

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,  
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Кафедра механизации животноводства  
и электрификации сельскохозяйственного производства

*К. А. Мачёхин*

# **ОСНОВЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

*Методические указания по выполнению лабораторной работы  
для студентов, обучающихся по специальности  
1-74 06 01 Техническое обеспечение процессов  
сельскохозяйственного производства*

Горки  
БГСХА  
2022

УДК 621.548(072)

*Рекомендовано методической комиссией  
факультета механизации сельского хозяйства.  
Протокол № 5 от 24 января 2022 г.*

Автор:  
старший преподаватель *К. А. Мачёхин*

Рецензент:  
кандидат технических наук, доцент *Д. А. Михеев*

#### СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Общие сведения .....	5
2. Изучение лабораторной установки.....	14
3. Определение скорости воздушного потока при изменении частоты вращения вентилятора .....	17
4. Изучение скоростных характеристик ветроустановки в зависимости от типа крыльчатки и угла наклона лопастей .....	19
5. Зависимость мощности ветрогенератора от скорости ветра .....	20
6. Характеристики ветрогенератора при постоянной скорости ветра .....	22
7. Характеристики синхронного генератора.....	25
8. Содержание отчета .....	29

**Основы энерго- и ресурсосбережения. Исследование рабочих параметров ветроэнергетической установки : методические указания по выполнению лабораторной работы / К. А. Мачёхин. – Горки : БГСХА, 2022. – 28 с.**

Приведены классификация ветроэнергетических установок и их принцип работы. Описан алгоритм работы с лабораторной установкой для проведения опытов.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 01 Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства.

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнение лабораторной работы по исследованию рабочих параметров ветроэнергетической установки способствует развитию у студентов навыков самостоятельной работы, углубляет и закрепляет теоретические знания, полученные в результате изучения теоретического курса дисциплины «Основы энерго- и ресурсосбережения».

Подготовка теоретического материала к данной работе и окончательная обработка полученных данных могут выполняться вне лабораторного времени. Произведя все необходимые вычисления, студент оформляет отчет.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо знать цель работы, порядок ее выполнения, понимать процессы и явления, которые изучаются в данной работе, знать принципиальную схему эксперимента и принцип действия приборов.

**Основные требования безопасности при выполнении работ в аудитории.**

При работе с электрическими установками необходимо помнить, что электрический ток при неосторожном обращении может вызвать серьезные, а иногда и смертельные поражения.

Сила тока, проходящего через организм, зависит от приложенного напряжения и сопротивления того участка тела, через который проходит ток. Сопротивление, в свою очередь, зависит от состояния кожи. Так, чистые и грязные, сухие и влажные руки обладают различным сопротивлением.

Необходимо помнить, что предел безопасной величины переменного тока с частотой 50 Гц равен 10 мА. При прохождении через организм тока 50 мА мышцы судорожно сжимаются и человек не может оторвать руки от провода. Ток свыше 100 мА вызывает смертельные поражения. Безопасным можно считать напряжение меньше 12 В. Напряжение в городской сети, равное 220 В, является крайне опасным. При работе с ним необходимо соблюдать приведенные ниже правила.

1. Приступать к работе с электрическими установками только после детального ознакомления с их устройством и схемой. Во время выполнения работы быть внимательным.

2. При работе с электрическими схемами руки должны быть сухими.

3. Собирать электрическую схему только проводами с исправной изоляцией.

4. Подключение схемы к источнику тока проводить только с разрешения преподавателя.

5. **Категорически запрещается** переключение проводов и замена деталей схемы при включенном напряжении.

6. Прикасаться к тумблерам и ручкам управления различных приборов разрешается одной рукой, не держась другой за корпус прибора.

7. Запрещается оставлять без наблюдения схему, находящуюся под напряжением.

8. При появлении запаха гари, треска или обнаружении искрящегося контакта необходимо немедленно отключить напряжение в схеме и заявить об этом преподавателю или лаборанту.

9. По окончании работы отключить лабораторную установку от источника тока и привести в порядок рабочее место.

При несоблюдении правил охраны труда студент отстраняется от работы.

**Цель работы:** изучить различные типы ветрогенераторных установок и режимы их работы.

**Содержание работы.**

1. Изучить назначение, устройство и принцип работы ветроэнергетических установок.
2. Ознакомиться с правилами эксплуатации лабораторной установки.
3. Провести опытные испытания и произвести расчет необходимых показателей.
4. Составить отчет.

**Материальное обеспечение:** методические указания по выполнению работы, лабораторный стенд.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Ветер представляет собой движение воздушных масс земной атмосферы, вызванное перепадом температуры в атмосфере из-за неравномерного ее нагрева солнцем. Устройства, обеспечивающие преобразование энергии ветра в полезную механическую, электрическую или тепловую энергии, называются ветроэнергетическими установками (ВЭУ).

Энергия ветра на Земном шаре оценивается в 175–219 тыс. ТВт · ч в год. Это примерно в 2,7 раза больше суммарного расхода энергии на планете. Постоянные воздушные течения к экватору со стороны северного и южного полушарий образуют систему пассатов. Существуют периодические движения воздуха с моря на сушу и обратно в течение суток (бризы) и года (муссоны). С пользой может быть использовано лишь 5 % от указанной величины энергии ветра. Однако используется значительно меньше. Выявим причины этого и перспективы развития ветроэнергетики.

Наиболее эффективный способ утилизации энергии ветра – производство электроэнергии. В ветроэнергетической установке (ВЭУ) кинетическая энергия движения воздуха превращается в энергию вращения ротора генератора, который вырабатывает электроэнергию. Выходная мощность установки пропорциональна площади лопастей ветрового ротора и скорости ветра в кубе. Поэтому ВЭУ большой мощности оказываются крупногабаритными, ведь скорость ветра в среднем

бывает небольшой. Для защиты от разрушения сильными случайными порывами ветра установки проектируются со значительным запасом прочности. Трудности в использовании ВЭУ связаны с непостоянством скорости ветра. Приходится управлять частотой вращения ветроколеса и согласовывать ее с частотой вращения электрогенератора. Кроме того, в периоды безветрия электроэнергия не производится. Для исключения перерывов в электроснабжении ВЭУ должны иметь аккумуляторы энергии. Крупномасштабное применение ВЭУ в каком-то одном районе может вызвать значительные климатические изменения, испортить ландшафт. ВЭУ создают шум и электромагнитные помехи.

Территория Республики Беларусь находится в умеренной ветровой зоне. Стабильная скорость ветра составляет 4–5 м/с и соответствует нижнему пределу устойчивой работы отечественных ВЭУ. Это позволяет использовать лишь 1,5–2,5 % ветровой энергии. К зонам, благоприятным для развития ветроэнергетики, со среднегодовой скоростью ветра выше 5–5,5 м/с относится 20 % территории страны. Поэтому ветроэнергетику можно рассматривать в качестве вспомогательного энергоресурса, решающего местные проблемы, например, отдельных фермерских хозяйств. По некоторым оценкам, возможная установленная мощность ВЭУ в 2021 г. в республике составляла 217,87 МВт (рис. 1).



Рис. 1. Суммарная произведенная электрическая энергия от возобновляемых источников энергии, млн. кВт · ч

Ветроэнергетическая установка (рис. 2) представляет собой комплекс оборудования, в состав которого входят:

- ветрогенератор;
- аккумулятор;
- инвертор;
- коммутационное оборудование, кабель, прочие устройства.

Принцип действия ветроустановок основан на использовании энергии ветра. Поток воздействует на лопасти рабочего колеса, приводя их во вращение. Оно передается на генератор, производящий электроток. Генератор заряжает аккумуляторы, напряжение с которых подается на инвертор, создающий переменный ток 220 В 50 Гц, необходимый для потребителей.

Существуют отдельные ветряки, питающие насосы или иные сложные устройства, которые подают напряжение напрямую на потребляющий прибор. Но при возникновении нештатных ситуаций, например, внезапном усилении ветра, потребитель может выйти из строя вследствие резкого скачка напряжения.



Рис. 2. Схема ветроэнергетической установки

Максимальное использование энергии ветрового потока согласно расчетам **не может превышать 59,3 %**, а реальное использование намного ниже и составляет от 10 %.

Ветровые установки классифицируются по двум основным признакам – геометрии ветрового колеса и ориентации оси вращения ветрового колеса относительно направления ветра. Установки, использующие подъемную силу (лифт-машины), имеют, как правило, линейную скорость концов лопастей ветрового колеса больше скорости ветра.

Установки, использующие силу лобового сопротивления (драг-машины), как правило, вращаются с линейной скоростью, меньшей скорости ветра.

Принципиальным отличием этих двух типов конструкции является необходимость ориентирования горизонтальных устройств по направлению ветра и нетребовательность к этому вертикальных ветряков. Кроме того, для горизонтальных устройств обязательно наличие высокой мачты, так как расположение на высоте обеспечивает более интенсивное воздействие потоков ветра на ротор. Вертикальные конструкции в подъеме над уровнем земли нуждаются в меньшей степени.

Конструкция ветроэлектрической установки приведена на рис. 3.

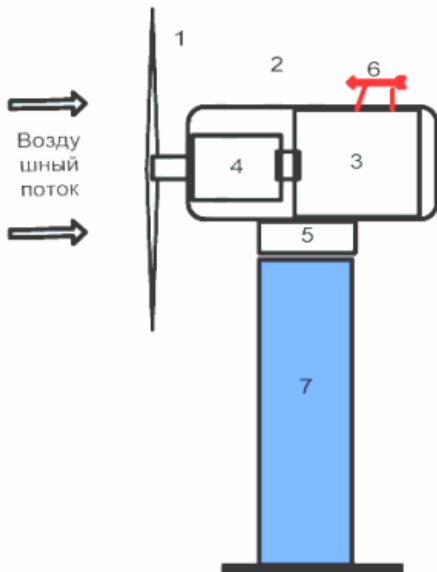


Рис. 3. Конструкция ветроэлектрической установки:

- 1 – ветродвигатель (ветроколесо); 2 – ветроголовка; 3 – генератор;  
4 – редуктор; 5 – поворотная платформа; 6 – измерительное устройство;  
7 – мачта ВЭУ, содержащая ветротурбину и электрогенератор,  
связанный с валом ветротурбины непосредственно или через редуктор

Эффективность горизонтальных ветряков в целом выше, чем вертикальных устройств, поскольку лопасти вертикальных роторов испытывают как полезное воздействие на рабочие части, так и противодействующие нагрузки на обратные стороны. Снижение уравновешивающего воздействия потока на обратные стороны лопастей является основной задачей конструкторов, пытающихся разработать наиболее удачную форму рабочего колеса.

**Горизонтальные ветрогенераторы.** Установки с горизонтальной осью вращения имеют практически одну конструкцию. Они представляют собой горизонтальную ось с хвостом и ротором на противоположных концах. Ось имеет возможность свободного вращения вокруг вертикальной оси, необходимого для установки ротора по направлению ветра. Это происходит автоматически при помощи хвоста. Ротор представляет собой род пропеллера, вращающегося при воздействии ветрового потока на лопасти. Разные модификации горизонтальных установок имеют от одной до трех лопастей и более.

*Ветрогенератор, устроенный по типу парусника* (рис. 4). Тарелкообразная конструкция под напором воздуха приводит в движение поршни, которые активируют гидросистему. Как результат, происходит трансформация физической энергии в электрическую.

Во время работы установка не шумит, обладает высокими показатели мощности, является легко управляемой.



Рис. 4. Ветрогенератор, устроенный по типу парусника

*Летающий ветрогенератор-крыло* (рис. 5). Используется без мачты, генератора, ротора и лопастей. В сравнении с классическими конструкциями, которые функционируют на небольшой высоте при постоянной силе ветра, а сооружение высоких мачт дело трудоемкое и дорогое, «крыло» таких проблем не имеет. Его запускают на высоту 550 м. Выработка электрической энергии составляет 1 мВт в год. Производителем «крыла» является компания Makani Power.



Рис. 5. Летающий ветрогенератор-крыло

Недостатками ветрогенераторов является необходимость ориентировать их на направление ветра. Постоянное перемещение снижает скорость вращения, что понижает производительность.

**Вертикальные ветрогенераторы.** Ветрогенераторы вертикальных конструкций имеют меньшую эффективность использования потока ветра, но с точки зрения эксплуатации они намного предпочтительнее.

Их преимущества:

- нет необходимости ориентировать ротор по направлению ветра;
- установка устройства на высокую мачту является необязательной, так как большой разницы в эффективности нет;
- устройства имеют более простую конструкцию, что удобнее при самостоятельном изготовлении.

Изначально вертикальные конструкции имели две лопасти, имеющие форму желоба и расположенные диаметрально вдоль оси враще-

ния. Впоследствии появились другие варианты, имеющие большее количество лопастей или иную форму. В настоящее время различных конструкций известно довольно много.

*Генераторы с ротором Савониуса* (рис. 6) состоят из двух цилиндров. Постоянное осевое вращение и поток ветра не находятся в зависимости друг от друга. Даже при резких порывах он крутится с заданной изначально скоростью.

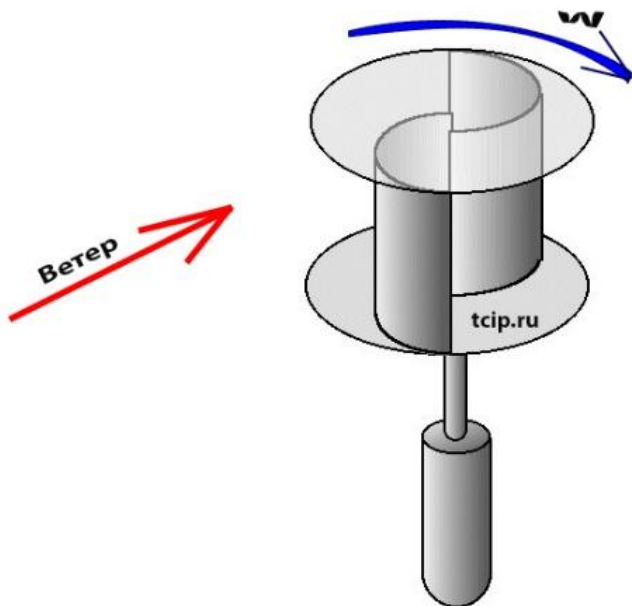


Рис. 6. Генератор с ротором Савониуса

Отсутствие влияния ветра на скорость вращения, бесспорно, является его большим преимуществом. Недостатком является то, что он использует силу стихии не на всю мощь, а только на треть. Устройство лопастей в виде полуцилиндров позволяет работать лишь в четверть оборота.

*Генераторы с ротором Дарье* (рис. 7) имеют две или три лопасти. Легко монтируются. Конструкция их является простой и понятной. Начинают работать от запуска вручную.

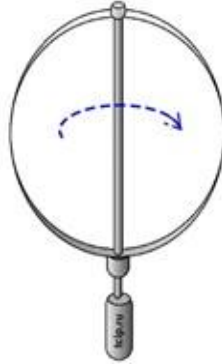


Рис. 7. Генератор с ротором Дарье

Минус – турбины не отличаются мощной работой. Сильная вибрация становится причиной сильного шума. Этому способствует большое количество лопастей.

*Геликоидный ротор* (рис. 8). Вращение ветрогенератора происходит равномерно благодаря закрученным лопастям. Подшипники не подвержены быстрому износу, что значительно продлевает срок эксплуатации.

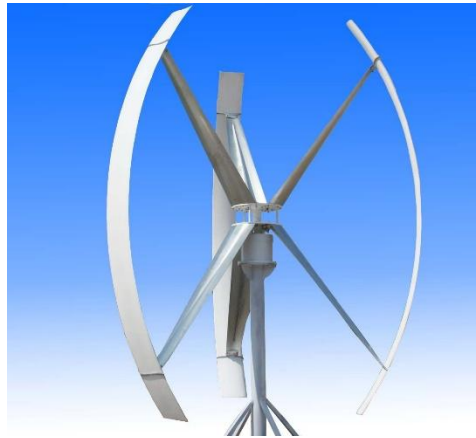


Рис. 8. Геликоидный ротор

Монтаж установки требует времени и сопряжен с трудностями сборки. Сложная технология изготовления отразилась на высокой цене.

*Многолопастный ротор* (рис. 9). Вертикально-осевая конструкция с большим количеством лопастей делает его чувствительным даже к очень слабому ветру. Эффективность таких ветрогенераторов очень высокая.



Рис. 9. Многолопастный ротор

Они являются мощными преобразователями. Энергия ветра используется максимально. Отличаются высокой стоимостью. Недостаток – высокий звуковой фон. Может давать большой объем электричества.

*Ортогональный ротор* (рис. 10). Начинает вырабатывать энергию при скорости ветра в 0,7 м/с. Состоит из вертикальной оси и лопастей. Не производит много шума, отличается красивым необычным дизайном. Срок службы составляет несколько лет.

Лопастя с большой массой делают его громоздким, что усложняет монтажные работы.

Положительные стороны вертикальных ветрогенераторов:

- использование их возможно даже при слабом ветре;
- не настраиваются на ветровые потоки, так как не зависят от его направления;

- устанавливаются на короткой мачте, что позволяет производить обслуживание систем на земле;
- шум в пределах 30 дБ;
- разнообразный внешний вид.



Рис. 10. Ортогональный ротор

Основной недостаток данного вида ветрогенераторов – использование силы и энергии ветра не полностью из-за невысокой вращательной скорости ротора.

## **2. ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

Конструктивно стенд состоит из испытательной установки и блока управления и измерения.

Блок управления состоит из корпуса, на котором установлены источники питания, электронные платы, нагрузочные резисторы, лицевая панель и столешница интегрированного рабочего стола.

На лицевой панели блока управления изображена схема ветрогенератора, подключения нагрузки и измерительных приборов.

На лицевой панели также расположены:

- сетевой выключатель;
- функциональные переключатели;
- блок нагрузочных светильников (две лампы);
- цифровые индикаторы (частота вращения генератора, напряжение, ток и мощность);
- силовой разъем подключения установки для испытаний.

Испытательная установка (рис. 11, 12) представляет собой передвижную раму, на которой установлено оборудование.



Рис. 11. Общий вид установки:

- 1 – блок управления; 2 – рама испытательной установки;
- 3 – центробежный вентилятор; 4 – кожух аэродинамического туннеля;
- 5 – стойка генератора; 6 – панель электрической коммуникации; 7 – инвертор;
- 8 – защитная сетка; 9 – разъем подключения питания инвертора

Воздушный поток создается центробежным вентилятором, регулируя скорость которого возможно изменять интенсивность потока. Применение ячеистого выпрямителя потока (на выходе вентилятора)

снижает завихрения воздуха в туннеле. Воздух подается на крыльчатку ветрогенератора через выходное отверстие туннеля, что обеспечивает равномерность потока и увеличивает скорость в сечении крыльчатки.

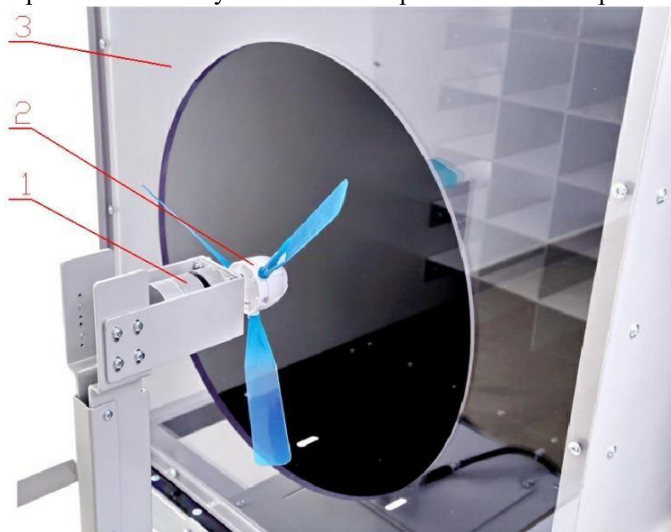


Рис. 12. Рабочий орган установки:

1 – генератор; 2 – крыльчатка генератора; 3 – выходное отверстие

Скорость вентилятора регулируется при помощи инвертора (рис. 13).



Рис. 13. Управление инвертором:

1 – панель управления инвертора; 2 – кнопка запуска;  
3 – кнопка остановки; 4 – регулятор частоты; 5 – индикатор

Поток воздуха от вентилятора, проходя по коробу, выходит к крыльчатке ветрогенератора и приводит ее во вращение. Крыльчатка выполнена съёмной.

Стенд комплектуется анемометром дифференциального давления с трубкой Пито (рис. 14). Прибор позволяет измерять скорость, давление и температуру воздушного потока. Для выполнения замера трубка вводится в вентиляционный канал.



Рис. 14. Анемометр Testo 512 дифференциального давления с трубкой Пито

### **3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРА**

1. Подготовить установку к работе.
2. Включить вентилятор.
3. Задать частоту вращения вентилятора 5 Гц.
4. С помощью анемометра измерить скорости воздушного потока в центре и по краям выходного отверстия (рис. 15). Значение скоростей занести в табл. 1. При измерении скорости ветра конец трубки Пито направлять строго перпендикулярно плоскости выходного отверстия. Измерения производить на расстоянии 5–15 см от выходного отверстия.
5. Повторить пункты 3, 4 для всех частот  $f$  из табл. 1.

6. Выключить вентилятор.
7. Выключить питание стенда.

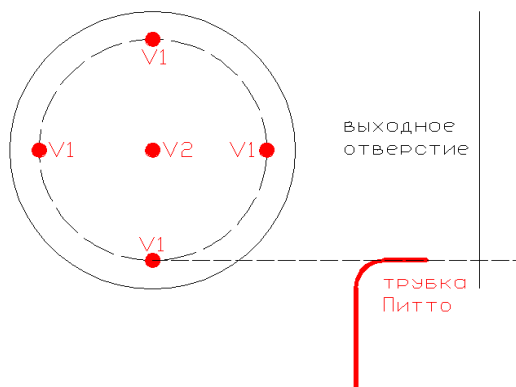
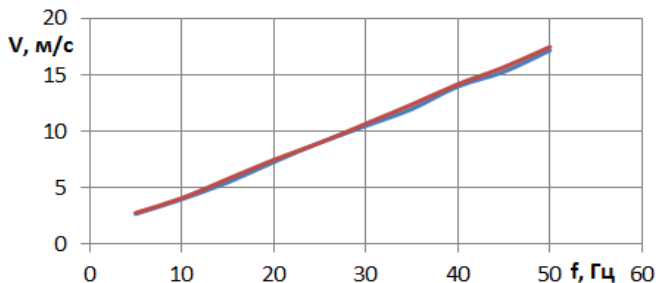


Рис. 15. Схема измерения скорости воздуха

Таблица 1. Скорости воздушного потока при изменении частоты вращения вентилятора

Частота АД, $f$	Скорость ветра $V_1$ , м/с	Скорость ветра $V_2$ , м/с	Скорость ветра $V$ , м/с
5			
10			
15			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			

8. По данным табл. 1 построить зависимости  $V_1 = f(f)$  и  $V_2 = f(f)$ . Убедиться, что указанные зависимости имеют линейный характер.



9. Определить коэффициент  $k$ , при котором выполняется равенство:

$$V = kf. \quad (1)$$

10. Задав коэффициентом  $k$ , рассчитать скорость  $V$  для всех частот  $f$  в табл. 1. Проверить, чтобы скорость  $V$  соответствовала  $V_1$  и (или)  $V_2$ . Если имеется сильное расхождение между  $V$  и  $V_1$  ( $V_2$ ) – уточнить величину  $k$  (лежит в пределах 0,3–0,4 (м/с)/Гц).

#### 4. ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОУСТАНОВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА КРЫЛЬЧАТКИ И УГЛА НАКЛОНА ЛОПАСТЕЙ

1. Подготовить установку к работе.
2. Установить на вал генератора крыльчатку с регулируемыми лопастями типа  $A$ . Установить вторую ступень наклона лопастей (крыльчатка типа  $A$  не вращается на первой ступени наклона лопастей).
3. Включить вентилятор.
4. Плавно увеличивать частоту вращения вентилятора до тех пор, пока крыльчатка генератора не начнет крутиться с постоянной скоростью (скорость страгивания). В табл. 2 занести данные о частоте питания вентилятора  $f$  и скорости вращения крыльчатки  $n$ .

Таблица 2. Скоростные характеристики ветроустановки в зависимости от типа крыльчатки и угла наклона лопастей

Частота АД, $f$	Лопасть типа А		Лопасть типа В						Лопасть типа С							
	2		3		1		2		3		1		2		3	
	$V$	$n$	$V$	$n$	$V$	$n$	$V$	$n$	$V$	$n$	$V$	$n$	$V$	$n$	$V$	$n$
8																
10																
12																



21. По данным табл. 2 построить зависимости скорости вращения крыльчатки генератора от скорости ветра  $n = f(V)$ .

## 5. ЗАВИСИМОСТЬ МОЩНОСТИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ОТ СКОРОСТИ ВЕТРА

1. Подготовить установку к работе.
2. Установить на вал генератора крыльчатку с нерегулируемыми лопастями.
3. Собрать на панели схему, как показано на рис. 16.

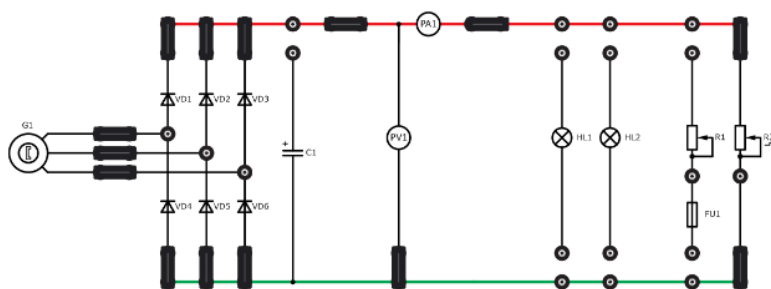


Рис. 16. Схема подключения лабораторной установки

4. Установить переключателем нагрузки  $R2$  ступень нагрузки номер 6.
5. Включить вентилятор.
6. Плавно увеличить частоту вращения вентилятора до 20 Гц. Измеренное значение мощности по  $PW_1$  занести в табл. 3.

Таблица 3. Зависимость мощности ветрогенератора от скорости ветра

Частота АД, $f$	Ступень нагрузки 6		Ступень нагрузки 7	
	Скорость $V$ , м/с	Мощность $P$ , Вт	Скорость $V$ , м/с	Мощность $P$ , Вт
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				

45				
50				
55				

7. Повторить пункт 6 для всех частот  $f$  в табл. 3.
8. Выключить вентилятор.
9. Установить переключателем нагрузки  $R2$  ступень нагрузки номер 7.
10. Повторить пункты 6–8. Данные занести в табл. 3.
11. Выключить питание стенда.
12. По формуле (1) рассчитать для всех случаев скорость ветра  $V$ . Заполнить табл. 3.
13. По данным табл. 3 построить зависимости мощности ветрогенератора от скорости ветра  $P = f(V)$ .

## 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА ПРИ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

1. Подготовить установку к работе.
2. Установить на вал генератора крыльчатку с нерегулируемыми лопастями.
3. Собрать на панели схему, как показано на рис. 17.

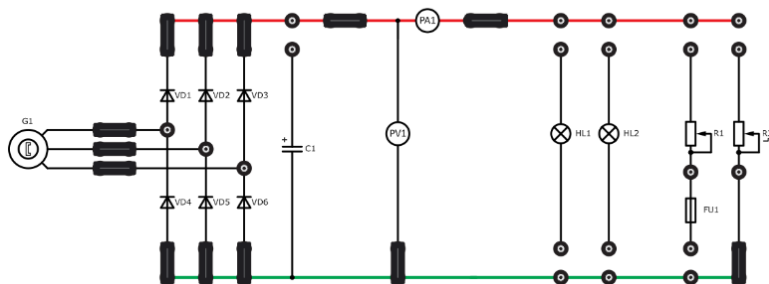


Рис. 17. Опыт холостого хода

5. Включить вентилятор.
6. Плавно увеличить частоту вращения вентилятора до 25 Гц. Рассчитать по формуле (1) скорость ветра  $V$ , записать в табл. 4.

Таблица 4. Мощностные характеристики ветрогенератора

**при постоянной скорости ветра**

Частота АД $f$	Скорость $V$ , м/с	Мощность ветра $P_V$ , Вт
25		

7. Определить мощность, создаваемую потоком воздуха на крыльчатку.

Расчетная формула для определения мощности ветра имеет вид

$$P_V = \frac{\rho S V^3}{2}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь круга, описываемого крыльчаткой, м<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр крыльчатки, м.

$$S = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (3)$$

8. Измеренные значения скорости вращения крыльчатки  $n$  и напряжения холостого хода генератора по прибору  $P_{V1}$  в зависимости от нагрузки занести в табл. 5.

Таблица 5. Характеристики ветрогенератора при постоянной скорости ветра на холостом ходу

$N$	$n$ , об/мин	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$\eta$
1			0	0	
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
КЗ		0		0	

9. Изменить на панели схему, как показано на рис. 18.

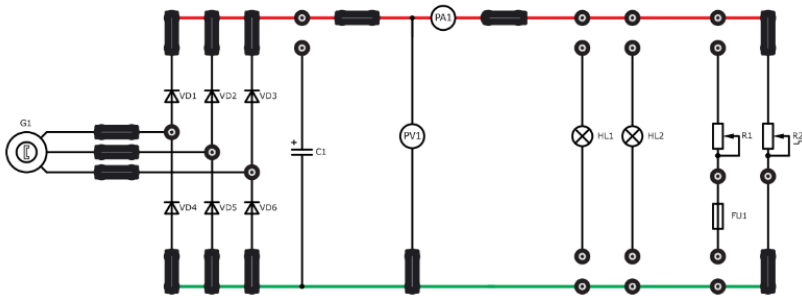


Рис. 18. Работа генератора на активную нагрузку

10. Установить переключателем нагрузки  $R2$  ступень нагрузки номер 1. Измеренные значения скорости вращения крыльчатки  $n$ , напряжения  $U$ , тока  $I$  и мощности  $P$  генератора занести в табл. 6.

Таблица 6. Характеристики ветрогенератора при постоянной скорости ветра на активной нагрузке

$N$	$n$ , об/мин	$U$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$\eta$
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
КЗ		0		0	

11. Повторить пункт 10 для всех ступеней нагрузки  $R2$ .

12. Изменить на панели схему, как показано на рис. 19.

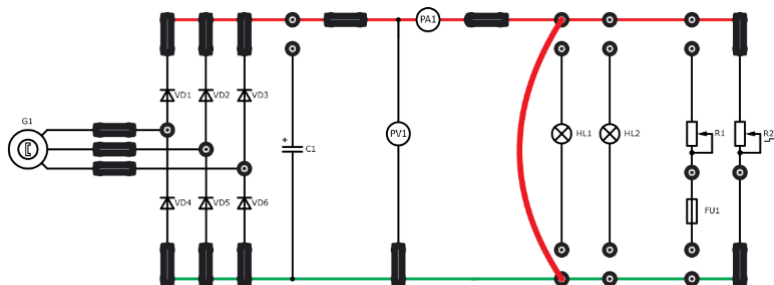


Рис. 19. Опыт короткого замыкания

13. Измеренные значения скорости вращения крыльчатки  $n$  и тока короткого замыкания по прибору  $P_{A1}$  занести в табл. 5.

14. Установить частоту вращения вентилятора 30 Гц. Данные занести в табл. 7.

15. Повторить пункты 8–13. Данные занести в таблицу типа 5 и 6.

16. Повторить пункты 14, 15 для скоростей вентилятора 35, 40, 45, 50 Гц.

Таблица 7. Мощностные характеристики ветрогенератора при постоянной скорости ветра

Частота АД $f$	Скорость $V$ , м/с	Мощность ветра $P_V$ , Вт
30		

17. Выключить вентилятор.

18. Выключить питание стенда.

19. Определить КПД ветрогенератора. Заполнить табл. 5 и 6.

Расчет КПД ветрогенератора осуществляется по формуле

$$\eta = \frac{P}{P_V}, \quad (4)$$

где  $P$  – мощность ветрогенератора при постоянной скорости ветра.

20. По данным таблиц построить зависимости мощности и напряжения генератора от тока нагрузки  $P = f(I)$  и  $U = f(I)$ .

21. Для каждой таблицы найти максимальную мощность, развиваемую генератором ( $P_{\max}$ ), и КПД при этой мощности. Данные занести в табл. 8.

22. По данным табл. 8 построить зависимости мощности и КПД генератора от скорости ветра  $P_{\max} = f(V)$  и  $\eta_{\max} = f(V)$ .

Таблица 8. Максимальная мощность, развиваемая генератором

$V, \text{ м/с}$	$P_{\max}, \text{ Вт}$	$\eta_{\max}$
20		
25		
30		
35		
40		
45		
50		

## 7. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

1. Подготовить установку к работе.
  2. Установить на вал генератора крыльчатку с нерегулируемыми лопастями.
  3. Собрать на панели схему, как показано на рис. 20
  4. Включить вентилятор.
  5. Плавно увеличить частоту вращения вентилятора до 40 Гц.
- Данные ( $n, U$ ) занести в табл. 9.

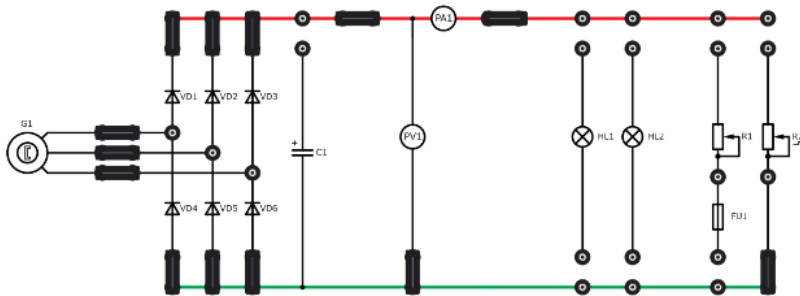


Рис. 20. Схема для определения характеристик генератора

Таблица 9. Характеристики синхронного генератора

$n, \text{ об/мин}$	$f, \text{ Гц}$	$V, \text{ м/с}$	$I, \text{ А}$	$P, \text{ Вт}$	$U, \text{ В}$
	40				

6. Изменить на панели схему, как показано на рис. 21.

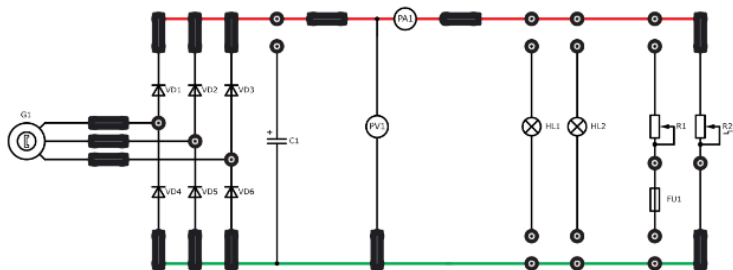


Рис. 21. Работа генератора на активную нагрузку

7. Установить переключателем  $R2$  ступень нагрузки номер 1.

8. Для компенсации снижения скорости генератора  $n$  увеличить частоту вращения вентилятора (при выполнении опыта скорость генератора  $n$  поддерживается постоянной).

9. Данные ( $f$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $P$ ) занести в табл. 9.

10. Повторить пункты 8, 9 для всех ступеней нагрузки  $R2$ .

11. Выключить вентилятор.

12. Выключить питание стенда.

13. Рассчитать по зависимостям (1), (2), (4) скорость ветра, мощность ветра, КПД генератора и занести в табл. 9.

14. По данным табл. 9 построить зависимости мощности, напряжения и КПД генератора от тока нагрузки  $P = f(I)$ ,  $U = f(I)$  и  $\eta = f(I)$  при постоянной скорости вращения.

## 8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Дать определение понятию «ветроэнергетическая установка».

2. Классифицировать ветроэнергетические установки.

3. Описать принцип работы различных ветроэнергетических установок.

4. Ознакомиться с основными узлами и принципом работы лабораторной установки.

5. Произвести расчет мощностных показателей в зависимости от скорости ветра.

Учебное издание

**Мачёхин Кирилл Александрович**

**ОСНОВЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ  
ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

**Методические указания по выполнению  
лабораторной работы**

Редактор *О. Г. Толмачёва*  
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 02.11.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,25.  
Тираж 50 экз. Заказ .

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».  
Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.  
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».  
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.