

Statistical analysis of energy indices of solar radiation (Based on the data of Tokmak Solar Power Station)

Kuznetsov N.

Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine
Kyiv, Ukraine

Lysenko O.

Tavria State Agrotechnological University
Melitopol, Ukraine

Abstract. Average daily or monthly data of solar radiation are often used in statistical analysis and in development of mathematical models for predicting energy generation. However, this can have a negative impact on the accuracy of forecasting. The authors carried out the statistical analysis of solar radiation based on the data obtained from the Tokmak SPS of the Zaporizhia region, Ukraine during 2016. The data were collected with a 30-minute interval in measurement. The analysis indicates close values of winter and summer insulation indices (direct and scattered), where the difference is approximately double. The mathematical expectation of the power surges is close to zero, and their distribution has signs of symmetry. The results of actual data calculation indicate that values of the elementary power surges of the SPS are a bit higher than the normal distribution calculated. Thus, the actual distribution corresponds to the normal one in the parameter of symmetry, but does not correspond to the parameters of kurtosis. If the time range is doubled from 30 minutes to 1 hour, the range of power changes slightly increases. In addition, the analysis of meteorological data showed that the probability of a prolonged growth or decline in power is not high, i.e. a change in power as a random process can be considered close to the stationary one. The performed analysis estimates the power supply possibilities for the region's consumers by the solar power plant, and creates a mathematical model for operation of the combined energy system that uses solar energy.

Keywords: solar radiation, power surges, statistical analysis of meteorological data, renewable energy sources.

Analiza statistică a indicilor eneretici a radiației solare (în baza datelor de exploatare a centralei solare Tokmak)

Kuznetsov N.P.¹, Lysenko O.V.²

¹Institutul energiei regenerabile a Academiei Naționale de Științe a Ucrainei
Kiev, Ucraina

²Universitatea Agrotehnică de Stat Tavria
Melitopol, Ucraina

Rezumat. Analiza statistică a datelor meteorologice și elaborarea în baza lor a modelelor matematice de prognoză a producerii energiei electrice pentru ce de obicei utilizează în calitate de informație primară valorile medii a radiației solare per zi, iar în unele cazuri cele lunare, ce poate influența negativ asupra preciziei prognozei. În această se realizează analiza statistică a radiației solare pe parcursul anului 2016 cu pasul de discretizare în timp egal cu 30 minute. Analiza datelor indică la faptul, că insolarea (directă și difuză) pentru perioada de iarnă și vară are valori comparabile. Diferența nu diferă mai mult de două ori. Valoarea de așteptare a salturilor de putere este aproape egală cu zero, iar distribuția acestei mărimi tendea spre simetrie. Este aproape căderi de tensiune la zero, iar distribuția lor are atribute simetrie. Rezultatele calculului măsurătorilor indică la o oarecare majorare a indicatorilor salturilor elementare a puterii centralei fotovoltaice în comparare cu valorile calculate în baza cuantilelor distribuției normale. Astfel, distribuția reală a parametrului corespunde distribuției normale pentru parametrul de simetrie, dar nu corespunde acestei distribuției parametru numit exces. La majorarea pasului de discretizare a măsurătorilor de la 30 minute până la 1 oră devierile puterii centrale se majorează nesemnificativ. Analiza datelor meteorologice indică la faptul, că probabilitatea creșterii sau descreșterii puterii centrale pe termen lung este nesemnificativă, deci devierea puterii centralei fotovoltaice ca un proces aleator se poate considera mult apropiată de un proces staționar.

Cuvinte-cheie: radiația solară, salt al puterii de generare, analiza statistică a datelor meteorologice, energia din surse regenerabile.

Статистический анализ энергетических показателей солнечной радиации (на примере данных Токмакской солнечной электростанции)

Кузнецов Н. П.

Институт возобновляемой энергетики национальной академии наук Украины
Киев, Украина

Лысенко О. В.

Таврический государственный агротехнологический университет
Мелитополь, Украина

Аннотация. При статистическом анализе имеющихся метеорологических данных и разработке на их базе математических моделей прогнозирования генерации энергии обычно в качестве исходных данных используют средние дневные, а в некоторых исследованиях среднемесячные значения солнечной радиации, что может негативно влиять на точность прогнозирования. Данная работа посвящена проведению статистического анализа данных солнечной радиации, полученных с Токмакской СЭС Запорожской области, Украина в течение 2016 года, с 30-минутным интервалом измерения. Анализ данных указывает на достаточно близкие значения зимних и летних показателей инсоляции (прямой и рассеянной), с разницей примерно в два раза. Математическое ожидание величины скачков мощности близко к нулю, а их распределение имеет признаки симметрии. Результаты подсчета фактических данных указывают на несколько завышенные показатели элементарных скачков мощности СЭС, чем рассчитанные по квантилю нормального распределения. Таким образом, фактическое распределение соответствует нормальному по параметру симметрии, однако не соответствует по параметрам эксцесса. При увеличении временного диапазона вдвое от 30 минут до 1 часа размах изменений мощности вырастает незначительно. Также анализ метеоданных показал, что вероятность длительного роста или спада мощности невысока, то есть изменение мощности как случайный процесс можно считать близким к стационарному. Выполненный анализ позволяет оценить возможности электроснабжения потребителей рассматриваемого региона от солнечной электростанции, а также построить математическую модель работы комбинированной энергосистемы, использующей солнечную энергию.

Ключевые слова: солнечная радиация, скачки генерируемой мощности, статистический анализ метеоданных, возобновляемые источники энергии.

Введение

В мире происходят изменения в подходах к формированию энергетической политики государств. Осуществляется переход от устаревшей модели функционирования энергетического сектора, в которой доминировали крупные производители энергии, ископаемое топливо, неэффективные сети, несовершенная конкуренция на рынках природного газа, угля, электроэнергии, к новой модели, в которой создается конкурентная среда, выравниваются возможности для развития рынка и минимизируется доминирование одного вида производства энергии. Вместе с этим отдается предпочтение повышению энергоэффективности и использованию энергии возобновляемых и альтернативных источников энергии, таких как энергия ветра и солнца. Внедрение мероприятий по предупреждению изменения климата являются одним из приоритетов глобального развития энергетики. Это ставит перед Украиной новые экономические и технологические вызовы, но одновременно открывает новые возможности для поиска и внедрения инновационных разработок в

области производства, трансформации, поставки и потребления энергии. [1]

Ветровая и солнечная генерация – наиболее динамично развивающаяся отрасль энергетики. Ожидается, что в перспективе солнечная энергия будет составлять наибольшую долю будущего глобального энергоснабжения [2]. Уже сейчас себестоимость производства энергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в некоторых странах достигла уровня ниже, чем себестоимость энергии на тепловых электростанциях [3]. Однако, главным недостатком ВИЭ остается нестабильность генерации под влиянием сезонных и метеорологических факторов. Последние являются источниками колебаний мощности продолжительностью от нескольких минут до нескольких дней, что негативно влияет на работу энергосистем и на качество электрической энергии. [4]

Оптимизация работы энергетической системы при увеличении объема генерации ВИЭ является одной из приоритетных задач. И для нивелирования или минимизирования влияния нестабильного характера генерации ВИЭ необходимо создание системы прогнозирования генерации электроэнергии и

внедрение использования аккумуляторов для балансировки энергетической системы.

Как правило, процесс генерации энергии солнечными электростанциями (СЭС) рассматривается как статистическое явление, которое может быть описано методами теории вероятности. Наличие статистических закономерностей, полученных на основе регулярных метеонаблюдений в конкретной местности, существенно упрощает методику определения энергопотенциала и вычисления технико-экономических показателей системы автоматизированного энергоснабжения автономных потребителей с использованием ВИЭ, позволяет провести компьютерное моделирование работы последней и в дальнейшем проводить прогнозирование уровней генерации. [5]

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах отечественных на зарубежных ученых анализ имеющихся метеорологических наблюдений за солнечной радиацией базируется на методике статистического анализа [6] - [9], а моделирование процесса часто проводят с использованием искусственных нейронных сетей.

Так, в работе [10] реализован метод сглаживания солнечных данных с помощью бета-вероятностных распределений. Работа [11] посвящена анализу корреляции данных диффузионной и полусферической солнечной радиации, а также анализу корреляции между мгновенной (почасовой) и ежедневной солнечной радиацией нескольких СЭС в США и Иордании. В [12] представлена стохастическая модель, позволяющая получить набор временных значений солнечной радиации, которую возможно использовать в проектах моделирования работы СЭС. Работа [13] посвящена сравнению статистических моделей, основанных на временных рядах, применяемых для прогнозирования значений глобальной солнечной радиации на основе данных за половину суток. Работа [14] исследует различные методы и подходы прогнозирования солнечной радиации, а именно – рассматриваются статистические методы и методы на основе облачных и гибридных моделей, разработанные по фактическим метеоданным. Работа [15]

описывает подходы к онлайн-прогнозированию производства электроэнергии СЭС. Для разработки модели прогнозирования используются метеоданные 15-минутных наблюдений солнечной энергии от 21 СЭС, расположенных на крышах в небольшом селе Дании. Работа [16] посвящена прогнозированию мощности СЭС. В ней был предложен статистический метод прогнозирования солнечной энергии на основе методов искусственного интеллекта. В [17] разработана и проверена среднесрочная модель прогнозирования солнечного облучения по метеорологическим данным US National Weather Service's, как источника информации для модели искусственной нейронной сети.

Следует заметить, что в большинстве работ при статистическом анализе имеющихся метеорологических данных и разработке на их базе математических моделей прогнозирования генерации энергии обычно в качестве исходных данных используют среднедневные, а в некоторых исследованиях среднемесячные значения солнечной радиации, что не может обеспечить достаточной точности. Кроме того, важно понимать, что для разработки модели прогнозирования генерации ВИЭ необходимо проводить такой анализ метеорологических данных для каждой отдельной территории, так как результаты могут иметь существенные региональные различия.

II. МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ

Данная работа посвящена проведению статистического анализа данных солнечной радиации, полученных в течение 2016 года на Токмакской СЭС Запорожской области, Украина, с 30-минутным интервалом измерения.

Поскольку погодные факторы имеют сезонную зависимость, в работе рассматриваются в качестве репрезентативных отдельные месяцы – январь, апрель, июль и октябрь, как середины соответствующих сезонов года.

Как свидетельствуют данные многолетних наблюдений, существует значительная разница в уровнях солнечной радиации в разную пору года [18]. Если рассматривать,

например, уровни инсоляции на горизонтальных площадках, то разница в солнечной радиации для различных сезонов года отличается почти в четыре раза [19] (рис.1). Однако анализ данных, полученных в районе Токмакской СЭС, указывает на

достаточно близкие значения зимних и летних показателей инсоляции (прямой и рассеянной), с разницей примерно в два раза (рис. 2а). А максимальные освещенности имеют еще меньшие отличия (рис. 2б).

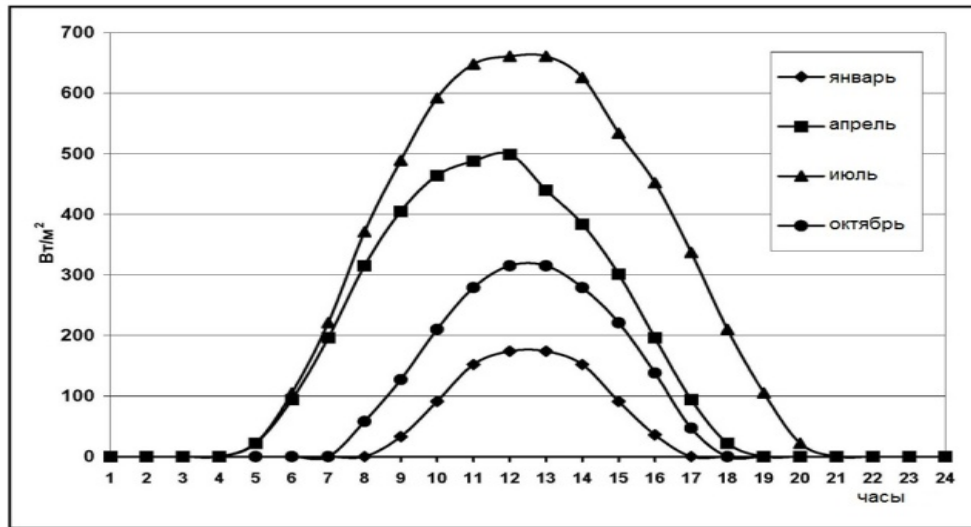
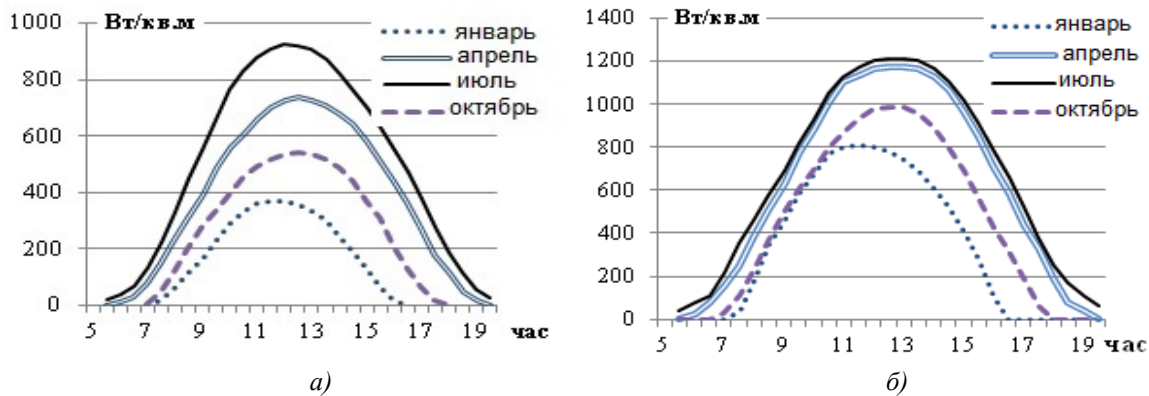


Рис. 1. Средний уровень инсоляции для г. Киев



а – средний для данного месяца; б – максимально достижимый
Рис. 2. Доступный уровень инсоляции, Токмакская СЭС.

Объяснением может служить тот факт, что основной причиной уменьшения инсоляции зимой, кроме большей облачности, может быть низкий угол подъема солнца над горизонтом. Однако на перпендикулярной к направлению солнечных лучей плоскости, при наличии следящей (трекерной) системы, этот фактор нивелируется. В результате использования таких трекерных систем, рост производительности СЭС может составлять от 25%, при одноосной коррекции ориентации, до 45% при двухосной (рис. 3) [20].

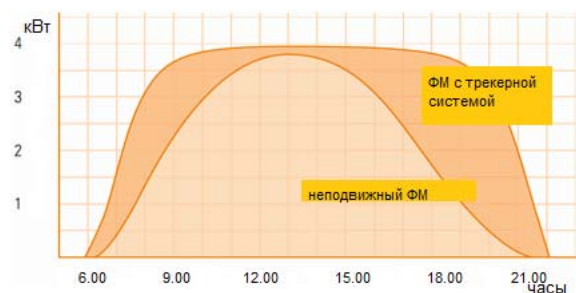


Рис. 3. Пример роста генерируемой мощности СЭС при наличии трекерной системы.

Мощность солнечной электростанции, или ее отдельной составляющей – фотомодуля (ФМ), зависит от состояния атмосферы, то есть доступного объема солнечной радиации, а также температуры воздуха и самого модуля. Например, стандартный модуль STP300S [21] площадью 1,63 м² имеет номинальную (пиковую) мощность 300 Вт при инсоляции 1000 Вт/м² и температуре модуля 25°C; при этом КПД преобразования энергии – на уровне 18,4% (достижимый максимум). Однако при нормальных погодных условиях КПД составляет 16,9%, а пиковая мощность 220 Вт при инсоляции 800 Вт/м². Текущая электрическая мощность ФМ определяется в зависимости от уровня радиации, а КПД составляет примерно 17%.

Безразмерным показателем, характеризующим величину солнечной энергии, можно считать коэффициент k_s :

$$k_s = \frac{P(\rho)}{P_n} \quad (1)$$

где $P(\rho)$ – текущая мощность ФМ в зависимости от ρ - уровня солнечной радиации;

P_n – номинальная мощность ФМ.

Значение $k_s=1$ соответствует максимальной теоретической мощности модуля, а $k_s = 0$ – полной темноте [22].

Кроме среднего значения k_s и его среднеквадратичного отклонения (СКО) можно определить также нормализованный

показатель k_t , который определяет вариативность солнечной радиации относительно среднего значения в настоящее время суток. Нормализованная мощность фактически отражает состояние прозрачности воздуха (уровня облачности) относительно среднего значения для данного месяца и времени суток [23]. Нормализация максимально достижимой инсоляции (рис. 3) отражает состояние облачности аналогично индексу облачности:

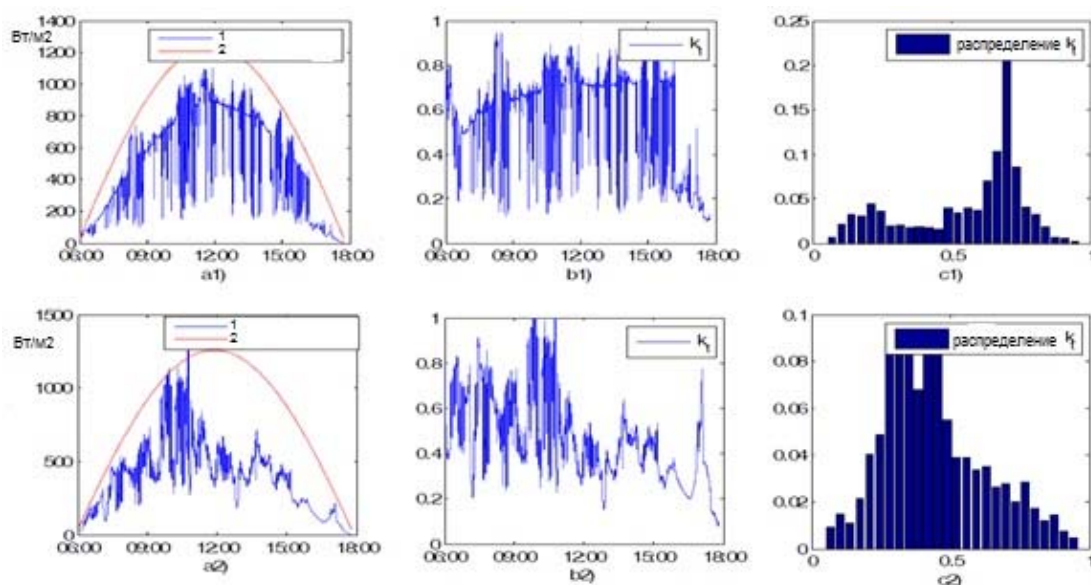
$$n = \frac{\rho - \rho_{\min}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \quad (2)$$

где ρ_{\min} , ρ_{\max} – минимальная и максимальная затеняющая способность облаков.

Для оценки прозрачности атмосферы можно рассматривать $k_t=1-n$ – коэффициент прохождения света через атмосферу (рис.4) [24]. Тогда прямая солнечная радиация на поверхности земли определяется

$$G = k_t \cdot G_{\text{clear}}$$

где G_{clear} – солнечная радиация при чистом небе.



а) 1- текущая и 2 - максимальная радиация; б) коэффициент прохождения света; в) гистограмма коэффициента прохождения света

Рис.4. Примеры изменения текущей солнечной радиации в течение суток.

Что касается рассеянной составляющей (рис.5), то она зависит от характера поверхности земли. Отношение количества отраженной радиации к суммарной, поступающей на поверхность, называется альбедо поверхности. Альбедо зависит от вида поверхности и изменяется от 5% для чернозема до 80-90% для снега (планетарное альбедо Земли составляет 35-40%).

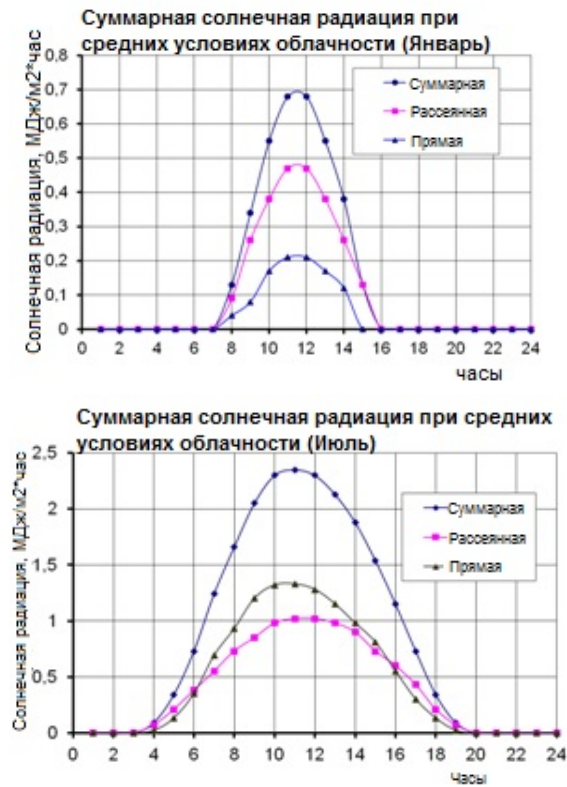


Рис.5. Усредненные показатели солнечной радиации г. Киев

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализа некоторых параметров относительной мощности солнечной радиации в исследуемом районе Токмакской СЭС, по данным 2016 года, приведены в табл.1.

Анализ 30-минутных изменений освещенности позволяет оценить вероятность значительных элементарных изменений (скачков) мощности Δk_s , выраженных через безразмерный показатель k_s (рис. 6).

Как видим, значительные скачки (более половины номинальной мощности) имеют характер отдельных выбросов, и уже при отсеивании 1% экстремальных значений (симметрично по 0,5% положительных и отрицательных) размах скачков составляет около 0,17 номинальной мощности СЭС, а

при отсеивании 5% – до 0,13 номинальной мощности. Вероятность 0,95 здесь рассматривается как приемлемый показатель, в частности применяется к технической надежности оборудования или к обеспечению частоты в электросети. Вероятность 0,99 демонстрирует влияние возможных сбоев при измерении, которые имеют нетипичный для данного процесса характер.

Таблица 1.

Показатели нормализованной мощности ФМ

Показатель	Янв.	Апр.	Июль	Окт.
Время инсоляции	7.30-16.00	6.00-19.00	5.30-20.00	7.00-17.30
Математическое ожидание k_s	0,19	0,33	0,38	0,26
СКО k_s	0,22	0,28	0,28	0,25
Коэффициент вариации среднесуточного уровня	0,78	0,34	0,14	0,56
Математическое ожидание k_t	0,38	0,58	0,69	0,51
СКО k_t	0,34	0,28	0,22	0,34
Максимальный скачок мощности, Δk_{smax}	0,49	0,63	0,65	0,57
СКО скачков мощности	0,10	0,15	0,16	0,13

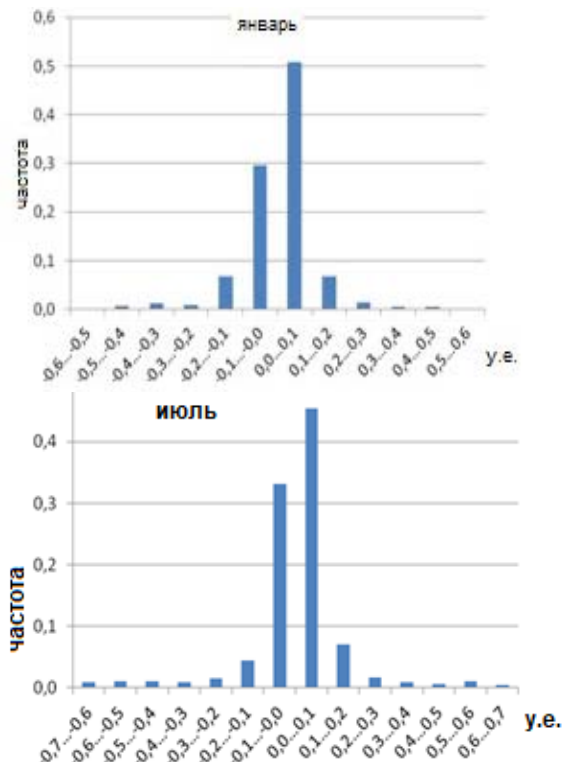


Рис.6. Гистограммы 30-минутных скачков мощности ФМ Токмакской СЭС.

Математическое ожидание величины скачков мощности близко к нулю, а их распределение имеет признаки симметрии. Если считать распределение величины скачков мощности нормальным, можно найти максимальную амплитуду скачков с вероятностью 0,99 (квантиль нормального распределения 2,58) и с вероятностью 0,95 (квантиль 1,96), (табл. 2).

Таблица 2.
Показатели распределения скачков мощности ФМ.

месяц	Δk_s max	Δk_s min	σ	$2,58 \cdot \sigma$	$1,96 \cdot \sigma$
Январь	0,49	-0,47	0,104	0,27	0,20
Апрель	0,63	-0,64	0,147	0,38	0,29
Июль	0,65	-0,67	0,155	0,40	0,30
Октябрь	0,57	-0,63	0,133	0,34	0,26

Проверим, насколько показатели нормального распределения соответствуют фактическим для имеющегося массива данных.

Для сравнения с показателями нормального распределения определим возможные экстремальные значения скачков мощности, отбрасывая (симметрично) количество измерений, соответствующее вероятностям 0,99 и 0,95. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3.
Фактические показатели скачков мощности ФМ за 30 мин.

месяц	max 0,99	min 0,99	max 0,95	min 0,95
Январь	0,45	-0,44	0,27	-0,30
Апрель	0,58	-0,59	0,34	-0,27
Июль	0,59	-0,65	0,36	-0,44
Октябрь	0,54	-0,58	0,32	-0,30

Результаты подсчета фактических данных (табл.3) указывают на несколько завышенные показатели элементарных скачков мощности, чем рассчитанные по квантилю нормального распределения (табл.2). Следовательно, фактическое распределение соответствует нормальному по параметру симметрии, однако не соответствует по параметру эксцесса. Как видно из рис.6, основная масса скачков мощности сосредоточена в пределах 30% номинальной мощности ФМ, при этом значительные скачки (до 60% номинальной

мощности) имеют в общем малую вероятность (менее 10% случаев), однако их размах затухает медленно, что соответствует завышенным (по сравнению с нормальным) значениям эксцесса.

В табл.4 приведены данные по скачкам мощности за 1 час.

Таблица 4.
Фактические показатели скачков мощности ФМ за 1 час.

месяц	max 0,99	min 0,99	max 0,95	min 0,95
Январь	0,49	-0,48	0,36	-0,37
Апрель	0,58	-0,63	0,40	-0,41
Июль	0,61	-0,67	0,41	-0,47
Октябрь	0,53	-0,59	0,37	-0,40

Как видно из сравнений табл. 3 и 4, при увеличении временного диапазона вдвое, от 30 минут до 1 часа, размах элементарных скачков мощности ФМ вырос незначительно, на 10-15%. Показатели для разных сезонов года также достаточно близки, если учитывать рост абсолютных показателей освещенности летом. Таким образом, вероятность длительного роста или спада мощности невысока, то есть изменение мощности как случайный процесс можно считать близким к стационарному, с колебаниями в диапазоне от нескольких минут до часа.

Показатели симметрии и эксцесса для распределения скачков мощности ФМ приведены в табл. 5. Проверку гипотезы о нормальности распределения по двунаправленным критерием асимметрии и эксцесса выполнено в соответствии с требованиями стандарта ISO [25].

Таблица 5.
Показатели распределения скачков мощности ФМ.

месяц	асимметрия		эксцес	
	30 мин.	1 час.	30 мин.	1 час.
Январь	-0,12	0,01	7,49	2,25
Апрель	-0,17	-0,25	6,44	2,95
Июль	-0,48	-0,22	6,49	2,31
Октябрь	-0,35	-0,41	6,90	2,23

Наличие отрицательных значений асимметрии свидетельствует о преобладании количества положительных скачков мощности над отрицательными, хотя их

размах обычно несколько меньше (табл. 3, 4). При этом величина асимметрии близка к требованиям нормального распределения. Значение эксцесса значительно превышают допустимые для гипотезы нормального распределения, что свидетельствует о концентрации основного объема значений вблизи среднего, и примерно равномерного распределения остальных значений по градациям скачков мощности.

IV. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ данных метеонаблюдений за 2016 на территории Токмакской СЭС позволил впервые получить вероятностные характеристики и законы распределения солнечной радиации на данной территории.

На основании экспериментальных данных (результатов наблюдений) определены некоторые численные параметры, которые необходимы для построения математических выражений при моделировании процессов использования солнечной энергии. Важным параметром является темп изменения получаемой энергии и результирующие скачки мощности, которые могут негативно влиять на работу энергосистемы и качество генерируемой электроэнергии. Анализ фактических данных позволяет выполнить оценку возможности электроснабжения потребителей рассматриваемого региона от СЭС в данном регионе. Сходимость данных с расчетными результатами позволяет применять гипотезу об усеченном нормальном распределении элементарных скачков мощности СЭС.

Проведенный статистический анализ позволяет также разработать математическую модель мощности СЭС, которая может применяться как для компьютерного моделирования работы СЭС и расчета ее технико-экономических показателей, так и для дальнейшего анализа работы СЭС в составе комбинированных энергетических систем с различными источниками энергии, включая ВИЭ.

Литература (References)

[1] Nova energy`chna strategiya Ukrainy` do 2035 roku: «Bezpeka, energoefekty`vnist`, konkurentospromozhnist`. [New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, Energy Efficiency, Competitiveness"]. Available

at
<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358> (accessed 28.06.2017)

[2] Heinemann, Detlev, Elke Lorenz, and Marco Girodo. "Forecasting of solar radiation." *Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale*. Nova Science Publishers, New York, (2006).

[3] Levelized Cost of Energy Analysis 10.0. Available at :
<https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-analysis-100/> (accessed 28.06.2017)

[4] Makhotilo K., Kosatij D. Eksperimentalnaya otsenka vliyaniya oblachnosti na kolebaniya moshchnosti fotoelektricheskoy sistemy [An experimental estimate of the effect of cloudiness on the power fluctuations of the photoelectric system]. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2014, no.12, pp. 47-53. (In Russian)

[5] Golik. O. P., Zhesan R.V. [Analysis of the data of meteorological observations on the intensity of solar radiation in the Kirovograd region in order to create a system of automatic control of autonomous power supply on the basis of solar-wind installations]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohrads`koho natsional`noho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v sil`s`kohospodars`komu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya: zb. nauk. pr. - Kirovograd: KNTU* [Proc. of Kirovograd National Technical University. "Engineering in agricultural production, branch engineering, automation"], 2009, no. 22, pp. 164-172. (In Ukrainian)

[6] Nelson W. B. Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis. – John Wiley & Sons, 2009. – T. 344.

[7] Schabenberger O., Gotway C. A. Statistical methods for spatial data analysis. – CRC press, 2017.

[8] Ramsey F., Schafer D. The statistical sleuth: a course in methods of data analysis. – Cengage Learning, 2012.

[9] Yang H. X., Lu L., Burnett J. Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong. *Renewable Energy*, 2003, vol. 28, no. 11, pp. 1813-1824.

[10] Ettoumi, F. Youcef, et al. "Statistical analysis of solar measurements in Algeria using beta distributions.", *Renewable Energy*, 2002, no. 26.1, pp. 47-67.

[11] Collares-Pereira, Manuel, and Ari Rabl. "The average distribution of solar radiation-correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values." *Solar energy*, 1979, no. 22.2 pp. 155-164.

- [12] Graham, V. A., and K. G. T. Hollands. "A method to generate synthetic hourly solar radiation globally.", *Solar Energy*, 1990, no. 46.6, pp. 333-341.
- [13] Martin, Luis, et al. "Prediction of global solar irradiance based on time series analysis: Application to solar thermal power plants energy production planning.", *Solar Energy*, 2010, no. 84.10 pp. 1772-1781.
- [14] Diagne, Maimouna, et al. "Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids.", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, no. 27, pp. 65-76.
- [15] Bacher, Peder, Henrik Madsen, and Henrik Aalborg Nielsen. "Online short-term solar power forecasting.", *Solar Energy*, 2009, no. 83.10, pp. 1772-1783.
- [16] Chen, Changsong, et al. "Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network.", *Solar Energy*, 2011, no. 85.11, pp. 2856-2870.
- [17] Marquez, Ricardo, and Carlos FM Coimbra. "Forecasting of global and direct solar irradiance using stochastic learning methods, ground experiments and the NWS database.", *Solar Energy*, 85.5 2011, no. 85.5, pp. 746-756.
- [18] DSTU-N B V.1.1-27:2010 Budivelna klimatolohiya. [State standard of Ukraine V.1.1-27: 2010 Construction climatology.] Kyiv, Ministry of Regional Development of Ukraine. - 2011. - 127 p
- [19] Velychko S.A. *Enerhetyka navkolyshnoho seredovyscha Ukrainy (z elektronnykh kartamy)* [Energy of the environment of Ukraine (with electronic maps)]. Educational and methodical manual. Kharkiv: Kharkiv National University named after VN Karazin, 2003, p. 52
- [20] SAVANNA™ ADVANTAGES Available at: <http://morgansolar.com/savanna-features/> (accessed 28.06.2017)
- [21] 300 Watt MONOCRYSTALLINE SOLAR MODULE, Available at: [http://shangde.fanyacd.com/imglibs/files/hypro_stp300s_wew\(mc4_300_295_290\).pdf](http://shangde.fanyacd.com/imglibs/files/hypro_stp300s_wew(mc4_300_295_290).pdf), (accessed 28.06.2017)
- [22] Zarzalejo L. F. et al. A new statistical approach for deriving global solar radiation from satellite images, *Solar Energy*, 2009, vol. 83, no.4, p. 480-484.
- [23] Woyte A., Belmans R., Nijs J. Fluctuations in instantaneous clearness index: Analysis and statistics // *Solar Energy*. – 2007. – Т. 81. – №. 2. – С. 195-206.
- [24] T. Soubdhan, R. Emilion, R. Calif. Classification of daily solar radiation distributions using a mixture of Dirichlet distributions. Article soumis a *Solar Energy*, 2008, p. 16 Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00289567>, (accessed 28.06.2017)
- [25] ISO 5479:1997 «Statistical interpretation of data - Tests for departure from the normal distribution»

Сведения об авторах.



Кузнецов Н. П.
Доктор технических наук,
заведующий отделом
комплексных энергосистем,
Институт возобновляемой
энергетики,
г. Киев, Украина
E-mail: nik_ku@ukr.net



Лысенко О. В.
Кандидат технических наук,
доцент кафедры
«Электроэнергетика и
автоматизация» Таврический
государственный
агротехнологический
университет,
г. Мелитополь, Украина
E-mail: helga_vl@ukr.net