



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»

**Методические указания**  
к практическим занятиям  
«Возобновляемые источники энергии.  
Ветроэнергетика»  
по дисциплине  
**«Вопросы теории и  
инновационных решений  
при использовании  
возобновляемых источников  
энергии»**

Авторы  
Галкина Н. И.

Ростов-на-Дону, 2019

## Аннотация

Приведена методика расчета, классификация и состав ветроэнергетической установки. Представлено теоретическое пояснение, сформулированы условия задач и приведены примеры их решения. Приведены варианты задач.

Предназначены для магистров направления 08.04.01 «Строительство», профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция» очной и заочной формы обучения

## Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»  
Галкина Н.И.





## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>1. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>5</b>
<b>2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЭУ .....</b>	<b>5</b>
<b>ЗАДАЧА 1.....</b>	<b>9</b>
<b>ЗАДАЧА 2.....</b>	<b>13</b>
<b>ЗАДАЧА 3.....</b>	<b>16</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>18</b>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России существуют отрасли хозяйства, которые значительно удалены от централизованного электроснабжения, кроме того, у крупных хозяйств также имеются автономные потребители электроэнергии. Для таких хозяйств наиболее приемлемым является автономное электроснабжение, которое может быть реализовано различными способами.

Ветер является одним из наиболее мощных энергетических источников и может быть утилизирован в народном хозяйстве в значительно больших масштабах, чем в настоящее время. Удаленные районы, недостаточно обеспеченные электроэнергией, практически не имеют другой, экономически выгодной альтернативы, как строительство ветроэлектростанций.

В настоящее время заинтересованность в применении ВЭУ для автономного электроснабжения объектов агропромышленного комплекса возрастает как во всем мире, так и в Российской Федерации в частности. В России существует значительный нереализованный потенциал в области ветроэнергетики.

К главным факторам, определяющим возможность использования энергии ветра, относятся: метеорологические условия, выбор оптимального расположения ветроэнергетической установки (ВЭУ), метод преобразования кинетической энергии ветра в электрическую, ее использование в общей системе энергоснабжения и, кроме того, экономическая эффективность.

Ветроэнергетика - отрасль науки и техники, разрабатывающая теоретические основы, методы и средства использования энергии ветра для получения механической, электрической и тепловой энергии и определяющая области и масштабы целесообразного использования ветровой энергии в народном хозяйстве.

Ветроэнергетика состоит из 2 основных частей: ветротехники, разрабатывающей теоретические основы и практические приёмы проектирования технических средств (агрегатов и установок), и ветроиспользования, включающего теоретические и практические вопросы оптимального использования энергии ветра, рациональной эксплуатации установок и их технико-экономических показателей, обобщение опыта применения установок в народном хозяйстве.

## 1. ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

**ВЭУ** - это комплекс технических устройств для преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора генератора.

ВЭУ состоит из одной или нескольких ветроэнергетических систем, аккумулирующего или резервирующего устройства и систем автоматического управления и регулирования режимов работы установки.

Ветер обладает кинетической энергией, которая может быть превращена ветромеханическим устройством в механическую, а затем электрогенератором в электрическую энергию. Скорость ветра измеряется в км/час или м/с ( $1 \text{ км/час} = 0.28 \text{ м/с}$ ,  $1 \text{ м/с} = 3.6 \text{ км/час}$ ).

ВЭУ преобразуют энергии ветра в другие виды энергии (электрическую, механическую, тепловую и т. п.).

Ветроагрегат являясь основной частью ВЭУ, состоит из ветродвигателя, системы передачи ветровой мощности на нагрузку (потребителю) и самого потребителя ветровой энергии (какого-либо устройства: электромашинного генератора, водяного насоса, нагревателя и т. п.).

Ветродвигатель является устройством для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию рабочего движения ветродвигателя. Рабочие движения, которые совершает ветродвигатель, могут быть разными. На существующих сегодня ветродвигателях в качестве рабочего движения используется круговое вращательное движение.

Лопастная система ветродвигателя (ветроколесо) может иметь различное конструктивное исполнение. У современных ветродвигателей лопастная система выполнена в виде жестких лопастей с крыловым профилем в поперечном сечении.

Лопасть - это составная часть ветроколеса, создающая крутящий момент. Лопастная система ветродвигателя с рабочим круговым вращательным движением может иметь горизонтальную или вертикальную оси вращения.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВЭУ

При расчете и проектировании конкретного ветродвигателя помимо ветровых условий его работы необходим учет как особен-

ностей ветроагрегата, так и всей ВЭУ. В связи с этим ВЭУ классифицируют по следующим признакам:

- виду вырабатываемой энергии;
- уровню мощности;
- назначению;
- областям применения;
- признаку работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса;
- способам управления;
- типу системы передачи.

**В зависимости от вида вырабатываемой энергии** все ветроэнергетические установки подразделяют на ветроэлектрические и ветромеханические. Электрические ВЭУ, в свою очередь, подразделяются на ветроустановки, вырабатывающие электроэнергию постоянного, либо переменного тока. Механические ВЭУ служат для привода рабочих машин.

**В зависимости от назначения** электрические ВЭУ постоянного тока подразделяют на ветрозарядные, гарантированного электроснабжения потребителя, негарантированного электроснабжения. Электрические ВЭУ переменной тока подразделяют на автономные, гибридные, работающие параллельно с энергостистой соизмеримой мощности, сетевые, работающие параллельно с мощной энергостистой.

Классификация ветроэнергетических установок **по областям применения** определяется их назначением.

При расчете и проектировании ветродвигателя и выборе его номинальных параметров необходим учет типа нагрузки (электрогенератор, водяной насос и т. п.), типа системы передачи ветровой мощности к потребителю, типа системы генерирования и аккумулирования электроэнергии.

Система передачи ветровой мощности представляет собой определенный комплекс различных устройств для передачи мощности от вала ветроколеса к валу соответствующей машины ветроагрегата (потребителя) с повышением или без повышения частоты вращения машины. В современной ветроэнергетике чаще всего используют механический способ передачи мощности.

Система генерирования электроэнергии представляет собой электромашинный генератор и комплекс устройств (устройства управления, силовой электроники, аккумулятор и т. д.) для подключения к потребителю со стандартными параметрами электроэнергии.

Выпускаются и работают ВЭУ различные **по уровню мощ-**

**НОСТЬЮ** от нескольких ватт до тысяч киловатт. Выделяют четыре группы:

- очень малой мощности - менее 5 кВт;
- малой мощности - от 5 до 99 кВт;
- средней мощности - от 100 до 1 000 кВт;
- большой мощности - свыше 1 МВт.

Ветроустановки каждой группы отличаются друг от друга прежде всего конструктивным выполнением, типом фундамента, способом установки ветроагрегата на ветер, системой регулирования, системой передачи ветровой мощности, способом монтажа и способом обслуживания.

Преимущественное распространение получили горизонтально-осевые ветроэнергетические установки.

На рис. 1 показана конструкция ветроэнергетической установки и общий вид ветроэлектростанции.

Мачта ВЭУ содержит ветротурбину и электрогенератор, связанный с валом ветротурбины непосредственно или через редуктор.

Кроме того, выделяют ВЭУ с горизонтальной и вертикальной осью (рис.2).

Ветряные электростанции производят электричество за счет энергии перемещающихся воздушных масс — ветра. Для ветряных электростанций с горизонтальной осью вращения минимальная [скорость ветра](#) составляет:

- 4-5 м/сек — при мощности  $\geq 200$  кВт
- 2-3 м/сек — если мощность  $\leq 100$  кВт.

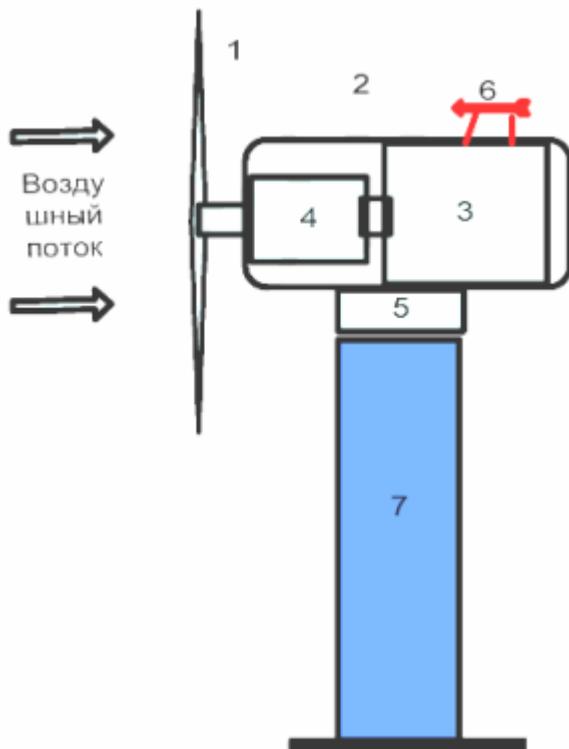


Рис. 1. Конструкция ветроэлектрической установки:  
 1 - ветродвигатель (ветроколесо), 2 - ветроголовка, 3 - генератор, 4 - редуктор,  
 5 - поворотная платформа, 6 - измерительное устройство, 7 – мачта.

Ветроэлектростанция – это мачта, наверху которой размещается контейнер с генератором и редуктором. К оси редуктора ветряной электростанции прикреплены лопасти. Контейнер электростанции поворачивается в зависимости от направления ветра.

Ветряные электростанции с вертикальной осью вращения менее популярны. Сам генератор находится под мачтой, и главное, необходимость ориентации на ветер отсутствует. Ветряные электростанции с вертикальной осью вращения требуют для стабильной работы более высоких скоростей ветра и предварительного запуска от внешнего источника энергии.

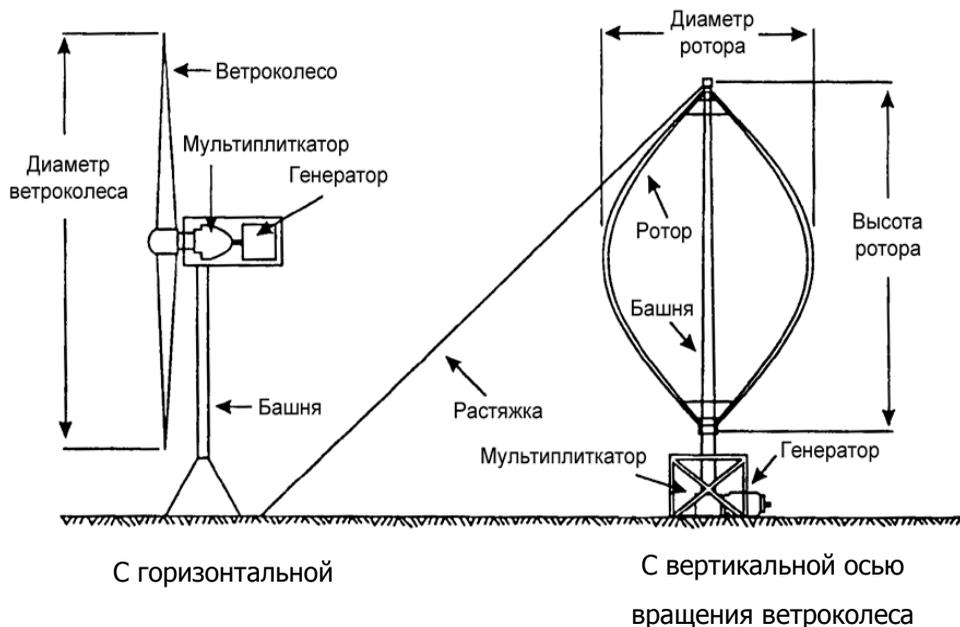


Рис 2. Классификация ВЭУ.

## ЗАДАЧА 1.

Имеется ветроколесо с определенным радиусом, известны скорость до и после него. Необходимо определить скорость в его плоскости, мощности ветрового потока и ветроустановки.

### Методика расчета.

1. Массовое количество воздуха, проходящего через ометаемую площадь в единицу времени равно:

$$m_1 = \rho \cdot S \cdot V_0, \text{ кг/с}$$

где  $\rho$  - плотность воздуха,  $1,2 \text{ кг/м}^3$ ;

$S$  - ометаемая площадь,  $\pi R^2, \text{ м}^2$ ;

$V_0$  - скорость ветра до ветроколеса,  $\text{м/с}$ .

2. Сила, действующая на ветроколесо:

$$F = m_1 \cdot (V_0 - V_2), \text{ (кг} \cdot \text{м/с}^2\text{)}$$

где  $V_2$  - скорость ветра после ветроколеса,  $\text{м/с}$ .

Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии

3. Скорость ветра в плоскости ветроколеса:

$$V_1 = 1/2 \cdot (V_0 + V_2), \text{ м/с}$$

4. Мощность ветрового потока:

$$P_0 = \rho \cdot S \cdot V_0^3 / 2, \text{ Вт}$$

5. Мощность ветроустановки равна той мощности, которую теряет ветер при прохождении ветроколеса:

$$P = m \cdot (V_0^2 - V_2^2) / 2, \text{ Вт}$$

6. Быстроходность ветроколеса:

$$Z = V_r / V_0 = R \cdot \omega / V_0,$$

где  $V_r$  - окружная скорость конца лопастей, м/с;

$\omega$  - угловая скорость ветроколеса, м/с.

Исходные данные для расчета по вариантам представлены в табл. 1.



Таблица 1

Исходные данные для расчета задачи №1

Величина	№ варианта														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Радиус ветроколеса $R$ , м	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	45	50	7,5	12,5
Скорость ветра до колеса $V_0$ , м/с	10	11	12	13	14	15	6	7	8	9	10	11	12	9	10
Скорость ветра после колеса $V_2$ , м/с	5	6	4	8	7	8	3	3	3	4	5	6	6	5	4

### Пример расчета

#### **Исходные данные:**

- радиус ветроколеса  $R=35\text{м}$ ;
- скорость ветра до колеса  $V_0=9, \text{ м/с}$ ;
- скорость ветра после колеса  $V_2=4, \text{ м/с}$ .
- плотность воздуха  $\rho = 1,2\text{кг/м}^3$ .

#### **Определить:**

- скорость ветра в плоскости ветроколеса  $V_1$ ;
- мощность ветрового потока  $P_0$ ;
- мощность ветроустановки  $P$ ;
- силу  $F$ , действующую на ветроколесо.

#### **Решение:**

1. Скорость ветра  $V_1$  в плоскости ветроколеса:

$$V_1 = (V_0 + V_2) / 2 = (9 + 4) / 2 = 6,5 \text{ м/с.}$$

2. Мощность ветрового потока:

$$P_0 = \rho \cdot S \cdot V_0^3 / 2 = 1,2 \cdot 3846,5 \cdot 9^3 / 2 = 1682459 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 =$$

$$1682459 \text{ Дж/с} = 1682459 \text{ Вт} = 1682,46 \text{ кВт}$$

$$S = \pi \cdot R^2 = 3,14 \cdot 35^2 = 3846,5 \text{ м}^2.$$

3. Масса воздуха, проходящего через ометаемую поверхность:

$$m = \rho \cdot S \cdot V_0 = 1,2 \cdot 3846,5 \cdot 9 = 41542,2 \text{ кг/с.}$$

4. Сила, действующая на ветроколесо:

$$F_A = m \cdot (V_0 - V_2) = 41542,2 \cdot 5 = 207711 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 = 207711$$

5. Мощность ВЭУ равна той мощности, которую теряет ветер при прохождении ветроколеса:

$$P = m \cdot (V_0^2 - V^2) = 41542,2 \cdot (9^2 - 4^2) = 2700243 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3 = 2700243 \text{ Вт} = 2700,2 \text{ кВт}.$$

## ЗАДАЧА 2.

Определите расчетную мощность двухлопастной горизонтально-осевой ветроэнергетической установки, оптимальную быстроходность и частоту вращения ветроколеса. Определить передаточное отношение редуктора для привода синхронного генератора.

### Методика расчета

1. Номинальная мощность:

$$P = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot (V^3/2), \text{ кВт}$$

где  $c_p$  – коэффициент использования мощности потока;

$\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$S$  – ометаемая площадь:  $S = (3,14 \cdot d^2) / 4, \text{ м}^2$ ;

$d$  – диаметр лопастей, м;

$V$  – скорость ветра, м/с.

2. Оптимальная быстроходность:

$$Z_{\text{опт}} \approx 4\pi/N$$

где  $N$  – количество лопастей, шт.

3. Оптимальная частота вращения:

$$\omega_{\text{опт}} = Z_{\text{опт}} \cdot (V/R), \text{ рад/с}$$

где  $R$  – радиус ветроколеса,  $R = d/2, \text{ м}$ ;

или  $n_{\text{опт}} = (\omega_{\text{опт}} \cdot 60) / 2\pi$ , об/мин

4. Передаточное отношение редуктора:

$$i = n_{\text{опт}} / n.$$

5. Номинальная мощность генератора:

$$P_H = P \cdot \eta_H, \text{ кВт}$$

6. Число пар полюсов генератора:

$$p = (60f) / n.$$

Исходные данные для расчета по вариантам представлены в табл. 2.

### Пример расчета

#### **Исходные данные:**

- диаметр лопастей  $d = 7\text{ м}$ ;
- расчетная скорость ветра  $V = 13\text{ м/с}$ ;
- номинальная частота вращения  $n = 1600\text{ об/мин}$ ;
- коэффициент использования мощности потока  $c_p = 0,3$ ;
- количество лопастей  $N = 2\text{ шт}$ ;
- плотность воздуха  $\rho = 1,3\text{ кг/м}^3$ .

Таблица 2

Исходные данные для расчета задачи №2

№ варианта	Размах лопастей $d$ , м	Скорость ветра, $V$ м/с	Частота вращения, $n$ об/мин
1	8	12	1500
2	8,5	11	1600
3	9	13	1700
4	7	11,5	1350
5	7,5	12	1400
6	8	11	1450
7	7	13	1550
8	7,5	11	1600
9	9	12	1700
10	9,5	13	1400
11	8	11,5	1350
12	7	12,5	1350
13	7,5	13	1450
14	8	14	1500
15	8,5	12	1700

**Определить:**

- оптимальную быстроходность  $Z_{\text{опт}}$ ;
- оптимальную частоту вращения ветроколеса  $\omega_{\text{опт}}$ ;
- передаточное отношение редуктора для привода синхронного генератора  $i$ .

**Решение:**

1. Номинальная мощность:

$$P = c_p \cdot \rho \cdot S \cdot (V^3/2) = 0,3 \cdot 1,3 \cdot (3,14 \cdot 7^2/4) \cdot (13^3/2) \cdot 10^{-3} = 16,5 \text{ кВт}$$

2. Оптимальная быстроходность:

$$Z_{\text{опт}} = 4\pi/N = 4 \cdot 3,14 / 2 = 6,28$$

3. Оптимальная частота вращения:

$$\omega_{\text{опт}} = Z_{\text{опт}} \cdot (V/R) = (6,28 \cdot 13) / 3,5 = 23,3 \text{ рад/с}$$

$$n_{\text{опт}} = (\omega_{\text{опт}} \cdot 60) / 2\pi = (23,3 \cdot 60) / 2 \cdot 3,14 = 223 \text{ об/мин}$$

4. Передаточное отношение редуктора:

$$i = n_{\text{опт}}/n = 223/1600 = 1/7,17.$$

### ЗАДАЧА 3.

Определите расчетную мощность трехлопастной горизонтально-осевой установки, а также оптимальную быстроходность и частоту вращения ветроколеса.

Определить номинальную мощность, частоту вращения и число пар полюсов прямоприводного синхронного генератора.

Исходные данные для расчета задачи 3 по вариантам представлены в табл. 3.

#### Пример расчета

#### Исходные данные:

## Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии

- диаметр лопастей  $d=44\text{м}$ ;
- расчетная скорость ветра  $V=11\text{м/с}$ ;
- номинальная частота сети  $f=55\text{ Гц}$ ;
- коэффициент использования мощности потока  $c_p = 0,35$ ;
- КПД генератора  $\eta_H=86\%$ .
- количество лопастей  $N=3\text{шт}$ ;
- плотность воздуха  $\rho = 1,3\text{кг/м}^3$ .

**Определить:**

- оптимальную быстроходность  $Z_{\text{опт}}$ ;
- частоту вращения генератора  $n$ ;
- номинальную мощность генератора  $P_H$ ;
- число пар полюсов генератора  $p$ .

Таблица 3

Исходные данные для расчета

№ вариан-та	Размах лопастей $d$ , м	Скорость ветра, $V$ м/с	КПД генера-тора $\eta_H$ , %	Номинальная частота $f$ , Гц
1	44	11	1500	50
2	42	12	1600	55
3	43	14	1700	60
4	45	12	1350	45
5	40	11.5	1400	50
6	46	11	1450	52
7	44	13	1550	54
8	48	11	1600	56
9	41	12	1700	49
10	40	13	1400	60

11	42	11.5	1350	50
12	44	12.5	1350	45
13	47	13	1450	48
14	42	14	1500	47
15	50	12	1700	50

**Решение:**

1. Номинальная мощность:

$$P = c_p \cdot \rho \cdot S(V^3/2) = 0,35 \cdot 1,3(3,14 \cdot 44^2/4) \cdot (11^3/2) \cdot 10^{-3} = 460 \text{ кВт}$$

$$S = (3,14 \cdot d^2)/4$$

2. Оптимальная быстроходность:

$$Z_{\text{опт}} = 4\pi/N = 4 \cdot 3,14 / 3 = 4,19$$

3. Оптимальная частота вращения:

$$\omega_{\text{опт}} = Z_{\text{опт}} \cdot (V/R) = (4,19 \cdot 11)/22 = 2,1 \text{ рад/с}$$

$$n_{\text{опт}} = (\omega_{\text{опт}} \cdot 60)/2\pi = (2,1 \cdot 60)/2\pi = 20 \text{ об/мин}$$

4. Передаточное отношение редуктора:

$$i = n_{\text{опт}}/n = 1$$

5. Частота вращения генератора:

$$n = n_{\text{опт}} = 20 \text{ об/мин}$$

6. Номинальная мощность генератора:

$$P_H = P \cdot \eta_H = 460 \cdot 0,86 = 395,6 \text{ кВт}$$

7. Число пар полюсов генератора:

$$p = (60f)/n = (60 \cdot 55)/20 = 165 \text{ шт.}$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Галкина Н.И. Энергосбережение в системах климатизации. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие /Н.И. Галкина; Донской гос. техн. ун-т. –Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. - 98с.
2. Горяев А.А. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие /А.А. Горяев, Г.А. Шепель. – Архангельск: САФУ, 2015. – 93 с;
3. Олешкевич, М.М. Нетрадиционные источники энергии: учебно-методическое пособие для студентов высших учебных заведений в 2 частях /М.М. Олешкевич (Часть 2). – Минск: БНТУ, 2007. – 45 с.
4. Елистратов В.В., Кузнецов М.В. Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики: Учебное пособие.- СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.
5. В.С.Кривцов, А.М.Олейников, А.И.Яковлев. «Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы»
6. Амерханов Р.А., Богдан А.В., Вербицкая С.В., Гарькавый К.А. Проектирование систем энергообеспечения: Учебник-2-е изд.- М.: Энергоатомиздат, 2010.