

Power Distribution Laws Modeling of Wind Power and Solar Stations

Manusov V. Z., Khaldarov Sh. K.

Novosibirsk State Technical University (NSTU)

Novosibirsk, Russian Federation

Abstract. Despite the obvious advantages of renewable and alternative energy sources (RAES) the main unresolved problem is the issue of the variability of the generated capacity of these power plants. It is difficult for energy system operators to determine how much per unit of time RAES are ready to provide capacity and energy. It does not allow considering such sources as full-fledged participants in power and electricity market. It is a big obstacle to investment in renewable energy projects. At the same time, the generated power of these stations depends on the natural conditions at a particular geographic point, the level of wind speed and solar insolation. The patterns of these parameters depend on the time of year, locality and are purely probabilistic in nature. The research purpose is to build distribution law models that can describe not only the data of solar insolation and wind speed, but also the RAES generated power. This goal has been achieved by methods of estimating the distribution law parameters and testing statistical hypotheses. The most important result is the identification of the basic distribution laws describing the probabilities of solar insolation and wind speed. For the considering area the laws of the 3rd kind beta distributions family and their mixtures better describe these data than the widespread Weibull's law. The same laws are applicable to RAES generated power. It allows to estimate the share of renewable energy in the total energy systems more accurately and helps system operators to predict output power of RAES.

Keywords: probability distribution laws, output power probability distribution, third kind beta distribution, renewable and alternative energy sources.

DOI: 10.5281/zenodo.4018988

UDC: 621.311.25: 621.311.26

Modelarea legilor distribuției probabilității puterii centralelor eoliene și solare

Manusov V.Z., Khaldarov Sh.K.

Universitatea Tehnică de Stat din Novosibirsk

Federația Rusă, Novosibirsk

Rezumat. Conștientizarea avantajelor evidente ale surselor de energie regenerabile și alternative (SERA), în special a parcurilor eoliene (PE) și a centralelor solare fotovoltaice (CSF), nu a exclus faptul, că principala problemă nerezolvată pentru acest segment al energiei rămâne problema capacității de generate a acestor centrale. Este dificil pentru operatorul de sistem al energiei electrice să stabilească cât de mult pe unitate de timp este pregătită generarea de la SERA pentru a furniza putere și energie. Acesta este un mare obstacol în calea investițiilor în proiectele de energie regenerabilă. Scopul acestei lucrări constă în construirea modelelor de legi de distribuție care să descrie cel mai bine nu numai datele privind radiația solară și debitul vântului, ci și puterea generată a centralelor electrice SERA. Acest obiectiv a fost atins prin metode de estimare a parametrilor legilor de distribuție și testarea ipotezelor statistice. Cel mai important rezultat este identificarea legilor de distribuție de bază care descriu probabilitățile de insolație solară și debitul vântului în zona luată în considerare - legile familiei distribuțiilor beta de al treilea fel, inclusiv combinațiilor lor, care, spre deosebire de legea larg răspândită a lui Weibull, descriu mai bine aceste date. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că aceleași legi sunt aplicabile puterii generate, ceea ce va face posibilă determinarea mai precisă a ponderii sale în puterea totală livrat în sistemul electroenergetic. Se presupune, că modelele construite pot fi utilizate de operatorul de sistem ca instrument auxiliar pentru prezicerea puterii de ieșire a centralelor, care utilizează surse de energie regenerabile.

Cuvinte-cheie: legile distribuției probabilității, distribuția probabilității puterii de ieșire, distribuțiile beta de al treilea tip, surse regenerabile și alternative de energie.

Моделирование законов распределений вероятностей мощности ветровых и солнечных электростанций

Манусов В. З., Халдаров Ш.К.

Новосибирский государственный технический университет

Российская Федерация, г. Новосибирск

Аннотация. Несмотря на очевидные преимущества возобновляемых и альтернативных источников энергии (ВАИЭ), в частности ветровых парков (ВП) и солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС),

основной не решенной задачей остается вопрос вырабатываемой мощности этих электростанций. Системному оператору энергетической системы сложно определить сколько в единицу времени готова генерация на ВАИЭ выдавать мощности и энергии, что не позволяет рассматривать такие источники в качестве полноценных участников в рынке мощности и электроэнергии. Это большая преграда на пути инвестиций в проекты по возобновляемым источникам. В то же время, вырабатываемая мощность этих станций зависит от природных условий в конкретной географической точке, уровня скоростей ветрового потока и солнечной радиации. Закономерности, характеризующие эти параметры, зависят от времени года, местности и носят сугубо вероятностный характер. Учитывая вышеупомянутые условия для эффективного внедрения объектов ВАИЭ в энергосистему целью данной работы является построение таких моделей законов распределения, которые наилучшим образом будут описывать не только данные солнечной радиации и скорости ветрового потока, но и выработанной мощности электростанций на ВАИЭ. Поставленная цель достигнута методами оценки параметров законов распределения и проверки статистических гипотез. Наиболее существенным результатом является выявление основных законов распределения, описывающих вероятности солнечной инсоляции и скорости ветрового потока на рассматриваемой территории – законы семейства бета-распределения 3-го рода, в том числе их смеси, которые в отличие от распространенного закона Вейбулла, лучше описывают эти данные. Значимость полученных результатов заключается в том, что эти же законы применимы и к вырабатываемой мощности, что позволит более точно определить ее долю в общей выработке энергосистемы. Предполагается, что построенные модели могут быть использованы системным оператором в качестве вспомогательного инструмента для прогнозирования мощности станций на возобновляемых источниках энергии.

Ключевые слова: законы распределения вероятностей, распределение вероятностей выдаваемой мощности, бета-распределения третьего рода, возобновляемых и альтернативные источники энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Скорость ветрового потока и солнечная инсоляция являются альтернативными и возобновляемыми источниками чистой энергии, в отличие от традиционного топлива. Эти возобновляемых источники энергии, по большому счету, можно считать метеофакторами, которые представляют собой случайные величины. Для этих величин необходимо использовать статистические методы анализа. Данный факт требует оценки вероятностных законов распределения. С ростом увеличения доли ВАИЭ в энергосистеме все больше становится необходимым высокая точность в определении оптимального статистического распределения этих случайных величин. В первую очередь это необходимо при оценке энергетического потенциала конкретной территории, планируемой для строительства электростанций, а также используется при проектировании систем на основе ВАИЭ и производите ветровых и фотоэлектрических установок, позволяя минимизировать затраты и оценить доходность от «зеленых» проектов.

Для расчета средней мощности генерирующей установки, требуется иметь данные о распределении солнечной инсоляции и скорости ветрового потока. Годовые измерения таких метеофакторов позволяет обнаружить, что штормовые ветра встречаются довольно редко, в то время как ветра с умеренной скоростью широко

распространены. Можно провести такие же расчеты и с солнечной инсоляцией как во время ясной, безоблачной погоды, так и в периоды пасмурного неба. Статистическое распределение подобных метеофакторов всегда варьируется от географического расположения источников энергии.

Необходимо отметить, что с точки зрения эффективности, анализ и оценка скорости ветрового потока и солнечной инсоляции позволит определить необходимые параметры ветрового парка и солнечной станции на стадии проектирования как по отдельности, так и вместе. Тем самым позволяя построить гибридную энергосистему на ВИЭ для получения синергетического эффекта.

Проведено немало научных исследований, посвященных анализу эффективного использования ВИЭ как в централизованных энергетических системах, так и автономных. Например, в [2] с помощью вероятностных и детерминистических методов прогнозируют выработку ветровых парков, пытаясь сделать режим работы станций более предсказуемым и приближенным к традиционной генерации. В работе [3] разработан алгоритм оптимальной работы солнечной электростанции. В [5] с помощью численных методов сделана попытка определения оптимальных параметров автономной гибридной электростанции на ВИЭ и оценка затрат. В работе [6] использован метод линейного программирования

проектирования гибридной энергосистемы для работы в «островном» режиме и параллельно с энергосистемой. Целевой функцией в работе выступает минимизация затрат на строительство электростанции. В работах [8, 9] посвящена определению функций распределения вероятностей мощности электростанций на ВИЭ для оптимального проектирования.

В большинстве случаев в работах используется анализ распределения скорости ветрового потока известный и распространенный закон распределения вероятностей Вейбулла. Однако, для определения распределения солнечной инсоляции в исследованиях встречается применение разных законов. Например, в [10] в одном из городов Нигерии для статистического анализа больших данных солнечной радиации за несколько лет используется логистический закон распределения. Авторы с уверенностью заявляют эффективность использования данного закона для их региона, что позволит оптимально спроектировать солнечную электростанцию (СЭС).

В [11] для вероятностного описания солнечной инсоляции используется Гамма-распределение, а для скорости ветрового потока – закон Вейбулла.

По предположению авторов работы [12] использование распределения Вейбулла-Гудвича для математического описания режима ветрового потока юго-востока европейской части территории России позволит эффективно использовать ветровые ресурсы данного региона.

В [13] в результате анализа данных солнечной радиации за 14 лет в городе Кумаси в Гане были выявлены несколько законов распределения, наилучшим образом описывающих метеоданные. А именно: для января, марта и мая оптимально подходит логнормальный закон распределения, для апреля – экспоненциальный, Вейбулла, логнормальный и Гамма-распределение, для июня-декабря – экспоненциальный, Вейбулла, геометрический законы распределения.

В последнее время в подобных исследованиях заметна тенденция применения сложных вероятностных моделей, а также проверка их адекватности.

В работе [15] применены распределение Накагами и обобщенное распределение экстремальных значений, в [16] – обобщенное

распределение Линдли. В [17], [18] приведены примеры смесей известных параметрических законов и рассматриваются смеси 21 параметрического закона, а также применение различных критериев согласия для проверки адекватности моделей. В [19] показана зависимость качество прогноза средней мощности ВЭУ от точности построения моделей законов скорости ветрового потока. В работе [20] авторы из Германии решают задачу трехмерного моделирования ветрового потока, в которой рассматривается сдвиг ветра.

Анализ приведенных научных работ подчеркивает наличие проблем, как при построении вероятностных моделей для солнечной инсоляции и скорости ветра, так и при проверке их адекватности. Становится очевидным, что для построения качественной модели распределения скорости ветра для конкретной местности необходимо использовать смесь параметрических законов распределения.

Статистические данные, полностью отражающие закономерности измерений метеофакторов (солнечной инсоляции и скорости ветра) позволяют строить точные модели законов распределения вероятностей для электростанций ВИЭ. Используя статистическое моделирование можно выявить математические соотношения между метеофакторами и вырабатываемыми мощностями ветровых парков и солнечных станций.

Таким образом, выявленные оптимальные модели позволяют моделировать распределение вероятностей генерируемой мощности гибридной энергосистемы. Это в свою очередь является предпосылкой для оптимального проектирования подобных гибридных энергосистем на ВИЭ, позволяя эффективно определять каждый ее элемент, например, выбор оптимальных параметров накопителя энергии, как резервного источника, без которого не обходится ни одна энергосистема на возобновляемых источниках.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время закон распределения Вейбулла-Гудвича широко применяется для анализа данных скорости ветрового потока. Практически доказана пригодность этого закона и для южно-казахстанского региона,

где локализована основная часть ветровых парков республики. В то же время, согласно некоторым исследованиям, такие законы распределения как бета и гамма также применимы и могут конкурировать с классическим законом.

Необходимо отметить, что для оптимального проектирования энергосистем на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии, электрических сетей, а также подбора для таких систем накопителей энергии одним из незаменимых инструментов является статистический анализ данных о метеофакторах. Таким образом, целью данной работы является анализ ретроспективных данных, собранных на территории существующего ветроэнергетического парка «Кордай» в Казахстане.

Пусть V – случайная величина, описывающая такой метеофактор, как скорость ветрового потока (м/с) на конкретной территории. То функция плотности будет соответствовать выражению:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{(k \pm 1)} e^{\pm \frac{V}{c}}, k > 0, V > 0, c > 0 \quad (1)$$

где k - параметр формы (величина безразмерная) необходим для оценки степени искаженности формы кривой, c (м/с) – параметр масштаба показывает изменение математического ожидания.

На практике оценку ветропотенциала территории принято производить с помощью закона распределения Вейбулла-Гудвича. Однако, как показывают исследования, довольно часто, такой метод приводит к ошибочному прогнозу выработанной мощности, что чревато дополнительными затратами. На пример, для оценки ветропотенциала ВЭС «Chungtun», расположенного на Тайванском острове, полезной оказалась смесь двух распределений Вейбулла-Гудвича [21]. Немало исследований, где используют смеси разных классических законов распределения. Например, таких, как гамма-распределение и бета-распределение, Вейбулла-Гудвича и логнормальный закон распределения и т.д. [22-27].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Одним из перспективных направлений в математической статистике сегодня это

выявление оптимальных комбинированных законов распределения из классических законов для тех или иных задач статистики. Как показывает практика, полученные в итоге распределения лучше и гибче описывают ретроспективные данные.

В данной работе представлена обобщенная версия бета-распределения. Полученные новые распределения представляют собой семейство бета-распределений:

$$F(x) = \frac{B(g(x, \delta), \alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)}, \quad (2)$$

где $x = \frac{V}{Scale}$ – отношение скорости ветрового

потока к масштабному коэффициенту,

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 y^{\alpha-1} (1-y)^{\beta-1} dy \quad \text{и}$$

$$B(\alpha, \beta, x) = \int_0^x y^{\alpha-1} (1-y)^{\beta-1} dy \quad \text{— полное и}$$

неполное β – распределения, δ, α, β –

параметры распределения, $g(\delta, x)$ –

возрастающая функция (от 0 до 1), задает

конкретное распределение. Ниже приведено

семейство β – распределений:

- β – распределение I-го рода,

$$g(x) = x, 0 \leq x \leq 1;$$

- β – распределение II-го рода,

$$g(x) = \frac{x}{1+x}, 0 \leq x \leq +\infty;$$

- β – распределение III-го рода,

$$g(x) = \frac{x}{1+(\delta-1)x}, 0 \leq x \leq 1.$$

Из трех распределений самым обобщенным является бета-распределение III-го рода.

$$0, \quad x \leq 0 \vee x \geq 1;$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\delta^\alpha}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} (1+(\delta-1)x)^{-(\alpha+\beta)}, & 0 < x < 1. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве критериев согласия для оценки параметров распределения в работе использованы: Колмогорова, χ^2 (критерий согласия Пирсона) и ω^2 (иначе – критерий Крамера-Мизеса-Смирнова). Последний

критерий чаще всего используется для принятия или опровержения нулевой гипотезы.

Анализ данных скорости ветра на уровне десятиметровой метеомачты по вышеуказанным критериям выявил следующие уровни значимости для бета-распределения III-го рода: $p_k=0,886$ (по критерию Колмогорова), $p_{\chi^2}=0,857$ (по критерию χ^2), $p_{n\omega^2}=0,715$ (по критерию ω^2). Для распределения Вейбулла-Гудвича соответственно: $p_k=0,912$ (по критерию Колмогорова), $p_{\chi^2}=0,503$ (по критерию χ^2), $p_{n\omega^2}=0,68$ (по критерию ω^2).

Как показали расчеты для описания скорости ветрового потока по данной территории лучше всего подходит распределения семейства бета, в частности бета III-го рода. На рисунках 1 и 2 приведены характеристики упомянутых распределений.

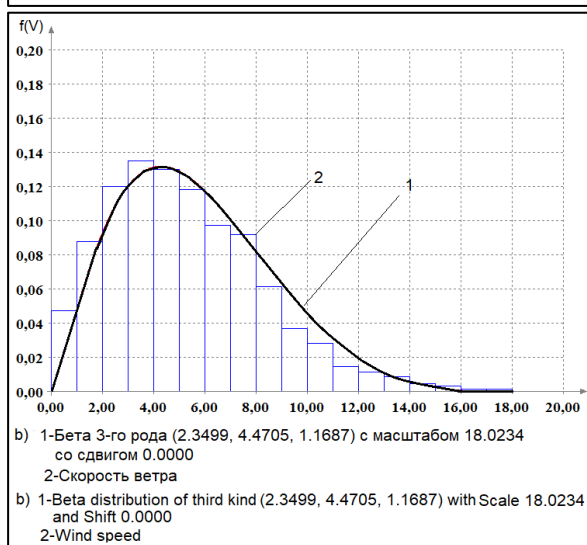
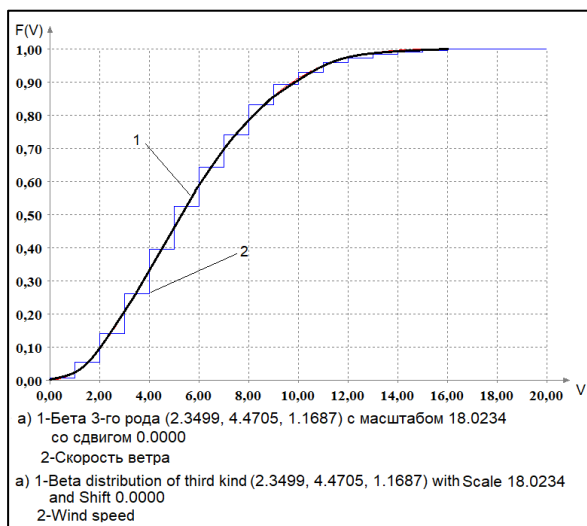


Рис. 1. Бета-распределение III-го рода (а – функция распределения, б – функция плотности)¹

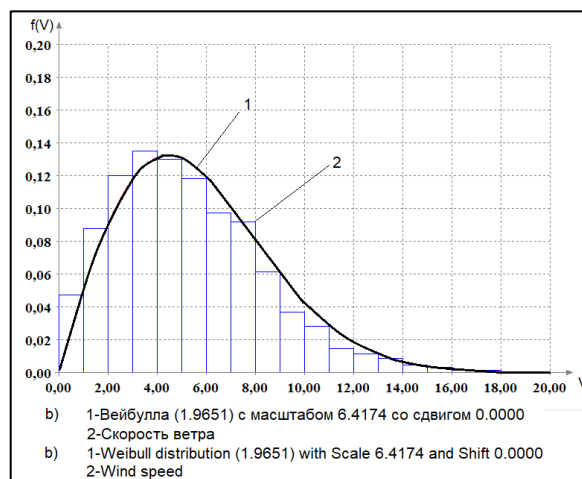
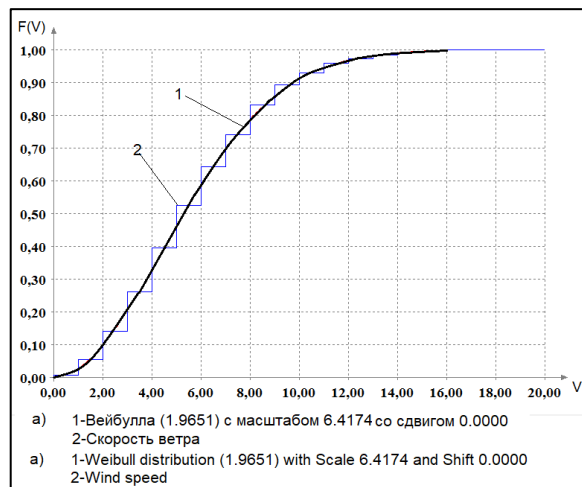


Рис. 2. Распределение Вейбулла-Гудвича (а – функция распределения, б – функция плотности)²

С помощью полученных результатов можно определить вырабатываемую мощность единичной установки, из которой состоит ветровой парк Кордай в Южном регионе Казахстана. В станции используются ветровые установки фирмы Nordex N54, энергетические характеристика приведены в таблице 1.

Таблица 1³

Характеристики установки ВЭУ Nordex модели N54

$P_{ВЭУ}$ - мощность номинальная P_{wt} – nominal power	1 МВт
V_s - Стартовая скорость V_s – Cut-in speed	3,5 м/с
V_n - Номинальная скорость V_n – Nominal speed	14 м/с
D_r - Диаметр ометаемой области	54 м

D_r – Rotor diameter	
h - Высота башни h – turbine height	70 м

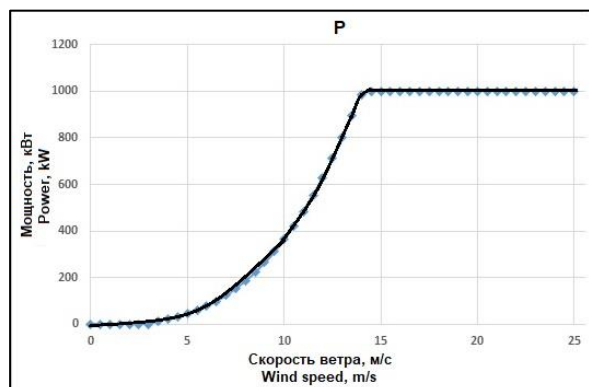


Рис. 3. Энергетическая характеристика ВЭУ марки Nordex N54 ⁴

Продольная ось ветроустановки находится на высоте 70 метров. Пересчитаем математически ожидаемые скорости ветра на высоте 70 метров по выражению:

$$V(h_1) = V(h_2) \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^m \quad (4)$$

где $V(h_1)$ – скорость ветра на высоте h_1 и $V(h_2)$ – известная скорость ветра на высоте h_2 , m – эмпирически выведенный коэффициент, который изменяется в зависимости от стабильности атмосферы, примем его равным 0,2.

$$V_b(70) = 4,296 \left(\frac{70}{10}\right)^{0,2} = 6,339 \text{ м/с} \quad (5)$$

$$V_w(70) = 4,469 \left(\frac{70}{10}\right)^{0,2} = 6,595 \text{ м/с} \quad (6)$$

Далее переходим к определению вырабатываемой мощности установки по формуле:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p A V^3 \quad (7)$$

где ρ – плотность воздуха, C_p – коэффициент мощности, A – ометаемая площадь.

$$P_b = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,43 \cdot 2289 \cdot 6,339^3 = 157428 \text{ Вт}$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,43 \cdot 2289 \cdot 6,595^3 = 169399 \text{ Вт}$$

В этом случае для двух выбранных законов распределения получим математические ожидания вырабатываемой мощности,

^{4,5} Appendix 1

которые равны 0,16 МВт и 0,17 МВт. Видно, если выбрана гипотеза закона распределения по Вейбуллу-Гудвичу, то математическое ожидание мощности несколько выше, чем при бета-распределении III рода.

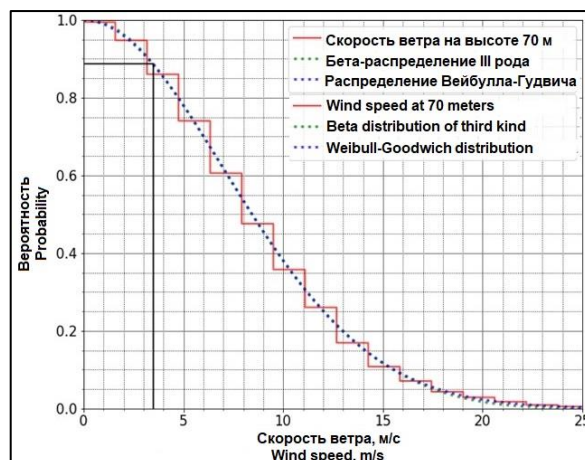


Рис. 4. Функция надежности ⁵

На основании полученных результатов можно определить вероятность ДПМ с максимальной вероятностью. Из рисунка 4 можно заключить, что с учетом разворота турбины при скорости ветра 3,5 м/с на высоте 70 метров с вероятностью 0,88 гарантирована поставка мощности примерно 25 кВт. Это свидетельствует о том, что для повышения вероятности выработки гарантированной мощности необходимо дополнительный источник мощности, например, накопитель электроэнергии.

Корреляция между скоростью ветрового потока и солнечной инсоляцией

В условиях информационной недостаточности часто приходится использовать неполные данные об объекте исследования. Подобное нередко встречается, когда речь идет о возобновляемых и альтернативных источниках энергии. Например, в гибридной энергосистеме, состоящей из солнечных станций и ветровых парков, когда есть возможность работать лишь данными солнечной инсоляции или наоборот. Появляется потребность знания корреляции между этими параметрами.

В данной работе сделана попытка нахождения этого коэффициента с помощью формулы Пирсона, характеризующий существование линейной зависимости между двумя случайными величинами.

Пусть даны выборки $x^m=(x_1, \dots, x_m)$, $y^m=(y^1, \dots, y^m)$; коэффициент корреляции по Пирсону рассчитываем по выражению:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\cos(x, y)}{\sqrt{(s_x^2 s_y^2)}}, \quad (8)$$

где, \bar{x}, \bar{y} – выборочные средние x^m, y^m, s_x^2, s_y^2 – выборочные дисперсии $r_{xy} \in [-1, 1]$.

В таблицах ниже приведены данные расчета коэффициента корреляции по Пирсону по сезонам.

Таблица 2⁶

Коэффициент корреляции за осень

Сезон Season	Осень Autumn	
Часы Hours	Инсоляция, Вт/м ² Insolation, W/m ²	v, м/с
1	0	2,39
2	7,91	2,48
3	184,33	2,58
4	431,63	2,68
5	654,9	2,79
6	827,84	2,9
7	941,04	3,01
8	835	3,09
9	996,29	3,17
10	884,64	3,26
11	742,28	3,3
12	474,03	3,34
.	.	.
2184	0	3,66
Корреляция Correlation	-0,092	

Таблица 3⁷

Коэффициент корреляции за зиму

Сезон Season	Зима Winter	
Часы Hours	Инсоляция, Вт/м ² Insolation, W/m ²	v, м/с
1	0	3,71
2	0	3,71
3	0	3,7
4	21,43	3,7
5	69,87	3,43
6	87,44	3,17
7	106,97	2,91

8	104,18	2,9
9	116,28	2,89
10	101,04	2,88
11	84,81	3,09
12	23,26	3,3
13	0	3,5
.	.	.
2184	0	2,55
Корреляция Correlation	-0,25	

Таблица 4⁸

Коэффициент корреляции за весну

Сезон Season	Весна Spring	
Часы Hours	Инсоляция, Вт/м ² Insolation, W/m ²	v, м/с
1	0	2,51
2	0	2,4
3	0	2,3
4	210,3	2,19
5	482,86	2,17
6	692,02	2,16
7	878,26	2,14
8	926,52	2,53
9	919,52	2,92
10	739,13	3,31
11	507,35	2,98
12	277,94	2,65
.	.	.
2184	0	2,24
Корреляция Correlation	0,11	

Таблица 5⁹

Коэффициент корреляции за лето

Сезон Season	Лето Summer	
Часы Hours	Инсоляция, Вт/м ² Insolation, W/m ²	v, м/с
1	3,52	2,19
2	73,72	1,94
3	178,68	1,7
4	236,49	1,45
5	301,35	1,06
6	761,78	0,67
7	890,92	0,28

8	964,16	0,63
9	857,59	0,98
10	265,25	1,34
11	512,22	1,52
12	421,07	1,71
13	310,78	1,89
.	.	.
.	.	.
2184	0	2,62
Корреляция Correlation		0,07

**Анализ отсутствия тренда
статистической выборки**

В процессе проектирования объектов безуглеродной энергетики, таких как ветровые парки и солнечные фотоэлектрические станции, необходимо учитывать статистические характеристики возобновляемых и альтернативных источников энергии, которые представляют собой некоторые наблюдаемые случайные последовательности измерений. При этом возникает целесообразность определения некоторой неслучайной закономерности, например, тренда или его отсутствия. Это предположение требует корректной проверки.

На примере анализа измерений скорости ветрового потока и солнечной инсоляции, зафиксированных за 2016 год в южном регионе Казахстана, рассмотрим применение критериев проверки гипотез об отсутствии тренда, а также критериев проверки однородности законов. Выборки представляют из себя ряды измерений по месяцам.

В некоторых зарубежных публикациях скорость ветрового потока зачастую описывают некоторыми простыми параметрическими моделями законов распределения. В данной работе показано, что рассмотрение этих измерений как случайных величин позволяет подобрать вполне приемлемую математическую модель как результат смесей статистических бета-распределений.

На рисунке 5 можно увидеть эмпирические функции распределения скорости ветрового потока для всех месяцев в году.

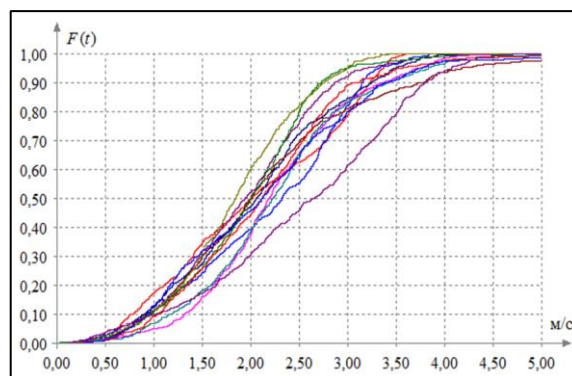


Рис.5. Эмпирические функции распределения скорости ветрового потока за 2016 год ¹⁰

С точки зрения однородности статистических выборок скорости ветрового потока можно полагать, что они в достаточной степени не однородны, но в некоторые месяцы эмпирические распределения достаточно близки.

Ниже приведены (рис. 6) эмпирические функции распределения скорости ветрового потока за август и июль. Можно считать, что скорость ветрового потока в эти месяцы подчиняются единому закону распределения.

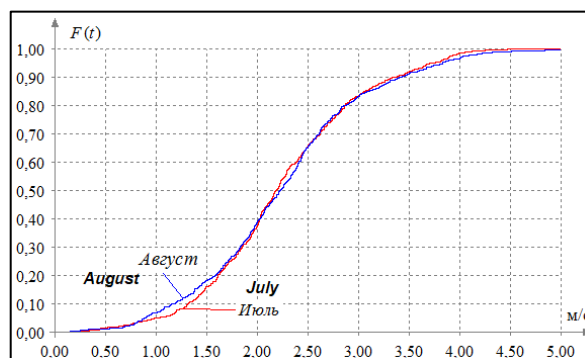


Рис.6. Эмпирические функции распределения скорости ветрового потока ¹¹

Показано, что степень значимости по критерию Хи-квадрат в значительной степени определяется временными интервалами, на которых анализируются ретроспективные данные [28].

На рисунке 7 в виде временных рядов приведена скорость ветрового потока за эти два летних месяца.

Проведем проверку гипотезы об отсутствии тренда в математическом ожидании и в дисперсии скорости ветрового потока в эти месяцы.

^{10,11} Appendix 1

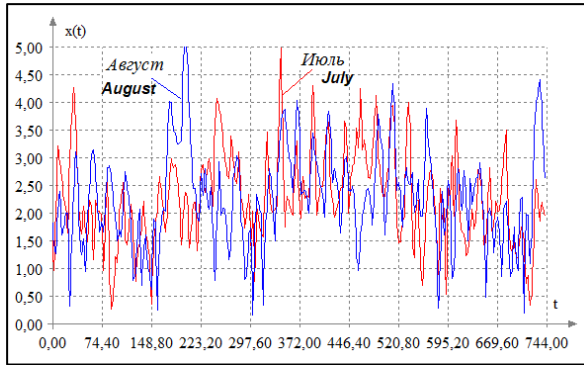


Рис.7. Ретроспектива скорости ветрового потока¹²

Ретроспективный ряд скорости ветрового потока за два последовательных месяца лета успешно описывается распределением: $f(x) = 0.8f_1(x) + 0.2f_2(x)$, где $f_i(x)$ – бета-распределения III-го рода со следующей плотностью:

$$f(x) = \frac{\theta_2^{\theta_0}}{\theta_3 B(\theta_0, \theta_1)} \frac{\left(\frac{x-\theta_4}{\theta_3}\right)^{\theta_0-1} \left(1 - \frac{x-\theta_4}{\theta_3}\right)^{\theta_1-1}}{\left[1 + (\theta_2 - 1) \frac{x-\theta_4}{\theta_3}\right]^{\theta_0+\theta_1}} \quad (9)$$

В $f_1(x)$ параметры $\theta_0 = 3.2357$, $\theta_1 = 8.7376$, $\theta_2 = 0.5567$, $\theta_3 = 5.9018$, $\theta_4 = 0$, в $f_2(x)$ – $\theta_0 = 14.0579$, $\theta_1 = 15.2853$, $\theta_2 = 0.7635$, $\theta_3 = 3.8998$, $\theta_4 = 0$.

Распределение ретроспективных данных для использования параметрических критериев об отсутствии тренда существенно зависит от реального эмпирического закона распределения вероятностей. При отклонении от нормального закона распределения вероятностей можно использовать настройку для выбора функции распределения и задания вероятности ошибки 1-го рода α .

В результате моделирования был получен закон распределения из смеси двух законов бета-распределения III-го рода, наиболее оптимально описывающего данные.

Анализ полученного уровня значимости для отсутствия тренда для математических ожиданий скоростей ветрового потока показал, что гипотеза отклоняется лишь по некоторым критериям. Но гипотеза об отсутствии тренда в дисперсии не отклоняется по всем критериям.

Интересно отметить, что законы распределения солнечной инсоляции, в таких месяцах, как апрель, июнь и июль являются однородными. Эмпирические распределения

солнечной инсоляции за эти месяцы приведены на рисунке 8.

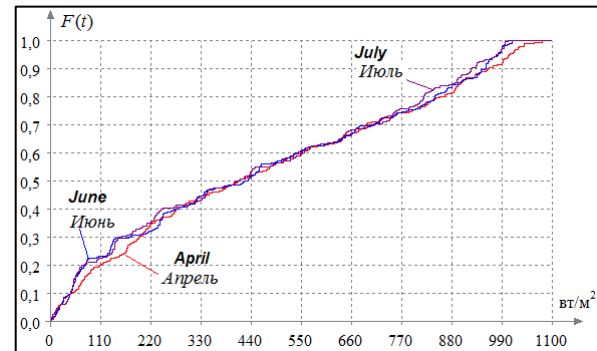


Рис. 8. Эмпирические функции распределения солнечной инсоляции за апрель, июнь и июль¹³

Было выявлено, что, в основном все критерии не отклоняют гипотезу об однородности законов, за исключением критериев Жанга.

Результаты статистического анализа законов распределений скорости ветрового потока и солнечной инсоляции могут быть полезны как в проектировании локальных гибридных систем электроснабжения на ВАИЭ, так и в качестве вспомогательного инструмента системному оператору энергосистемы для прогнозирования мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Показано, что с наилучшим уровнем значимости распределение скорости ветрового потока принадлежит либо закону бета-распределения III-го рода, либо широко применяемому закону Вейбулла-Гудвича.

2) На основании имеющихся ретроспективных временных рядов для данной территории сделана попытка установить корреляционную зависимость между скоростью ветрового потока и солнечной инсоляцией, которая показала, что для данного региона эта корреляция слабо выражена или отсутствует. Это позволяет рассматривать использование ветрового и солнечного потенциалов как две достаточно независимые задачи.

3) Исследовано отсутствие монотонной составляющей тренда в случайной выборке возобновляемых и альтернативных источников энергии на основе статистических критериев по отношению к близким конкурирующим гипотезам. При этом,

отсутствие периодической составляющей тренда требует дополнительного исследования.

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹Fig. 1. Beta distribution of third kind (a – distribution function, b – density function).

²Fig. 2. Weibull-Goodwich distribution (a – distribution function, b – density function)

³Table 1. Characteristic of the wind turbine Nordex N54

⁴Fig. 3. Energy characteristic of the wind turbine

Nordex N54.

⁵Fig. 4. Reliability function.

⁶Table 2. Correlation coefficient for autumn.

⁷Table 3. Correlation coefficient for winter.

⁸Table 4. Correlation coefficient for spring.

⁹Table 5. Correlation coefficient for summer.

¹⁰Fig. 5. Empirical distribution functions of the wind speed for 2016.

¹¹Fig. 6. Empirical distribution functions of wind speed.

¹²Fig. 7. Retrospective of wind speed.

¹³Fig. 8. Empirical distribution functions of solar insolation for April, June and July.

Литература (References)

- [1] Elhadidy M., Shaahid S. Parametric study of hybrid power generating systems. *Renew Energy*. 21(2). pp.129–139.
- [2] Karaki S.H., Chedid R.B., Ramadan R. (1999) Probabilistic performance assessment of autonomous solar–wind energy conversion systems. *IEEE Trans Energy Conversion*. 14(3). pp. 766–772.
- [3] Borrowsoy B.S., Salameh Z.M. (1994) Optimum photovoltaic array size for a hybrid wind/PV systems. *IEEE Trans Energy Conversion*. 9(3). pp. 482–488.
- [4] Kruangpradit P., Tayati W. (1996) Hybrid renewable energy system development in Thailand. *Renewable Energy*. 8(1–4). pp. 514–517.
- [5] Kellogg W.D., Nehrir M.H., Venkataramana G., Gerez V. (1998) Generation unit sizing and cost analysis for standalone wind, photovoltaic and hybrid wind/PV systems. *IEEE Trans Energy Conversion*. 13(1). pp. 70–75.
- [6] Chedid R., Rahman S. (1997) Unit sizing and control of hybrid wind-solar power system. *IEEE Trans Energy Conversion*. 112(1). pp. 79–86.
- [7] Diletto E., Gagliano S., Salerno N., Tina G. (2007) Optimization of Hybrid Solar Wind Power Systems. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. 26(3–4). pp. 225–231.
- [8] Tina G., Gagliano S., Raiti S. (2006) Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. *Solar Energy*. 80(5). pp. 578–588.
- [9] Hollands K.T.G., Huget R.G. (1983) A probability density function for the clearness index, with applications. *Solar Energy*. 30(3). pp. 195–209.
- [10] Ettoumi F.Y., Sauvageot H., Adane A.E.H. (2003) Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution. *Renewable Energy*. 28(11). pp. 1787–1802.
- [11] Tina G., Gagliano S. Probability Analysis of Weather Data for Energy Assessment of Hybrid Power System. 4th IASME/WSEAS International Conference on ENERGY, ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Algarve, Portugal, June 2008 11–13. p.p. 217–223.
- [12] Rykhlov B.A. (2010) Analiz primeneniya razlichnykh zakonov raspredeleniya dlya vyravnivaniya skorostey vetra na yugo-vostoke yevropeyskoy territorii Rossii [Analysis of the various distribution laws application to equalize wind speeds in the southeast of the Russian European territory]. *News of Saratov University*. 10(2). Ser. Earth sciences. pp. 25–30.
- [13] Bashahu M., Buseke M. (2016) Statistical Analysis of Hourly Wind Speed Data from Some Burundian Stations Using Beta Probability Density Functions. *Modern Environmental Science and Engineering*. 2(11). pp. 740–746.
- [14] Safari B. (2011) Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(2). pp. 925–935.
- [15] Mohammadi K., Alavi O., McGowan J.G. (2017) Use of Birnbaum-Saunders distribution for estimating wind speed and wind power probability distributions: A review. *Energy Conversion and Management*. 143. pp. 109–122.
- [16] Kantar Y.M., Usta I., Arik I., Yenilmez I. (2018) Wind speed analysis using the extended generalized Lindley distribution. *Renewable Energy*. 118. pp. 1024–1030.
- [17] Aries N., Boudia S.M., Ounis H. (2018) Deep assessment of wind speed distribution models: A case study of four sites in Algeria. *Energy Conversion and Management*. 155. pp. 78–90.
- [18] Jung C., Schindler D. (2017) Global comparison of the goodness-of-fit of wind speed distributions. *Energy Conversion and Management*. 133. pp. 216–234.
- [19] Jung C., Schindler D., Laible J., Buchholz A. (2017) Introducing a system of wind speed distributions for modeling properties of wind speed regimes around the world. *Energy Conversion and Management*. 144. pp. 181–192.
- [20] Jung C., Schindler D. (2018) 3D statistical mapping of Germany’s wind resource using

- WSWS // Energy Conversion and Management. 159. pp. 96–108.
- [21] Liu, F.-J., Ko, H.-H., Kuo, S.-S., Liang, Y.-H., & Chang, T.-P. (2014). Study on wind characteristics using bimodal mixture Weibull distribution for three wind sites in Taiwan. *Journal of Applied Science and Engineering*, 17, 283–292.
- [22] Chang, T. P. (2011). Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *Applied Energy*, 88, 1848–1856.
- [23] Akpinar, S., & Akpinar, E. K. (2009). Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models. *Energy Conversion Management*, 50, 877–884.
- [24] Carta, J. A., & Mentado, D. (2007). A continuous bivariate model for wind power density and wind turbine energy output estimations. *Energy Conversion and Management*, 48, 420–432.
- [25] Wang, J., Hu, J., & Ma, K. (2016a). Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 881–899.
- [26] Tian Pau, C. (2011). Estimation of wind energy potential using different probability density functions. *Applied Energy*, 88, 1848–1856.
- [27] Kollu, R., Rayapudi, S. R., Narasimham, S. V. L., & Pakkurthi, K. M. (2012). Mixture probability distribution functions to model wind speed distributions. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3, 1–10.
- [28] Lemeshko B.Y., Shcheglov A.E., Komissarova A.S. Svoystva i oshchnost' nekotoryh kriteriev sluchajnosti i otsutstviya trenda [Properties and power of some criteria for randomness and trend lack]. *Vestnik NGTU – The Messenger of NSTU*, 2012, no. 1(46), pp. 53-66. [in Russian].

Сведения об авторах.



Манусов Вадим Зиновьевич. (НГТУ, кафедра СЭСИ), доктор тех. наук, профессор. Направление интересы: нечеткие множества и нечеткая логика, применение методов искусственного интеллекта для оптимизации и планирования режимов электроэнергетических систем.

E-mail: Manusov36@mail.ru



Халдаров Шерход Камалханович. (НГТУ, кафедра СЭСИ) соискатель ученой степени.

Научные интересы: вопросы эффективной интеграции возобновляемых источников энергии, системы накопления энергии, прогнозирование вырабатываемой мощности ВИЭ и т.д.

E-mail: haldaroff@mail.ru