



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Cooperation Office in the Kyrgyz Republic
Кыргыз Республикасындагы Кызматташтык боюнча Швейцариялык Бюро
Швейцарское Бюро по сотрудничеству в Кыргызской Республике



European Bank
for Reconstruction and Development



Empowered lives.
Resilient nations.

Ветроэнергетические установки

Валерий Павлович Пантелеев

(зав. лаб. ВИЭ КРСУ)

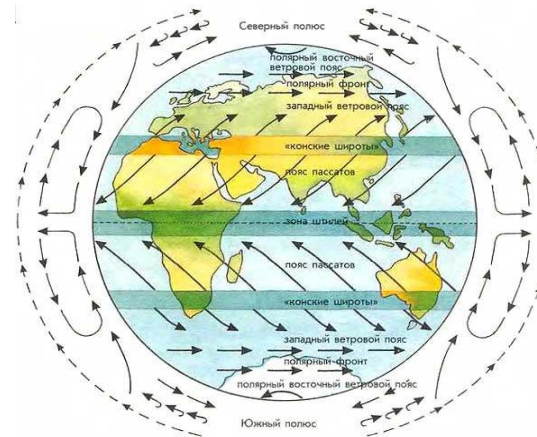
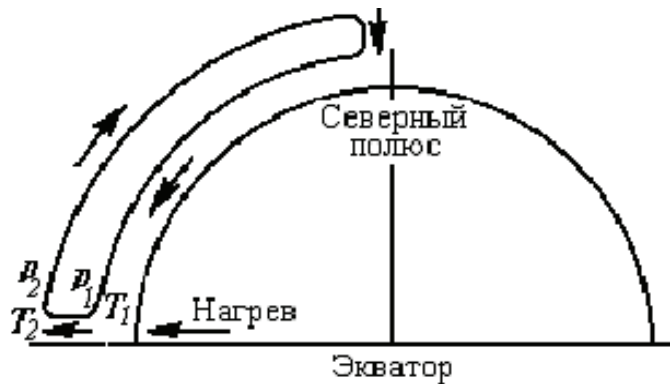
Тренинг Центра развития ВИЭ и
энергоэффективности

Бишкек, 27 -30 апреля 2013

Ветроэнергетические установки

- 1. Энергетический потенциал ВЭУ и физические основы его использования
- 2. Ветроэнергетические установки
расчет мощности ветрового потока.
- 3. ВЭУ коммунально-бытового назначения
- 4. Энергетические характеристики ВЭУ
- 5. Расчет и проектирование ветроэнергетических установок
- 6. Монтаж и эксплуатация ветроэнергетических установок.
- 7. Особенности монтажа и эксплуатации ВЭУ

Формирование ветра

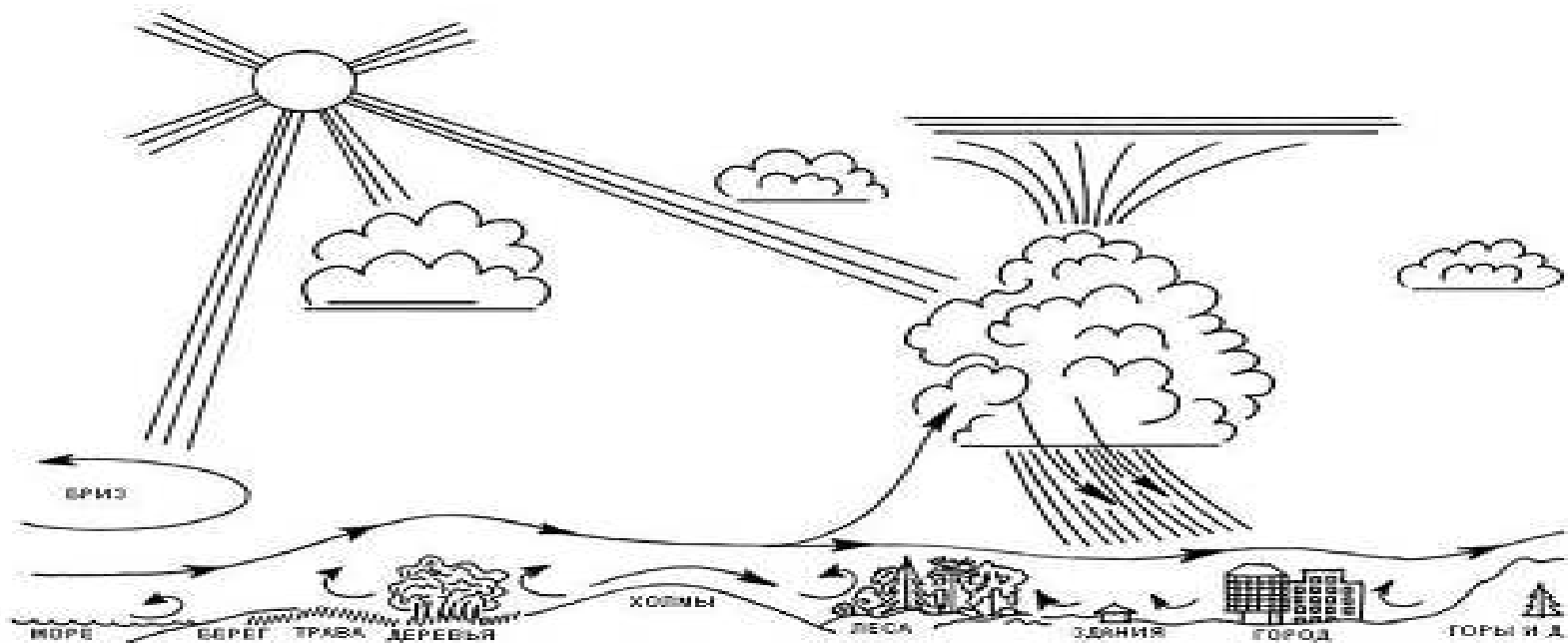


Воздух, нагреваясь возле поверхности земли, поднимается вверх, так как его удельный вес при нагревании становится меньше. Это вертикальное движение воздуха является первичным и основным в ряду последовательных процессов, вызывающих появление ветра.

Первопричиной образования ветра, так же как и многих других динамических явлений, происходящих на поверхности земли и в ее атмосфере, является энергия солнца.

- Воздух, нагреваясь возле поверхности земли, поднимается вверх, так как его удельный вес при нагревании становится меньше. Это вертикальное движение воздуха является первичным и основным в ряду последовательных процессов, вызывающих появление ветра. Последовательность процессов движения воздуха от нагрева к охлаждению и снова к нагреву и т. д. по мере его движения относительно вращающейся вокруг оси поверхности земли во времени и пространстве приводит к возникновению атмосферной циркуляции

Суммарная кинетическая энергия ветров оценивается величиной
порядка $0,7 \cdot 10^{21}$ Дж



- Схематичное изображение влияющих на ветер внешних факторов
- Скорость ветра увеличивается с высотой, а их горизонтальная составляющая значительно больше вертикальной. Последнее обстоятельство является основной причиной возникновения резких порывов ветра и некоторых других мелкомасштабных эффектов.

Циркуляционные изменения направления движения воздушных масс обусловлены влиянием океанских течений – холодных и теплых, рельефом местности и множеством других циклических и случайных факторов

- Ветер характеризуется скоростью, направлением и силой. Скорость ветра измеряется в метрах в секунду (м/с), километрах в час (км/ч), баллах (по шкале Бофорта от 0 до 12, в настоящее время до 13 баллов). Скорость ветра зависит от разницы давления и прямо пропорциональна ей: чем больше разность давления (горизонтальный барический градиент), тем больше скорость ветра. Средняя многолетняя скорость ветра у земной поверхности 4-9 м/с, редко более 15 м/с. В штормах и ураганах (умеренных широт) - до 30 м/с, в порывах до 60 м/с. В тропических ураганах скорости ветра достигают до 65 м/с, а в порывах могут достигать 120 м/с.
- Направление ветра определяется той стороной горизонта, с которой дует ветер. Для его обозначения применяется восемь основных направлений (румбов): С, СЗ, З, ЮЗ, Ю, ЮВ, В, СВ. Направление зависит от распределения давления и от отклоняющего действия вращения Земли.
- Сила ветра зависит от его скорости и показывает, какое динамическое давление оказывает воздушный поток на какую-либо поверхность. Сила ветра измеряется в килограммах на квадратный метр (кг/м²).

Измерение скорости ветра

- Скорости ветра замеряют с помощью приборов, называемых анемометрами. Анемометр (от греческого анемос – ветер, и метрео – измерение) — измерительный прибор, предназначенный для определения скорости ветра, а также для измерения скорости направленных воздушных и газовых потоков.
- Средние скорости ветра за короткие и продолжительные промежутки времени удобно определять анемометром завода «Метрприбор». Он состоит из крестовины с полушариями, надетой на ось, которая находится в зацеплении с зубчатой передачей, помещенной в коробке с циферблатом.

Механический анемометр состоит из крестовины с полушариями, надетой на ось, которая находится в зацеплении с зубчатой передачей, помещенной в коробке с циферблатом.



а) Механический анемометр завода



б) цифровой анемометр

Средние скорости ветра за короткие и продолжительные промежутки времени удобно определять анемометром завода «Метеоприбор».

Разделив число, показываемое стрелками на циферблате, на число секунд, в течение которых вращался анемометр, получим скорость ветра в секунду за наблюдаемый период.

Цифровые приборы, как правило, отображают цифровое значение скорости ветра в требуемых величинах сразу.

Порядок обработки результатов измерений

- Результаты измерений скорости ветра V_1 , м/с, объединяются в группы с интервалом ΔV . Определяется общее число измерений N .
- Поскольку измерения скорости могут проводиться на высоте h_1 , а для оценки энергетического потенциала нужна скорость ветра V , м/с, на высоте предполагаемой установки ветротурбин h , определение скорости ветра на высоте h выполняется с помощью известной аппроксимационной зависимости

$$V = V_1 \cdot \left(\frac{h}{h_1} \right)^{\frac{1}{5}}$$

- где h - определяется из предварительных расчетов (если, например, известен диаметр колеса ветроагрегата).

$$\Phi_V = \frac{N_{V_i}}{N}$$

- где N_{V_i} - число измерений в i -ом скоростном интервале.
- Строится зависимость $\Phi_V = f(V)$. Произведение $\Phi_V \cdot \Delta V$ может быть интерпретировано как часть времени года, в течение которого скорость ветра имеет значения, заключенные в интервале от V до $V + \Delta V$.

Порядок обработки результатов измерений

Среднее значение скорости ветра V_c , м/с, определяется соотношением:

$$V_c = \frac{\sum V_i}{N}$$

- где $\sum V_i$ – сумма всех измеренных значений скорости.
- Определяется вероятность $> V'$ появления ветра со скоростью V , большей некоторой заданной скорости V' , для чего складываются вероятности всех скоростных интервалов, в которых $V > V'$
- Вероятность $> V'$ может быть интерпретирована как часть времени года, в течение которого ветры дуют со скоростью, V' .
- Строится зависимость $\Phi_{V > V'} = f(V)$.
- Пользуясь построенной зависимостью $\Phi_V = f(V)$. Необходимо сравнить среднее значение скорости ветра с наиболее вероятным значением скорости ветра в данной местности, а также с расчетной скоростью, принимаемой для проектирования ВЭУ ($V = 10 - 12$ м/с).

Сила ветра по шкале Бофорта

	Характеристика силы ветра	Скорость ветра, м/с	Наблюдаемые эффекты
0	Штиль	0...0,2	Дым из труб поднимается вертикально
1	Тихий	0,4 ...1,8	Дым поднимается не совсем отвесно, но флюгеры неподвижны. На воде появляется рябь
2	Легкий	1,8...3,6	Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливое волнение
3	Слабый	3,6...5,8	Колеблются листья на деревьях, развеваются легкие флаги, на отдельных волнах появляются гребни
4	Умеренный	5,8...8,5	Колеблются тонкие ветки деревьев, поднимается пыль и клочки бумаги, на воде много гребней

Продолжение таблицы Бофорта

5	Свежий	8,5...11	Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в гребнях
6	Сильный	11...14	Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн
7	Крепкий	14...17	Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена
8	Очень крепкий	17...21	Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочья пены
9	Шторм	21...25	Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы
10	Сильный шторм	25...29	Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем

Принципы реализации ветроэнергетических установок

- Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) – это комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для преобразования энергии ветра в другие виды энергии (механическую, тепловую, электрическую и т. п.). Поэтому ветроэнергетические установки по назначению можно подразделить на:
 - ветро-механические, обеспечивающие привод механизмов;
 - ветро-тепловые, производящие тепло;
 - ветро-электрические, служащие для производства электроэнергии.
- Преобладающее значение в промышленной ветроэнергетике имеют ветроэлектрические установки, в результате чего аббревиатура ВЭУ отнесена в основном к ветроэлектрическим установкам.
- Использование ВЭУ для привода дробилок, насосов, компрессоров, генераторов и т.д., а также для запасания (аккумулирования) преобразованной энергии ветра в тепловых аккумуляторах, ресиверах, химических аккумуляторах и т.п.

Классификация ветроэнергетических установок

Ветроэнергетические установки (ВЭУ), классифицируют по следующим признакам:

- мощности — малые, средние, крупные, сверхкрупные;
- числу лопастей рабочего колеса — одно-, двух-, трех- и многолопастные;
- отношению рабочего колеса к направлению воздушного потока — с горизонтальной осью вращения, параллельной или перпендикулярной вектору скорости (ротор Дарье).

В случае автономной работы ВЭУ аккумулятор становится неотъемлемой частью ветроэнергетической системы и делает возможным использование преобразованной энергии ветра даже в безветренную погоду. А во время работы ВЭУ делает возможным кратковременное использование преобразованной энергии большей мощности, чем мощность ВЭУ.

- Срок службы ветрогенераторов обычно не менее 15 – 20 лет, а их стоимость колеблется от 1000 до 1500 долл. США за 1 кВт проектной мощности.

Классификация ВЭУ по мощности

маломощные установки 30 – 5000 Вт	Применяются как зарядные устройства для аккумуляторных систем и создания локальных электрических сетей в местах, где нет доступа к общей энергосистеме. (рис.1)
установки средней мощности 5 – 100 кВт	Также чаще всего применяются для электропитания изолированных хозяйственных объектов (рис. 2).
установки большой мощности 100 кВт – 5 МВт	Установки большой мощности (100 кВт – 5 МВт) и гигантские ветроустановки используются для коммерческой выработки электроэнергии с поставкой ее в электросети, чаще всего в виде ветропарков, образующих ветроэлектростанции (рис. 3).
установки гигантской мощности Более 5 МВт	

Общий вид маломощных автономных ветроустановок

ВЭУ с опорой на растяжках



ВЭУ средней мощности

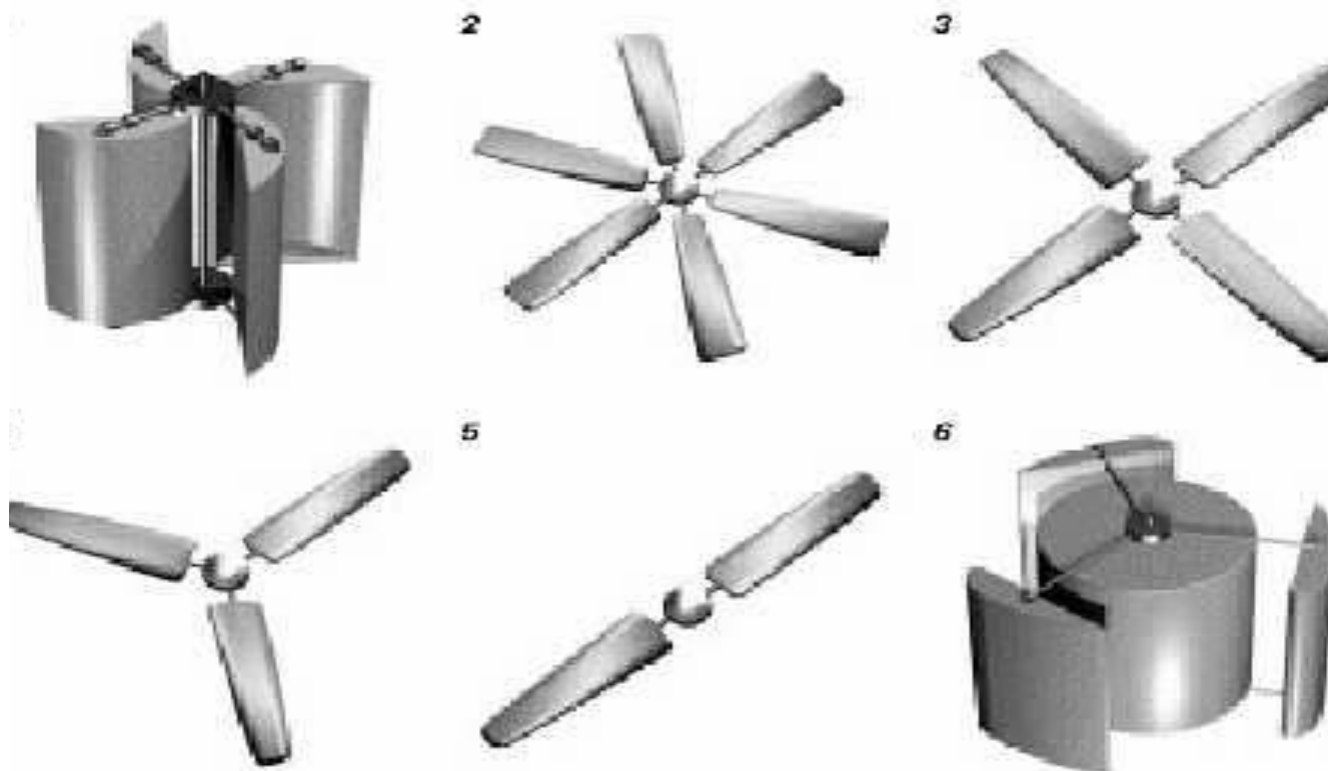
ВЭУ с цельнометаллической опорой.



ВЭУ большой и гигантской мощности

ВЭУ, установленная в море, что обеспечивает равномерный поток ветра.



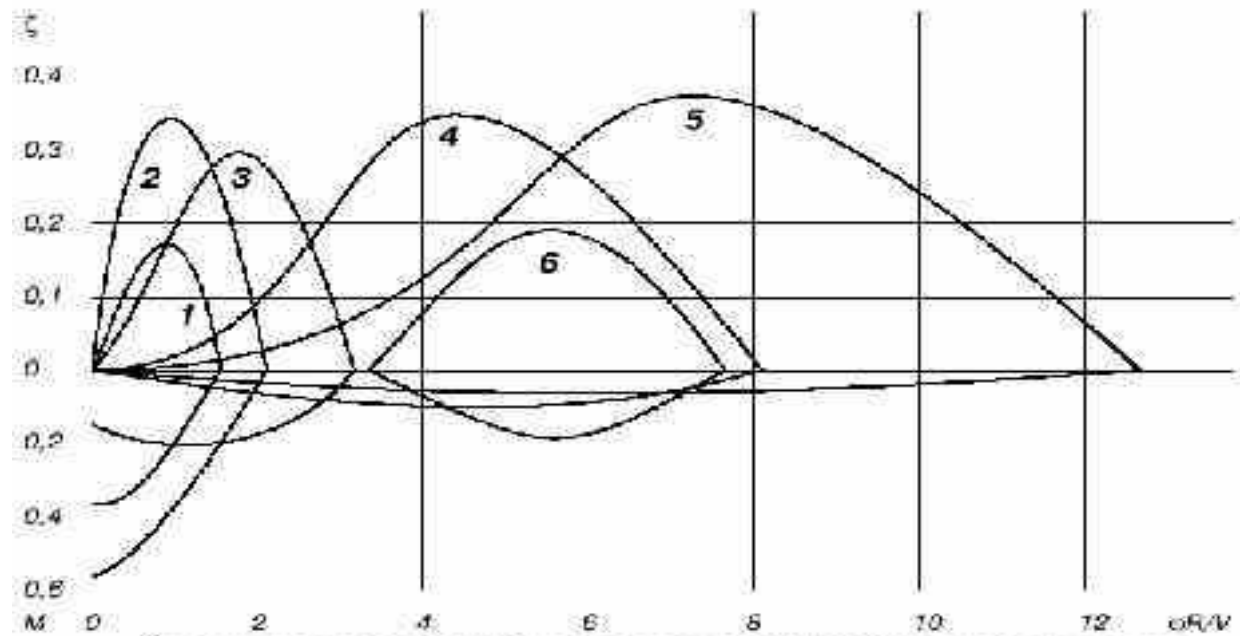


Основные разновидности ветроагрегатов

ветродвигатели с горизонтальной осью вращения (крыльчатые 2...5);

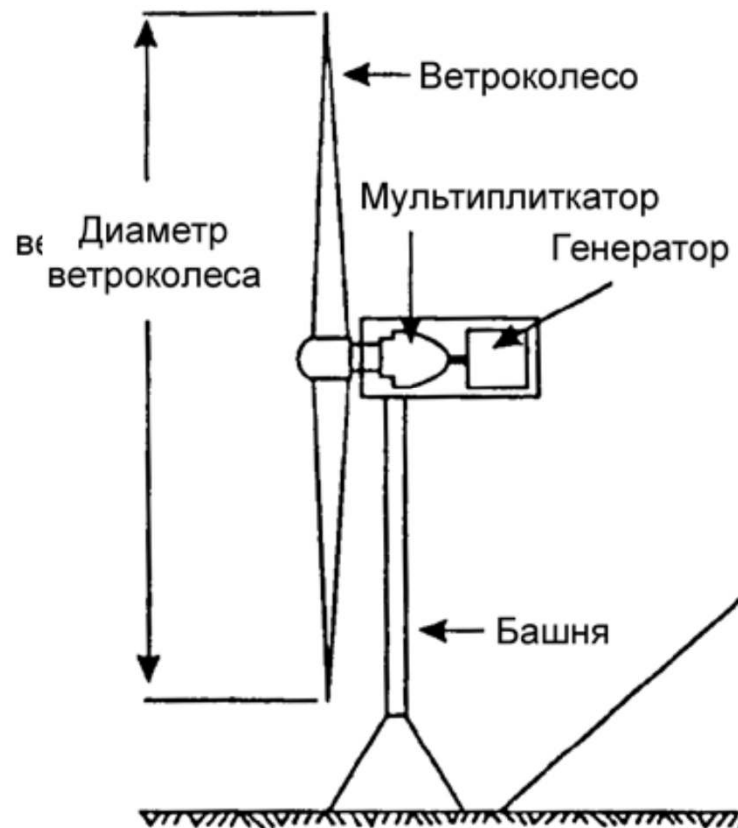
ветродвигатели с вертикальной осью вращения (карусельные:
лопастные 1 и ортогональные 6).

Коэффициенты использования энергии ветра для различных типов ветродвигателей

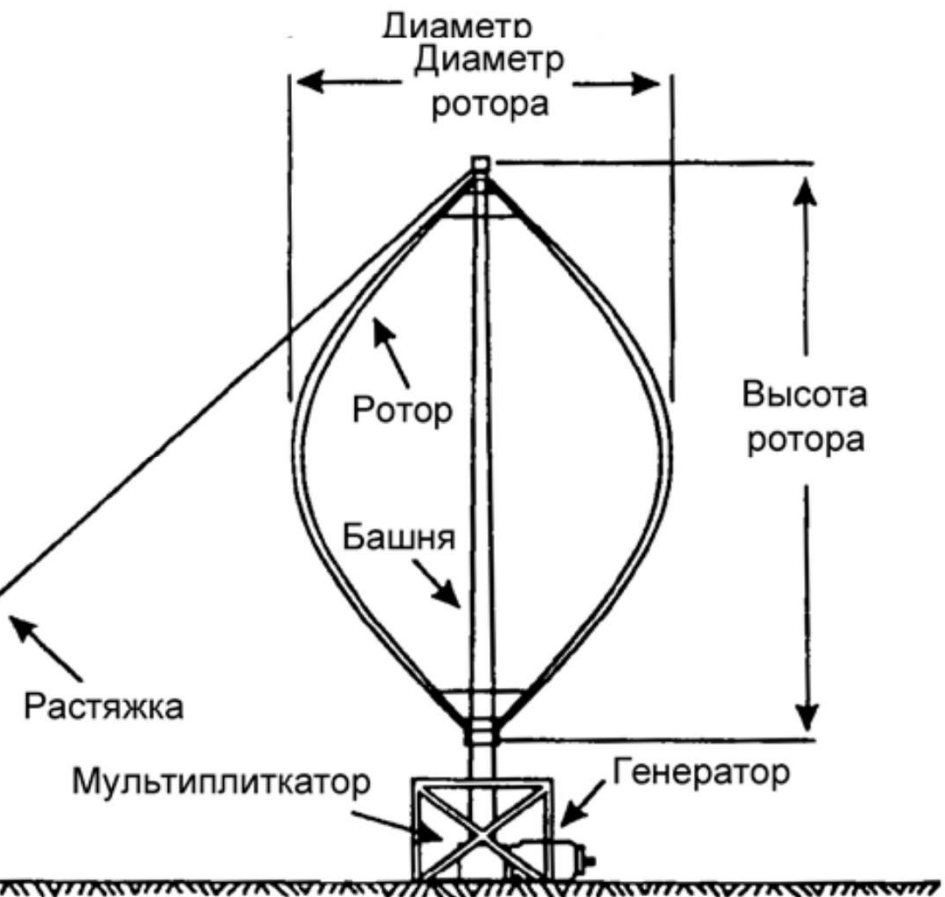


Коэффициент использования энергии ветра в зависимости от вращающего момента и типа ветродвигателя

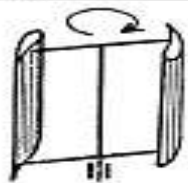
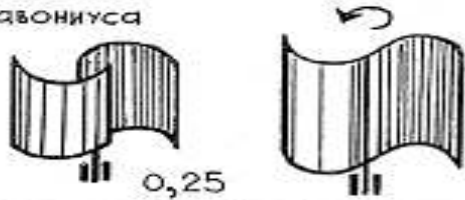
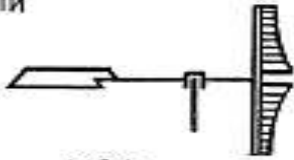
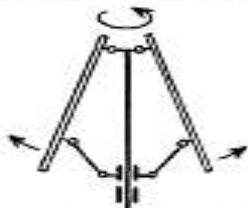
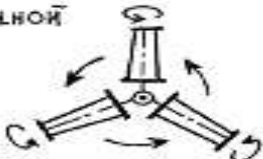
горизонтально-осевой
ветродвигатель



вертикально-осевой
ветродвигатель



Конструктивные модели ветродвигателей ВЭУ автономных технологических объектов с невысокими потребляемой мощностью и качеством энергии.

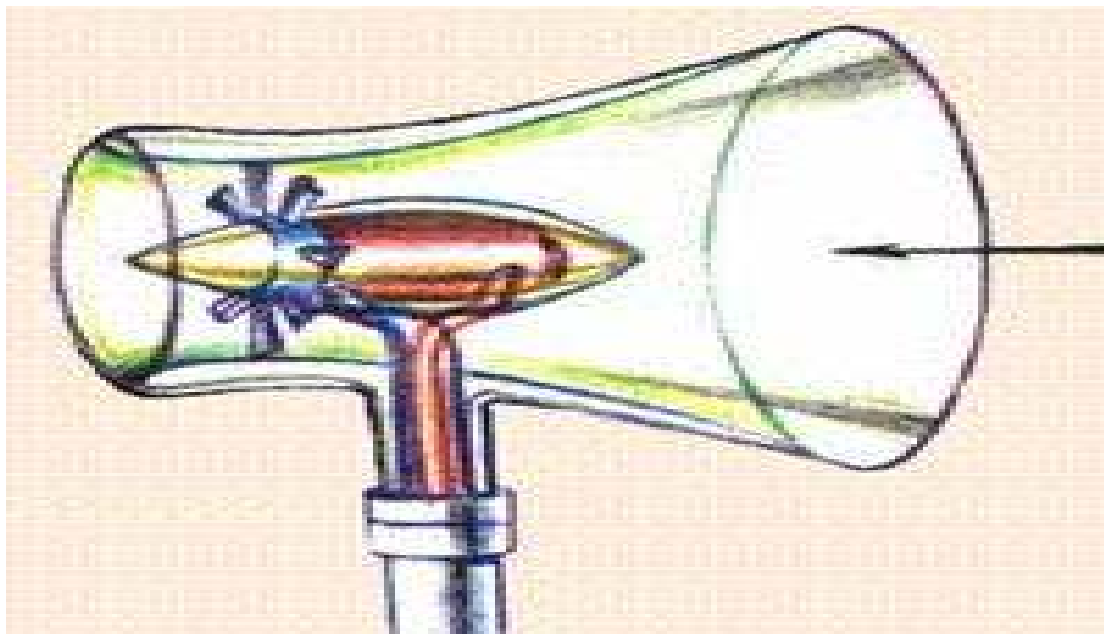
Репеллерный  0,35 0,40	Ортогональный  0,30
Репеллерный с вихреобразователем  0,45 0,50	Савониуса  0,25
Многолопастный  0,25	Дарье  0,35
Парусный  0,30	Мак-Гроув  0,35
Роторноприводной Флетнера  0,20	Геликоидный  0,40

Концентраторы воздушного потока

Мощность ветроэнергоустановки зависит от эффективности использования энергии воздушного потока. Одним из способов ее повышения является использование специальных концентраторов (усилителей) воздушного потока. Для горизонтально-осевых ветроэлектродвигателей разработаны или предложены различные варианты таких концентраторов. Это могут быть диффузоры или конфузоры (дефлекторы), направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади, большей семаемой площади ротора, и некоторые другие устройства. Широкого распространения в промышленных установках концентраторы пока не получили.

Форма диффузора такого ветродвигателя очень похожа на сопло ракеты и реактивного сверхзвукового самолета. Такая форма сопла позволяет вначале разогнать поток воздуха до очень высокой скорости, которая после прохождения самого узкого сечения вместо торможения продолжает нарастать до сверхзвуковых значений.

Ветродвижитель, предложенный доктором технических наук Т.Д. Каримбаевым
(завод ЛОЭМ "Красная звезда")



Характеристики такой конструкции ветроколеса. поразительны. За год ветродвижитель этого типа успевает "поймать" в 4 - 5 раз больше энергии, чем обычный. Очень ценна для этого варианта еще одна его особенность - высокая скорость вращения. Достигается она с помощью диффузора. В узкой его части воздушный поток особенно стремителен, благодаря чему генератор набирает немыслимые для ветряков обычной схемы обороты даже при сравнительно слабом ветре.

Расчет мощности ветрового потока

Мощность ветрового потока, действующего на ветроколесо, определяется по формуле :

$$P_0 = C_p \cdot \left(\frac{\rho \cdot A \cdot V_0^3}{2} \right)$$

- где A – площадь, ометаемая ветроколесом, м^2 ;

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

- D – диаметр ветроколеса, м.
- V_0 – скорость ветрового потока, м/с;
- C_p – коэффициент отбора мощности, зависит от конструкции ветроколеса и скорости ветра (0,35-0,5);
- ρ – плотность набегающего потока (воздуха), на уровне моря $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Теоретически с 1 м^2 в зависимости от скорости ветра и типа ветроколеса может быть использовано около 57% ветровой энергии, практически — не более 33%. Долю мощности ветрового потока, которую может использовать ветроколесо и показывает коэффициент отбора мощности C_p

Из этой формулы видно, что мощность P пропорциональна ометаемой площади A и кубу скорости ветрового потока.

Расчет мощности ВЭУ

Для практических расчетов, если известна среднегодовая скорость ветра $V_{ср}$, рекомендуется следующая формула, в которой учтен соответствующий повышающий коэффициент (около 1,91).

$$P_0 = 1,17 \cdot A_0 \cdot V_{ср}^3$$

Современные ВЭУ в соответствие с физическими представлениями о преобразовании энергии ветрового потока в энергию вращения ВК изначально могут использовать только часть ветровой энергии (критерий Бетца, около 0,59 от общей энергии). Кроме этого, надо учитывать и конструктивное исполнение ВЭУ, что сказывается, например, на величине начальной (стартовой) скорости ветра (обычно 3-4 м/с), при которой ветроколесо начинает вращаться и соответственно ВЭУ начинает вырабатывать электроэнергию.

Поэтому в формулу для расчета средней развиваемой мощности ВЭУ ($P_{ВЭУ}$) вводится некий понижающий коэффициент $C_p^{ВЭУ}$, с помощью которого учитываются главные факторы, определяющие фактическую мощность ВЭУ.

В общем случае количество электроэнергии, вырабатываемой ВА, зависит от КПД генератора и редуктора, а при определении количества электроэнергии, подаваемой потребителю от ВЭУ, следует учитывать также потери энергии в подводящем кабеле, инверторе и аккумуляторной батарее (АБ). С учетом названных факторов в практических расчетах может снизиться до 0,25

Развиваемая мощность ВЭУ

- Таким образом, среднюю развиваемую мощность ($P_{\text{п}}^{\text{вэу}}$) ВЭУ, отвечающую запросам потребителя, рекомендуется рассчитывать по формуле

$$P_{\text{п}}^{\text{вэу}} = 1,17 \cdot C_{\text{р}}^{\text{вэу}} \cdot A_{\text{вк}} \cdot V_{\text{ср}}^3$$

- где $A_{\text{вк}}$ – площадь ветрового потока, «ометаемая» ВК;
- $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость ветра за расчетный период, м/с (определяется географическим положением места установки ВЭУ).
- Мощность $P_{\text{п}}^{\text{вэу}}$ обычно существенно отличается от так называемой установленной мощности ВЭУ ($P_{\text{уст}}^{\text{вэу}}$). Под установленной мощностью обычно понимается номинальная мощность, обеспечиваемая генератором ВА при некоторой расчетной скорости ветра (для современных ВЭУ). Поэтому в соответствии с формулами (1) и (3) для вычисления установленной мощности ВЭУ ($P_{\text{уст}}^{\text{вэу}}$) (номинальной мощности генератора) следует использовать зависимость:

$$P_{\text{уст}}^{\text{вэу}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{р}} \cdot F_{\text{вк}} \cdot V_{\text{р}}^3$$

Годовая выработка электроэнергии ветроагрегатом

Установленная мощность $P_{уст}^{вэу}$ или номинальная мощность, обеспечиваемая генератором, вычисляется для того, чтобы в соответствие с полученным результатом подобрать марку ВЭУ, которая выпускается промышленностью.

Современные ВЭУ способны преобразовывать только около 25% полной мощности воздушного потока в полезную мощность, поэтому:

$$P_{ВЭУ} = 0,25 \cdot 1,17 \cdot A_{вк} \cdot V_{ср}^3$$

где: $P_{ВЭУ}$ – мощность на выходе ветроагрегата [Вт];

$A_{вк}$ – площадь поверхности, ометаемой ветроколесом [м²];

$V_{ср}$ – средняя скорость ветра на уровне ступицы ветроколеса [м/с]

Количество энергии, которую вырабатывает ветроагрегат за расчетный период времени можно определить следующим образом:

$$W = \frac{P_{ВЭУ} \cdot T}{1000}$$

где: W количество вырабатываемой энергии [кВт·ч];

T – расчетное время работы ветроагрегата [ч].

Среднее годовое количество энергии от ВЭУ

Среднее количество энергии, которую ветроагрегат выработает за год, находится по формуле:

$$W_{\text{сг}} = \frac{24 \cdot 365 \cdot P_{\text{вэу}}}{1000} = 2,56 \cdot A_{\text{вк}} \cdot V_{\text{сг}}^3$$

где: $W_{\text{сг}}$ – среднегодовая выработка энергии ветроагрегатом [кВт·ч/год];

$V_{\text{сг}}$ – среднегодовая скорость ветра [м/с]

Таким образом, для ветроагрегата среднегодовая выработка электроэнергии зависит от диаметра ветроколеса и среднегодовой скорости ветра.

Пример 1:

Определим среднегодовую выработку электроэнергии ветроагрегатом УВЭ-500 на метеостанции Тарагай в Иссык-кульской области

Диаметр ветроколеса УВЭ-500 находим из справочника ;

$$d_{\text{к}} = 2,2 \text{ м}$$

$$A_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4} = 3,8 \text{ м}^2$$

Продолжение 1 Примера 1 расчета годового потенциала ВЭУ

Среднегодовую скорость ветра для ВЭУ определим из СНиП Кыргызской Республики «Строительная климатология». 2000 г

$$V_{\text{ср}} = 5,0 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$$

$$V_{\text{ср}}^3 = 125 (\text{м/сек})^3$$

Определим среднегодовую выработку электроэнергии ветроагрегатом УВЭ-500

$$W_{\text{ср}} = 2,56 \cdot 3,8 \cdot 125 = 1216 \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{год}}$$

Пример 2:

Исходные данные:

- количество потребителей электроэнергии (крестьянских дворов) в населенном пункте: ; $M_{\text{п}} = 18$ потребителей
- норма выработки электроэнергии в расчете на одного потребителя в год:

$$n_{\text{п}} = 3600 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}$$

Продолжение 2 Примера 2 расчета годовой потребности электроэнергии

- время работы ВЭУ в течение года (τ), сутки: $\tau = 320$ сут в год
- средняя скорость ветра за время работы ВЭУ $V_{cp} = 4,9$ м/с
- расчетная скорость ветра, при которой обеспечивается установленная мощность ВЭУ: $V_p = 8,0$ м/с
- коэффициент мощности ВК, $C_p = 0,37$
- удельные капитальные вложения в 1 кВт установленной мощности ВЭУ:
 $k_n^{ВЭУ} = 1000$ долл./кВт

Определяются параметры:

- годовая потребность в электроэнергии ($E_C^П$) для всех потребителей населенного пункта $E_C^П = M_{п} \cdot n_{п} = 18 \cdot 3600 = 64800$ кВт · ч в год
- количество электроэнергии ($E_C^{ВЭУ}$), которое должно поступить от ВЭУ за время τ
$$E_C^{ВЭУ} = \frac{E_C^П \cdot \tau}{365} = \frac{64800 \cdot 320}{365} = 56811 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$
- средняя развиваемая мощность ВЭУ ($P_{п}^{ВЭУ}$),

$$P_{п}^{ВЭУ} = \frac{E_C^{ВЭУ}}{24 \cdot \tau \cdot \eta_{Г} \cdot \eta_{Р}} = \frac{56811}{24 \cdot 320 \cdot 0,95 \cdot 0,9} = 8,65 \text{ кВт}$$

Продолжение 3 Примера 2 расчета годовой потребности электроэнергии

где η_{Γ} – КПД генератора

η_P – КПД редуктора

требуемая мощность воздушного потока (P_0)

$$P_0 = \frac{N_{\Pi}^{\text{ВЭУ}}}{C_P} = \frac{8,65}{0,37} = 23,4 \text{ кВт}$$

где $C_P = 0,37$ – коэффициент мощности ВК ВЭУ;

радиус (R) ВК (если $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^3$)

$$R = \sqrt{\frac{N_0}{1,17 \cdot \tau \cdot V_{CP}^3}} = \sqrt{\frac{23,4 \cdot 10^3}{1,17 \cdot 320 \cdot 4,9^3}} = 7,4 \text{ м}$$

«ометаемая» площадь ($A_{\text{ВК}}$) ВК

$$A_{\text{ВК}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 14,8^2}{4} = 172 \text{ м}^2$$

– высота (H) башни ВЭУ

$$H = (1,3 \dots 1,7) \cdot D = 1,5 \cdot 14,8 = 22,2 \text{ м}$$

Продолжение 4 Примера 2 расчета годовой потребности электроэнергии

– установленная мощность ВЭУ ($P_{уст}^{ВЭУ}$) при заданной расчетной скорости ветра $V_p = 8 \text{ м/с}$

$$P_{уст}^{ВЭУ} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \eta_{\Gamma} \cdot \eta_p \cdot F_{вк} \cdot V_p^3 \cdot 10^{-3} = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,37 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 172 \cdot 8^3 \cdot 10^{-3} = 17,1 \text{ кВт};$$

– объем предотвращенной эмиссии углекислого газа ($V_{уг}^{ВЭУ}$), если выработка 1 кВт·ч электрической энергии на органическом топливе сопровождается выбросом 0,5кг CO₂

$$V_{уг}^{ВЭУ} = 0,5 \cdot E_c^{ВЭУ} = 0,5 \cdot 56811 = 28400 \text{ кг} = 28,4 \text{ т}$$

– пересчет электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, в тепловую энергию ($Q^{ВЭУ}$), если 1 кВт·ч = 860 ккал

$$Q^{ВЭУ} = E_c^{ВЭУ} \cdot 860 = 56811 \cdot 860 = 48,9 \cdot 10^6 \frac{\text{ккал}}{\text{год}}$$

– годовая экономия условного топлива ($B^{ВЭУ}$)

$$B^{ВЭУ} = \frac{Q^{ВЭУ}}{Q_p^n \cdot \eta_{ГЭС}} = \frac{48,9 \cdot 10^6}{7000 \cdot 0,35} = 19960 \text{ кг у.т.} = 20,0 \text{ т у.т.}$$

где Q_p^n – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива,

$$Q_p^n = 7000 \text{ ккал /кг у.т.}$$

Продолжение 5 Примера 2 расчета годовой потребности электроэнергии

$\eta_{ГЭС}$ – КПД традиционной энергоустановки, $\eta_{ГЭС} = 0,35$;

Вариант – ВЭУ + дизель-генераторная установка (ДЭС);

– общее ($t_{доп}^{ДЭС}$) и фактическое ($t_{фак}^{ДЭС}$) количество часов работы (ДЭС):

$$t_{доп}^{ДЭС} = 365 - \tau = 365 - 320 = 45 \text{ сут.} = 1080 \text{ ч}$$

$$t_{фак}^{ДЭС} = t_{доп}^{ДЭС} \cdot k_{ис}^{ДЭС} = 1080 \cdot 0,8 = 864 \text{ ч}$$

где $k_{ис}^{ДЭС} = 0,8$ – коэффициент использования установленной мощности ДЭС

– количество электроэнергии ($\Delta E_c^{ДЭС}$), которое поступает от ДЭС

$$\Delta E_c^{ДЭС} = E_c^п - E_c^{ВЭУ} = 64800 - 56811 = 7989 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

необходимая мощность ДЭС ($P_{тр}^{ДЭС}$)

$$P_{тр}^{ДЭС} = \frac{\Delta E_c^{ДЭС}}{t_{фак}^{ДЭС} \cdot \eta_{ак}} = \frac{7989}{864 \cdot 0,9} = 10,3 \text{ кВт}$$

где $\eta_{ак} = 0,9$ – КПД аккумуляторной батареи, от которой электроэнергию получает потребитель во время остановки ДЭС на техобслуживание.

Продолжение 6 Примера 2 расчета годовой потребности электроэнергии

В соответствии с [20] принимаем ближайшее большее значение установленной мощности ДЭС, в данном случае ДЭС марки АД-16С-Т400-1В установленной мощностью $P_{уст}^{ДЭС} = 16 \text{ кВт}$

Уточнение фактического времени работы ДЭС ($P_{уст}^{ДЭС} = 16 \text{ кВт}$) с учетом остановки на техобслуживание ($t_{ФАК}^{ДЭС}$):

$$t_{ФАК}^{ДЭС} = \frac{\Delta E_c^{ДЭС}}{P_{уст}^{ДЭС} \cdot \eta_{АК}} = \frac{7989}{16 \cdot 0,9} = 555 \text{ ч}$$

Оценку эффективности инвестиций в энергообеспечение изолированного потребителя рекомендуется выполнять для двух вариантов:

1 вариант – ВЭУ + дизель-генераторная установка (ДЭС);

2 вариант – вместо ВЭУ (+ДЭС) электроэнергия поступает от традиционной установки с такими же энергетическими показателями.

Ввиду ограниченности объема презентации остановимся на ключевом моменте при оценке эффективности инвестиций, а именно – выборе размера тарифа на электрическую энергию.

Продолжение 7 Примера 2 расчета годовой потребности электроэнергии

Совершенно естественно, что тариф ($b^{\text{ЭС}}$) зависит от мировых цен на нефть. Чтобы вычислить нижнюю границу тарифа, воспользуемся следующими зависимостями:

$$b^{\text{ЭС}} = \frac{123}{\eta_{\text{ЭС}}} = \frac{123}{0,35} = 351 \text{ г у.т./кВт}\cdot\text{ч} = 0,351 \text{ кг у.т./кВт}\cdot\text{ч} = 3,51 \cdot 10^{-4} \text{ т у.т./кВт}\cdot\text{ч}$$

где $\eta_{\text{ЭС}}$ – КПД традиционной электрической станции, ;

123 – теоретический эквивалент условного топлива, г. у. т/кВт·ч.

Далее находится удельная экономия затрат на топливе (ΔC_T) при устройстве ВЭУ +ДЭС вместо традиционной электрической станции

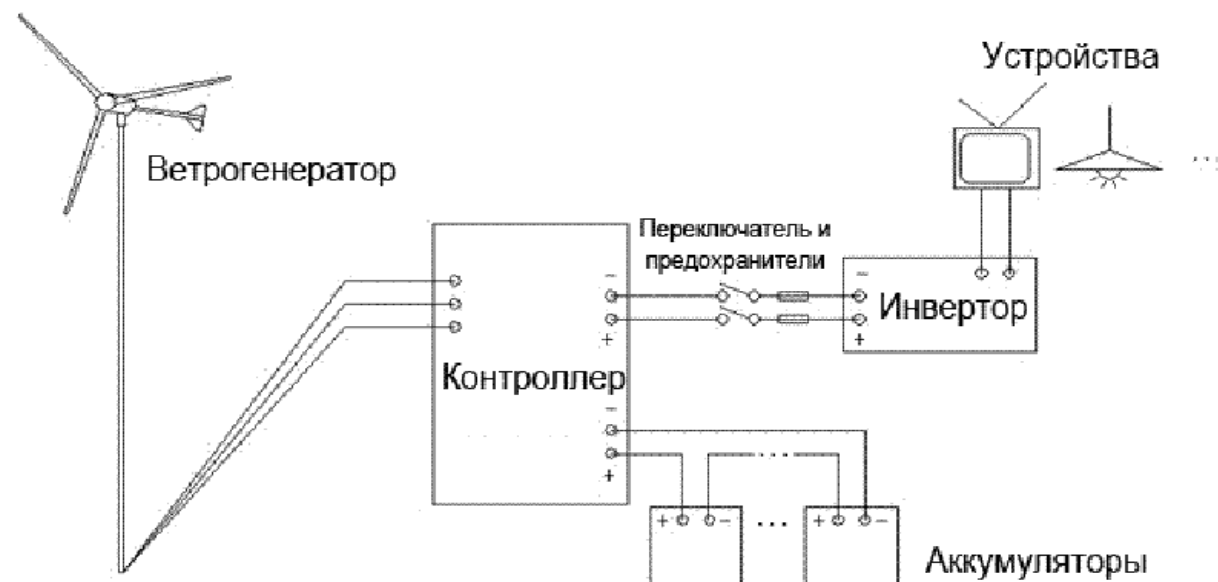
где $\Delta C_T = P_T \cdot b^{\text{ГЭС}} = 210 \cdot 3,51 \cdot 10^{-4} = 0,0737 \text{ долл./кВт}\cdot\text{ч}$,
– $P_T = 210 \text{ долл./т у.т.}$ стоимость единицы условного топлива (около 42 долл. за баррель);

– ΔC_T рассматривается как нижняя граница тарифа на электроэнергию, которая в отсутствие ВЭУ (+ДЭС) была бы выработана традиционной электрической станцией.

Примеры схем работы ветрогенератора ВЭУ.

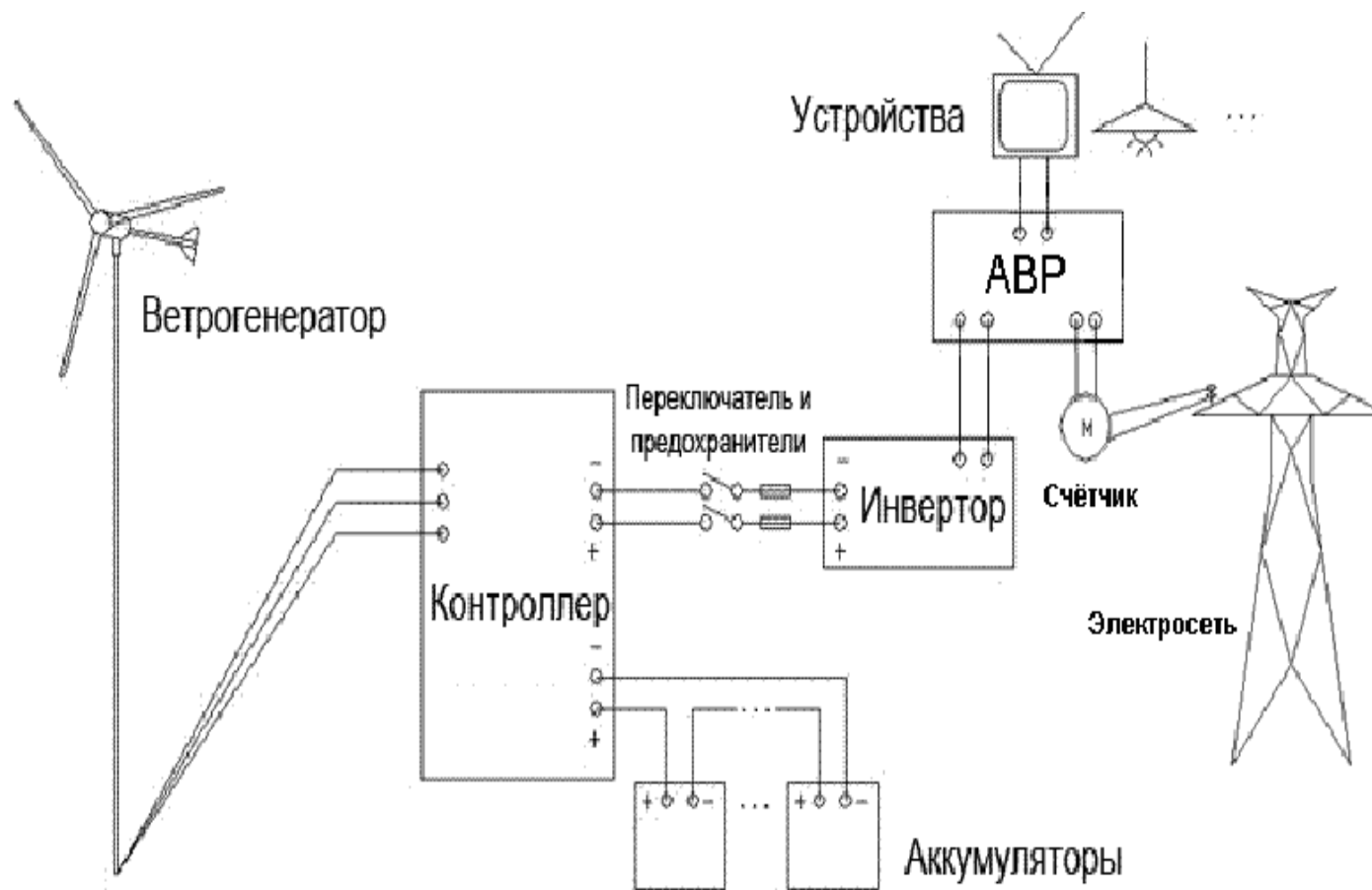
С учетом мировых цен на органическое топливо можно принять тариф для электроэнергии, поступающей от комбинированной ВЭУ.

Практические расчеты показывают, что комбинированная ВЭУ всегда экономичнее любой установки, работающей на углеводородном топливе, будь то ДЭС или ЭС, если иметь в виду стоимость топлива при его завозе



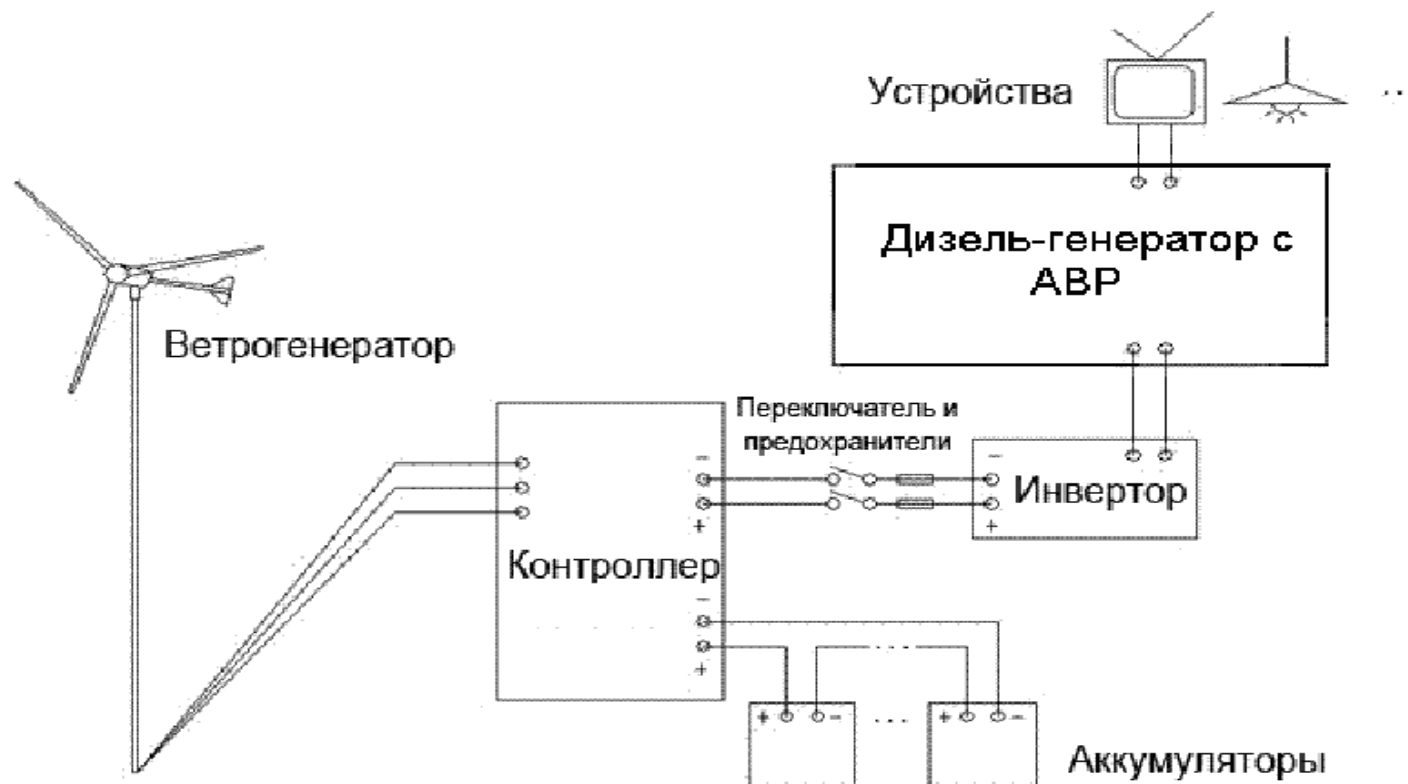
Автономное обеспечение объекта (с аккумуляторами)

Примеры схем работы ветрогенератора ВЭУ



Обеспечение объекта (с аккумуляторами) и коммутация с сетью.

Примеры схем работы ветрогенератора ВЭУ



Обеспечение объекта (с аккумуляторами) и коммутация с дизель – генератором

Критерии выбора ветроэнергетической установки (ВЭУ).

Три основные величины, которые определяют работу комплекса:

1. Выходная мощность (кВт), определяется только мощностью преобразователя (инвертора) и не зависит от скорости ветра, емкости аккумуляторов.
2. Время непрерывной работы при отсутствии ветра определяется только емкостью аккумуляторных батарей (А.ч) и зависит от величины и характера нагрузки и режимов работы.
3. Выработка электроэнергии определяется реальным ветровым потенциалом, высотой мачты, рельефом местности и, обычно, указывается за усредненный промежуток времени, например, месяц, так как дневная или часовая выработка будет носить выборочный, случайный характер.

Исходя из перечисленных выше факторов, для подбора ветрогенератора и сопровождающего оборудования необходимо ответить на три вопроса:

1. Количество электроэнергии, необходимое вашему объекту ежемесячно или ежегодно (измеряется в киловатт-часах). Эти данные необходимы для подбора ветрогенератора.
2. Желаемое время автономной работы вашей энергосистемы в безветренные периоды. Данный параметр определяет количество и емкость аккумуляторных батарей.
3. Максимальная нагрузка на вашу сеть в пиковые моменты (измеряется в киловаттах). Необходимо для подбора инвертора переменного тока.

Эффективность выбора ветроэнергетических установок

1. Использование электроэнергии от ветра экономически выгодно при среднегодовых скоростях ветра более 5 м/с, либо при отсутствии или нерегулярной подаче сетевого электричества.
2. Серийного производства ВЭУ (более 10 шт. в месяц) в настоящее время в России и СНГ нет нигде. Сегодня существует около 10 реальных производителей и еще 10-20, которые пытаются или пробовали ранее изготавливать ВЭУ в РФ.
3. Особое внимание стоит уделять не только мощности ВЭУ (именно ВЭУ, а не инвертора, входящего в комплект), но и при какой скорости ветра эта мощность может быть получена. Некоторые производители представляют завышенные показатели. Для этого не поленитесь подсчитать по несложной формуле мощность, которую способен отдать ветряк с ВК конкретного диаметра. Эта мощность практически зависит только от скорости ветра V и диаметра винта D , а все остальные факторы - количество лопастей, их вес, площадь, профиль, обороты, генератор, подшипники и т.д. - второстепенные и большой погрешности не дают. Упрощенная формула расчета реально отдаваемой ветром мощности в зависимости от скорости ветра и диаметра винта: $P = D^2 V^3 / 7000$ кВт, с точностью $\pm 20\%$ (зависит от к.п.д ВК и генератора). При равной мощности ВЭУ выбирайте ту, у которой диаметр ветроколеса больше.

Эффективность выбора ветроэнергетических установок

ВЭУ выбирается на основе энергопотребления объекта (в кВтч) в течение какого-либо расчетного периода и среднегодовой скорости ветра в районе сооружения ВЭУ. Мощность энергопотребления во внимание не принимается. Среднегодовая скорость ветра берется по данным метеостанции, которая ближе всего расположена к объекту. Эти данные можно взять, например, из справочника “Климат СССР. Ветер”. При выборе ВЭУ необходимо скорректировать среднегодовую скорость ветра и суммарное энергопотребление. Необходимость коррекции среднегодовой скорости ветра связана с тем, что выработка энергии ВЭУ зависит от высоты мачты. Выбирая высокую мачту для ВЭУ (выше 10м) можно в ряде случаев увеличить среднегодовую скорость ветра на оси ротора ВЭУ до 50%. При коррекции суммарного энергопотребления учитываются потери в кабеле, инверторе и АБ. Потери в кабеле могут снижать выработку энергии ВЭУ до 30%, поэтому для снижения потерь рекомендуется при использовании длинного кабеля выбирать большое сечение жилы. Потери в АБ и инверторе связаны с КПД преобразования энергии. КПД свинцовой АБ составляет примерно 90%, КПД щелочной батареи составляет примерно 80%. Номинальный КПД современных инверторов составляет примерно 95%. Для всего рабочего диапазона инвертора можно принять среднее КПД инвертора 90%

Библиографический список

- Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат. 1990. 392 с.
- Беляев Ю.М. Концепция альтернативной экологически безопасной энергетики. Краснодар: «Сов. Кубань». 1998. 64 с.
- Ревель П., Ревель Ч. Среда нашего обитания: В 4-х книгах. Кн. 3. Энергетические проблемы человечества: Пер. с англ. – М.: Мир. 1995. 291 с.
- Использование возобновляемых источников энергии в России (Российский Национальный доклад). //Энергия: экономика, техника, экология. 1996. №11. С. 3-11.
- Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.). Что может дать энергия ветра? Энергия: экономика, техника, экология. 2000. № 1. С. 11-17. № 2. С. 13-24.
- Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников в России. Коллектив авторов. – СПб.: Наука, 2002. 314 с.
- Концепция использования ветровой энергии в России. Коллектив авторов. М.: Книга-Пента, 2005. 128 с.
- Экологический энциклопедический словарь. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 1999. 930 с.
- Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергия: стратегия, ресурсы, технологии. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 264 с.
- Справочник-каталог «Оборудование нетрадиционной и малой энергетики». – М.: АО «ВИЭН», 2000. 167 с.
- Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности. ИСЦ. – М, 2001. 62 с.
- Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов. Косов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. – М.: НПО Изд-во «Экономика», 2000, 421 с. Изд 2-е.
- Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смолдык С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Дело, 2002. 888 с.
- Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.
- Новый политехнический словарь. – М.: Большая Российская Энциклопедия, 2000. 671 с.
- Кашфразиев Ю.А. Ветроэнергетические установки в России – роскошь или источник энергии? Энергия: экономика, техника, экология. 2004. №10. С. 35-39.
- Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. – М.: ГУ ИЭС, 2003. 136 с.
- www.elektroveter.ru.
- www.diesel-status.ru.

Спасибо за внимание!