

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
НА БАЗЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА AIR-X**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по дисциплине  
**Общая энергетика**

Томск 2023

# ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА AIR-X

## Цель работы

Исследовать энергетические характеристики ветрогенератора AIR-X при различной силе ветра. На основании полученных данных проанализировать работу автономной системы электроснабжения на базе ветроэнергетической установки.

## КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Ветроэнергетика является наиболее развитой сферой практического использования природных возобновляемых энергоресурсов. Мировой рынок ветровой энергетики развивается быстрее, чем любой другой вид возобновляемой энергетики. С 1995 года установленная мощность ветровых электростанций в мире увеличилась более чем в 12 раз: с 4800 МВт до 59000 МВт (на конец 2005 года). Оборот международного рынка ветроэнергетики в 2006 году превысил 13 млрд. евро. Всего в отрасли, по приблизительным подсчетам, занято 150000 человек. Во многих странах появилась даже новая отрасль – ветроэнергетическое машиностроение. Мировыми лидерами в ветроэнергетике являются США, Германия, Испания, Нидерланды, Дания, Индия.

В ряде стран и регионов доля электроэнергии, генерируемой ветровыми станциями, составляет реальную конкуренцию традиционной энергетике. В Дании за счет энергии ветра производится 20 % электроэнергии, в Испании этот показатель достиг 8 %, в Голландии и Северных землях Германии 10 %. Приводимые цифры показывают, что ветроэнергетика уже сегодня вносит значительный вклад в энергетический баланс ряда стран.

Принцип действия ветроэнергетической установки (ВЭУ) заключается в преобразовании энергии ветра в механическую энергию вращающегося ветроколеса, а затем в электрическую энергию.

Ранее в ветроустановках применялись ветроколеса так называемого «активного» типа (карусельного и парусного типа, Савониуса и др.), использующие силу давления ветра. Эти ветроколеса имеют очень низкий КПД (менее 20%), поэтому в настоящее время для производства энергии они не применяются.

В настоящее время применяются две основные конструкции ветроколес – горизонтально-осевые и вертикально-осевые ветродвигатели (рис.1), использующие подъемную силу крыла. Оба типа ВЭУ имеют примерно равный КПД, однако наибольшее распространение получили ветроагрегаты первого типа. Мощность ВЭУ такой конструкции может быть от сотен ватт до нескольких мегаватт.

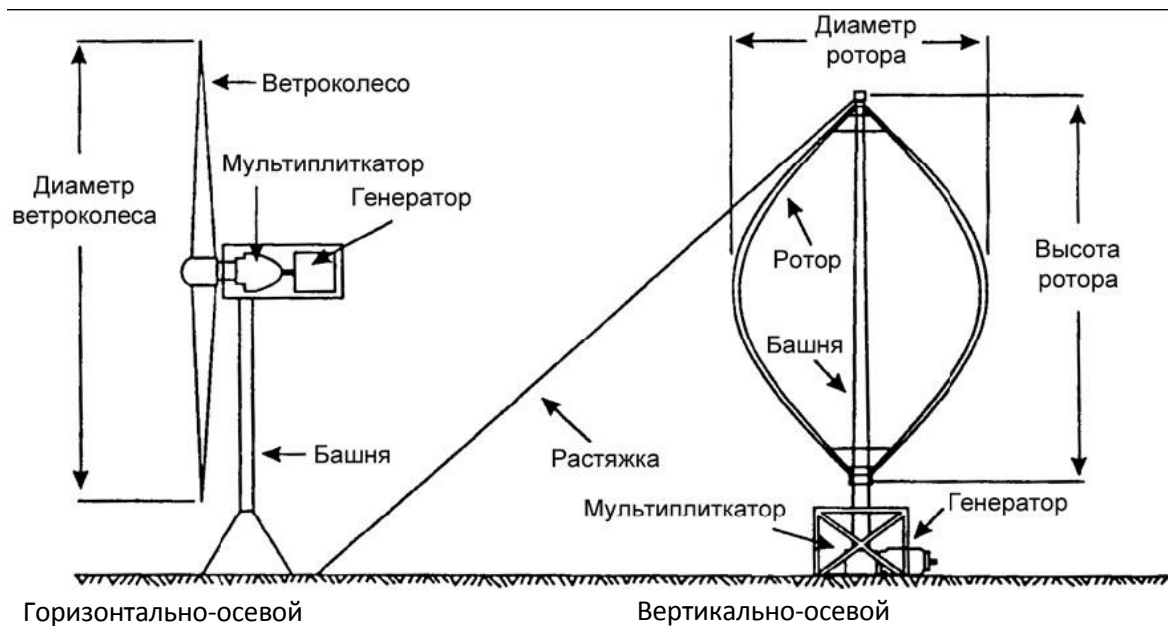


Рис.1. Устройство современных ветроэнергетических установок

Основными компонентами ветроустановки, кроме собственно ветроколеса, являются башня, мультипликатор и генератор. В зависимости от мощности ВЭУ диаметр ветроколеса может составлять от одного до нескольких десятков метров, а номинальная частота его вращения от 15 до 100 об/мин. Мультипликатор (редуктор) служит для повышения числа оборотов ветроколеса и согласования с частотой вращения генератора. ВЭУ небольшой мощности могут не содержать мультипликатор.

Мощность ветрового потока можно определить из выражения:

$$P = \frac{\rho V^3 S}{2}, \text{ Вт} \quad (1)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения ветрового потока,  $\text{м}^2$ ;  $V$  - скорость ветра,  $\text{м/с}$ ;  $\rho$  - плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Плотность воздуха зависит от давления и температуры и выражается в килограммах на кубический метр. Плотность сухого воздуха  $\rho_0$  при стандартной температуре  $288 \text{ }^\circ\text{K}$  и давлении  $760 \text{ мм ртутного столба}$  составляет  $1.226 \text{ кг/м}^3$ .

Любой ветродвигатель характеризуется коэффициентом использования энергии ветра  $\xi$ , который определяется как отношение механической мощности на валу ветроколеса  $P_{\text{вк}}$  к мощности ветрового потока  $P$ :

$$\xi = \frac{P_{\text{вк}}}{P} \quad (2)$$

Коэффициент использования энергии ветра определяет максимум части энергии ветрового потока, которая может быть использована ветродвигателем. Максимальное значение коэффициента мощности ветроколеса зависит от его быстроходности и достигает теоретического максимума, равного  $0.593$ , которое впервые было вычислено Бетцом.

Реальный коэффициент использования энергии ветра всегда меньше теоретического за счёт образования вихрей, сходящих с концов лопастей, профильных потерь, которые вызываются трением струй воздуха о поверхность крыла, потерь на кручение струи, потерь, происходящих вследствие неполного использования всей ометаемой площади крыла.

Быстроходность ветроколеса характеризует отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра: Ее можно рассчитать, если известны расчетное число оборотов при заданной скорости ветра:

$$Z = \frac{\omega R}{V}, \quad (3)$$

где  $\omega$  - угловая частота вращения ветродвигателя, рад/с;  $R$  - радиус лопасти ветроколеса, м.

Чем больше число лопастей рабочего колеса, их ширина и угол поворота лопастей относительно плоскости вращения, тем при прочих равных условиях, быстроходность двигателя ниже.

Основным типом ветродвигателя, получившим практическое применение, является двигатель крыльчатой конструкции, в котором вращающий момент создается за счет аэродинамических сил, возникающих на лопастях рабочего ветроколеса. В большинстве стран выпускают и применяют только крыльчатые ветродвигатели. Они отличаются большими коэффициентами использования энергии ветра и значительно большей быстроходностью. Максимальное значение  $\xi$  для быстроходных колес достигает 0,45-0,48.

Электрическая мощность, развиваемая ветроэнергетической установкой, может быть определена из выражения:

$$P_{ВЭУ} = \pi \rho V^3 \frac{R^2}{2} \xi \eta, \text{ Вт} \quad (4)$$

где  $\eta$  - КПД электромеханического преобразования энергии (в пределах 0,7 – 0,85) .

Крыльчатые ветродвигатели с горизонтальной осью вращения наиболее эффективны, когда поток воздуха перпендикулярен плоскости вращения лопастей. Для обеспечения этого условия в составе ВЭУ требуется устройство автоматического поворота оси вращения. Обычно эту роль выполняет крыло-стабилизатор. Ветродвигатели с вертикальной осью вращения могут работать при любом направлении ветра без изменения своего направления.

Так как основным фактором, определяющим производительность ВЭУ, является скорость ветра, производители ветроэнергетического оборудования приводят в документации на ветроагрегат такие важные показатели как минимальная, номинальная и максимальная скорость ветра.

За минимальную скорость ветра  $V_{\min}$  принимают скорость, при которой обеспечивается вращение ветроколеса с номинальной частотой вращения и нулевой производительностью (холостой ход).

Номинальная (расчетная) скорость ветра  $V_{\text{ном}}$  – это скорость, при которой ВЭУ развивает номинальную мощность  $P_{\text{ном}}$ . Под номинальной мощностью ВЭУ следует понимать максимальное значение выходной мощности, на которую рассчитана энергетическая установка в длительном режиме работы.

Максимальная скорость ветра  $V_{\max}$  - это скорость ветра, при которой расчетная прочность ветроагрегата позволяет производить энергию без повреждений. При скоростях

ветра выше максимальной скорости ВЭУ должна быть выведена из работы.

На рис.2 приведены типичные зависимости выходной мощности ВЭУ от величины нагрузки при различных скоростях ветра ( $V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5$ ).

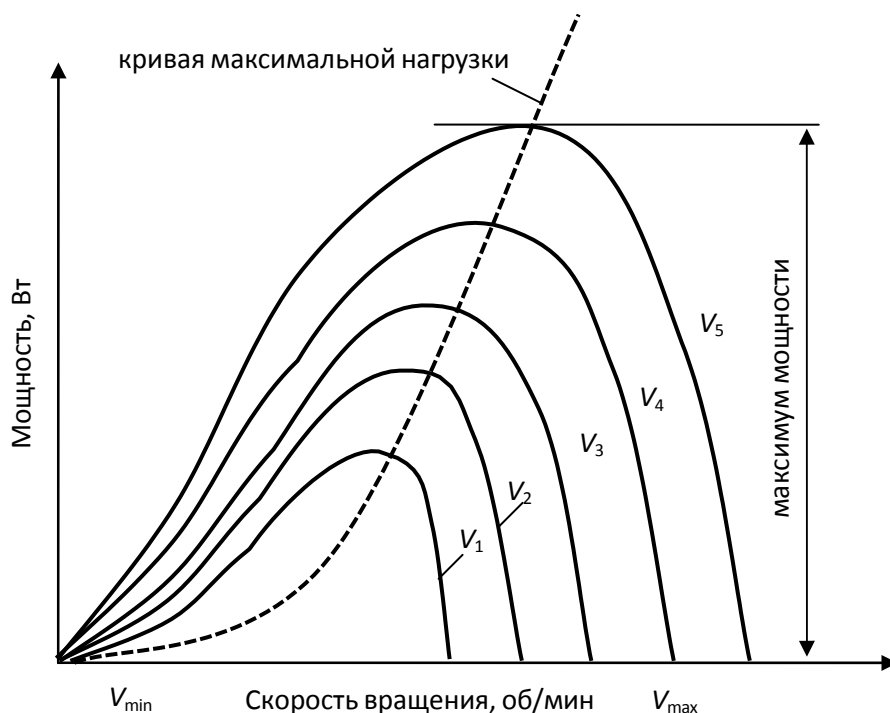


Рис. 2. Типичные зависимости выходной мощности ВЭУ от величины нагрузки

Необходимость бесперебойного электроснабжения потребителей требует наличия в составе автономной электростанции гарантированного источника питания, способного обеспечить потребителя необходимой электрической энергией в периоды ветрового затишья и слабых ветров. В качестве такого источника в автономных ветроэлектростанциях (ВЭС) чаще всего используют аккумуляторные батареи. Структурная электрическая схема автономной ВЭС представлена на рис.3.

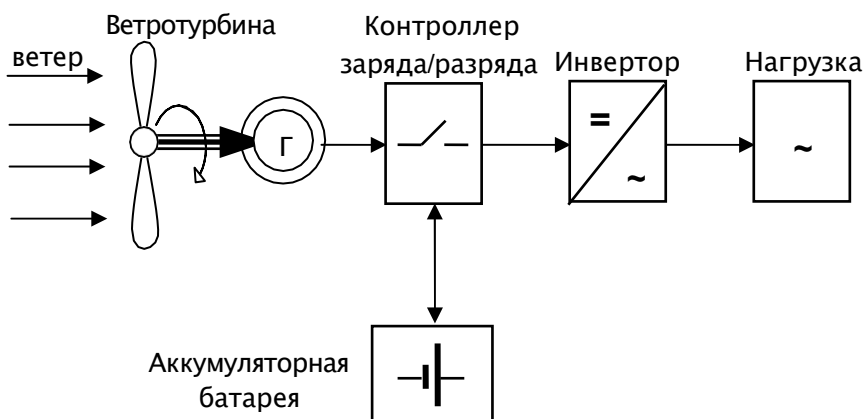


Рис.3. Структурная схема автономной ветроэлектростанции

Так как аккумуляторная батарея работает на постоянном токе, а большинству потребителей требуется ток переменный, в составе автономной ВЭС необходимо предусмотреть устройство для преобразования постоянного тока в переменный – инвертор. Мощность инвертора и ветроагрегата должны быть выбраны на максимальную мощность нагрузки, а емкость аккумуляторных батарей выбирается исходя из необходимого запаса энергии, который нужно обеспечить электростанции для покрытия электрических нагрузок в периоды простоя ветроагрегата.

Для оптимизации процессов заряда/разряда аккумуляторных батарей в состав установки входит контроллер заряда/разряда. Необходимость применения в составе ВЭС контроллера заряда/разряда связана с тем обстоятельством, что аккумуляторные батареи очень критичны к величине зарядного тока и глубине разряда. Использование контроллера заряда позволяет существенно продлить срок службы аккумуляторов и снизить эксплуатационные затраты на обслуживание электростанции.

Использование в составе автономной ВЭС аккумуляторных батарей, контроллера заряда и инвертора повышают затраты на 1 кВт установленной мощности электростанции, однако это позволяет значительно упростить конструкцию ветроагрегата. Так как стабилизация выходных электрических параметров электростанции обеспечивается при помощи аккумуляторов и инвертора, нет необходимости в стабилизации частоты вращения ветроколеса и регулировании величины выходного напряжения электрического генератора. Современным решением конструкции генератора ветроэлектростанции малой мощности является безредукторный многополюсный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и полупроводниковым выпрямителем выходного напряжения якорной обмотки. Ветроколесо выполняется с жестко закрепленными лопастями, и его частота вращения определяется только силой ветра и величиной нагрузки. Для защиты от буревых ветров ветродвигатель оснащен специальным механизмом, выводящим ветроколесо из-под ветра.

Невысокие массо-габаритные показатели аккумуляторов и их сравнительно небольшой срок службы ограничивают применение представленной выше схемы ВЭС мощностями до 10 кВт. Подобные ВЭС находят практическое применение в качестве источника электроснабжения отдельных домов, коттеджей, небольших ферм, телекоммуникационных, метеорологических объектов и т.п.


Для электроснабжения более крупных потребителей – деревень, поселков, геологических объектов и т.п. используют ветро-дизельные электростанции. В таких электростанциях дизель-генератор выполняет роль гарантированного источника электропитания, а ВЭУ, покрывая часть электрической нагрузки потребителя, обеспечивает экономию дорогостоящего дизельного топлива. Диапазон рабочих мощностей ветро-дизельных комплексов гораздо шире – от единиц кВт до десятков МВт.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ



Лабораторная установка «Исследование автономной системы электроснабжения на базе ветрогенератора AIR-X включает следующие основные элементы.

Название	Описание	Фото
<p style="text-align: center;">Ветрогенератор мобильный <b>AIR-X</b></p>	<p><b>Общие технические характеристики.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- диаметр ротора 1,15 м</li> <li>- вес 5,85 кг (в упаковке 7,7 кг)</li> <li>- стартовая скорость ветра 3,58 м/с</li> <li>- выходное напряжение (постоянный ток) 12 В</li> <li>- максимальная мощность при ветре 12,5 м/с - 400 Вт</li> <li>- количество лопастей 3</li> <li>- материал лопастей: карбоно-волоконный композит</li> <li>- корпус литой алюминий</li> <li>- выработка при ветре 5,4 м/с - 38 кВт/час в месяц</li> <li>- максимальная скорость ветра 49,2 м/с</li> </ul>	
<p style="text-align: center;">Вентилятор Ruck EL315E201</p>	<p><b>Основные технические характеристики</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- диаметр лопастей 315 мм</li> <li>- потребляемая мощность 660 Вт</li> <li>- тип электродвигателя: асинхронный с короткозамкнутым ротором</li> <li>- тип вентилятора: диагональный</li> <li>- номинальная частота вращения 3000 об/мин</li> <li>- номинальный расход воздуха 8300 м<sup>3</sup>/час</li> </ul>	

Название	Описание	Фото
Блок управления	<p><b>Назначение:</b> управление режимом работы ветроэлектростанции и контроль ее параметров</p> <p><b>Габаритные размеры:</b> 100 x 100 x 100 мм</p> <p><b>Состав:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- тумблер включения вентилятора</li> <li>- преобразователь частоты E2 MINI</li> <li>- набор нагрузочных сопротивлений</li> <li>- ключи управления нагрузкой ветрогенератора</li> <li>- измерительные приборы</li> </ul>	

Генератор AIR-X – это последняя разработка из ряда ветротурбин серии AIR, выпускаемых компанией Southwest Windpower (США). Лопасты AIR сделаны из углеволоконного усиленного композита и имеют уникальное кручение, дающее максимальную эффективность выработки при данной ометаемой площади. Скручивающий эффект при критических скоростях ветра меняет фронтальную плоскость, что замедляет вращение и предупреждает повреждение генератора.

Электрический генератор AIR-X является синхронной машиной безщеточного типа с неодимевыми ферроборовыми постоянными магнитами и оптимизирован для оптимальной эффективной работы без обслуживания.

Для создания воздушного потока в лабораторной установке используется вентилятор диагонального типа Ruck EL315E201, производства компании «Ruck Ventilatoren GmbH» (Германия), обеспечивающий в номинальном режиме работы расход воздуха 8300 м<sup>3</sup>/час. При этом скорость воздушного потока на выходе из вентилятора составляет 14,5 м/с. Изменение скорости воздушного потока, создаваемого вентилятором, производится за счет изменения его частоты вращения, которое обеспечивается преобразователем частоты E2 MINI, производства компании «ВЕСПЕР» (Россия), через который вентилятор подключен к электрической сети.

Преобразователь E2-MINI разработан для регулируемых приводов на основе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Преобразователь обеспечивает изменение выходной частоты от 1 до 200 Гц, защиту двигателя от перегрузок, имеет аналоговые и цифровые входы/выходы для регулирования и дистанционного управления.



Панель управления преобразователя частоты приведена на рис.4.

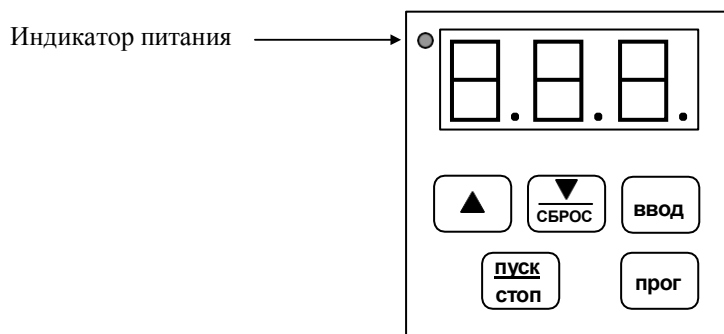


Рис.4. Панель управления преобразователя частоты E2 MINI

### Назначение клавиш панели управления

Клавиша	Режим управления	Режим программирования
	Увеличение заданной частоты	Увеличение порядкового номера константы Увеличение значения константы
	Уменьшение заданной частоты сброс сигнала ошибки	Уменьшение порядкового номера константы Уменьшение значения константы
	Не используется	Чтение значения констант Запись значения констант
	Переход в режим программирования	Выход из режима программирования
	Пуск и останов двигателя	Пуск и останов двигателя

Рекомендуемая компанией Southwest Windpower монтажная схема электрических соединений ветроэлектростанции на базе генератора AIR-X приведена на рис.5.

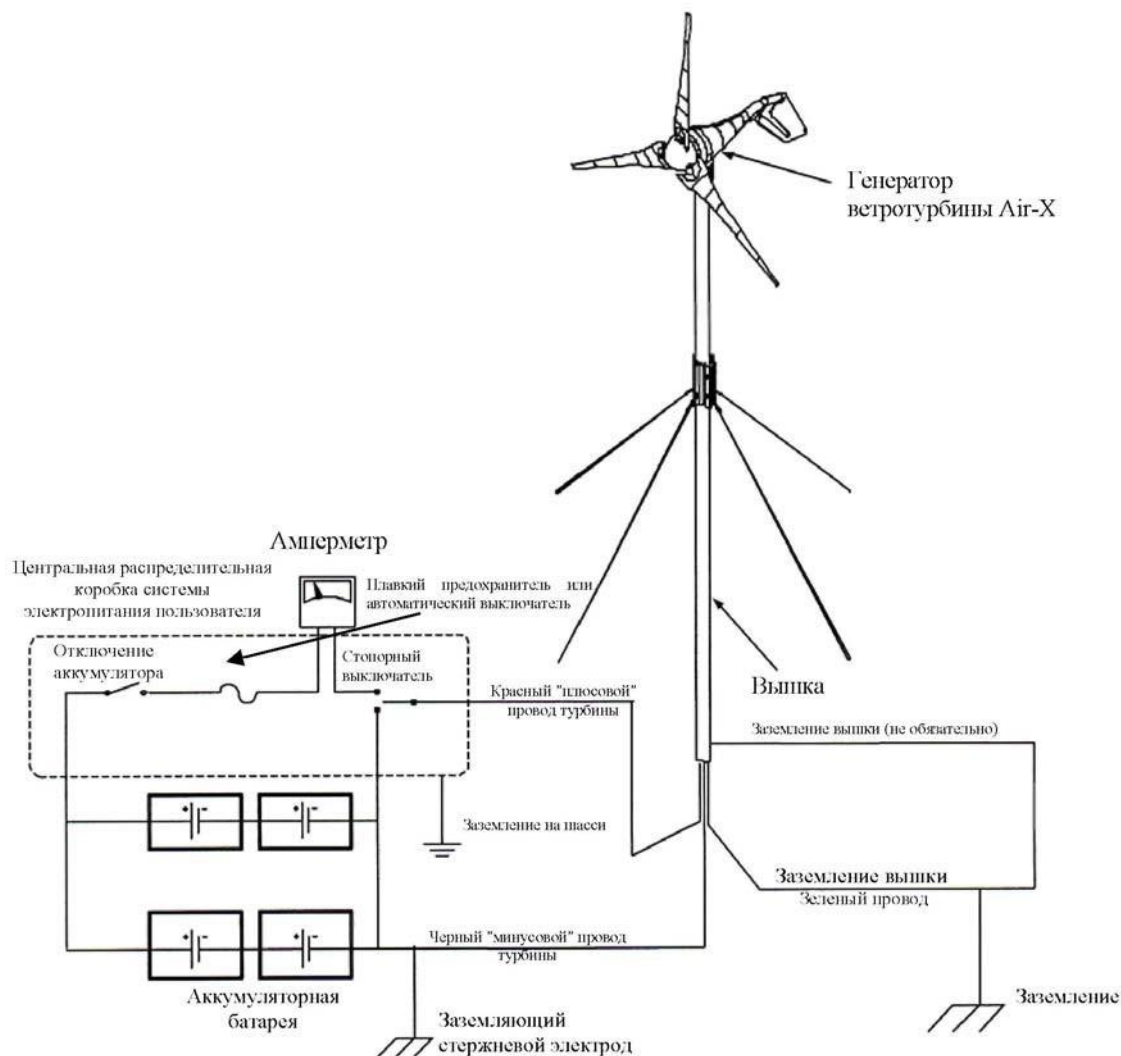


Рис.5. Монтажная схема электрических соединений ветроэлектростанции на базе генератора AIR-X

Установленный в электрической схеме стопорный выключатель используется для «остановки» турбины при проведении ее технического обслуживания.

Для управления режимом работы ВЭС в системе используется микропроцессорный интеллектуальный контроллер, расположенный в корпусе ветрогенератора.

Когда генератор подключен к аккумуляторной батарее, нуждающейся в зарядке, лопасти турбины будут «нормально» вращаться под действием энергии ветра. Турбина будет заряжать аккумуляторную батарею по мере необходимости – до тех пор, пока напряжение аккумулятора не достигнет заданного значения для регулирования.

Когда напряжение аккумулятора достигает заданного значения, турбина переходит в режим «регулирования». Скорость вращения лопастей резко падает (почти до 0 об./мин.), и выработка энергии прекращается. Нормальная операция зарядки возобновится, когда напряжение аккумулятора опустится ниже уровня полной зарядки. Эта функция регулирования именуется «гистерезис».

В режиме заряда аккумуляторных батарей контроллер AIR-X отслеживает пиковые мощности и корректирует электрическую нагрузку генератора таким образом, чтобы при соответствующей скорости ветра с него снималась максимальная мощность. Это позволяет поддерживать оптимальный угол атаки лопастей при любых скоростях ветра, снижает шум и обеспечивает максимальную выработку электрической энергии.

При скоростях ветра выше 14,3 м/с контроллер AIR-X активизирует режим срыва потока с лопастей. В этом режиме число оборотов в секунду падает на 500-700 об/мин., в зависимости от конкретной скорости ветра. При скорости ветра свыше 22,5 м/с турбина полностью останавливается, и число оборотов падает почти до нуля. Режим срыва потока производится регулируемой во времени закороткой обмотки генератора, при этом торможение турбины обеспечивается за счет аэроупругого закручивания или «флаттера» лопастей. Режим срыва потока в AIR-X позволяет уменьшить износ лопастей и подшипников при высоких скоростях ветра, и, что наиболее важно, защищает турбину от повреждений при высоких скоростях ветра. Шум, возникающий при флаттере в AIR-X, не возникает.

Мощностная характеристика ветрогенератора AIR-X приведена на рис.6.

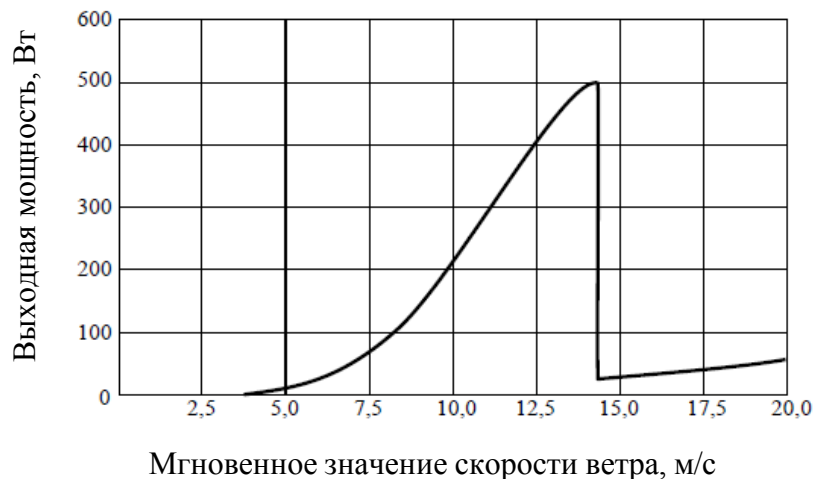


Рис.6. Каталогная мощностная характеристика ветрогенератора AIR-X

Структурная схема лабораторного стенда приведена на рис.7.

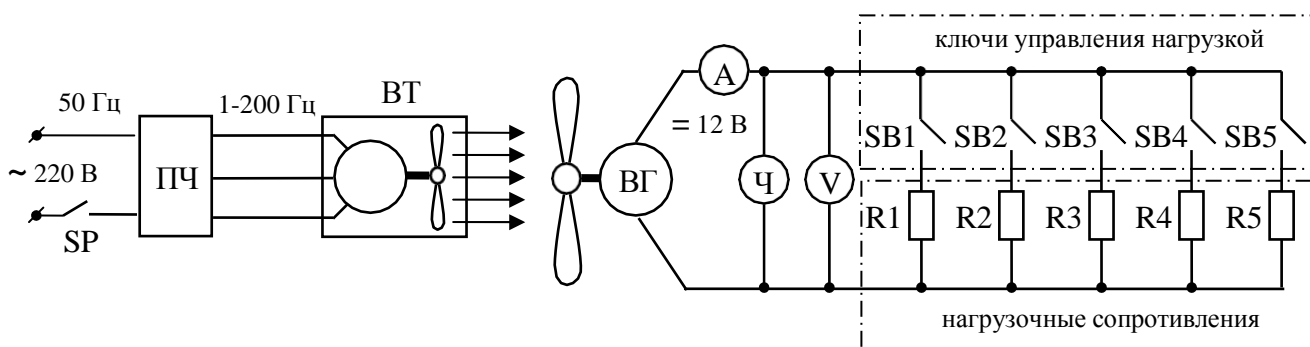






Рис.7. Структурная схема лабораторного стенда

Электропитание лабораторной установки производится от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. При замыкании ключа SP (Вентилятор) питание подается на преобразователь частоты ПЧ. С выхода преобразователя трехфазное напряжение переменного тока с регулируемой частотой от 1 до 50 Гц подается на двигатель вентилятора ВТ, который создает воздушный поток. Ветровая энергия приводит во вращение ветрогенератор ВГ, с выхода которого снимается напряжение

постоянного тока. В качестве электрической нагрузки ветрогенератора в лабораторной установке используется набор активных сопротивлений  $R1 \div R5$ , параллельное подключение которых осуществляется с помощью ключей  $SB1 \div SB5$ . В цепи нагрузки ветрогенератора установлены измерительные приборы: амперметр и вольтметр постоянного тока и частотомер. Частотомер подключен к цепи постоянного тока через логическую схему, которая вычисляет частоту вращения ветрогенератора по частоте пульсаций выпрямленного напряжения.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

1. Замыканием ключа  $SP$  подайте питание на преобразователь частоты ПЧ (Вентилятор).
2. При помощи клавиш управления установите выходную частоту преобразователя равной 50 Гц. Увеличение и уменьшение выходной частоты осуществляется клавишами  и  соответственно.
3. Произведите пуск двигателя вентилятора нажатием клавиши .
4. При достижении ветрогенератором установившегося режима работы (через 15-20 сек) снимите показания измерительных приборов при работе электростанции в режиме холостого хода. Результаты занесите в таблицу.
5. Последовательным замыканием ключей  $SB1 \div SB5$  изменяйте нагрузку ветрогенератора от холостого хода до максимальной. Для каждой ступени нагрузки зафиксируйте показания измерительных приборов и запишите их в таблицу.
6. Остановите двигатель вентилятора нажатием клавиши .
7. Верните все тумблеры панели управления в исходное состояние.
8. Повторите пункты 1-7 для режимов выходной частоты преобразователя 45 и 40 Гц соответственно.
9. Для каждого проделанного опыта рассчитайте выходную мощность ветрогенератора и занесите значения в таблицу.
10. В одних осях координат постройте экспериментальные мощностные характеристики ветрогенератора  $AIR-X$  для различных скоростей ветра  $P = f(n)$ .
11. Нанесите на полученную диаграмму каталожную мощностную характеристику ветрогенератора  $AIR-X$  и определите скорость ветра, создаваемую вентилятором при частотах питающего напряжения 50, 45 и 40 Гц соответственно.
12. Для каждой скорости ветра рассчитайте мощность ветрового потока и определите общий КПД преобразования ветровой энергии в электрическую в режиме максимальной мощности.

13. Определите возможную годовую выработку электроэнергии ветрогенератором при различных скоростях ветра и сделайте анализ полученных результатов.
14. Сформулируйте выводы по полученным результатам.

Выходная частота ПЧ	Ступени нагрузки	$n$ , об/мин	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт
50 Гц	х.х.				
	ступень 1				
	ступень 2				
	ступень 3				
	ступень 4				
	ступень 5				
45 Гц	х.х.				
	ступень 1				
	ступень 2				
	ступень 3				
	ступень 4				
	ступень 5				
40 Гц	х.х.				
	ступень 1				
	ступень 2				
	ступень 3				
	ступень 4				
	ступень 5				

#### УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать описание цели лабораторной работы, технические характеристики используемых элементов и приборов, результаты проведенных экспериментов, оформленные в виде таблиц, графиков, а также необходимые схемы и расчеты. В отчете должны быть приведены выводы по всем пунктам проведенных экспериментов. Отчет оформляется на листах формата А4 в текстовом редакторе.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

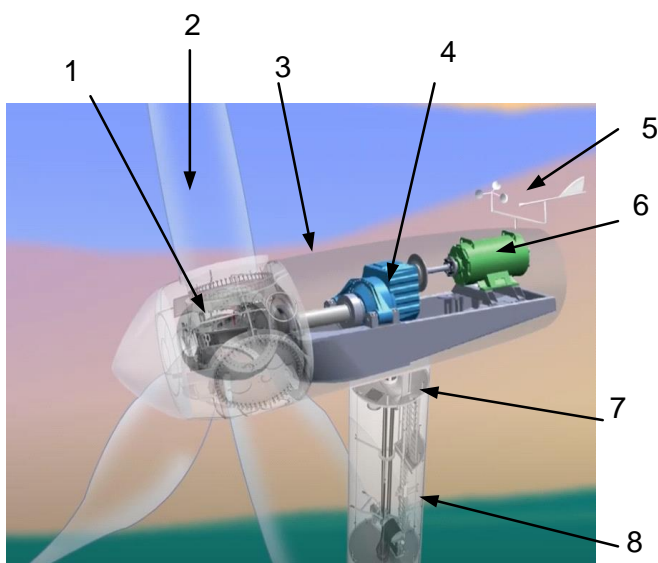
1. Цель работы.
2. Принципиальная схема.
3. Таблицы с данными.
4. Графики.
5. Выводы по работе. На основании полученных данных проанализировать работу автономной системы электроснабжения.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОПУСКА

1. Перечислите основные элементы лабораторной установки и назначение каждого элемента.
2. Перечислите основные элементы структурной схемы по рис. 7.
3. Опишите назначение клавиш панели управления.
4. Рассказать порядок проведения опытов.
5. В каком порядке выключаются блоки для изменения выходной частоты преобразователя?
6. При каких значениях частоты проводятся опыты и на что влияет частота?
7. Какие показания измерительных приборов необходимо зафиксировать?
8. Каким образом определить скорость ветра, создаваемую вентилятором при частотах питающего напряжения 50, 45 и 40 Гц?
9. Как определить мощность ветрового потока и КПД преобразования ветровой энергии в электрическую в режиме максимальной мощности?
10. Как рассчитать годовую выработку электроэнергии ветрогенератором?

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ

- 1) Перечислите названия и опишите назначение элементов 1–8 ветрогенератора.



- 2) Сформулируйте первый закон ветродвигателей (крыльчатых).
- 3) Сформулируйте второй закон ветродвигателей (крыльчатых).
- 4) Сформулируйте третий закон ветродвигателей (крыльчатых).
- 5) Как определить коэффициент быстроходности ВЭУ?
- 6) Каким образом поддерживается постоянство скорости вращения ветроколеса?
- 7) Что такое геометрическое заполнение ветроколеса? На что она влияет?
- 8) Какие экономические причины препятствуют повсеместному внедрению ВЭУ?
- 9) Что понимается под круткой лопасти? Почему она необходима?
- 10) Перечислите вредные последствия для экологии от применения ВЭУ.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. В.К. Власов. Ветро двигатели. Теория и практика. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 226с.  
<https://reader.lanbook.com/book/175546#1>
2. В.Г.Лабейш. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Учеб. пособие. – СПб.: СЗТУ. 2003 – 78 с.
3. DIERET - дистанционный интернет курс «Технологии использования возобновляемых источников энергии», <http://www.ecomuseum.kz>
4. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / Электронная версия - <http://www.intersolar.ru/wind>.
5. Ветроэнергетика. Под ред. Д. де Рензо / М.Энергоатомиздат, 1982 – 270 с.