



Особенности запуска однолопастных ветроэнергетических установок малой мощности

«Памяти моего учителя и друга
Ивана Андреевича Бабинцева»

От автора.

Рецензия эксперта на статью получена
12.01.2022 [The expert review of the article
received on January 12, 2022].

Для электроснабжения удалённых мало-мощных потребителей электрической энергии в регионах со среднегодовыми ветрами более 4 м/с целесообразно применение ветроэнергетических установок (ВЭУ). Из всего многообразия их конструкций наибольшее применение находят горизонтально-осевые (ГО) ветроустановки. Основным их отличием от вертикально-осевых (ВО) является более высокий коэффициент преобразования энергии ветра C_p , в современных ВЭУ достигающий 0,5–0,52 при его максимальном теоретическом значении, определённом Н.Е. Жуковским [1] и чуть позднее, в 1919 году, немецким физиком Альбертом Бетцом, $C_p = 0,593$ [2].

Кроме того, горизонтально-осевые ВЭУ имеют меньшую материалоемкость и являются более лёгкими и дешёвыми. Кроме того, они обладают большей быстротходностью, что позволяет использовать в них (при прямом приводе) электрические генераторы с меньшей массой [3].

Для электроснабжения передвижных объектов различного назначения, геологических экспедиций, туристических групп, альпинистов, пастухов (чабанов) и других потребителей требуются ветро-

установки, имеющие малые габариты при вырабатываемых мощностях от 50 Вт до 2 кВт. Геометрические размеры ветроколеса могут быть определены по основной формуле ветроэнергетики [1]:

$$P = C_p \rho \eta \frac{S_{\text{ом}} v^3}{2} = C_p \rho \eta \frac{\pi R^2 v^3}{2}, \quad (1)$$

где P — мощность горизонтально-осевой ВЭУ; v — скорость воздушного потока (ветра), м/с; C_p — коэффициент преобразования энергии ветра; $\eta = \eta_{\text{ген}} \eta_{\text{мульти}}$, где $\eta_{\text{ген}}$ — КПД генератора, $\eta_{\text{мульти}}$ — КПД мультипликатора (при его отсутствии $\eta_{\text{мульти}} = 1,0$); ρ — удельная плотность воздуха при 18 °C, $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$; $S_{\text{ом}}$ — площадь максимального сечения и ротора, м^2 ; R — радиус ветроколеса (БК).

Как видно из формулы (1), выходная мощность ВЭУ зависит только от площади, ометаемой ветроколесом (то есть от его радиуса), коэффициента преобразования энергии ветра, который зависит от профиля лопастей, плотности воздуха, КПД генератора при прямом приводе генератора ветроколесом и куба скорости ветра. Следует отметить, что мощность, развиваемая ВЭУ, практически не зависит от числа лопастей.

УДК 621.311.24. Научная специальность: 05.14.08.

Особенности запуска однолопастных ветроэнергетических установок малой мощности

С.В. Грибков, к.т.н., академик [Российской инженерной академии \(РИА\)](#), г. Москва), учёный секретарь Комитета по проблемам использования возобновляемых источников энергии [Российского Союза научных и инженерных обществ](#) (Комитет ВИЭ [РосСНИО](#)), генеральный директор [НИЦ «Виндэк»](#) (г. Подольск, Московская область)

В статье рассматривается конструкция однолопастной ветроэнергетической установки (ВЭУ) малой мощности. Исходя из основной формулы зависимости выходной мощности от геометрии ветроколеса показана независимость выходной мощности от числа лопастей ВЭУ, рассмотрена конструкция однолопастной ВЭУ со стартовым запуском ветроколеса от генератора, работающего в режиме вентильного двигателя и запуск ВЭУ в конструкции с косым карданом. Приводятся математическое обоснование конструкции и зависимости пусковых углов лопасти однолопастной ВЭУ от конструкции косого кардана.

Ключевые слова: ветроэнергетические установки малой мощности, однолопастная ветроэнергетическая установка, ветроколесо, конструкция однолопастной ветроэнергетической установки, угол установки лопасти, регулятор пусковых углов лопасти, балансировка ветроколеса.

UDC 621.311.24. The number of scientific specialty: 05.14.08.

Features of start-up of small wind turbine with single-blade

S. V. Gribkov, PhD, Academician of the [Russian Engineering Academy \(REA\)](#), scientific secretary of the Committee on the Problems of the Use of Renewable Energy Sources of the [Russian Union of Scientific and Engineering Societies \(RES\)](#) Committee of [RosSNIQ](#), general director of ["WindEq Technical Center"](#), LLC (Podolsk city, Moscow Region)

The article discusses the design of a single-blade small wind turbine (SWT). Based on the main formula of the dependence of the output power on the geometry of the wind plant, the independence of the output power from the number of SWT blades is shown, the design of a single-blade SWT with starter start of the wind wheel from a generator operating in the valve engine mode and the launch of the SWT in the design with an oblique cardan is considered. The mathematical justification of the method is given and the dependencies of the starting angles of the blade of the single-blade SWT on the design of the oblique gimbal are given.

Key words: small wind turbine, single-blade wind turbine, wind wheel, single-blade wind turbines design, blade mounting angle, blade starting angle regulator, wind wheel balancing.

Анализ современных конструкций горизонтально-осевых ВЭУ малых и средних мощностей отечественного и зарубежного производства показывает, что все существующие ветроустановки имеют три или две лопасти [4]. Практически не встречаются однолопастные ВЭУ, хотя их конструкция позволяет иметь не худшие характеристики при более низкой стоимости, меньших габаритах и массе в упакованном виде, что, безусловно, представляет особенный интерес для указанных выше групп потребителей.

Сложность применения однолопастных ВЭУ связана прежде всего с тем, что, несмотря на кажущуюся их простоту, они с трудом запускаются.

В настоящей статье предлагается техническое решение, которое обеспечивает надёжный запуск однолопастных ВЭУ при любых скоростях ветра всего рабочего диапазона ВЭУ от 2 до 60 м/с.

Для проектирования однолопастных ВЭУ необходимо знать зависимости размера лопасти ветроколеса от мощности и частоты вращения ветроколеса n для выбора или проектирования генератора [1–4] исходя из выбранной быстроходности ветроколеса Z и расчётной скорости ветра v_p :

$$Z = \frac{\omega R}{v_p} = \frac{\pi n R}{30 v_p}. \quad (2)$$

Конструкция однолопастной ВЭУ

Типовая конструкция однолопастной ветроустановки представлена на рис. 1. Основным её элементом является наличие одной лопасти 1, крепящейся на переходнике 5, насаженном на вал 6 генератора 4, и балансирующего груза 8, перемещающегося по резьбе переходника при статической балансировке ветроколеса. Крепление маха лопасти на переходнике осуществляется с помощью спецштифта 3.

Однолопастные ВЭУ из-за несимметричности конструкции или не имеют пускового момента вообще, или он слишком мал, что не позволяет им запускаться при малых скоростях ветра от 2,0 до 3,5 м/с. Запуск ветроколеса с одной лопастью или несколькими лопастями без крутки (или с малой круткой) возможен за счёт применения стартового режима генератора ВЭУ. Обычно в качестве генератора ВЭУ применяются синхронные магнитоэлектрические генераторы, которые сравнительно легко перевести в режим полупериодного вентильного двигателя без датчика положения ротора. В таких двигателях информацию о положении ротора можно снимать с фаз ротора в неработающий полупериод ЭДС вращения [5].

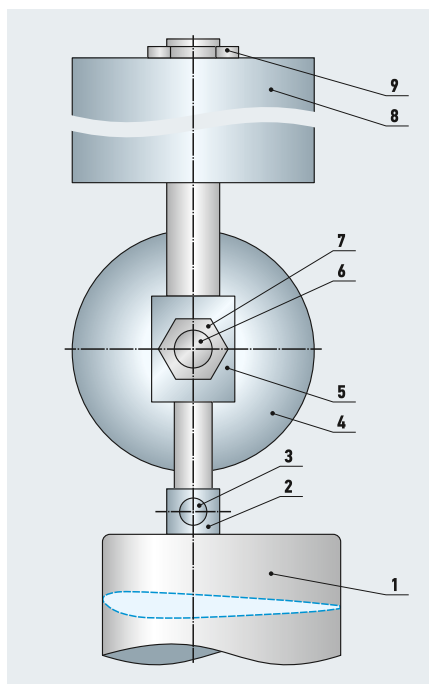


Рис. 1. Конструкция ветроколеса однолопастной ВЭУ (1 — лопасть; 2 — мах лопасти; 3 — штифт крепления лопасти; 4 — генератор; 5 — переходник крепления лопасти к генератору; 6 — вал генератора; 7 — гайка крепления переходника к валу генератора; 8 — уравнивающий груз; 9 — гайка крепления груза)

Существует и другой способ запуска системы «ветроколесо — генератор» ветроэнергетической установки — за счёт установления лопасти под действием ветра на пусковой угол. Реализовать такой способ изменения угла атаки возможно за счёт применения так называемого «косого кардана», имеющего шарнирное крепление к корпусу генератора.

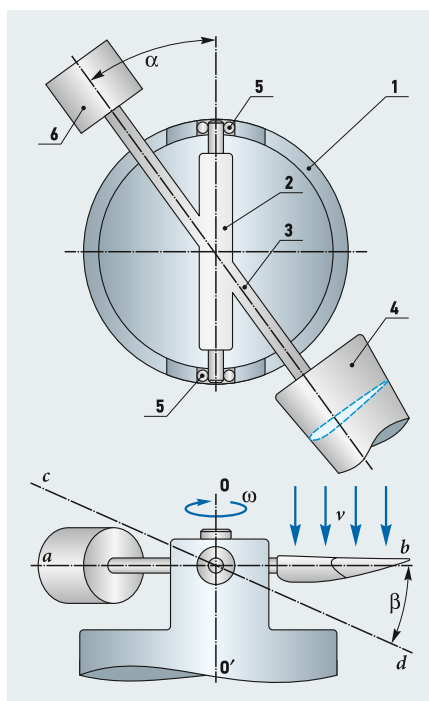


Рис. 2. Регулятор пускового угла однолопастной ВЭУ (1 — корпус генератора; 2 — кардан; 3 — мах лопасти; 4 — лопасть; 5 — подшипники кардана; 6 — балансирующий груз)

На рис. 2 показана принципиальная конструкция однолопастного ветроколеса, включающего: кардан 3, свободно качающийся в медно-графитовых подшипниках 5; мах 3, находящийся под углом α к оси вращения кардана; лопасть 4; балансирующий цилиндрический груз 6, имеющий возможность перемещаться по резьбе. Система «лопасть — мах — груз» крепится к корпусу генератора обращённой конструкцией или к переходному устройству, крепящемуся к генератору, который, в свою очередь, приводится во вращение лопастью ветроколеса ВЭУ.

Такая конструкция обеспечивает при ветре, имеющем скорость от 0,5 до 2 м/с, отклонение системы «лопасть — мах — груз» по ветру на угол β и установку лопасти под большим углом атаки φ (положение по оси с–d), что, в свою очередь, обеспечивает уверенный запуск ветроколеса даже при таких малых скоростях ветра.

После начала вращения ветроколеса плоскость его вращения занимает положение а–b, перпендикулярное оси вращения ротора генератора O–O'.

Сложность применения однолопастных ВЭУ связана прежде всего с их трудным запуском. Однолопастные ВЭУ из-за несимметричности конструкции либо не имеют пускового момента вообще, либо он слишком мал, что не позволяет им запускаться при малых скоростях ветра

Рассмотрим подробно работу однолопастной ВЭУ с устройством установки лопасти на большие пусковые углы.

Свободнокачающееся ветровое колесо состоит из косого кардана 2, установленного в подшипниках 5, помещённых в подшипниковых гнездах стоек корпуса генератора 1. Под углом α сквозь кардан проходит запрессованный в тело кардана стержень 3, с одной стороны которого крепится лопасть 4, на другом же конце стержня находится балансирующий цилиндрической формы груз 6, который можно перемещать по резьбе при статической балансировке ветроколеса.

При отсутствии ветра положение системы «лопасть — мах — кардан — балансирующий груз» занимает любое произвольное положение. При возникновении ветра ветроколесо с помощью хвостового оперения ориентируется на ветер, который давит на лопасть и переводит всю указанную систему в положение, совпадающее с осью с–d.

При этом лопасть ветроустановки совершает сложное движение и занимает положение с углом атаки φ , что позволяет системе «лопасть — мах — кардан — груз — корпус генератора» начать вращаться вокруг оси $O-O'$. При этом плоскость вращения лопасти занимает положение, перпендикулярное оси вращения генератора. Лопасть установлена под углом атаки, обеспечивающим интенсивный разгон ветроколеса и генератора до требуемой расчётной или номинальной частоты вращения, при которой генератор выдаёт положенную паспортную мощность, определяемую формулой (1).

Обязательным условием устойчивой работы однолопастной ВЭУ является балансировка ветроколеса. Как показывает опыт разработки и эксплуатации однолопастных ВЭУ, для их стабильной работы без вибраций достаточно проведение статической балансировки ветроколеса на ножах перед установкой его в подшипниковый узел. Масса балансировочного груза и его положение определяется условием равновесия системы «лопасть — мах — кардан — груз»

На рис. 2 ось $a-b$ соответствует положению системы «лопасть — мах — груз» при вращении ветроколеса под действием ветра. При этом угол атаки лопасти φ соответствует оптимальному углу разбега ветроколеса, а ось $c-d$ соответствует положению отклонения лопасти под действием ветра, при этом угол φ соответствует пусковым углам ветроколеса. Положение лопасти при отсутствии ветра может быть любым (произвольным), и будем считать, что угол установки лопасти не позволяет ветроколесу трогаться.

Для определения зависимости между конструкционным углом между карданом и стержнем — махом лопасти α , углом отклонения лопасти под действием ветра β необходимо рассмотреть геометрическую модель регулятора, представленную на рис. 3.

Рассмотрим два положения маха ветроколеса ВЭУ. Первое — при отсутствии ветра ($v = 0$): DE — хорды лопасти при отсутствии ветра; AB — ось кардана; $O-O'$ — мах; α — угол между махом и карданом.

Положение лопасти при скорости ветра $v > 0$: β — угол отклонения лопасти; D_1E_1 — хорда лопасти; φ — пусковой угол лопасти.

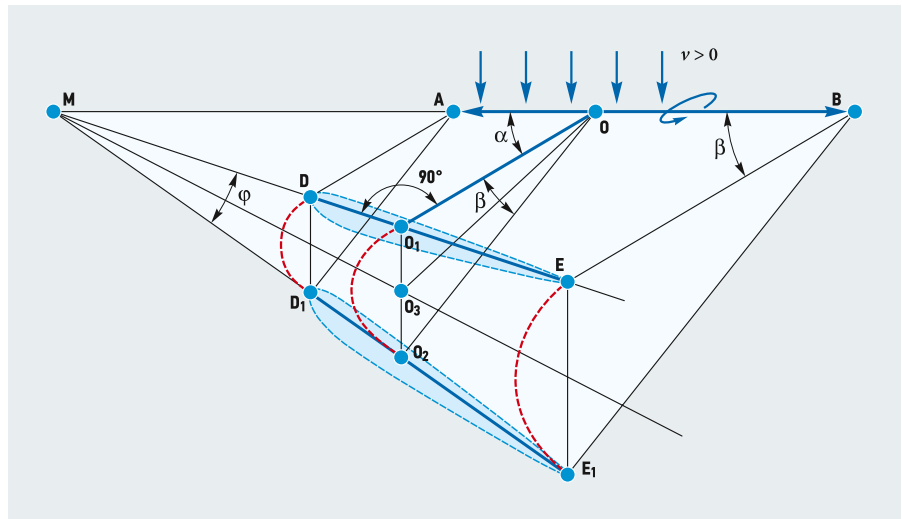


Рис. 3. Геометрическая модель регулятора пусковых углов однолопастной ВЭУ

Для нашего доказательства рассмотрим сферический равнобедренный треугольник OO_1O_2 с углом при вершине O (угол O_1OO_2 равен углу β) и равнобедренный треугольник O_1MO_2 , который имеет угол при вершине φ .

Проведём биссектрисы углов O_1OO_2 и O_1MO_2 — OO_3 и MO_3 , которые в силу равнобедренности треугольников OO_1O_2 и O_1MO_2 будут и высотами, образуя угол 90° с основанием O_1O_2 .

Длина маха $O-O_1$ известна и равна a , то есть имеет место:

$$O-O_1 = a. \quad (3)$$

Рассмотрим прямоугольные треугольники O_1OO_3 и O_1O_3M . Углы при вершинах M и O равны, соответственно:

$$O_3MO_1 = \frac{\varphi}{2} \text{ и } O_1OO_3 = \frac{\beta}{2}. \quad (4)$$

Тогда, решая треугольники, можно выразить из треугольника O_1OO_3 :

$$O_1O_3 = OO_1 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = a \sin\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (5)$$

Из треугольников OMO_1 и O_1MO_3 найдём вначале MO_1 , а затем O_1O_3 :

$$MO_1 = OO_1 \tan(\alpha) = a \tan(\alpha); \quad (6)$$

$$O_1O_3 = MO_1 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = a \tan(\alpha) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (7)$$

Приравняв правые части (5) и (7), можно записать:

$$a \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = a \tan(\alpha) \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right), \quad (8)$$

из (8) можно получить углы φ и α :

$$\varphi = 2 \arcsin \left[\frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\tan(\alpha)} \right]; \quad (9)$$

$$\alpha = \arctan \left[\frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \right]. \quad (10)$$

Расчётные зависимости между конструкционными углами α , предельным углом отклонения лопасти β и пусковым углом φ представлены в табл. 1 и на рис. 4.

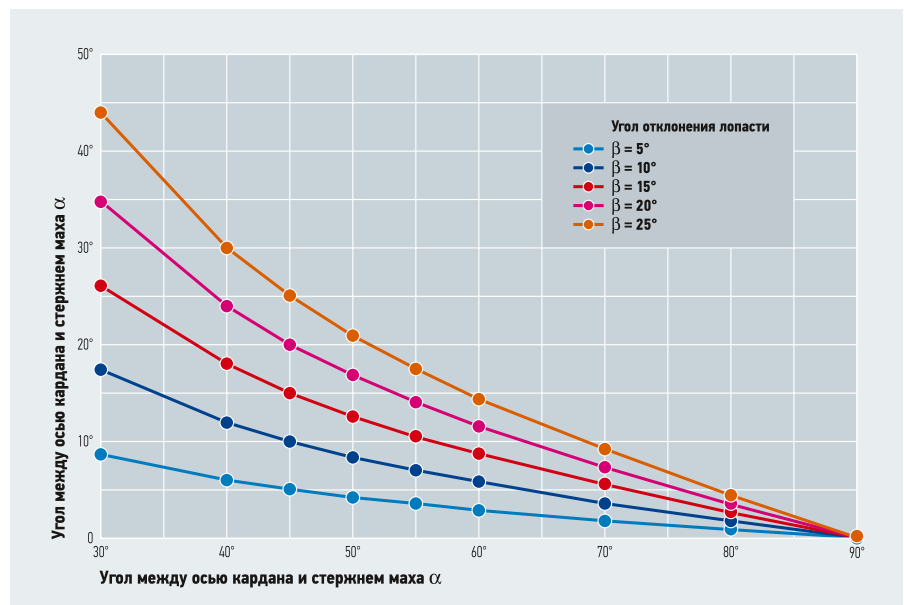


Рис. 4. Зависимость пускового угла однолопастной ВЭУ от конструкционного угла α между осями маха и кардана

Анализ графических зависимостей пусковых углов φ (рис. 4) от конструктивных углов между осью кардана и стержнем маха α , а также предельным углом отклонения лопасти под действием ветра β позволяет выбрать их оптимальные значения для обеспечения надёжного запуска ветроколеса.

Обязательным условием устойчивой работы однолопастной ВЭУ является балансировка ветроколеса. Как показывает опыт разработки и эксплуатации однолопастных ВЭУ, для их стабильной работы без вибраций достаточно проведение статической балансировки ветроколеса на ножах перед установкой его в подшипниковый узел корпуса генератора.

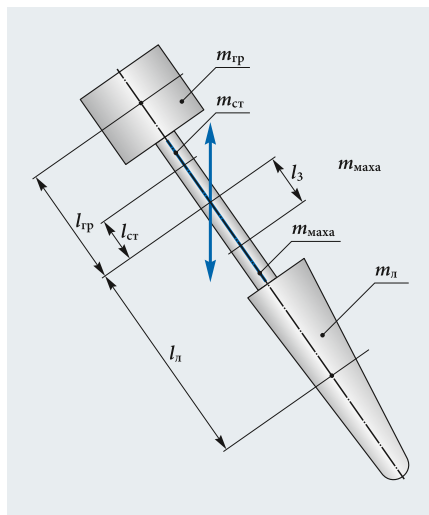


Рис. 5. Упрощённая схема ветроколеса однолопастной ВЭУ



Зависимость пусковых углов лопасти φ от углов наклона маха α и углов конструктивного угла отклонения лопасти β

табл. 1

α , град.	β , град.	φ , град.	α , град.	β , град.	φ , град.	α , град.	β , град.	φ , град.	α , град.	β , град.	φ , град.	α , град.	β , град.	φ , град.
90	25	0,0	90	20	0,0	90	15	0,0	90	10	0,0	90	5	0,0
80	25	4,4	80	20	3,5	80	15	2,6	80	10	1,8	80	5	0,9
70	25	9,1	70	20	7,3	70	15	5,5	70	10	3,6	70	5	1,8
60	25	14,4	60	20	11,5	60	15	8,7	60	10	5,8	60	5	2,9
55	25	17,5	55	20	14,0	55	15	10,5	55	10	7,0	55	5	3,5
50	25	20,9	50	20	16,8	50	15	12,6	50	10	8,4	50	5	4,2
45	25	25,0	45	20	20,0	45	15	15,0	45	10	10,0	45	5	5,0
40	25	29,9	40	20	23,9	40	15	17,9	40	10	11,9	40	5	6,0
30	25	44,1	30	20	35,0	30	15	26,1	30	10	17,4	30	5	8,7

Масса балансировочного груза и его положение определяется условием равновесия системы «лопасть — мах — кардан — груз» из уравнения равенства моментов с одной стороны и от оси поворота кардана — с другой [6], в соответствии с упрощённой схемой ветроколеса однолопастной ВЭУ (рис. 5):

$$m_{гр} + m_{ст} = m_{маха} + m_{л}; \quad (11)$$

$$m_{гр}l_{гр} + m_{ст}l_{ст} = m_{маха}l_{маха} + m_{л}l_{л}, \quad (12)$$

где $m_{гр}$ — масса груза, кг; $m_{ст}$ — масса стержня, кг; $m_{маха}$ — масса маха, кг; $m_{л}$ — масса лопасти, кг; $l_{гр}$ — расстояние от центра вращения до центра массы груза, м; $l_{ст}$ — расстояние от центра вращения до

центра масс стержня груза, м; $l_{маха}$ — расстояние от центра вращения до центра масс маха, м; $l_{л}$ — расстояние от центра вращения до центра масс лопасти, м.

Выводы

1. Выходная мощность горизонтально-осевых ВЭУ не зависит от числа лопастей ветроколеса.
2. Запуск ветроколеса однолопастной ВЭУ возможен как от генератора, работающего в стартерном режиме, так и с помощью качающегося регулятора пусковых углов с косым карданом.
3. Для устойчивой работы однолопастной ВЭУ без вибраций и устранения дис-

баланса необходима и достаточна статическая балансировка ветроколеса в составе «лопасть — балансировочный груз» на ножах до установки ветроколеса в подшипники корпуса генератора.

4. Величина пусковых углов лопасти однолопастной ВЭУ фиксированная и зависит от угла между осью кардана и осью маха лопасти, а также предельного угла отклонения лопасти под действием ветра, заложенных в конструкцию регулятора. ●

1. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. — М.: Сельхозгиз, 1957. 545 с.
2. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. Wind energy explained: Theory, design, and application. 2nd Edition. John Wiley & Sons. 2010. 704 p.
3. Грибков С.В., Русаков А.М., Сутробов А.М., Теталь А. Вопросы оптимального проектирования ветроэнергетических установок малой мощности. Электрические генераторы ветроустановок малой мощности // Новое в российской энергетике, 2021. №4. С. 17–36.
4. Грибков С.В. Развитие малой ветроэнергетики в мире и России. Комплексы гарантированного электроснабжения / Альтернативная энергетика в регионах России: Мат. молодёжн. науч. конф. (г. Астрахань, 5–7.12.2018); под ред. Л.Х. Зайнутдиновой и М.Г. Тягунова. — Астрахань: Изд. Сорокин Р.В., 2018. 304 с.
5. Мелихов Н.Н., Морозов В.А. Учебное пособие по курсу «Проектирование ЭЛА»: Системы управления вентиляторами автономных объектов / Под ред. В.С. Павлихина. — М.: Изд-во МЭИ, 1981. 95 с.
6. Теория механизмов и механика машин: учебник для вузов / Г.А. Тимофеев, А.К. Мусатов, С.А. Попов, К.В. Фролов; под ред. Г.А. Тимофеева. Изд. 8-е, перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ, 2017. 566 с.

References — see page 80.



Ветроэлектрическая установка ВЭУ-0,8 производства ООО «НИЦ «Виндэк»

Features of start-up of small wind turbine with single-blade. Pp. 68–71.

Sergey V. Gribkov, PhD, Academician of the [Russian Engineering Academy \(REA\)](#), scientific secretary of the Committee on the Problems of the Use of Renewable Energy Sources of the [Russian Union of Scientific and Engineering Societies](#) (RES Committee of [RosSNIO](#)), general director of ["WindEq Technical Center"](#), LLC (Podolsk city, Moscow Region)

1. E.M. Fateev. *Vetrodvigateli i vetroustanovki* [Wind turbines and wind turbines]. Moscow. Sel'khozgiz [State Publishing House of Agricultural Literature of the USSR ("Selkhozgiz" Publishers)]. 1957. 545 p. [In Russian]
2. J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers. Wind energy explained: Theory, design, and application. 2nd Edition. John Wiley & Sons. 2010. 704 p.
3. S.V. Gribkov, A.M. Rusakov, A.M. Sugrobov, A. Tetel'. *Voprosy optimal'nogo proektirovaniya vetroenergeticheskikh ustanovok maloj moshhnosti. Jelektricheskie generatory vetroustanovok maloj moshhnosti* [Issues of optimal design of low power wind turbines. Electric generators of low power wind turbines]. *Novoe v rossijskoj jenergetike* ["New in the Russian energy industry" Magazine]. 2021. No. 4. Pp. 17–36. [In Russian]
4. S.V. Gribkov. *Razvitie maloj vetroenergetiki v mire i Rossii. Kompleksy garantirovannogo jelektrifikirovaniya* [Development of small wind energy in the World and Russia. Complexes of guaranteed power supply]. *Alternativnaja jenergetika v regionah Rossii (AJeR-2018): Mat. molodezhn. nauch. konf.* [Alternative energy in the regions of Russia (AJeR-2018): Proc. of the Youth scientific conference]. Astrakhan city, December 5–7, 2018. Under the scientific editorship of L.Kh. Zainutdinova and M.G. Tyagunov. Astrakhan. Publisher: R.V. Sorokin. 2018. 304 p. [In Russian]
5. N.N. Melihov, V.A. Morozov. *Uchebnoe posobie po kursu "Proektirovanie JeLA": Sistemy upravleniya ventil'nymi dvigateljami avtonomnykh ob'ektov* [A textbook for the "Designing of experimental aircraft" training course: Control systems for valve motors of autonomous objects]. Edited by V.S. Pavlikhin. Moscow. *Izd-vo MJeI* [Moscow Power Engineering Institute Publishing House]. 1981. 95 p. [In Russian]
6. G.A. Timofeev, A.K. Musatov, S.A. Popov, K.V. Frolov. *Teorija mehanizmov i mehanika mashin: uchebnik dlja vuzov* [Theory of mechanisms and mechanics of machines: A textbook for universities]. Edited by G.A. Timofeev. 8th Edition, rev. and exp. Moscow. *Izd-vo MGTU* [Bauman Moscow State Technical University Publishing House]. 2017. 566 p. [In Russian]