

УДК 629.04

## Анализ актуальности ветроэнергетики в Республике Башкортостан

© Е.С. Павлов, А.Е. Кишалов

*Уфимский государственный авиационный технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация*

**Аннотация.** Данная статья посвящена произведенному обзору традиционных и альтернативных методов выработки электроэнергии и анализу их вклада в мировую выработку. Также в статье перечислены основные возобновляемые источники энергии. На основании анализа мировой выработки электроэнергии были выделены страны-лидеры по развитию ветроэнергетики в мире. Приводится процентное соотношение выработки электроэнергии за счёт ветроэнергетики к общей выработке в этих странах. Был проведен анализ состояния ветроэнергетики, представлены характеристики ветрогенератора ветроэлектростанции (ВЭС), действующей в Республике Башкортостан. Сформулированы требования к промышленным ВЭС для районов Урала. Приведены и проанализированы характеристики распространённых ветрогенераторов индивидуального пользования. На основе анализа характеристик распространённых ветрогенераторов индивидуального пользования была построена их обобщённая обезразмеренная характеристика, позволяющая делать прогнозы об изменении электрической мощности этих генераторов в зависимости от скорости ветра. В статье также приведены данные о среднегодовой скорости в различные сезоны в разных районах Республики Башкортостан. Сделаны выводы об актуальности установки – как промышленных ВЭС, так и индивидуальных ветрогенераторов в Республике Башкортостан.

**Ключевые слова:** ветрогенератор, ветроэнергетика, Республика Башкортостан, возобновляемые источники энергии, скорость ветра

## Analysis of the Relevance of Wind Energy in the Republic of Bashkortostan

© Yegor S. Pavlov, Aleksandr Ye. Kishalov

*Ufa State Aviation Technical University,  
Ufa, Russian Federation*

**Abstract.** The article is devoted to an overview of traditional and alternative methods of electricity generation and an analysis of their contribution to global generation. The article also lists the main renewable energy sources. Based on the analysis of world electricity generation, the leading countries in the development of wind energy in the world have been identified. The article gives the percentage of electricity generated by wind energy to the total generation in these countries. The article analyzes the state of the wind power industry, presents the characteristics of a wind generator of a wind power plant (WPP) operating in the Republic of Bashkortostan and formulates requirements for industrial WPPs for the regions of the Urals. The article presents and analyzes the characteristics of common wind turbines for individual use. Based on the analysis of the characteristics of common wind generators for individual use, their generalized dimensionless characteristic has been built, which makes it possible to make predictions about the change in the electrical power of these generators depending on the wind speed. The article also provides data on the average annual speed in different seasons in different regions of the Republic of Bashkortostan and draws conclusions about the relevance of the installation of both industrial and individual wind turbines in the Republic.

**Keywords:** wind generator, wind power, Republic of Bashkortostan, renewable energy sources, wind speed

В настоящее время около 65 % от общей производимой электроэнергии в мире вырабатывается за счет традиционных методов выработки электроэнергии, 10 % производится на АЭС, 25 % – за счёт возобновляемых источников энергии.

К самым распространённым возобновляемым источникам энергии относятся следующие: энергия ветра, энергия солн-

ца, энергия приливов и отливов, энергия волн, геотермальная энергия, энергия, получаемая в результате сжигания биотоплива [1]. К традиционным методам выработки относятся тепловые электростанции (ТЭС).

ТЭС используют в качестве топлива природные ископаемые, такие как природный газ, нефть, уголь. Потребность в элект-

троэнергии в мире только возрастает, что может привести к истощению природных ресурсов.

Ветроэнергетика – одна из перспективных ветвей развития альтернативных источников энергии. Энергия ветра не истощима. Ветер возникает из-за неравномерного распределения атмосферного давления, вызванного неравномерным распределением температуры. Ветроэнергетика позволяет преобразовывать бесплатную и неиссякаемую энергию ветра в электроэнергию. По данным за 2017 год, за счет ветроэнергетики в мире было выработано 1129,08 млрд кВт·ч, что составляет 4,6 % от общей выработки электроэнергии [1]. Одними из лидеров по выра-

ботке электроэнергии за счёт ветроэнергетики являются Германия и Голландия. Мощность ветряных электростанций в Германии составляла 5333,5 МВт [2]. В Германии за счёт ветроэнергетики было произведено 103,71 млрд кВт·ч (16,8 % от общей), а в Голландии за счёт ветроэнергетики было выработано 10,57 млрд кВт·ч (9,48 % от общей). В РБ ветроэнергетика не так распространена, но в 2001 году в Туймазинском районе Республики Башкортостан была введена в эксплуатацию ветроэлектростанция (ВЭС) «Тюпкильды». ВЭС на данный момент обладает 3 ветрогенераторами ЕТ 550/41, произведенными в Голландии (табл. 1) [3].

Таблица 1. Характеристика ЕТ 550/41

Номинальная мощность, кВт		550
Высота до оси винта, м		42,0
Число лопастей, шт.		3
Диаметр винта, м		41,5
Высота башни, м		40,0
Заметаемая площадь, м <sup>2</sup>		1353
Плотность мощности, м <sup>2</sup> /кВт		2,46
Скорость ветра, м/с:	минимальная	3,5
	номинальная	14,0
Разъединительная скорость, м/с		25,0

Средняя расчетная стоимость киловатт-часа составила 14,37 рублей при действующем тарифе для населения 1,49 рубль [4]. Убытки компании от эксплуатации ВЭС в 2013–2014 годах составили 7–8 миллионов рублей в год [5]. Тем не менее ВЭС «Тюпкильды» представляет ценность для энергетиков Башкортостана из-за того, что на её базе идёт наработка опыта по эксплуатации и обслуживанию объектов возобновляемой энергетики.

На основании полученного опыта эксплуатации Башкирэнерго составило требования (критерии), которым должны соответствовать ВЭС для районов Урала. Среди них можно выделить три основных.

1. Номинальная мощность должна быть 200–300 кВт, высота башни – не более 40 м, масса гондолы – не более 30 т, что в большей степени связано с трудностями в поиске крана необходимой грузоподъемности и транспортировки ВЭС.

2. Номинальная скорость ветра ВЭУ должна составлять 11–13 м/с, скорость ветра включения ВЭС – 2,5–3,5 м/с, генератор четырех-шестиполюсный или многополюсный совместно с инвертором, регулирование скорости вращения осу-

ществляется изменением угла атаки лопастей. Это позволяет обеспечить максимальную выработку как при малых, так и при больших скоростях ветра.

3. Минимальная рабочая температура должна быть до минус 30 °С (большинство иностранных ВЭС могут работать до минус 15 °С).

Однако все эти требования касаются больших промышленных ВЭС. Помимо промышленных ветрогенераторов также существуют малые ветрогенераторы, предназначенные для индивидуальных потребителей. Основные характеристики распространённых индивидуальных ветрогенераторов приведены в таблице 2 [6–8].

Из анализа характеристик, приведённых в таблице 2, видно, что ветрогенераторы имеют большие габариты. При средней высоте мачты 10 м они имеют диаметры винтов порядка 4 м, а средний вес составляет 80 кг (не считая мачты), что существенно усложняет их установку и эксплуатацию. Также они рассчитаны на работу в диапазоне скоростей от 3 до 40 м/с, ротор большинства ветрогенераторов начинает вращение при скорости ветра 2,5 м/с. Номинальная мощность до-

стигается при высоких скоростях ветра (порядка 10–12 м/с). На основании данных, приведенных выше, была построена безразмерная характеристика типа  $N_p = f(W)$

(рис.), для ее построения все значения скорости набегающего потока делились на номинальные значения, аналогично и для электрической мощности.

Таблица 2. Характеристики ветрогенераторов индивидуального пользования

Наименование	Номинальная мощность, кВт	Кол-во лопастей, шт.	Диаметр, м	Рабочий диапазон скоростей, м/с	Вес, кг	Аккумулятивное напряжение, В	Гарантия, лет	Стоимость, тыс. руб.	Срок службы, лет
Energy wind 1 kWt	1,00	3	2,6	3–30	30	12/24/48	3	65	15–25
Energy wind 2 kWt	2,00	1	2,6	3–30	35	12/24/48	3	80	
Energy wind 3 kWt	3,00	1	4,0	3–30	45	12/24/48	3	110	
Energy wind 4kWt	4,00	1	3,5	3–30	55	24/48	3	119	
Energy wind 5kWt	5,00	3	4,0	3–40	65	48	3	250	
Energy wind 6,5 kWt	6,50	1	5,0	3–40	85	48	3	300	
Energy wind 8 kWt	8,00	3	5,0	3–40	100	48	3	500	
Energy wind 10 kWt	10,0	3	7,0	3–40	150	48	3	650	
Exmork 1kWt	1,00	3	2,8	3–25	70	48/24	1	67	10
Exmork 1,5 kWt	2,00	3	3,2	3–25	85	48/24	1	81	
Exmork 2 kWt	2,00	3	3,2	3–25	88	48/24	1	87	
Exmork 2,5 kWt	2,50	3	3,8	3–25	88	48	1	99	
Exmork 3 kWt	3,00	3	4,0	3–25	170	48	1	158	
ZWP-300W-12	0,30	3	2,2	3–25	40	12	1	40	-
ZWP-750W-12	0,75	3	2,7	3–25	65	12	1	63	
ZWP-1500W-24	1,50	3	3,2	3–25	85	24	1	100	
ZWP-2000-24	2,00	3	3,6	3–25	105	24	1	111	
ZWP-3000-48	3,00	3	4,0	3–25	130	48	1	173	

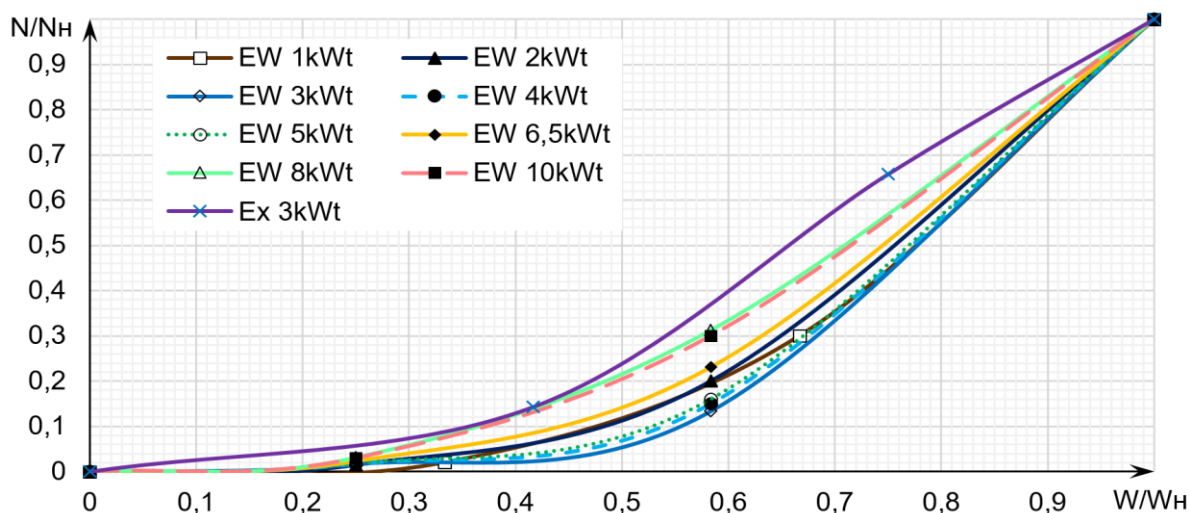
Из анализа рис. становится ясно, что ветрогенераторы набирают мощность согласно закону кубической параболы. Это обусловлено тем, что полезная работа, совершаемая лопастью ветрогенератора, напрямую зависит от кинетической энергии набегающего потока  $\rho W^2 / 2$  и от расхода  $m = \rho W F$ . Можно наблюдать отклонение линии Ex 3kWt от параболы, что можно объяснить особенностью построения гладких кривых с помощью пакета MSExcel или неточностью замеров мощности и малым количеством экспериментальных точек. Также наблюдается расхождение некоторых линий. Они проходят выше других, что обусловлено различным значением коэффициента полезного использования ветра ( $\xi$ ) у разных ветрогенераторов, от которого зависит полезная работа лопасти ветрогенератора при заданной скорости набегающего потока. Коэффициент полезного использования ветра ( $\xi$ ) рассчитывается по формуле [9]:

$$\xi = C_x (1 - W/V)^2 W/V$$

где  $W$  – скорость набегающего потока,  $V$  – скорость потока на некотором удалении от лопасти,  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления.

Для ветрогенераторов, представленных в таблице 2, отсутствует полная информация о распределении мощности по скорости набегающего потока, поэтому такие ветрогенераторы на характеристике не изображены.

Для анализа актуальности установки ветрогенераторов важным критерием является среднегодовая скорость ветра в регионе. Среднегодовая скорость ветра в РБ составляет 3–5 м/с, число дней с сильным ветром (15 м/с и более) достигает 25–30 дней [10]. В таблице 3 приведены скорости ветра в различных районах РБ по сезонам [6].



Характеристика ветрогенераторов

Таблица 3. Скорость ветра в РБ

Расположение метеостанции	Среднегодовая скорость ветра на высоте 10 м	Средняя скорость ветра, м/с				Максимальная скорость ветра, м/с
		Зима	Весна	Лето	Осень	
Уфа	2,2	2,3	2,5	1,8	2,1	23
Акъяр	3,3	3,1	3,6	3,2	3,0	20
Аксаково	3,1	3,4	3,2	2,6	3,4	21
Аскино	3,1	3,1	3,4	2,7	3,1	24
Бирск	2,6	2,7	2,8	2,3	2,6	25
Зилаир	1,9	1,8	2,3	1,7	1,6	21
Стерлитамак	1,6	1,5	1,8	1,5	1,5	20
Янаул	3,2	3,1	3,5	2,5	3,7	24

На основании анализа таблицы 3 можно утверждать, что среднегодовая скорость ветра в различных районах РБ не превышает 3,5 м/с. В частности, в районе г. Уфы среднегодовая скорость ветра составляет 2,2 м/с, а максимальная скорость ветра – 23 м/с. Число дней с сильным порывистым ветром (15 м/с и более) достигает 25–30 дней.

Итак, из информации, приведенной в статье, следует, что установка промышленных ВЭС в РБ невыгодна, так как промышленные ВЭС выходят на номинальный режим при больших скоростях ветра (14 м/с), они сложны в эксплуатации и требуют больших территорий для установки. Поэтому единственная промышленная ВЭС в РБ работает в убыток. Установка ветрогенераторов для индивидуальных потребителей тоже не является выгодной, так как из анализа их характеристик видно,

что они также выходят на номинальный режим при больших скоростях ветра (порядка 10–12 м/с). При этом среднегодовая скорость ветра в РБ составляет 2,5–3,0 м/с. Отсюда возникает необходимость проектирования ветрогенераторов, которые выходят на номинальный режим при малых скоростях ветра (2,5–3,0 м/с), такие ветрогенераторы называются тихоходными. Коэффициент полезного использования ветра тихоходных ветрогенераторов достигает 40 %, что обеспечивается повышенным коэффициентом полезного использования ветра, который зависит от количества и профиля лопастей. Малые габариты тихоходных ветрогенераторов упрощают их установку и эксплуатацию. Таким образом, исследование тихоходных ветрогенераторов является одним из перспективных и актуальных направлений развития ветроэнергетики.

**Библиографический список**

1. International monthly data update [Электронный ресурс]. URL: <https://knoema.ru/EIAINTL2018May/international-energy-data-monthly-update> (04.02.2020).
2. Сидорович В. Ветроэнергетика Германии превысила 56 ГВт по итогам 2017 // RenEn [Электронный ресурс]. URL: <https://renen.ru/wind-energy-of-germany-exceeded-56-gw-in-2017/> (04.02.2020).
3. TheWindPower [Электронный ресурс]. URL: [https://www.thewindpower.net/turbine\\_en\\_120\\_euroturbine\\_et-550-41.php](https://www.thewindpower.net/turbine_en_120_euroturbine_et-550-41.php) (19.03.2020).
4. Стоимость электроэнергии от возобновляемых источников Башкирии в 4 раза выше традиционной // Bashinform [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bashinform.ru/news/1237729-stoimost-elektroenergii-ot-vozobnovlyaemykh-istochnikov-bashkirii-v-4-raza-vyshe-traditsionnoy/> (24.03.2020).
5. Щаулов В.Ю., Афанасьев И.П., Озеров А.В. Опыт монтажа и эксплуатации ветроэнергетических установок [Электронный ресурс]. URL: <http://windturbines.ru/article/77-opit-montaga-windturbines.html> (04.02.2020).
6. Ветрогенераторы // EnergyWind [Электронный ресурс]. URL: <http://energywind.ru/katalog/vetrogeneratory> (04.02.2020).
7. Ветрогенераторы // Inventory.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://inventory.ru/category/vetrogeneratory> (04.02.2020).
8. Ветрогенератор 300 Вт (12 В) // Altcentr [Электронный ресурс]. URL: <http://www.altcentr.ru/catalog> (30.01.2020).
9. Агеев В.А. Нетрадиционные и возобновляемые энергии [Электронный ресурс]. URL: [https://renewables.ru/pdf\\_doc/lecture7.pdf](https://renewables.ru/pdf_doc/lecture7.pdf) (24.03.2020).
10. Климатическая характеристика Республики Башкортостан // meteorb.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteorb.ru/meteorology/climatic-characteristics> (24.03.2020).

**Сведения об авторах / Information about the Authors**

**Павлов Егор Сергеевич**,  
студент группы ТЭТ-310,  
Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12, Российская Федерация,  
e-mail: egorpavlov98@mail.ru

**Кишалов Александр Евгеньевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики,  
Уфимский государственный авиационный технический университет,  
450077, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12, Российская Федерация,  
e-mail: kishalov@ufanet.ru

**Yegor S. Pavlov**,  
Student,  
Ufa State Aviation Technical University,  
12 Karl Marx Str., Ufa, 450077, Russian Federation,  
e-mail: egorpavlov98@mail.ru

**Aleksandr Ye. Kishalov**,  
Cand. Sci. (Technics),  
Associate Professor of Aviation Heat Engineering and Heat Power Engineering Department,  
Ufa State Aviation Technical University,  
12 Karl Marx Str., Ufa, 450077, Russian Federation,  
e-mail: kishalov@ufanet.ru