



ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.548
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-58-64

А. А. БЕЛЬСКИЙ
А. И. ЗАМЯТИН

Санкт-Петербургский
горный университет,
г. Санкт-Петербург

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Использование ветроэлектрических установок стремительно растет, несмотря на продолжающийся рост добычи традиционных ископаемых ресурсов. В данной работе проведен анализ энергетических характеристик реальных моделей ветроэлектрических установок и распространенных среди научного сообщества полиномов, описывающих зависимость выходной мощности ветроэлектрических установок от ветра. В статье рассматриваются 82 модели ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения, номинальной мощностью до 100 кВт и способом ограничения частоты вращения в рабочем режиме *pitch control*. Был проведен расчет потенциальной генерации каждой ветроэлектрической установки на нефтегазовом месторождении за период двадцать лет с интервалом в один час, рассчитан коэффициент использования установленной мощности, после чего значения сравнивались с результатами расчетов по полиномам других авторов. Полученные результаты могут быть широко применены при моделировании режимов работы ветроэлектрических электростанций и позволят повысить точность технико-экономических обоснований реализации автономных систем электроснабжения.

Ключевые слова: энергетическая характеристика, ветроэлектрическая установка, автономный электротехнический комплекс, ВЭУ.

Введение. На сегодняшний момент наблюдается ежегодное увеличение установленной мощности всех видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и количества вырабатываемой ими электроэнергии [1]. Ветроэнергетика имеет значительные темпы развития — установленная мощность ветряных электростанций за 10-летний период увеличилась в 3 раза. При этом возобновляемые источники энергии получили широкое распространение в Арктическом регионе, так как данное решение существенно сокращает расходы на ископаемое топливо и отличается отсутствием выбросов вредных веществ в атмосферу [2–4].

Более 60 % территории России имеет децентрализованное электроснабжение или не электрифици-

ровано (рис. 1). Объекты в таких регионах имеют проблемы с качеством электроэнергии и с системами резервирования [6–8].

Нефтегазовый сектор является одним из ключевых для нашей страны [9], при этом необходимо отметить, что основные запасы нефти и газа расположены на Крайнем Севере нашей страны, разработка таких месторождений по большей части осложнена неблагоприятными климатическими условиями и большой удалённостью объектов нефтепромысла от существующей инфраструктуры, такой как транспортные магистрали и электрические сети. При этом на данной территории имеется ветропотенциал для развития ветроэнергетики и использования её в качестве основного энергетического



Рис. 1. Карта России с тремя видами территории электроснабжения и стоимостью электроэнергии по выборочным регионам [5]

ресурса для снабжения объектов нефтегазового сектора.

Поддержание объемов добычи нефти в России становится все более сложной задачей главным образом в связи с ростом трудноизвлекаемых запасов, а также ухудшением качественных характеристик нефти, в первую очередь на зрелых месторождениях. Увеличение коэффициента извлечения нефти, который по основным месторождениям России за последние три года не превышает 28–30 % [10], возможно различными способами, в том числе и за счет вовлечения в работу ранее остановленных эксплуатационных скважин. В России существует объективный тренд ухудшения условий добычи нефти. За 2007–2017 годы рост добычи нефти на 13 % сопровождался увеличением числа вводимых скважин на 37 %, а объемов эксплуатационного бурения — на 79 % [11], что является крайне затратным способом эксплуатации. При этом все большее значение будет иметь ввод в эксплуатацию новых месторождений, включая малые месторождения с запасами менее 1 млн тонн, доля которых составляет до 12 % от общего запаса нефти [12].

Темой организации и оптимизации электротехнического комплекса на основе возобновляемой энергии занимались как зарубежные исследователи, так и отечественные [13–15].

Для определения оптимального состава электротехнического комплекса (ЭТК) используются различные критерии. Показатели этих критериев можно разделить на четыре категории, а именно: экономические, надежность, экологические и социальные. Экономическая оценка является основным фактором при определении желательных минимальных начальных, эксплуатационных и любых других будущих затрат на ЭТК [16]. Категория надежности оценивает способность гибридной системы обеспечивать совместную работу генерирующих установок для удовлетворения спроса на нагрузку [17]. Экологический критерий оценивает количество CO_2 и других вредных выбросов, производимых системой в течение заданного периода времени. Социальный критерий оценивает способность ЭТК производить энергию для увеличения индекса человеческого развития (HDI). Кроме того, он оценивает социальное признание установки ги-

бридной системы и создания рабочих мест [18]. Однако одним из ключевых критериев является выработанная электроэнергия. Разные авторы по-своему описывают возможную генерацию электроэнергии от ветроэлектрической установки. Распространенный в научном сообществе вариант, представленный в виде полинома (далее формула № 1):

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & v(t) \leq v_{ci} \text{ или } v(t) \geq v_{co} \\ P_r \left(\frac{v^3(t) - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3} \right) & v_{ci} < v(t) < v_r \\ P_r & v_r < v(t) < v_{co} \end{cases}, \quad (1)$$

где P_r — номинальная мощность ветроэлектрической установки (ВЭУ); $v(t)$ — фактическая скорость ветра на высоте мачты, м/с; v_{ci} — начальная скорость ветра (включение ВЭУ), м/с; v_{co} — предельная скорость ветра (отключение ВЭУ), м/с; v_r — номинальная скорость ветра, м/с.

Впервые данный полином был представлен авторами Borowy B. S. и Salameh Z. M. в 1996 году [19], после чего он начал активно применяться в других научных работах [20–22].

Альтернативный метод расчёта был предложен Бельским А. А. [23]. В своих работах для расчета выработываемой электрической энергии ВЭУ автором был выведен полином для описания энергетической характеристики при базовой номинальной скорости ветра, равной 10,65 м/с, и минимальной скорости 3 м/с для ВЭУ способом ограничения частоты вращения ветроколеса — поворот лопасти (Pitch control), и имеет вид:

$$P^*(V) = \begin{cases} P^{**}(V) = -0,001V^3 + 0,027V^2 - \\ -0,095V + 0,078, & \text{при } V_{\min}^6 \leq V \leq V_{\text{расч}}^6 \\ P^{**}(V) = 1, & \text{при } V_{\text{расч}}^6 < V \leq V_{\max}^6 \end{cases},$$

где $P^*(V)$ — энергетическая характеристика ВЭУ в о.е. при скоростях ветра, не превышающих расчетного (номинального) значения; $P^{**}(V)$ — энергетическая характеристика ВЭУ в о.е. при скоростях ветра свыше расчетного (номинального) значения; V — текущая скорость ветра, м/с; V_{\min}^6 , $V_{\text{расч}}^6$, V_{\max}^6 — минимальная, расчетная и максимальная

Распределение моделей ветроэлектрических установок
из базы данных по номинальной скорости ветра

	Номинальная скорость ветра, м/с				
	8	9	10	11	12
Кол-во моделей	18	20	20	16	8
Кол-во производителей	8	10	14	12	7
Кол-во стран производителей	6	8	9	7	6

базовые скорости, полученные в результате построения среднестатистической энергетической характеристики.

После чего в полином (далее формула № 2) вводится коэффициент для расчета с другими номинальными скоростями ветра:

$$P^*(V) = \begin{cases} P^{**}(V) \cdot (V_{\text{расч}}^6 / V_{\text{расч}}^6)^{3/2}, & \text{при } V_{\text{мин}} \leq V \leq V_{\text{расч}} \\ 1, & \text{при } V_{\text{расч}} < V \leq V_{\text{макс}} \end{cases} \quad (2)$$

Для того чтобы проверить, какое будет расхождение представленных выражений, необходимо провести расчеты на потенциальных к установке ВЭС местах для электроснабжения промышленного потребителя. В работе для сравнения результатов расчетов по формуле № 1 и формуле № 2 были взяты энергетические характеристики реальных моделей, которые зарегистрированы в базе данных ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения мощностью от 1 до 100 кВт [24].

База данных содержит в себе данные по 417 моделям более чем 20 характеристик: модель, производитель, страна, мощность, номинальная скорость ветра, начальная скорость ветра, радиус лопастей, кол-во лопастей, способ ограничения частоты вращения в рабочем и аварийном режиме, наличие мультипликатора, энергетическая характеристика и др.

Большинство моделей ВЭУ, использующих технологию ограничения частоты вращения в рабочем режиме pitch control, имеют стабильную выдаваемую мощность, равную номинальной, при скоростях ветра более номинального, поэтому для наглядности результатов в данной работе будут рассматриваться модели только с технологией поворота лопасти и взят полином Бельского А. А. для ВЭУ с pitch control.

Целью работы является сравнение энергетических характеристик реальных моделей ВЭУ с формулами № 1 и № 2, описывающих выходную мощность ВЭУ от скорости ветра, произвести расчет возможной генерации на конкретном объекте в России и оценить расхождение результатов формулы № 1 и формулы № 2 с результатами реальных моделей.

Методология и материалы. Для анализа энергетических характеристик был выбран объект — Сихорейское нефтяное месторождение (Ненецкий автономный округ, Заполярный район, координаты 67.750556 58.000556, 80 км до ЕЭС, разведано, неэлектрифицировано).

Данный объект выбран из-за своего удаленного местонахождения от ближайших высоковольтных подстанций единой энергетической системы.

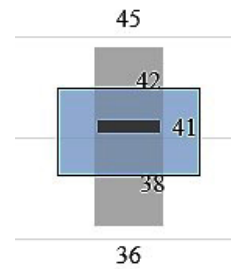


Рис. 2. Пример прямоугольника графика выходной мощности ВЭУ при определенной скорости ветра

Взяты данные по скорости ветра с месторождения с интервалом 1 час за 20 лет на высоте 50 м от уровня земли по данным NASA [25].

Результаты. Для сравнения выработанной энергии различными методологиями и анализа энергетических характеристик расчет велся для ВЭУ с номинальными скоростями ветра 8, 9, 10, 11 и 12 м/с. Для всех расчетов начальная скорость ветра была принята 3 м/с, максимально рабочая скорость — 25 м/с.

База данных содержит в себе 247 моделей ВЭУ мощностью до 100 кВт с горизонтальной осью вращения с энергетической характеристикой. Из них 82 модели, которые используют как основную технологию способа ограничения частоты вращения в рабочем режиме pitch control (табл. 1).

Результаты исследования представлены в виде коробчатых графиков, используемых в описательной статистике [26, 27]. Графики показывают сводку из пяти чисел набора данных: включая минимальное значение, первый (нижний) квартиль, медиану, третий (верхний) квартиль и максимальное значение. Если число элементов в выборке нечетное, то медианой будет число в середине вариационного ряда; если число элементов в выборке четное, то медианой будет среднее арифметическое двух центральных элементов вариационного ряда. Межквартильный диапазон (IQR) — это график, показывающий средние 50 % значений (т. е. диапазон между 25-м и 75-м процентилями). Пример показан на рис. 2.

В результате сравнения энергетических характеристик 82 моделей были построены пять графиков, отражающих выходную мощность ВЭУ в относительных единицах при определенном значении скорости ветра с шагом 1 м/с, для номинальных скоростей 8–12 м/с, на которых отмечены энерге-

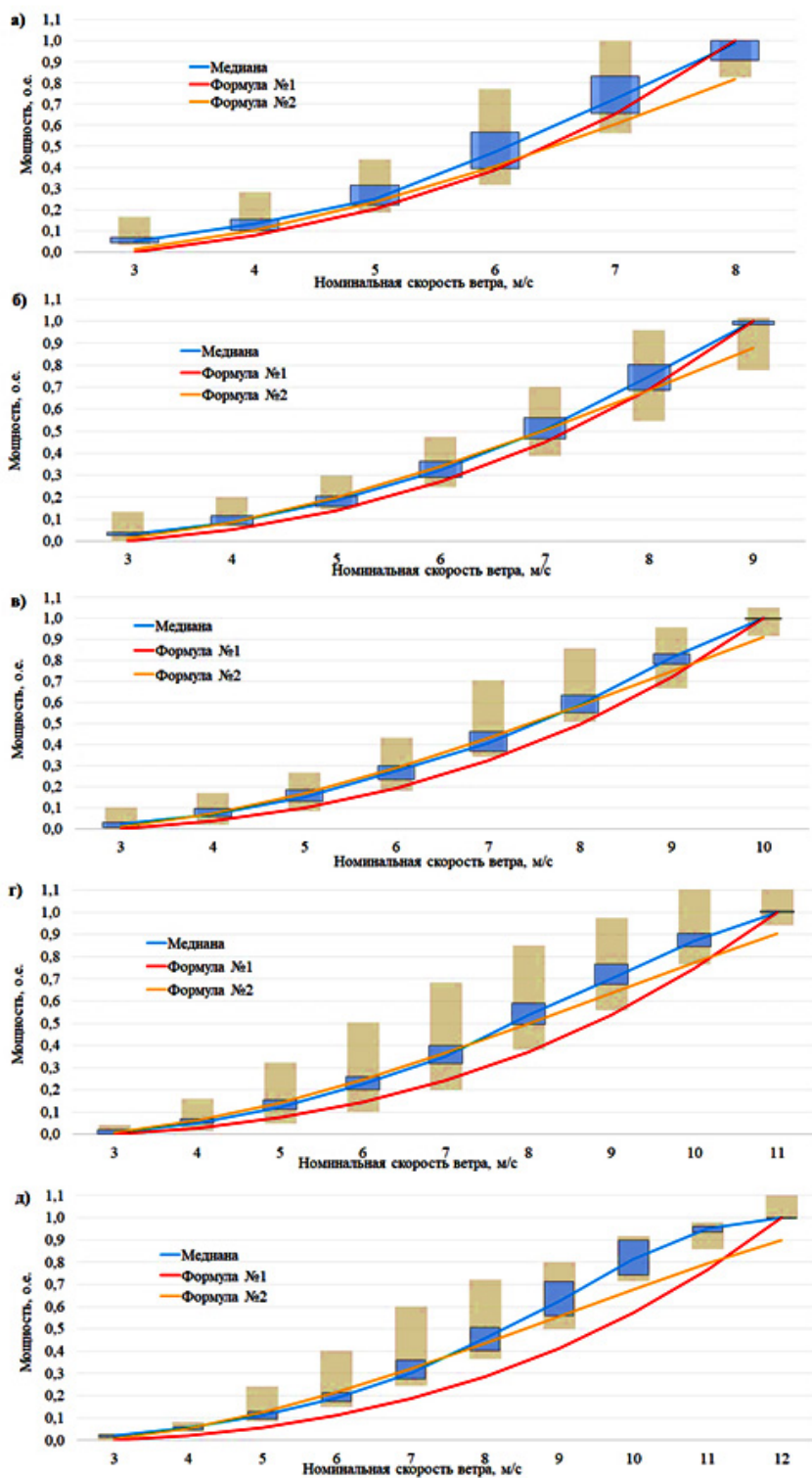


Рис. 3. Графики энергетических характеристик при различных номинальных скоростях ветра: а) 8 м/с; б) 9 м/с; в) 10 м/с; г) 11 м/с; д) 12 м/с

тические характеристики формулы № 1 и формулы № 2 (рис. 3).

Из представленных графиков видно довольно серьезное расхождение энергетических характеристик реальных моделей с формулой № 1 и формулой № 2. Выходная мощность ВЭУ по формуле № 1 в основном находится на уровне минимальных значений реальных ВЭУ, в то же время при номинальной скорости 12 м/с характеристика полностью выходит за диапазон выходной мощности всех ВЭУ. У формулы № 2 выход за пределы межквартиль-

ного диапазона выходной мощности реальных ВЭУ наблюдается только при скоростях ветра, близких к номинальному значению, при этом в точке, где ВЭУ должна выходить на номинальную мощность, значение меньше на 10–20 %.

Для расчета генерации электроэнергии на объекте были построены универсальные энергетические характеристики по медианному значению для номинальных скоростей от 8 до 12 м/с (рис. 4). Полиномиальная функция представлена в виде (табл. 2):

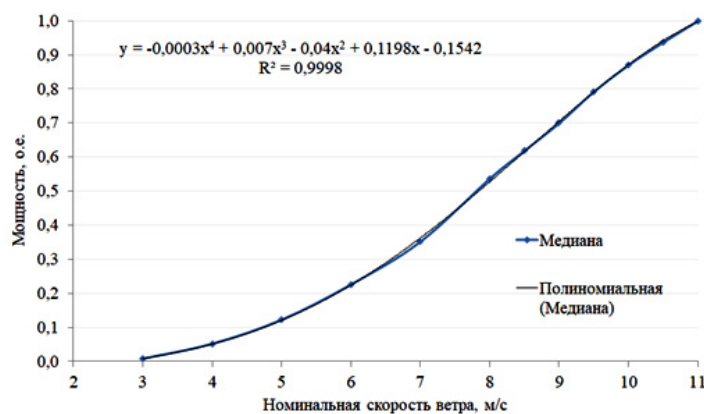


Рис. 4. Пример графика универсальной энергетической характеристики для номинальной скорости ветра 11 м/с

Таблица 2

Значения коэффициентов полиномиальных функций для разных номинальных скоростей ветра

Номинальная скорость ветра	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	R^2
8 м/с	-0,0017	0,0347	-0,2213	0,6447	-0,6883	0,999
9 м/с	0	-0,0005	0,031	-0,1469	0,2082	0,999
10 м/с	0	-0,001	0,0339	-0,1605	0,2281	0,999
11 м/с	-0,0003	0,007	-0,04	0,1198	-0,1542	0,999
12 м/с	-0,0005	0,0129	-0,1023	0,37	-0,479	0,997

$$y = A_1x^4 + A_2x^3 + A_3x^2 + A_4x + A_5.$$

Далее была рассчитана возможная генерация электроэнергии каждой ВЭУ на объекте в течение 20 лет с 2001 года. Расчетный интервал изменения скорости ветра составлял 1 час, что в конечном итоге был проведен расчет для 175,2 тыс. часов для каждой из 82 ВЭУ. Стоит отметить, что если скорость ветра была меньше 3 м/с, то возможная генерация приравнивалась к нулю, а если скорость ветра была больше номинальной скорости ветра у ВЭУ, то возможная генерация приравнивалась к $P_{\text{ном}} \cdot \text{час}$, где $P_{\text{ном}}$ — это номинальная мощность ВЭУ. Полученные результаты пересчитывались в коэффициент использования установленной мощности. Подобный расчет был проведен для формулы № 1 и формулы № 2, а также всех унифицированных характеристик с различными номинальными скоростями ветра.

Анализируя графики (рис. 5) можно сделать несколько ключевых выводов:

- разброс между максимальным и минимальным значением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) у всех ветроэлектрических установок за период в 20 лет находится на уровне около 30 %, вне зависимости от номинальной скорости ветра. Данный показатель подчеркивает, насколько важна энергетическая характеристика, а именно её диапазон разгона. При этом 50 % моделей различаются не более чем в 9% по показателю использования установленной мощности;

- формула № 1 имеет самое наибольшее отклонение от результатов реальных ветроэлектрических установок. С увеличением номинальной скорости ветра увеличивается отклонение, что в один

момент максимальная выработка по формуле № 1 не достигает межквартильный диапазон, из-за чего в дальнейшем может быть некорректно составлен электротехнический комплекс или рассчитано технико-экономическое обоснование;

- формула № 2 имеет обратный результат: с увеличением номинальной скорости ветра уменьшается отклонение от межквартильного диапазона всех ВЭУ. Данный эффект можно объяснить тем, что энергетическая характеристика в диапазоне разгона при меньших значениях ветра имеет большее значение крутизны ($\text{tg } \lambda$), чем при значениях ветра у номинальной точки;

- универсальная характеристика показала наилучший результат, практически всегда попадая в межквартильный диапазон всех ВЭУ;

- необходимо отметить высокие значения КИУМ у графиков для номинальных скоростей ветра 8 и 9 м/с. Данный показатель можно объяснить тем, что на объекте среднее значение ветра на высоте 50 метров колеблется в диапазоне 8–10 м/с и большую часть времени ВЭУ в таком режиме работает при номинальной мощности.

Обсуждение и критика. Таким образом, ученые, использующие формулу № 1, при расчете электротехнического комплекса на основе возобновляемых источников, в частности ветроэнергетики, значительно занижают показатели ВЭУ, что существенно сказывается на последующем обосновании структуры электротехнического комплекса.

Бельский А. А. вывел наиболее приближенную зависимость мощности от скорости ветра к выходным характеристикам реальных ВЭУ, однако при номинальных скоростях ветра менее 10 м/с расхождения становятся все больше.

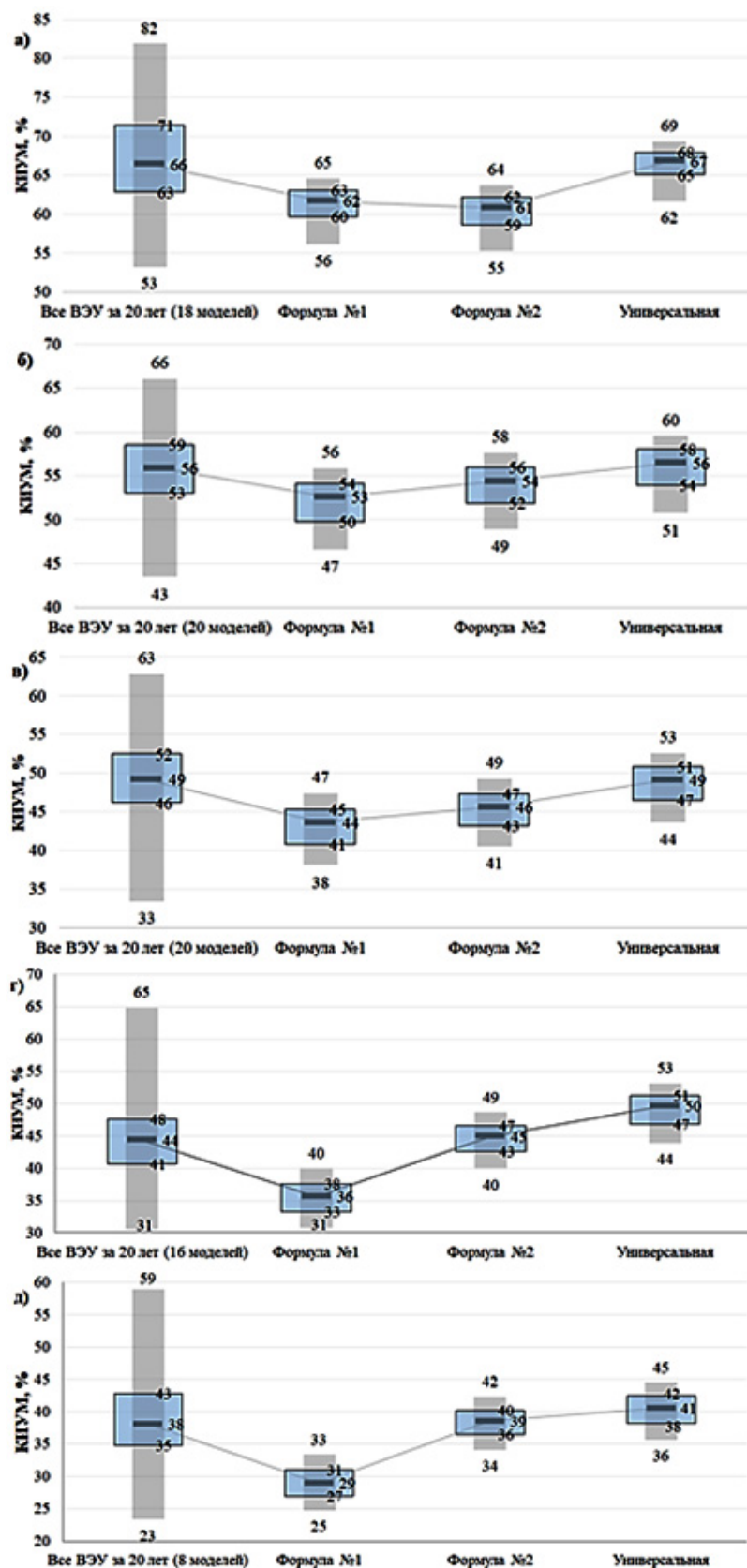


Рис. 5. Сравнение КИУМ при различных номинальных скоростях ветра: а) 8 м/с; б) 9 м/с; в) 10 м/с; г) 11 м/с; д) 12 м/с

Стоит также учитывать, что данное исследование проводилось на основе ветроэлектрических установок мощностью до 100 кВт, то есть в классе «малых мощностей», и вполне возможно, что для ВЭУ с мощностями от 100 до 500 кВт и от 500 кВт и более формула № 1 будет иметь другой результат

при расчетах. Ключевым моментом в данном исследовании может являться и тот факт, что расчет проводился для высоты 50 метров над уровнем земли, в то время как наиболее распространенная высота башни для подобного класса ВЭУ находится в диапазоне 25–35 метров.

1. Renewable capacity statistics 2020 // International renewable energy agency (IRENA). 2020. 66 p. ISBN 978-92-9260-239-0.
2. Cherepovitsyn A. E., Tsvetkov P. S., Evseeva O. O. Critical analysis of methodological approaches to assessing sustainability of arctic oil and gas projects // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 249. P. 463–478. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15.
3. Zhukovskiy Y. [et al.]. Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic // Resources. 2021. Vol. 10 (12). 124. 25 p. DOI: 10.3390/resources10120124.
4. Stroykov G., Cherepovitsyn A. Y., Iamshchikova E. A. Powering multiple gas condensate wells in Russia's arctic: Power supply systems based on renewable energy sources // Resources. 2020. Vol. 9 (11). 130. 15 p. DOI: 10.3390/resources9110130.
5. Возобновляемые источники энергии как новый шаг развития для нефтегазовых компаний // KPMG. 2019. 25 с.
6. Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. P. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
7. Abramovich B. N., Bogdanov I. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 249. P. 408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.
8. Шклярский Я. Э., Васильков О. С. Разработка алгоритма определения мест подключения систем накопления электроэнергии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 165–173. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-4-165-173.
9. Батуева Д. Е. [и др.]. Традиционная углеводородная энергетика в рамках устойчивого развития // О продвижении принципов «зеленой» экономики в целях ускорения научно-технологического прогресса: конф. 2020. С. 12–13. DOI: 10.38006/907345-65-2.2020.12.13.
10. Игошева А. А. Обзор динамики и структуры фонда нефтяных скважин в России // Инновационная наука. 2018. № 11. С. 71–74.
11. Рыженко В. Ю. Нефтяная промышленность России: состояние и проблемы // Перспективы науки и образования. 2014. № 1 (7). С. 300–314.
12. Шайхисламов Р. М., Рябов С. Ю., Репчук С. В. Методика анализа и оценка перспектив освоения нефтяных месторождений по геолого-физической характеристике. URL: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C11/V2/047.pdf> (дата обращения: 10.06.2022).
13. Upadhyay S., Sharma M. P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 38. P. 47–63. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.057.
14. Sawle Y., Gupta S. C., Bohre A. K. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 2217–2235. DOI: 10.1016/j.rser.2017.06.033.
15. Батуева Д. Е., Шклярский Я. Э., Ревин И. Е. Анализ данных генерации электроэнергии в ветродизельном комплексе с использованием алгоритма SSA // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 6. С. 69–77.
16. Жуковский Ю. Л. [и др.]. Классификация инструментов инвестиционной поддержки технологий интегрированных энергетических систем // Российский экономический интернет-журнал. 2019. № 3. С. 29.
17. Zhukovskiy Y. L. [et al.]. Analysis of technological changes in integrated intelligent power supply systems // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects-11th Conference of the Russian-German Raw Materials. St. Petersburg: Saint-Petersburg mining university, 2018. Vol. 1. P. 249–258.
18. Al-Falahi M. D. A., Jayasinghe S. D. G., Enshaei H. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system // Energy conversion and management. 2017. Vol. 143. P. 252–274. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.04.019.
19. Borowy B. S., Salameh Z. M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system // IEEE Transactions on energy conversion. 1996. Vol. 11 (2). P. 367–375. DOI: 10.1109/60.507648.
20. Rajanna S., Saini R. P. Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area // Energy. 2016. Vol. 111. P. 803–817. DOI: 10.1016/j.energy.2016.06.005.
21. Лаврик А. Ю. [и др.]. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С. 10–17. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17.
22. Askarzadeh A., dos Santos Coelho L. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: A case study of Iran // Solar Energy. 2015. Vol. 112. P. 383–396. DOI: 10.1016/j.solener.2014.12.013.
23. Бельский А. А. Ветроэлектрическая установка с регулированием мощности за счет вывода ветроколеса из под ветра // Естественные и технические науки. 2013. № 1. С. 185–188.
24. Пат. 2021621667 Российская Федерация. База данных ветроэлектрических установок с горизонтальной осью вращения мощностью от 1 до 100 кВт / Бельский А. А., Замятин А. И., Васильева Н. В. № 2021621537; заявл. 27.07.21; опубл. 05.08.21, Бюл. № 8.
25. Data Access Viewer // NASA Power. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (дата обращения: 10.06.2022).
26. Tayyib M., Odden J. O., Saetre T. O. Irradiance dependent temperature coefficients for MC solar cells from Elkem solar grade silicon in comparison with reference polysilicon // Energy Procedia. 2014. Vol. 55. P. 602–607. DOI: 10.1016/j.egyp.2014.08.032.
27. Moeini B., Haack H., Fairley N. [et al.]. Box plots: A simple graphical tool for visualizing overfitting in peak fitting as demonstrated with X-ray photoelectron spectroscopy data // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. 2021. Vol. 250. 147094. DOI: 10.1016/j.jelspec.2021.147094ff.fhal-03298446.

БЕЛЬСКИЙ Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5210-4195

AuthorID (РИНЦ): 743832

ORCID: 0000-0002-2619-1496

AuthorID (SCOPUS): 56367311300

Адрес для переписки: Belskij_AA@pers.spmi.ru

ЗАМЯТИН Алексей Игоревич, аспирант кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета, г. Санкт-Петербург.

ORCID: 0000-0002-1108-6001

AuthorID (SCOPUS): 57220047983

Адрес для переписки: a1le2x@yandex.ru

Для цитирования

Бельский А. А., Замятин А. И. Анализ энергетических характеристик ветроэлектрических установок // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 58–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-58-64.

Статья поступила в редакцию 15.06.2022 г.

© А. А. Бельский, А. И. Замятин