ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

Д. В. ШУШПАНОВ

ПЕРВИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ПРАКТИКУМ

СПбГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019

УДК
ББК
Л69

Рецензент
доцент кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ
Б. Г. Шамсиев

Рекомендовано к печати
редакционно-издательским советом СПбГУТ

Шушпанов, Д. В.

Л69 Первичные источники электроэнергии. Практикум / Д. В. Шушпанов; СПбГУТ. – СПб., 2019. – 24 с.

Содержит учебные задания, методические указания по их выполнению и теоретический материал в виде алгоритмов, формул, определений; контрольные вопросы; литературу.

Предназначено в качестве методических указаний к лабораторным работам при подготовке бакалавров по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

УДК
ББК

© Шушпанов Д. В., 2019
© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2019

Введение

Практикум «Первичные источники электроэнергии» предназначен для организации самостоятельной работы студентов.

Для проверки правильности решения студенту рекомендуется выполнить компьютерный анализ заданных задач с использованием программы FASTMEAN. Программа FASTMEAN позволяет рассчитать ЭЦ в режимах постоянного тока и гармонических колебаний, рассчитать частотные характеристики ЭЦ и получить аналитические формулы, используя «Символьный анализ». Студент должен сравнить результаты аналитического и компьютерного анализов и при их несовпадении найти ошибки самостоятельно или обратиться к преподавателю.

Для оказания помощи в самостоятельной работе студентов при выполнении практических заданий по всем темам дисциплины приведены номера страниц литературы [1, 2].

В конце каждого блока заданий по изучаемым темам даны контрольные вопросы. При подготовке к ответам на них студент может оценить свой уровень знаний и степень подготовленности как к текущему контролю, так и к итоговому – теоретическому зачету.

После решения задач своего варианта всех разделов блока студент проходит текущий контроль. Последний состоит из решения задач по темам одного или нескольких блоков, которые дает преподаватель. Студент, выполнивший все блоки, успешно прошедший текущий контроль, а также выполнивший и защитивший лабораторные работы, допускается к сдаче теоретического зачета.

1. Химический источник тока (ХИТ)

При анализе используется согласный выбор положительных направлений напряжений и токов в ветвях анализируемых цепей.

ХИТ – это устройство, в котором химическая энергия НЕПОСРЕДСТВЕННО превращается в электрическую энергию. Устройство для этого преобразования и будет называться «химическим источником тока» или «гальваническим элементом» или «электрохимическим элементом» или «электрохимической ячейкой». Все другие устройства предполагают ОПОСРЕДОВАННОЕ превращение химической энергии в электрическую энергию. Например, топливо сжигается, его химическая энергия превращается в тепло, за счет которого вода превращается в водяной пар, поток пара вращает турбину, которая генерирует электроэнергию.

Основой работы ХИТ является химическая реакция взаимодействия окислителя и восстановителя. В процессе взаимодействия окислитель, восстанавливаясь, присоединяет электроны, а восстановитель, окисляясь, отдает электроны. Чтобы энергия этой реакции не выделялась в виде тепла, а превращалась в электрическую энергию, процессы окисления и восстановления должны быть пространственно разделены. Электрохимическим методом можно также обратно преобразовать электрическую энергию в химическую и таким образом накапливать, аккумулировать электрическую энергию в химической форме. Перезаряжаемую электрохимическую ячейку многократного действия называют также «аккумулятор».

Простейшая электрохимическая ячейка состоит из двух электродов, разделенных проводником второго рода, т.е. ионным проводником или электролитом. Электролит необходим для предотвращения непосредственного перехода электронов от восстановителя к окислителю.

окислитель	ионный проводник	восстановитель
катод	электролит	анод
$\leftarrow \Delta\varphi_к \rightarrow$		$\leftarrow \Delta\varphi_а \rightarrow$

Электродом называют проводник первого рода, находящийся в контакте с ионным проводником. На границе между этими проводниками возникает скачок потенциала, называемый **электродным потенциалом**. Электрод, на котором протекает окисление восстановителя, называют **анодом**,

электрод, на котором протекает восстановление окислителя – катодом. Совокупность окислителя, восстановителя и ионного проводника называется **электрохимической системой**.

По принципу работы ХИТ подразделяют на **первичные, вторичные и топливные элементы**. Первичные ХИТ (гальванические элементы) – одноразовые, содержат активные вещества в электродах, а после полного расходования активных веществ источники становятся неработоспособными и требуют замены новыми.

Вторичные ХИТ (**аккумуляторы**) после разряда, т.е. после израсходования активных масс могут быть приведены в рабочее состояние пропусканием электрического тока через элемент в обратном направлении. Если в рассмотренном выше примере заменить диоксид марганца (который при определенных условиях тоже может обратимо работать в водном растворе) на оксид серебра Ag_2O, мы получим цинк-серебряный аккумулятор, т.к. пара Ag_2O/Ag способна к обратимому окислению-восстановлению в водном щелочном растворе. Токообразующая реакция имеет вид

Как известно, основная доля производимой в мире электроэнергии вырабатывается на теплоэлектростанциях. Принцип в простейшем описании такой: сжигается топливо (твердое, жидкое или газообразное), нагревается вода и превращается в пар, пар и продукты сгорания вращают турбину, турбина крутит электрогенератор, который вырабатывает электрический ток. И сколько лет существует производство электричества, столько же лет вопросу: как напрямую превратить внутреннюю химическую энергию, заключенную в топливе, в электричество? Минуя фазы сжигания, парообразования и т.д., так как на всех этих ступенях теряется часть энергии, из-за чего КПД паровых машин и теплоэлектростанций недостаточно высок. Такое устройство для прямого преобразования химической энергии топлива в электричество называется **топливным элементом** (ТЭ). ТЭ является химическим источником тока, причем первичным источником тока. Однако обычно ТЭ относят не к первичным ХИТ, а выделяют в особый класс. В отличие от остальных ХИТ, в ТЭ электроды являются нерасходуемыми (и неизменяемыми при работе), а реагенты хранятся вне элемента и подаются в него в процессе работы.

Конденсатор – это устройство, накапливающее электрическую энергию. ХИТ – это тоже устройство, накапливающее электрическую энер-

гию. В чем различие между ними? Конденсатор характеризуется определенной постоянной емкостью:

$$C = \frac{q}{U},$$

измеряемой в Фарадах, 1 Ф = Кл/В. Запишем эту основную формулу по другому:

$$q = CU$$

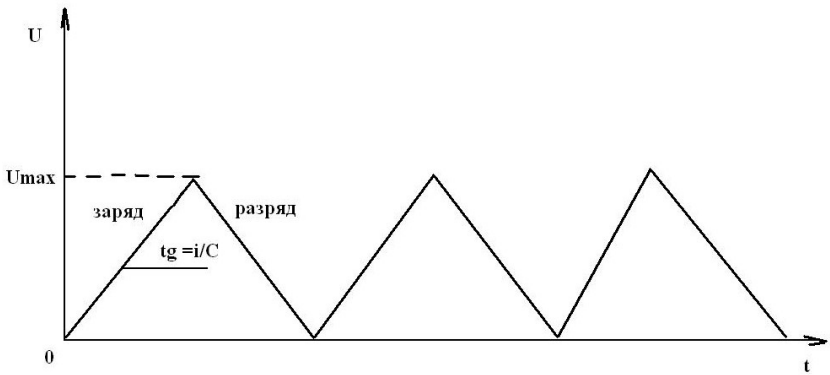
т.е. чем больше емкость, тем больше накапливаемый заряд при одном и том же напряжении. Если мы будем вести заряд и разряд постоянным током *I*, то получаем

$$q = It$$

следовательно

$$U = \frac{q}{C} = \frac{I}{C}t$$

Напряжение на конденсаторе будет линейно меняться во времени с тангенсом угла наклона, равным *I/C*. Чередуя заряд – разряд, получим пилообразное изменение напряжения, как на этом рисунке.



То есть форма разрядной и зарядной кривых конденсатора отличается от ХИТ (аккумулятора). Это определено принципиальной причиной. Заряд и разряд аккумулятора обусловлен электрохимической реакцией, которая протекает при приблизительно постоянном напряжении (при приблизительно постоянном потенциале). Заряд же и разряд конденсатора обусловлены накоплением электростатической энергии в соответствии с формулами, приведенными выше. По этой же причине скорость заряда и разряда конденсатора может на многие порядки превышать соответствующие скорости для аккумулятора, которые резко ограничены скоростью химических и фазовых превращений электродных веществ.

Максимальная энергия, накапливаемая конденсатором, вычисляется по формуле:

$$W_{\max} = \int_0^{q_{\max}} U dq = \int_0^{q_{\max}} \frac{q}{C} dq = \frac{q_{\max}^2}{2C} = \frac{CU_{\max}^2}{2}$$

Рассмотрим **<u>виды электрохимических конденсаторов</u>**.

1. <u>Электролитические конденсаторы</u>

Известны несколько десятков лет. Изготавливаются анодированием алюминиевой, танталовой, ниобиевой или титановой фольги, в результате чего она покрывается тонким диэлектрическим слоем оксида. Вторая обкладка конденсатора – электролит. Электролитические конденсаторы только по способу изготовления связаны с электрохимией.

Напряжение пробоя оксида ~ 10^7 В/см. Рабочее напряжение конденсатора может быть до ~ 10^3 Вольт.

2. <u>Двойнослойные конденсаторы (ДСК).</u>

Первый патент получен в 1957 года. Это уже настоящие электрохимические конденсаторы. Основаны на использовании емкости двойного электрического слоя (ДЭС), существующего на границе электрод | электролит. Емкость ДЭС в водных растворах составляет ~20 мкФ/см^2 = 0.02 Ф/см^2.

В ДСК два пористых поляризуемых электрода находятся в инертном электролите. Материал электродов – обычно различные виды углерода:

активированный уголь, углеродная ткань, стеклоуглерод, углеродный аэрогель, графит и д.р. Электролит – водные растворы простых устойчивых ионогенных соединений, таких как NaCl, KOH, H_2SO_4, NaF и др. При типичной площади поверхности активированного угля 1000 – 3000 $м^2$/г, получаем емкость 20 – 60 Ф/г. По сравнению с обычными конденсаторами – это гигантские величины. Циклируемость 10^5 – 10^6 циклов. Напряжение – низкое, обычно ±1 В. С органическими электролитами (например, растворитель ПК) получается больше, например ±2.5 В. Габариты ДСК самые разные, вес от 1 грамма до десятков килограмм.

3. Псевдоконденсаторы (ПсК) или суперконденсаторы на основе псевдоемкости

Эти варианты уже ближе к перезаряжаемым ХИТ. Содержат два твердых электрода, которые могут быть одинаковыми. Заряд накапливается в них за счет фарадеевского процесса достаточно обратимой редокс-реакции, плюс добавляется емкость ДЭС. Поэтому емкость получается значительно больше, чем у ДСК.

Например, используется внедрение (и обратная экстракция) ионов водорода в гидроксид рутения $HRuO_2$

4. Гибридные конденсаторы (ГК)

Представляют собой переходный вариант между аккумулятором и конденсатором. В ГК один электрод взят от ХИТ, а другой – от конденсатора.

Задача: расход энергии «СБ – аккумулятор»

Небольшая домашняя осветительная система питается от аккумуляторной батареи напряжением U, В. Освещение включается каждый вечер на 4 часа, потребляемый ток I, А. Какой должна быть солнечная батарея, чтобы зарядить аккумулируемую батарею, если известно, что кремниевый элемент имеет ЭДС E = 0,5 В при токе 0,5А. Расход энергии на заряд батареи 20% больше, чем энергия отдаваемая потребителю при разряде.

U, В	I, А
8	3,0
9	2,5
10	3,0
11	3,5

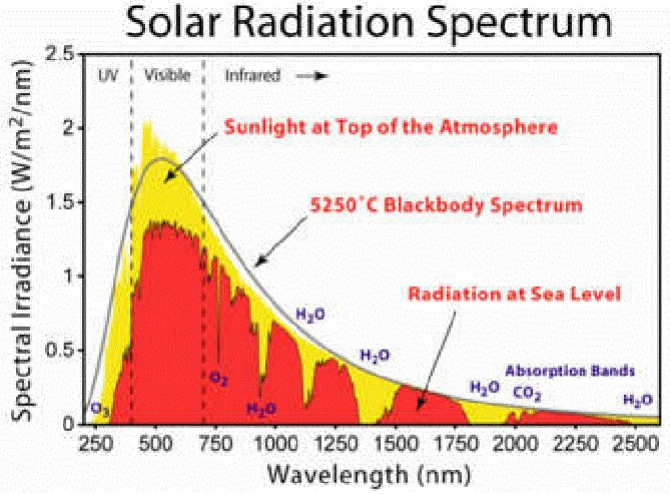
12	4,0
8	2,5
9	3,0
10	3,5

Контрольные вопросы

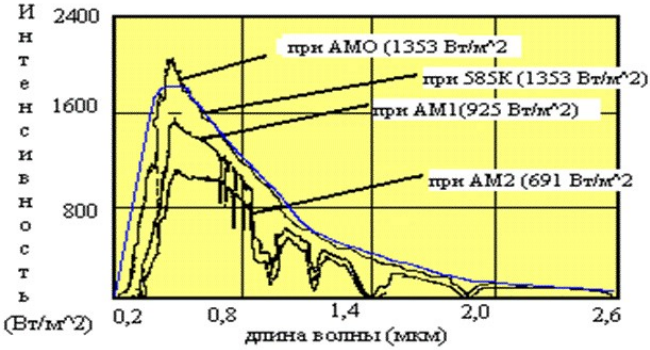
1. Что такое ХИТ?
2. Какие бывают виды химических источников тока? В чем их преимущества и недостатки?
3. Какие характеристики существуют у химических источников тока?

2. Солнечная энергетика

Источником энергии солнечного излучения служит термоядерная реакция – каждую секунду на Солнце ~$6*10^{11}$ кг водорода превращается в гелий. Дефект массы при этом составляет 4000 кг, что согласно соотношению Эйнштейна $E=mc^2$ приводит к выделению $4*10^{20}$ Дж энергии. Основная часть этой энергии испускается в виде электромагнитного излучения в диапазоне 0,2–3 мкм. Поскольку полная масса Солнца ~$2*10^{30}$ кг, оно должно пребывать в достаточно стабильном состоянии свыше 10 млрд. лет с постоянным выделением энергии. Интенсивность солнечного излучения в свободном пространстве на удалении, равном среднему расстоянию между Землей и Солнцем, называется солнечной радиацией. Ее величина – 1353 Вт/м2



Спектр излучения Солнца, наблюдаемый выше атмосферы Земли и на уровне моря



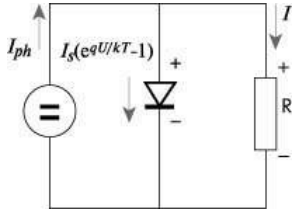
Атмосферная масса (AM)— это длина пути, который проходит свет через атмосферу, отнесенная к кратчайшему возможному пути (когда Солнце находится в зените). Атмосферная масса показывает на сколько уменьшилась спектральная плотность потока излучения после прохождения через атмосферу и поглощения воздухом и пылью. Атмосферная масса определяется, как

$$AM = \frac{1}{cos(\theta)}$$

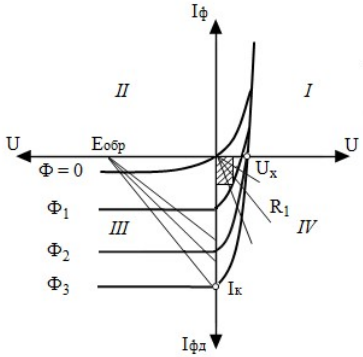
где θ — это угол, отсчитываемый от вертикали (зенитный угол). Когда Солнце находится прямо над головой, θ = 90° и атмосферная масса равна 1:

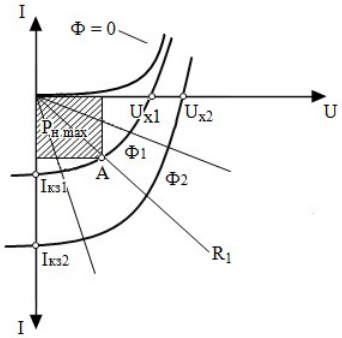
- AM0 – на орбите
- AM1 (0°) - зенит
- AM1.1 (25°)
- AM1.5 (48,2°)
- AM2 (60°)
- AM3 (70°)

Схема замещения фотоэлемента:



Вольтамперная характеристика фотоэлемента:

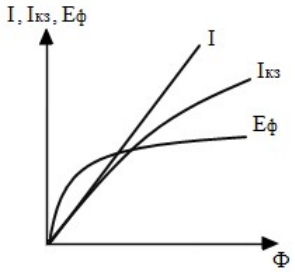




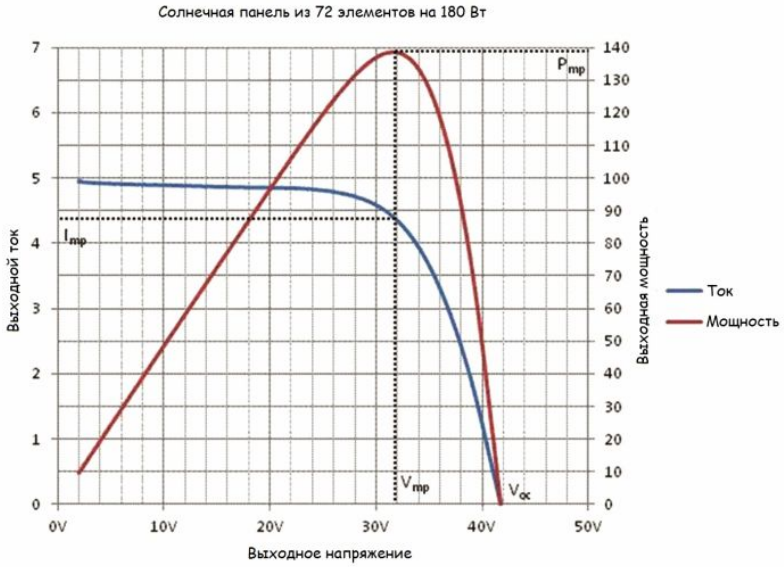
КПД фотодиода:

$$КПД = \frac{P_{max}}{P_{солнца}}$$

Световые (энергетические) характеристики фотодиода



Вольтамперная и ваттамперная характеристики солнечной панели



Задача: площадь солнечной батареи

Плотность потока излучения, падающего на солнечную батарею, составляет G, Вт/м^2, КПД, η %. Какую площадь F должна иметь солнечная батарея с КПД η и мощностью P, Вт.

G, Вт/м^2	η, %
460	20
500	18
550	19
600	20
700	21
750	22

450	23
480	18

Задача: КПД солнечной батареи

Солнечная батарея состоит из (n) фотоэлементов, мощность каждого 1,5 Вт, размер 20·30 см. Определить КПД (η) солнечной батареи, если плотность потока G Вт/м^2.

n, шт	G, Вт/м^2
900	500
1000	450
1100	550
1200	600
1300	650
1400	700
1500	750
600	450

Задача: ЭДС солнечной батареи

Площадь солнечной батареи S, м^2, плотность тока i, А/см^2, плотность излучения G, Вт/м^2. Определить ЭДС в солнечной батарее при КПД η.

S, м^2	i, А/см^2	G, Вт/м^2	η
0,25	$3\cdot10^{-3}$	300	0,3
0,3	$2\cdot10^{-8}$	400	0,25
0,4	$4\cdot10^{-3}$	500	0,26
0,5	$1\cdot10^{-2}$	400	0,27
0,6	$2\cdot10^{-2}$	450	0,28
0,7	$3\cdot10^{-2}$	500	0,29
0,8	$4\cdot10^{-2}$	550	0,3
0,9	$5\cdot10^{-2}$	600	0,25

Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на приходящее солнечное излучение?
2. Что такое атмосферная масса?
3. Характеристики фотодиода
4. Строение солнечной батареи
5. Характеристики солнечной батареи

3. Ветроэнергетика

Для определения характеристик ветра, используемых в ветроэнергетике используются следующие термины:

- **среднегодовая скорость ветра** (average annual wind speed) – средняя скорость ветра за год в конкретной местности, определяемая для заданной высоты над уровнем земной поверхности;
- **распределение скоростей ветра** (wind distribution) – функция статистической закономерности частот вариаций скоростей ветра за определенный период времени, аппроксимирующая статистические данные наблюдений;
- **роза скоростей ветра** (wind rose) – векторная диаграмма, характеризующая режим ветра в данном пункте, с длинами лучей, расходящихся от центра в разных направлениях относительно стран света, пропорциональными повторяемости скоростей ветра для этих направлений;
- **роза энергии ветра** (wind energy rose) – векторная диаграмма, характеризующая распределение удельной мощности ветра по направлениям за определенный период времени, с длинами лучей, расходящихся от центра в разных направлениях относительно стран света, пропорциональными удельной мощности ветра.

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ, wind power plant) – комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для преобразования энергии ветра в другие виды энергии (механическую, тепловую, электрическую и др.).

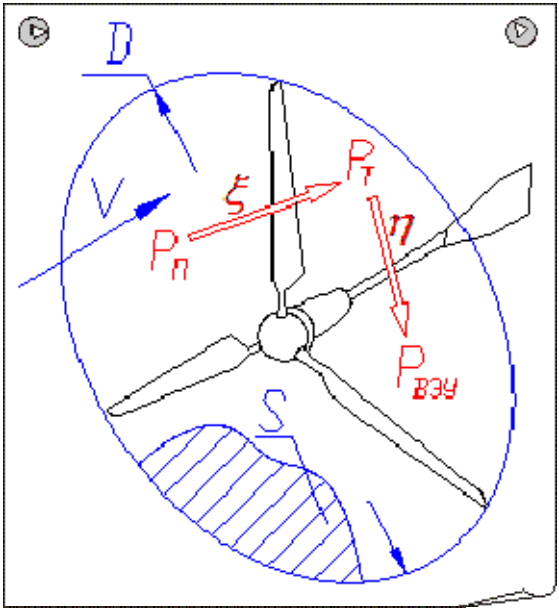
ВЭУ подразделяют на: горизонтально-осевые ветродвигатели и вертикально-осевые ветродвигатели.

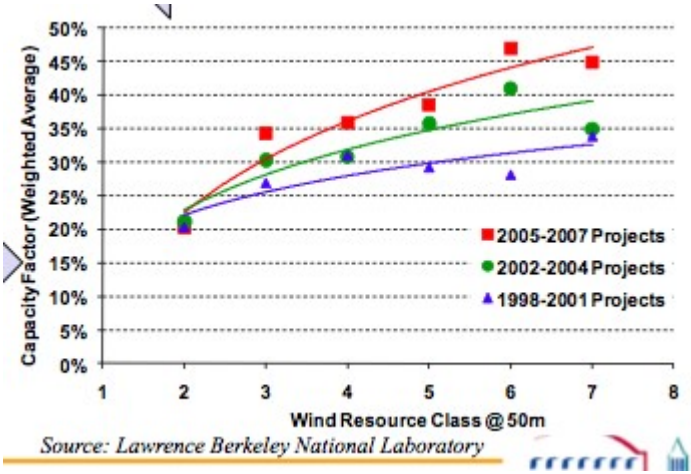
Расчет ветрогенератора.

$$P_{\text{П}} = \frac{mv^2}{2 \cdot t} = \frac{\rho Sxv^2}{2t} = \frac{\rho Sv^3}{2} = \rho \pi R^2 \frac{v^3}{2}$$

$$R = 1 \text{ м}$$

$$P_{\text{П}} = 1,25 \cdot 3,14 \frac{125}{2} = 245 \text{ Вт}$$





Задача: ветрогененатор.

Радиус ветроколеса R, м, скорость ветра до колеса V_0, м/с, после колеса V_2, м/с. Определить: скорость ветра в плоскости ветроколеса V_1, мощность ветрового потока P_0, мощность ветроустановки P и силу F, действующую на ветроколесо. = Плотность воздуха ρ=1,2кг/м^3.

R, м	V_0, м/с	V_2, м/с
4	10	5
6	11	6
8	12	4
10	13	8
12	14	7
15	15	8
20	6	3
25	7	3

Контрольные вопросы

1. Что такое ветрогенератор?
2. Какие бывают ветрогенераторы?
3. Характеристики ветрогенераторов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белецкий, А. Ф.* Теория линейных электрических цепей : учебник. – 2-е изд. / А. Ф. Белецкий. – СПб. : Издательство «Лань», 2009. – 544 с.

2. *Бакалов, В. П.* Основы теории цепей : учебник для вузов ; 3-е изд. / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. Н. Крук. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 596 с.