Lab».
5. Назначение резистивной нагрузки в лабораторном стенде «Wind Lab».
6. Классификация ветроэнергетических установок. Основные элементы конструкции ветроэнергетических установок.
7. Силы, возникающие при взаимодействии воздушного потока с лопастями ветроколеса ветроэнергетической установки.
8. Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки (ВЭУ), принцип их действия.
9. Вертикально-осевые ветроэнергетические установки (ВЭУ). Принцип действия, типы вертикально-осевых ВЭУ, их преимущества и недостатки.
10. Какой режим работы горизонтально-осевой ветроустановки получен при выполнении лабораторной работы? Объясните полученный результат.
11. Как частота вращения ротора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.
12. Как частота вращения ротора генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.
13. Как сила тока на фазах А, В, С генератора горизонтально-

осевой ветроустановки зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

14. Как напряжение на фазах А, В, С генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

15. Как мощность, вырабатываемая горизонтально-осевой ветроустановкой, зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

## 5.2. Лабораторная работа №2

**И**

**И**

**И**

**И**

**g**

**И** . Изучить режимы работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения её ротора 150 об/мин и 200 об/мин и при наличии нагрузки на фазы А, В, С. Сравнить технические параметры двух исследуемых режимов работы горизонтально-осевой ветроустановки.

Перед выполнением лабораторной работы внимательно изучите рубрику 1 «Физико-технические основы ветроэнергетики».

**И** ! Перед работой внимательно ознакомьтесь с требованиями по технике безопасности (рубрика 3) и с правилами эксплуатации при работе с лабораторным стендом «Wind Lab» (рубрика 4).

### *5.2.1. Последовательность выполнения лабораторной работы*

1) Осмотрите лабораторный стенд «Wind Lab» согласно пункту 4.1.

Убедитесь, что положение реостатов нагрузки (фазы А, В и С) и реостата напряжения возбуждения генератора соответствует нулевому значению до пуска ветроустановки.

2) Запишите установленный угол поворота лопасти ветроустановки по отношению к потоку воздуха.

3) Подключите лабораторный стенд согласно пункту 4.2.

4) Чтобы начать работу, нажмите кнопку START на панели контроллера Wind Speed Control. Убедитесь, что система находится в ручном управлении: в левом верхнем углу контроллера должно стоять значение «LOC».

5) Создайте файл для записи данных эксперимента согласно пункту 2.6.

6) Задайте скорость потока воздуха 3,3 м/с с помощью стрелки «Вверх», расположенной на панели контроллера Wind Speed Control. При этом частота вращения ротора ветроустановки должна быть 150 об/мин.

7) Задайте значение напряжения возбуждения генератора 50% с помощью реостата на панели оператора.

8) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 50 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

9) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 70 Ом. При этом

необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

10) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) на значение 90 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

11) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, а затем понижайте скорость потока воздуха, нажимая на стрелку «Вниз» на панели контроллера Wind Speed Control через каждые 5 секунд.

12) Когда частота вращения ротора ветроустановки достигнет значения 120 об/мин, установите реостаты нагрузки (фазы А, В, С) и реостат напряжения возбуждения генератора на ноль. Когда вентилятор почти остановится, нажмите кнопку STOP на панели контроллера.

13) На виртуальной панели оператора нажмите кнопки «Stop Save Data» и «Stop Program».

14) Поверните ключ на панели оператора против часовой стрелки на 90° для выключения стенда.

15) Осмотрите лабораторный стенд «Wind Lab» согласно пункту 4.1.

Убедитесь, что положение реостатов нагрузки (фазы А, В и С) и реостата напряжения возбуждения генератора соответствует нулевому значению до пуска ветроустановки.

16) Подключите лабораторный стенд согласно пункту 4.2.

17) Чтобы начать работу, нажмите кнопку START на панели контроллера Wind Speed Control. Убедитесь, что система нахо-

дится в ручном управлении: в левом верхнем углу контроллера должно стоять значение «ЛОС».

18) Создайте файл для записи данных эксперимента согласно пункту 2.6.

19) Задайте скорость потока воздуха 4,0 м/с с помощью стрелки «Вверх», расположенной на панели контроллера Wind Speed Control. При этом частота вращения ротора ветроустановки должна быть равной 200 об/мин.

20) Задайте значение напряжения возбуждения генератора 50% с помощью реостата на панели оператора.

21) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 50 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх», расположенной на панели контроллера Wind Speed Control.

22) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 70 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

23) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 90 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

24) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, а затем понижайте скорость потока воздуха, нажимая на стрелку

«Вниз» на панели контроллера Wind Speed Control через каждые 5 секунд.

25) Когда частота вращения ротора ветроустановки достигнет значения 120 об/мин, установите реостаты нагрузки (фазы А, В, С) и реостат напряжения возбуждения генератора на нулевое значение. Когда вентилятор почти остановится, нажмите кнопку STOP на панели контроллера.

26) На виртуальной панели оператора нажмите кнопки «Stop Save Data» и «Stop Program».

27) Поверните ключ на панели оператора против часовой стрелки на 90° для выключения стенда.

28) Подготовьте отчет по выполненной лабораторной работе в формате Word/pdf с анализом полученных экспериментальных данных и графиками.

29) Готовый отчет отправьте на электронный адрес преподавателя, имя файла должно иметь следующую структуру:  
~~ВВВВу~~                      **В** **bb** **Б**

### *5.2.2. Задание для подготовки отчета по лабораторной работе*

- Данные, полученные в ходе работы, сохраняются в виде текстового файла в формате .txt. Файл содержит данные о:

- 1) скорости потока воздуха;
- 2) частоте вращения ротора ветроустановки;
- 3) частоте вращения ротора генератора;
- 4) силе тока и напряжении на фазах А, В, С;
- 5) мощности, вырабатываемой ветроустановкой;
- 6) частоте тока.

- Файл с данными необходимо перенести в программу MS Excel для дальнейшего анализа полученных экспериментальных данных и построения графиков.



- В программе MS Excel выберите тип диаграммы «График» (без точек).

Совмещая данные двух исследуемых режимов работы, постройте графики для каждого технического параметра режима работы горизонтально-осевой ветроустановки, где ось абсцисс – скорость потока воздуха, ось ординат – частота вращения ротора ветроустановки; частота вращения ротора генератора; сила тока на фазах А, В, С; напряжение на фазах А, В, С; мощность, вырабатываемая ветроустановкой.

- Полученные графики должны быть представлены в отчете.

- Проанализируйте полученные графики и объясните, как меняются технические параметры режима работы горизонтально-осевой ветроустановки в зависимости от скорости ветрового потока при разной нагрузке на фазы А, В, С, при частоте вращения ротора 150 об/мин и 200 об/мин и напряжении возбуждения генератора 50%.

- Сравните режимы работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения ротора ветроустановки 150 об/мин и 200 об/мин. Сделайте выводы по результатам исследования.

- Определите момент эффективной работы горизонтально-осевой ветроустановки.

### *5.2.3. Контрольные вопросы*

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как она достигается.

2. Назовите основные элементы лабораторного стенда и объясните их назначение.

3. Что показывает средняя скорость ветра?

4. Зависимость средней скорости ветра от высоты.

5. Ветровые зоны России.

6. Что показывает график характеристики мощности ветроэнергетических установок.

7. Скорости ветра, характеризующие работу горизонтально-осевой ветроустановки.

8. Что показывает значение быстроходности ветроколеса ветроэнергетической установки? Как его найти?

9. Как частота вращения ротора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

10. Как частота вращения ротора генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

11. Как сила тока на фазах А, В, С генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

12. Как напряжение на фазах А, В, С генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

13. Как мощность, вырабатываемая горизонтально-осевой ветроустановкой, зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

14. Сравните режимы работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения ротора ветроустановки 150 об/мин и 200 об/мин и при наличии нагрузки на фазы А, В, С и сделайте вывод.

15. Чему равна мощность, вырабатываемая горизонтально-осевой ветроустановкой, в момент эффективной работы ветроустановки?

### 5.3. Лабораторная работа №3

И . Изучить режимы работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения её ротора 150 об/мин и 200 об/мин и новом угле поворота лопасти ветроколеса по отношению к потоку воздуха. Сравнить технические параметры двух исследуемых режимов работы горизонтально-осевой ветроустановки с техническими параметрами работы ветроустановки, полученными в лабораторной работе №2.

Перед выполнением лабораторной работы внимательно изучите рубрику 1 «Физико-технические основы ветроэнергетики».

**ВЗ** **В** ! Перед проведением работ внимательно ознакомьтесь с требованиями по технике безопасности (рубрика 3) и с правилами эксплуатации при работе с лабораторным стендом «Wind Lab» (рубрика 4).

#### 5.3.1. Последовательность выполнения лабораторной работы

1) Проведите осмотр лабораторного стенда «Wind Lab» согласно пункту 4.1.

Убедитесь, что положение реостатов нагрузки (фазы А, В и С) и реостата напряжения возбуждения генератора соответствует нулевому значению до пуска ветроустановки.

2) Установите новый угол поворота лопасти ветроколеса по отношению к потоку воздуха, отличный от угла в лабораторной работе №2, согласно пункту 2.3.

Запишите новый установленный угол поворота лопасти по отношению к потоку воздуха.

3) Подключите лабораторный стенд согласно пункту 4.2.

4) Чтобы начать работу, нажмите кнопку START на панели контроллера Wind Speed Control. Убедитесь, что система находится в ручном управлении: в левом верхнем углу контроллера должно стоять значение «LOC».

5) Создайте файл для записи данных эксперимента согласно пункту 2.6.

6) Задайте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин.

7) Задайте значение напряжения возбуждения генератора 50% с помощью реостата на панели оператора.

8) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 50 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх», расположенной на панели контроллера Wind Speed Control.

9) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 70 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх», расположенной на панели контроллера Wind Speed Control.

10) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 90 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 150 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх», расположенной на панели контроллера Wind Speed Control.

11) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась,

а затем понижайте скорость потока воздуха, нажимая на стрелку «Вниз» на панели контроллера Wind Speed Control через каждые 5 секунд.

12) Когда частота вращения ротора ветроустановки достигнет значения 120 об/мин, установите реостаты нагрузки (фазы А, В, С) и реостат напряжения возбуждения генератора на нулевое значение. Когда вентилятор почти остановится, нажмите кнопку STOP на панели контроллера.

13) На виртуальной панели оператора нажмите кнопки «Stop Save Data» и «Stop Program».

14) Поверните ключ на панели оператора против часовой стрелки на 90° для выключения стенда.

15) Проведите осмотр лабораторного стенда «Wind Lab» согласно пункту 4.1.

16) Убедитесь, что положение реостатов нагрузки (фазы А, В и С) и реостата напряжения возбуждения генератора соответствует нулевому значению до пуска ветроустановки.

17) Подключите лабораторный стенд согласно пункту 4.2.

18) Чтобы начать работу, нажмите кнопку START на панели контроллера Wind Speed Control. Убедитесь, что система находится в ручном управлении: в левом верхнем углу контроллера должно стоять значение «LOC».

19) Создайте файл для записи данных эксперимента согласно пункту 2.6.

20) Задайте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин.

21) Задайте значение напряжения возбуждения генератора 50% с помощью реостата на панели оператора.

22) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 50 Ом. При

этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

23) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 70 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

24) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, и установите нагрузку на каждую фазу (А, В, С) в 90 Ом. При этом необходимо следить, чтобы частота вращения ротора ветроустановки была 200 об/мин. Для этого увеличьте скорость потока воздуха с помощью стрелки «Вверх» на панели контроллера Wind Speed Control.

25) Подождите 30 секунд, чтобы система стабилизировалась, а затем понижайте скорость потока воздуха, нажимая на стрелку «Вниз» на панели контроллера Wind Speed Control через каждые 5 секунд.

26) Когда частота вращения ротора ветроустановки достигнет значения 120 об/мин, установите реостаты нагрузки (фазы А, В, С) и реостат напряжения возбуждения генератора на нулевое значение. Когда вентилятор почти остановится, нажмите кнопку STOP на панели контроллера.

27) На виртуальной панели оператора нажмите кнопки «Stop Save Data» и «Stop Program».

28) Поверните ключ на панели оператора против часовой стрелки на 90° для выключения стенда.

29) Подготовьте отчет по выполненной лабораторной работе в

формате Word/pdf с анализом полученных экспериментальных данных и графиками.

30) Готовый отчет отправьте на электронный адрес преподавателя, имя файла должно иметь следующую структуру:

**З** **Р** **В** **Б**

### *5.3.2. Задание для подготовки отчета по лабораторной работе*

- Данные, полученные в ходе работы, сохраняются в виде текстового файла в формате .txt. Файл содержит данные о:

- 1) скорости потока воздуха;
- 2) частоте вращения ротора ветроустановки;
- 3) частоте вращения ротора генератора;
- 4) силе тока и напряжении на фазах А, В, С;
- 5) мощности, вырабатываемой ветроустановкой;
- 6) частоте тока.

- Файл с данными необходимо перенести в программу MS Excel для дальнейшего анализа полученных экспериментальных данных и построения графиков.

- В программе MS Excel выберите тип диаграммы «График» (без точек).

- Постройте графики для каждого технического параметра режима работы горизонтально-осевой ветроустановки, где ось абсцисс – скорость потока воздуха, ось ординат – частота вращения ротора ветроустановки; частота вращения ротора генератора; сила тока на фазах А, В, С; напряжение на фазах А, В, С; мощность, вырабатываемая ветроустановкой.

При этом совместите на одном графике данные о режиме работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения ротора 150 об/мин для двух разных значений угла поворота лопасти ветроколеса (данные о режиме работы горизонталь-

но-осевой ветроустановки при частоте вращения ротора 150 об/мин для двух разных значений угла поворота лопасти ветроколеса необходимо взять из лабораторных работ №2 и №3). Эти же действия повторите при частоте вращения ротора 200 об/мин.

- Полученные графики должны быть представлены в отчете.
- Проанализируйте полученные графики и сравните режимы работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения ротора ветроустановки 150 об/мин и 200 об/мин и новом угле поворота лопасти ветроколеса по отношению к потоку воздуха с режимами работы горизонтально-осевой ветроустановки в лабораторной работе №2.
- Объясните, как влияет изменение угла поворота лопасти ветроколеса горизонтально-осевой ветроустановки на технические параметры режима работы ветроустановки. Сделайте выводы по результатам исследования.
- Определите момент эффективной работы горизонтально-осевой ветроустановки.

### *5.3.3. Контрольные вопросы*

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как она достигается.
2. Назовите основные элементы лабораторного стенда и объясните их назначение.
3. Основные положения классической теории идеального ветряка.
4. Методика расчета мощности, вырабатываемой горизонтально-осевой ветроэнергетической установкой.
5. Способы регулирования мощности горизонтально-осевых ветроэнергетических установок.



6. Выбор схемы расположения горизонтально-осевых ветроэнергетических установок на ветроэлектростанции.

7. Коэффициент использования установленной мощности ветроэнергетической установки.

8. Схемы электрических соединений ветроэнергетических установок.

9. Как частота вращения ротора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

10. Как частота вращения ротора генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

11. Как сила тока на фазах А, В, С генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от резистивной нагрузки и скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

12. Как напряжение на фазах А, В, С генератора горизонтально-осевой ветроустановки зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

13. Как мощность, вырабатываемая горизонтально-осевой ветроустановкой, зависит от резистивной нагрузки и от скорости потока воздуха? Объясните полученный в лабораторной работе результат.

14. Сравните режимы работы горизонтально-осевой ветроустановки при частоте вращения ротора ветроустановки 150 об/мин и 200 об/мин при разных углах поворота лопасти ветроколеса по отношению к потоку воздуха и сделайте вывод.

15. Объясните, как влияет изменение угла поворота лопасти

ветроколеса горизонтально-осевой ветроустановки на технические параметры режима работы ветроустановки.

16. Чему равна мощность, вырабатываемая горизонтально-осевой ветроустановкой, в момент эффективной работы ветроустановки?

1. Global Wind Energy Council (GWEC), Global Wind Report, 2015. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gwec.net/>
2. BP, Statistical Review of World Energy. 2015. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>
3. *Thomas Ackermann*. Lecture notes the course «Renewable energy technology». – KTH, Sweden, 2012.
4. *Godfrey Boyle*. Renewable Energy. Power for a Sustainable Future (3-rd edition) // Oxford University Press – 2012. – P. 584.
5. *Безруких П.П.* Ветроэнергетика: Справочное и методическое пособие. – М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010. – 195 с.
6. *Ali Sayigh*. Comprehensive Renewable Energy. Volume Two. Wind Energy // Elsevier Ltd – 2012. – P. 746. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com.focus.lib.kth.se/>
7. *Бессель В.В., Мингалеева Р.Д.* Теоретические основы ветроэнергетики: Учебное пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. – 80 с.
8. *Мингалеева Р.Д., Бессель В.В.* Методика оценки суммарной мощности ветроэлектростанции // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – № 9. – С. 82–86.
9. *Городов Р.В., Губин В.Е., Матвеев А.С.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
10. *Мингалеева Р.Д., Зайцев В.С., Бессель В.В.* Оценка технического потенциала ветровой и солнечной энергетики России // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – № 3. – С. 82–90.
11. Atmospheric Science Data Center. NASA Surface meteorology and Solar Energy, 2016. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>





