



Погрешности определения мощности ВЭУ по данным измерений метеопараметров на ветроизмерительных комплексах

Рецензия эксперта на статью получена 30.10.2024 [The expert review of the article was received on October 30, 2024]

Важнейшей задачей проектирования энергокомплексов на базе ветроэлектрических установок (ВЭУ) и ветроэлектрических станций (ВЭС) является достаточно точный для практики прогноз величин их средней многолетней мощности и выработки, определяющих энергетическую и экономическую целесообразность их использования. Под достаточной точностью в международной практике, осуществляемой в соответствии с требованиями кредитных организаций (что недостаточно обоснованно, по нашему мнению), распространено и на Россию), принята 10 %-я точность прогноза многолетней выработки ВЭУ, рассчитываемых с учётом многолетних прогнозных потерь и погрешностей с обеспеченностью 90 %. При этом во внимание принимаются погрешности измерения и анализа достоверности данных ветровых параметров, моделирования ветровых потоков и мощности ВЭУ, а также возможные технические и климатические потери.

Для определения прогноза средней многолетней мощности и выработки ВЭУ разработаны расчётные методы на основе временных рядов данных краткосрочных

(один-два года) многоуровневых (от трёх до пяти уровней) измерений скорости и направления ветра, температуры и давления на специализированных ветроизмерительных комплексах (ВИК) и многолетних измерений на метеорологических станциях (МС) с использованием рабочих характеристик ВЭУ (зависимостей мощности ВЭУ от скорости ветра v [м/с] и плотности воздушного потока ρ [кг/м³]).

Информационная база исследования

Ценной информацией для изучения структуры ветра разного временного масштаба являются данные одно- и двухлетних трёхуровневых измерений на ВИК со стандартным средним десятиминутным разрешением. Согласно общим правилам, площадки для установки ВИК в рассмотренных пунктах выбирались с учётом рельефа подстилающей поверхности и экранирующих ветер препятствий естественного и искусственного происхождения, а также разрешённого землеотвода под их строительство и возможностей электроснабжения измерительного оборудования ВИК и устройств накопления и передачи получаемых данных.

УДК 620.97. Научная специальность: 2.4.5.

Погрешности определения мощности ветроэнергетических установок по данным измерений метеопараметров на ветроизмерительных комплексах

В. Г. Николаев, д.т.н., член-корреспондент Российской инженерной академии (РИА), директор АНО «НИЦ «Атмограф» (Москва); **А. А. Гамова**, научный сотрудник АНО «НИЦ «Атмограф», аспирант ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» («ФНАЦ ВИМ», Москва)

Рассмотрена задача определения погрешностей прогнозирования (определения) мощности и выработки ветроэлектрических установок (ВЭУ) общепринятыми методами косвенных расчётов с использованием рабочих характеристик ВЭУ и временных рядов данных краткосрочных измерений скорости и направления ветра, температуры и давления на специализированных ветроизмерительных комплексах (ВИК). Представленные в статье результаты получены с использованием разработанной авторами формулы аппроксимации рабочих характеристик модельных ВЭУ, близких по характеристикам к наиболее технически совершенным ВЭУ. Оценка погрешностей косвенных расчётов мощности ВЭУ — функции скорости ветра и плотности воздуха — проведена с использованием теории определения статистических характеристик связанных рядов данных.

Ключевые слова: ветровая энергетика, ветроэлектрическая установка, ветроизмерительный комплекс, связанные временные ряды, статистическая достоверность.

UDC 620.97. The number of scientific specialty: 2.4.5.

Errors in determining the power of wind power plants based on measurements of meteorological parameters on wind measuring complexes

V. G. Nikolaev, Doctor of Technical Sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Engineering (RIA), Director of the Autonomous Non-profit Organization (ANO) "Atmograph" Scientific Information Center (SIC) (Moscow); **A. A. Gamova**, researcher at ANO "Atmograph" SIC, postgraduate student of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM" (Moscow)

The problem of determining the errors in forecasting (determining) the power and generation of wind turbines (wind turbines) by generally accepted methods of indirect calculations using the performance characteristics of wind turbines and time series of data from short-term measurements of wind speed and direction, temperature and pressure at specialized wind measuring complexes (WMC) is considered. The results presented in the article are obtained using the formula approximation of the performance characteristics of model wind turbines developed by the authors, which are close in characteristics to the most technically advanced wind turbines. The estimation of errors in indirect calculations of wind turbine power — a function of wind speed and air density — was carried out using the theory of determining the statistical characteristics of connected data series.

Keywords: wind energy, wind power plant, wind measuring complex, connected time series, statistical reliability.

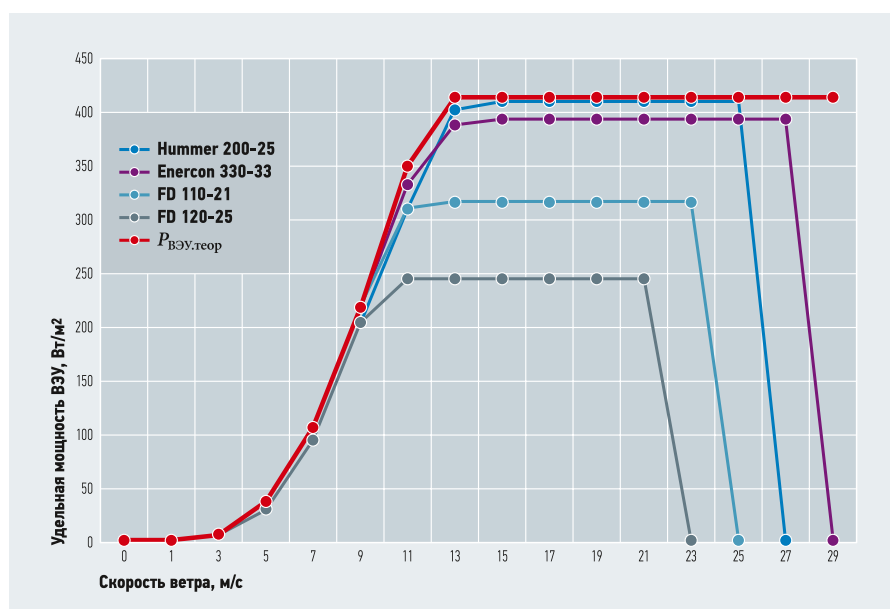


Рис. 1. Рабочие характеристики $P_{ВЭУ}(v)$ современных ВЭУ малой мощности

Измерения и анализ полученных данных ВИК проводились согласно требованиям международного стандарта IEC 61400-12-1:2011 “Wind energy generation systems”.

Для определения технико-экономических характеристик ВЭУ на основе данных ВИК необходима численно реализованная методика их анализа, проводимого в целях максимально достоверного (с минимальными погрешностями) прогноза мощности ВЭУ, учитывающего природные вариации характеристик ветра и плотности воздуха в местах предполагаемого размещения (МПР) ВЭУ. Обоснование актуальности разработки такой методики для российских ВЭУ и ВЭС были даны в работе [1].

В этой работе были использованы данные ВИК, установленных в климатически разных регионах России: в посёлках Темрюк (Краснодарский край), Тикси [Республика Саха (Якутия)], Новиково (Сахалинская область). ВИКи представляют собой мачты высотой от 42 до 62 м, измерительные комплексы на базе чашечных анемометров производства фирмы NRG (США), предназначенные для измерения скорости ветра и закреплённые на мачтах на трёх высотных уровнях: 20, 30 и 40 м в Тикси и Новиково и 20, 40 и 62 м в Темрюке, а также два измерителя направления ветра на каждом ВИК.

Измерения на ВИК проводились в разные периоды времени: в 2009 и 2010 годах в Темрюке, в 2013 и 2014 годах в Новиково и в 2012 и 2013 годах в Тикси.

Выходными данными ВИК являются непрерывно регистрируемые на протяжении полутора лет временные ряды данных по скорости и направлению ветра, осреднённые за десять минут по непрерывным двухсекундным замерам, и их среднеква-

дратические отклонения (СКО), определённые для каждого десятиминутного интервала по двухсекундным данным на указанных трёх уровнях.

Данные ВИК были предоставлены АНО «НИЦ «Атмограф», проводившем проектирование ВЭС установленной мощности 450 кВт в Новиково и 1200 кВт в Тикси, работающих в составе ветродизельных комплексов, а также сетевой ВЭС номинальной мощности 100 МВт в Темрюке. Использованные данные явились ценной информационной базой для изучения высотной и временной структур ветра и построения методики расчёта энергетических показателей ВЭУ по данным ВИК, изложенной в работе [2].

Моделирование мощностных показателей ВЭУ

Разработанная авторами и использованная в статье методика основана на совместном анализе десятиминутных характеристик ветра исследуемого региона и косвенных расчётах мощности ВЭУ по данным ВИК и МС.

Мощность ВЭУ $P_{ВЭУ}(v, \rho)$ рассчитываются по её рабочей характеристике $P_{ВЭУ}$ — зависимости мощности ВЭУ от скорости и плотности ветрового потока, набегающего на ветроколесо ВЭУ.

Рабочая характеристика $P_{ВЭУ}(v)$ определяется следующими параметрами: номинальной мощностью (для современных ВЭУ мощностью от сотен ватт до 20 МВт) и скоростями ветра — стартовой v_0 , при которой начинается выдача мощности (3–4 м/с), буревой $v_{бур}$, при которой вращение ветроколеса ВЭУ останавливается во избежание поломок ($v_{бур} \approx 20\text{--}34$ м/с для разных ВЭУ) и скоростью регулирования $v_{рег}$, выше которой мощность ВЭУ поддерживается специальной системой регулирования постоянной, равной номинальной ($v_{рег} \approx 12\text{--}15$ м/с).

Для определения технико-экономических характеристик ВЭУ на основе данных ветроизмерительных комплексов необходима численно реализованная методика их анализа, проводимого в целях максимально достоверного прогноза мощности ветровых установок

Рабочие характеристики наиболее технически совершенных ВЭУ, для сравнения их эффективности, представленные в удельном единицах [Вт/м² ветроколеса ВЭУ], показаны на рис. 1 [2].

Приведённые на рис. 1 результаты расчётов с использованием формульной аппроксимации рабочих характеристик наиболее технически совершенных в настоящее время серийно выпускаемых ВЭУ (Hummer 200-25, Enercon 330-33 и др.), приближающихся по техническим характеристикам к идеальным. Формульная аппроксимация построена авторами на основе следующих соображений.



Результаты косвенных расчётов погрешностей определения среднегодовой удельной мощности ветроэлектрических установок по результатам измерений на ветроизмерительных комплексах в посёлках Тикси, Темрюк и Новиково

табл. 1

Пункт установки ВИК	Тикси				Темрюк				Новиково			
Скорость ветра, м/с	7,53		7,92		7,48		7,95		5,62		5,75	
Плотность воздуха, кг/м³	1,358		1,358		1,237		1,237		1,276		1,276	
Удельная мощность ВЭУ	243,2		267,2		175,6		201,4		111,3		–	
Коэффициент корреляции связности рядов скорости ветра r_v	0,974		0,963		0,982		0,983		0,980		0,078	
Коэффициент корреляции связности рядов плотности воздуха r_p	0,991		0,993		0,997		0,998		0,998		0,997	
Погрешность расчёта $P_{ВЭУ}$	$\Delta P_{ВЭУ,уд}/P_{ВЭУ,уд}$				$\Delta P_{ВЭУ,уд}/P_{ВЭУ,уд}$				$\Delta P_{ВЭУ,уд}/P_{ВЭУ,уд}$			
Высота, м	30		40		20		40		22		34	
Уровень достоверности	*1	*2	*1	*2	*1	*2	*1	*2	*1	*2	*1	*2
90,0 %	9,7	5,9	10,2	6,1	10,4	7,0	11,0	7,2	11,4	10,1	11,6	10,4
95,0 %	11,6	7,1	12,2	7,3	12,4	8,3	13,1	8,5	13,6	12,1	13,9	12,4
99,0 %	15,2	9,3	16,0	9,6	16,3	10,9	17,2	11,2	17,8	15,9	18,2	16,3
99,7 %	17,7	10,8	18,6	11,1	18,9	12,7	20,0	13,1	20,8	18,5	21,2	18,9
99,9 %	19,5	11,8	20,4	12,2	20,8	13,9	21,9	14,3	22,8	20,3	23,3	20,8

*1 С учётом погрешностей измерения скорости ветра и плотности воздуха $P_{ВЭУ}(v, \rho)$; *2 Без учёта погрешностей измерения плотности воздуха $P_{ВЭУ}(v)$.

Идеальная удельная (на единицу площади ветроколеса) мощность ВЭУ $P_{ид,уд}(v, \rho)$ [Вт/м²] по теории Жуковского — Бетса определяется формулой:

$$P_{ид,уд}(v, \rho) = 0,593 \frac{\rho v^3}{2}, \quad (1)$$

где v — скорость ветра, м/с; ρ — плотность воздуха [кг/м³], рассчитываемая по данным измерений на ВИК давления p [Па] и температуры T [°К] по закону идеального газа, где R — универсальная газовая постоянная, вычисляемая по формуле:

$$\rho = p/(RT). \quad (2)$$

Реальные удельные $P_{уд}(v, \rho)$ и полные $P(v, \rho)$ мощности ВЭУ $P_{ВЭУ}(v, \rho)$ [Вт/м²] определяются формулами:

$$P_{уд}(v, \rho) = C_p(v) \frac{\rho v^3}{2}; \quad (3)$$

$$P(v, \rho) = C_p(v) \frac{\rho v^3}{2\pi \frac{D^2}{4}}, \quad (4)$$

где D — диаметр ветроколеса ВЭУ, $\pi = 3,1416$ — число Пи; C_p — техническая характеристика реальной ВЭУ, определяющая реально достижимую долю удельной мощности ветра [Вт/м²], которую ВЭУ может преобразовать в электроэнергию.

Обработкой данных о значениях C_p наиболее совершенных в настоящее время серийно выпускаемых ВЭУ авторами установлено, что параметр C_p в рабочем диапазоне наиболее технически совершенных ВЭУ ($v_0 \leq v \leq v_{пер}$) с высокой точностью описывается формулами:

$$C_p = A(v - B)^2 + C \text{ при } v_0 \leq v \leq v_{пер} \quad (5)$$

$$\text{и } C_p = 0 \text{ при } v < v_0 \text{ и при } v > v_{пер} \quad (6)$$

с коэффициентами $A = -0,0054$, $B = 0,8$ и $C = 0,504$ при скоростях регулирования ВЭУ $v_{пер} \leq 15$ м/с.

Сравнение результатов моделирования рабочей характеристики ВЭУ с характеристиками реальных ВЭУ указывает на удовлетворительную точность модели $P(v, \rho)$, обеспечивающей погрешности расчёта менее 1 %.

Численная реализация использованной в данной статье методики [2] позволяет аппроксимировать рабочую характеристику любой известной ВЭУ с известным C_p и производить пересчёт измеренных на ВИК скоростей ветра на мощность ВЭУ.

Косвенные расчёты энергетических показателей ВЭУ по данным ВИК

Реальные удельные $P_{уд}(v, \rho)$ и полные $P(v, \rho)$ мощности ВЭУ $P_{ВЭУ}(v, \rho)$ непосредственно не измеряются, а являются производными от скоростей ветра и плотности воздушного потока и определяются косвенными методами расчёта энергетических показателей ВЭУ по данным временных рядов измерений на ВИК по формулам (2)–(5) с учётом статистических погрешностей их измерений.



Статистические параметры ветровых характеристик определены авторами по временным рядам десятиминутных данных одно- и двухлетних измерений ветра, давления и плотности воздуха на ветроизмерительных комплексах длиной в десятки тысяч. Это позволяет с высокой статистической достоверностью определять средние значения и погрешности как самих скоростей ветра, так и косвенно рассчитанных показателей ВЭУ.

Как показали расчёты, данные соседних десятиминутных измерений характеристик ветра, давления, температуры на рассмотренных в работе ветроизмерительных комплексах тесно связаны между собой (с расчётными коэффициентами корреляции от 0,96 до 0,998). Теория погрешностей определения статистических характеристик связанных рядов данных разработана в 1960–1970-е годы специалистами Главной геофизической обсерватории (ГГО) имени А. И. Воейкова [3, 4].

В соответствии с развитой теорией статистических погрешностей средних значений или математических ожиданий МО, а также среднеквадратических отклонений СКО измеряемых на ВИК параметров и косвенно рассчитанных по ним характеристик ВЭУ, определяются следующими формулами:

$$MO = \sigma_{P_{cp}} = \frac{\sigma_P}{\sqrt{n}} \sqrt{1+r}; \quad (7)$$

$$CKO = \sigma_{P_{cp}} = \frac{\sigma_P}{\sqrt{2n}} \sqrt{\frac{1+r^2}{1-r^2}}, \quad (8)$$

где r — коэффициент корреляции между соседними десятиминутными значениями временных рядов данных измерений ВИК, рассчитанные значения которых по данным рассмотренных ВИКов приведены в табл. 1.



Сильная зависимость определяющих погрешности *СКО* связанных рядов данных ВИК от коэффициентов корреляции *r*, особенно при больших их значениях приводит к значительному (в разы) занижению погрешностей определения искомым статистических характеристик.

Определение абсолютной погрешности косвенного расчёта мощности ВЭУ

Таким образом, абсолютные погрешности $\Delta P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)$ двухпараметрических функций $P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)$, полученных косвенными расчётом по данным измерений на ВИК по формуле (2) с коэффициентами (4) и (5), определяются в данной работе согласно [5] полным конечным приращением [формула (8)], представляющим собой сумму частных производных по переменным *v* и *ρ*, помноженных на конечные приращения соответствующих переменных:

$$\sigma_{P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)} = \sigma_v \left| \frac{\partial P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)}{\partial v} \right| + \sigma_\rho \left| \frac{\partial P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)}{\partial \rho} \right|, \quad (9)$$

где частные производные по переменным *v* и *ρ* после дифференцирования выражения (2) с учётом коэффициентов (4) и (5) приходят к виду:

$$\frac{\partial P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)}{\partial v} = 0,005 A <\rho> (<v>)^2 \times (<v> - B)(5<v> - B); \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)}{\partial \rho} = 0,005 (<v>)^3 \times [A(<v> - B) + C], \quad (11)$$

где *<v>* и *<ρ>* — средние по всем данным ВИК и наиболее вероятные значения скорости ветра и плотности воздуха, соответственно.

Необходимые промежуточные расчёты для определения абсолютных погрешностей косвенных расчётов по формуле (2) с коэффициентами (4) и (5) средних мощностей ВЭУ $P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)$, установленных

в местах расположения ВИКов, определяются в следующей последовательности:

1. Анализ данных измерений скорости ветра на предмет их достоверности и отбраковка ошибочных данных.

2. Расчёт средних арифметических значений или МО скорости ветра *v* и плотности воздуха *ρ* по *N* прошедшим анализ по п.1 данным временных рядов, полученных за соответствующие периоды измерений на каждом ВИК, по формулам:

$$<v> = \sum_{n=1}^N \frac{v_n}{N}; \quad (12)$$

$$<\rho> = \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n}{N}, \quad (13)$$

при этом плотность воздуха определяется косвенным расчётом согласно закону идеального газа по формуле:

$$\rho = p/(RT). \quad (14)$$

где *p* и *T* — измеряемые на ВИК давление и температура, соответственно; *R* — универсальная газовая постоянная, *R* = 8,314 Дж/(моль·К).

3. Расчёт средних арифметических или математических ожиданий МО искомым значений $P_{ВЭУ,уд}$ за все полные периоды измерений на ВИК по формуле:

$$<P_{ВЭУ,уд}> = \sum_{n=1}^N \frac{P_{ВЭУ,уд,n}}{N}. \quad (15)$$

4. Расчёт абсолютных погрешностей Δv_i и $\Delta \rho_i$ рассчитанных средних арифметических или математических ожиданий МО значений *<v>* и *<ρ>* и их квадратов $(\Delta v_n)^2$ и $(\Delta \rho_n)^2$.

5. Расчёт дисперсий D_v и D_ρ средних значений *<v>* и *<ρ>* по формулам:

$$D_v = \sum_{n=1}^N \frac{(\Delta v_n)^2}{n(n-1)}; \quad (16)$$

$$D_\rho = \sum_{n=1}^N \frac{(\Delta \rho_n)^2}{n(n-1)}. \quad (17)$$

6. Расчёт среднеквадратических погрешностей Δv и $\Delta \rho$ средних значений скорости

сти *<v>* и плотности воздуха *<ρ>* по следующим формулам:

$$\Delta v \approx \sigma_v = \sqrt{D_v}; \quad (18)$$

$$\Delta \rho \approx \sigma_\rho = \sqrt{D_\rho}. \quad (19)$$

7. Расчёт среднеквадратических погрешностей определения удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{ВЭУ,уд}$ по формуле (8) по значениям среднеквадратических погрешностей Δv и $\Delta \rho$, рассчитанных по формулам (17) и (18).

8. Расчёт полуширины доверительных интервалов погрешности определения удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{ВЭУ,уд}$ по *t*-критерию Стьюдента [6] с коэффициентами *K_t* для уровней доверительной вероятности 90 % (*K_t* = 1,645), 95 % (*K_t* = 1,96), 99 % (*K_t* = 2,577), 99,7 % (*K_t* = 3,0) и 99,9 % (*K_t* = 3,292).

9. Расчёт относительной погрешности определения удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{ВЭУ,уд}$ по данным ВИК.

Результаты выполненного расчёта сведены в табл. 1.

Анализ результатов расчётов

Приведённые в табл. 1 результаты принципиально важны в связи с существующей международной практикой, сложившейся по требованиям зарубежных банков и кредитных организаций, финансирующих строительство ВЭС. Необходимым условием кредитования проектов ВЭС, гарантирующим возврат вложенных инвестиций, является предоставление рассчитываемого по данным измерений на ВИК прогноза многолетней выработки ВЭУ с погрешностью не выше 10 % при 90 %-й статистической достоверности, рассчитываемого с учётом возможных многолетних прогнозных технических и климатических потерь энергии, вырабатываемой ВЭС.

Данное требование было распространено и на проекты ВЭС, осуществляемые на территории Российской Федерации, без достаточного, на наш взгляд, научно-го анализа и обоснования.

Результаты, изложенные в данной статье, позволяют в некоторой степени восполнить этот недостаток в части принципиально важных вопросов. Во-первых, достигим ли требуемый от проектировщика ВЭС прогноз её средних многолетних величин мощности и энергии с погрешностью менее 10 % при 90 %-й статистической достоверности на основании расчётов по данным двухлетних измерений на ВИК скорости ветра, температуры и давления атмосферы. И, во-вторых, каковы возможные и практически достижимые пределы достоверности косвенных расчётов энергетических показателей ВЭУ по данным ВИК.

Из анализа полученных расчётных результатов, приведённых в табл. 1, следует, что погрешности расчёта среднегодовой удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)$ по данным ВИК определяются погрешностями определения на них двух параметров: скорости ветра и плотности воздуха. При этом важнейшим фактором точности определения является связанность временных рядов этих параметров.

При исследовании предполагалось, что погрешности определения показателей ВЭС, обусловленные межгодовой изменчивостью определяющих их параметров, в первом приближении учтены за счёт использования данных измерений примерно за два смежных года на ВИК с существенно отличающимися ветроклиматическими характеристиками.

Согласно расчётам, относительные погрешности определения удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{ВЭУ,уд}$ по данным трёх рассмотренных в статье ВИК, с учётом погрешностей измерения скорости ветра и плотности воздуха $\Delta P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)$ при 90%-й статистической достоверности превышают 10%. Превышение 10%-й погрешности составляет от 12 до 14% при 95%-й значимости и существенно (до 50%) вырастает при 99%-й значимости. Рассмотрение заметно растущих погрешностей при значимости более 99%, по нашему мнению, теряет практический смысл.

Согласно данным табл. 1, определённые погрешности среднегодовой удельной мощности ВЭУ по результатам измерений на рассмотренных в статье ВИК, с учётом погрешностей измерения скорости ветра и плотности воздуха $\Delta P_{ВЭУ,уд}(v, \rho)$, существенно (в полтора-два раза) превышают таковые, полученные без учёта погрешностей определения плотности $\Delta P_{ВЭУ,уд}(v)$. При этом без учёта погрешностей определения плотности расчётная погрешность удельной мощности ВЭУ при 90%-й статистической значимости не превышает 10%. Отметим, что погрешности расчёта среднегодовых удельных мощностей ВЭУ, как с учётом погрешностей измерения скорости ветра и плотности воздуха, так и без учёта погрешностей измерения плотности воздуха, согласно результатам, полученным по данным измерений скорости ветра, температуры и давления атмосферы на трёх данных ВИК, растут с высотой.

Анализ физического объяснения полученных результатов и их расхождения (превышения 10%-й погрешности) с результатами, положенными в основу зарубежной практики инвестирования проектов ВЭС, не является задачей настоящей статьи. Но такой анализ, интересный в научном и практическом плане, требует,



по нашему мнению, дополнительных аналогичных исследований по данным существенно большего количества ВИК, проводивших измерения в различных ветроклиматических регионах России.

Выводы

В данной статье решалась задача определения средних многолетних погрешностей мощности и выработки ВЭС с использованием методов косвенных расчётов с использованием временных рядов данных краткосрочных (приблизительно два года) измерений скорости ветра, температуры и давления на трёх ВИКах, проводивших измерения в трёх различных ветроклиматических регионах России, и рабочих характеристик ВЭУ.

Установлено, что погрешности среднегодовой удельной мощности ВЭУ, рассчитанные по данным измерений на рассмотренных в статье ВИК, с учётом погрешностей определения средних скоростей ветра и плотности воздуха в полтора-два раза превышают таковые, полученные без учёта погрешностей определения плотности

Представленные результаты получены с использованием разработанной авторами формульной аппроксимации рабочих характеристик модельных ветроэнергетических установок, близких по характеристикам к наиболее технически совершенным в настоящее время ВЭУ.

Оценки погрешностей косвенных расчётов мощности ВЭУ как функции скорости ветра и плотности воздуха проведены по методике статистического анализа связанных временных рядов данных. При этом установлена и учтена в расчётах сильная и принципиально важная для практики зависимость погрешности определения мощности ВЭУ от коэффициентов автокорреляции рядов скорости и плотности.

Установлено, что погрешности косвенного расчёта удельной мощности ВЭУ $\Delta P_{ВЭУ,уд}$ с высотами осей ветроколёс от 30 до 40 м по данным трёх рассмотренных в статье ВИК (в Тикси, Темрюке, Новиково) с учётом погрешностей измерения скорости ветра и плотности воздуха при 90%-й статистической достоверности превышают принятые за рубежом 10%. Расчётные погрешности на 15–20% вырастают при 95%-й статистической достоверности. При 99%-й значимости погрешности, рассчитанные по данным трёх ВИК, достигают 16–18% и более, что, по нашему мнению, недостаточно для практики.

Установлено также, что погрешности среднегодовой удельной мощности ВЭУ, рассчитанные по данным измерений на рассмотренных в статье ВИК, с учётом погрешностей определения средних скоростей ветра и плотности воздуха существенно (в полтора-два раза) превышают таковые, полученные без учёта погрешностей определения плотности. При этом без учёта погрешностей определения плотности расчётная погрешность удельной мощности ВЭУ при 90%-й статистической значимости не превышает 10%.

Установлен незначительный (порядка 5–10%) рост с высотой погрешностей расчёта среднегодовых удельных мощностей ВЭУ, как с учётом погрешностей определения скорости ветра и плотности воздуха, так и без учёта погрешностей измерения плотности воздуха.

Дальнейшие исследования установленного в данной статье превышения 10%-й погрешности определения средней многолетней мощности ВЭУ, положенной в основу зарубежной практики инвестирования проектов ВЭС, представляют интерес в научном и практическом плане и целесообразны на основе измерений на существенно большем количестве ВИК, проводивших измерения в различных ветроклиматических регионах России. ●

1. Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. — М.: Атмосфера, 2008. 584 с.
 2. Гамова А.А. Методика определения характеристик бестопливных источников энергии на базе ветроустановок и систем аккумуляции энергии по данным мачтовых измерений // Электротехнические системы и комплексы, 2024. №2. С. 60–65.
 3. Марченко А.С. Устойчивость оценок математического ожидания и дисперсии для связанных метеорологических временных рядов // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1965. Т. 1. №9. С. 906–913.
 4. Федорченко Е.И. О влиянии связности метеорологических рядов на точность выборочных моментов // Труды ГГО. 1973. Вып. 336. С. 25–47.
 5. Осташев В.Б. Первичные методы обработки результатов эксперимента: учебное пособие. — СПб.: Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2021. 81 с.
 6. Student (Gosset W.S.). The probable error of a mean. Biometrika. 1908. Vol. 6. No. 1. Pp. 1–25.
- References — see page 80.

Errors in determining the power of wind power plants based on measurements of meteorological parameters on wind measuring complexes. Pp. 70–74.

Vladimir G. Nikolaev, Doctor of Technical Sciences, Corresponding member of the Russian Academy of Engineering (RIA), Director of the Autonomous Non-profit Organization (ANO) "Atmograph" Scientific Information Center (SIC); **Anastasia A. Gamova**, researcher at ANO "Atmograph" SIC", postgraduate student of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM"

1. V.G. Nikolaev, S.V. Ganaga, Ju.I. Kudrjashov. *Natsional'nyj kadastr vetrojenergeticheskikh resursov Rossii i metodicheskie osnovy ikh opredelenija* [National cadastre of wind energy resources of Russia and methodological principles for their determination]. Moscow. *Atmograf* ["Atmograph" Scientific Information Center] Autonomous Non-profit Organization]. 2008. 584 p. [In Russian]
2. A.A. Gamova. *Metodika opredelenija kharakteristik bestoplivnykh istochnikov jenerгии na baze vetroustanovok i sistem akumulirovaniya jenerгии po dannym machtovykh izmerenij* [Methodology for determining the characteristics of fuel-free energy sources based on wind turbines and energy storage systems based on mast measurements]. *Jelektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* ["Electrical systems and complexes" Magazine]. 2024. No. 2. Pp. 60–65. [In Russian]
3. A.C. Marchenko. *Ustojchivost' otsenok matematicheskogo ozhidaniya i dispersii dlja svjaznykh meteorologicheskikh vremennykh rjadov* [Stability of estimates of mathematical expectation and variance for connected meteorological time series]. *Izvestija AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Series: Physics of the atmosphere and ocean]. 1965. Vol. 1. No. 9. Pp. 906–913. [In Russian]
4. E.I. Fedorchenko. *O vlijanii svjaznosti meteorologicheskikh rjadov na tochnost' vyborochnykh momentov* [On the influence of the connectivity of meteorological series on the accuracy of sample moments]. *Trudy GGO* [Papers of the Voeikov Main Geophysical Observatory]. 1973. Issue 336. Pp. 25–47. [In Russian]
5. V.B. Ostashev. *Pervichnye metody obrabotki rezul'tatov jeksperimenta: uchebnoe posobie* [Primary methods for processing experimental results: A tutorial]. St. Petersburg. *Izd-vo SPbGTI (TU)* [Publishing House of Saint Petersburg State Institute of Technology]. 2021. 81 p. [In Russian]
6. Student (W.S. Gosset). The probable error of a mean. *Biometrika*. 1908. Vol. 6. No. 1. Pp. 1–25.