

Оценка генерации электроэнергии электротехническим комплексом с фотоэлектрическими панелями с использованием статистических методов

А.В. ТУРЫШЕВА¹ ✉, И.Н. ВОЙТЮК¹, Даниэль ГЕРРА ДИАС²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Центр исследований солнечной энергии, Сантьяго-де-Куба, Куба

✉ anna_turysheva_21@mail.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Turysheva, A.; Voytyuk, I.; Guerra, D. Estimation of Electricity Generation by an Electro-Technical Complex with Photoelectric Panels Using Statistical Methods. *Symmetry* 2021, 13, 1278. <https://doi.org/10.3390/sym13071278>

Аннотация: В данной статье представлен вычислительный инструмент для оценки энергии, вырабатываемой маломощными фотоэлектрическими системами, исходя из специфических условий исследуемого региона, поскольку характеристическое уравнение энергии может быть получено с учетом основных климатических факторов, влияющих на эти системы с точки зрения симметрии или асимметрии случайного распределения вырабатываемой энергии. Кроме того, целью данной работы является определение корреляции, существующей между метеорологическими переменными и энергией, вырабатываемой 5-киловаттными солнечными системами в конкретных климатических условиях Республики Куба. В работе также представлены результаты влияния каждого климатического фактора на симметрию распределения энергии, генерируемой солнечной системой. Изучение симметрии в статистических моделях важно, так как они позволяют установить степень симметрии (или асимметрии) вероятностного распределения случайной величины, не прибегая к ее графическому представлению. Статистическая асимметрия показывает, насколько равномерно и пропорционально распределены наблюдения выше и ниже центральной (наивысшей) точки распределения. В том случае, когда указанное распределение сбалансировано, оно называется симметричным.

Ключевые слова: солнечная энергия; солнечные системы; фотоэлектрические панели; математическое моделирование; статистика; корреляция; асимметрия; симметрия; распределение случайных величин.

Estimation of Electricity Generation by an Electro-Technical Complex with Photoelectric Panels Using Statistical Methods

Anna V. TURYSHEVA¹ ✉, Irina N. VOITYUK¹ and Daniel GUERRA DÍAZ²

¹ Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

² Solar Energy Research Center, Santiago de Cuba, Cuba

✉ anna_turysheva_21@mail.ru

Abstract: This paper presents a computational tool for estimating energy generated by low-power photovoltaic systems based on the specific conditions of the study region since the characteristic energy equation can be obtained considering the main climatological factors affecting these systems in terms of the symmetry or skewness of the random distribution of the generated energy. Furthermore, this paper is aimed at determining any correlation that exists between meteorological variables with respect to the energy generated by 5-kW solar systems in the specific climatic conditions of the Republic of Cuba. The paper also presents the results of the influence of each climate factor on the distribution symmetry of the generated energy of the solar system. Studying symmetry in statistical models is important because they allow us to establish the degree of symmetry (or skewness), which is the probability distribution of a random variable, without having to make a graphical representation of it. Statistical skewness reports the degree to which observations are distributed evenly and proportionally above and below the center (highest) point of the distribution. In the case when the mentioned distribution is balanced, it is called symmetric.

Keywords: solar power; solar systems; photovoltaic panel; mathematical modeling; statistics; correlation; skewness; symmetry; random variable distribution

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Недостатки и преимущества возобновляемых источников энергии

Рост населения планеты, а также развитие промышленности и производственных технологий сопровождаются значительным увеличением потребления электроэнергии. Для удовлетворения потребностей населения энергогенерирующие предприятия вынуждены потреблять все больше ископаемых органических ресурсов [1, 2], так как производство энергии обычно осуществляется за счет сжигания углеводородов (нефти, газа, угля). Однако со временем запасы этого вида сырья истощаются, месторождения находятся во все более сложных горно-геологических и климатических условиях [3, 4], а проекты по реализации добычи углеводородов требуют строительства нескольких инфраструктур: промышленных объектов для подготовки, бурения, добычи и транспортировки нефти, газа и угля [5]. Это приводит не только к значительным инвестициям, но и к негативному воздействию на окружающую среду из-за строительных и монтажных работ, возведения дорожных насыпей, рытья траншей для трубопроводов, а также выбросов при работе машин, приводящих к нарушению почвы, загрязнению, замусориванию, разрушению почвенного покрова, изменению и уничтожению мест обитания животных, и возникновению парникового эффекта [6].

Поэтому вопрос перехода от традиционного производства энергии к альтернативным методам выработки электроэнергии становится все более актуальным [7]. Методы получения электроэнергии, основанные на использовании возобновляемых ресурсов, имеют следующие преимущества: неистощаемость, доступность, отсутствие необходимости в сложной сопутствующей инфраструктуре, а также сокращение или полное исключение выбросов углекислого газа [8]. Однако, несмотря на все преимущества, техногенное воздействие на окружающую среду все же существует, что подтверждают исследования, проведенные в рамках китайско-американского сотрудничества [9]. Согласно отчету, к негативным факторам относятся изменение среды обитания животных и выброс токсичных веществ некоторыми фотоэлементами солнечных панелей.

Однако, несмотря на недостатки возобновляемых источников энергии, они оказывают гораздо менее значительное воздействие на окружающую среду, чем традиционные виды выработки электроэнергии [10]. Поэтому использование альтернативных видов энергии, в том числе солнечной, в последнее время занимает лидирующие позиции в мировой энергетике. Из года в год возникают новые проблемы и ставятся новые задачи по совершенствованию систем [11, 12], использующих альтернативные источники энергии, чему способствует развитие других областей науки и техники – автоматики, материаловедения и технологии производства. Кроме того, для современного общества проблема снижения негативного воздействия на окружающую среду является актуальной и требует немедленного решения [13].

Для того чтобы стимулировать предприятия к переходу на возобновляемые виды выработки электроэнергии, многие страны принимают меры государственной, политической, законодательной и экономической поддержки, в том числе:

1. увеличение финансирования из государственных бюджетов в США, Японии, Германии, Италии и Индии [14];
2. внедрение системы «Зеленых сертификатов», действующей в Евросоюзе и США, обеспечивающей реализацию механизма предоставления квот на производство/приобретение энергии из возобновляемых источников;
3. налоговые кредиты и льготы для производителей возобновляемой энергии; гранты и тендеры на разработку новых проектов и расширение существующих производственных мощностей.

2. Целесообразность использования солнечной энергии

В данной статье рассматриваются аспекты использования солнечной энергии в электротехнических комплексах.

В пользу выбора солнечной энергии в качестве источника говорит тот факт, что солнце излучает на поверхность Земли около 1 кВт/м^2 в сутки, и энергия, поступающая на планету за семь дней, превышает энергию всех мировых запасов ископаемых органических ресурсов. По некоторым оценкам, экономический потенциал солнечной энергетики составляет 20 млрд тонн условного топлива, и эта цифра в два раза превышает добычу всех углеводородов в год [15]. Кроме того, значительными ресурсами обладает сырьевая база для производства фотоэлектрических панелей: количество кремния, из которого сегодня изготавливается большинство солнечных батарей,

в 100 000 раз превышает запасы урана, используемого при выработке электроэнергии на атомных электростанциях.

Исходя из вышесказанного, следует сделать вывод о целесообразности использования солнечной энергии [16] и преобразования ее в электрическую [17] с помощью солнечных батарей (фотоэлектрических панелей).

3. Факторы, влияющие на эффективность фотоэлектрических панелей

Фотоэлектрическая панель – это генератор постоянного тока, принцип действия которого основан на физическом свойстве полупроводников: фотоны света выбивают электроны с внешней орбиты атомов полупроводника, создавая достаточное количество свободных электронов для генерации электрического тока. Когда цепь замыкается, возникает электрический ток [18]. Для получения необходимой мощности отдельные солнечные элементы объединяются в панели, где они соединяются параллельно или последовательно для получения требуемых параметров тока и напряжения. Поскольку производимая электроэнергия прямо пропорциональна площади панелей, фотоэлектрические панели занимают много места.

Эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую зависит в первую очередь от интенсивности солнечного света и угла падения лучей. Эффективность панели зависит от ее местоположения (широты), климатических характеристик, времени года и времени суток. Поскольку поверхность панели обладает отражающими свойствами, не все солнечные лучи попадают на модуль. Однако следует отметить, что поскольку панель обладает способностью преобразовывать в электрическую энергию не только прямое солнечное излучение, но и рассеянное, фотоэлектрический модуль может улавливать и излучение, отраженное от соседних поверхностей. Согласно токо-напряженной характеристике солнечных модулей, напряжение холостого хода OSV обратно пропорционально зависит от рабочей температуры модуля, поэтому выходная мощность снижается при нагреве модуля.

Кроме того, мощность теряется при прохождении тока через объемное сопротивление полупроводника [19], при этом происходит нагрев модуля, что приводит к снижению его энергоэффективности [20-22]. Количество отказов фотоэлектрических станций в процессе эксплуатации также влияет на количество производимой электроэнергии. Примерно в течение десяти лет эксплуатации количество отказов невелико, но затем быстро возрастает [23]. Описанные выше факторы являются основными причинами, снижающими эффективность фотоэлектрических панелей. Поэтому теоретически кремниевый солнечный элемент имеет КПД около 20 %, но на практике – меньше [24].

В настоящее время повышение эффективности преобразования солнечного света в электроэнергию является весьма актуальной задачей [25]. Широко известны два метода увеличения выработки электроэнергии [26], получаемой от фотоэлектрической установки: улучшение структуры фотоэлектрической панели для повышения ее производительности [27] и увеличение количества солнечного излучения, улавливаемого панелью [28]. Первый способ напрямую связан с разработкой новых технологических решений по созданию материалов и комбинированию различных полупроводниковых материалов, способных улавливать различный спектр. Например, в работе [29] увеличение эффективности фотоэлектрического модуля достигается за счет создания многослойных панелей, так называемых гетероструктур. В работе [30] описано использование тонких пленок для двухсторонних кремниевых солнечных элементов. Второй метод включает в себя технические решения по использованию систем слежения за солнцем – концентраторов солнечного излучения, или, одним словом, компонентный состав оборудования, входящего в состав солнечной электростанции.

Данная работа направлена на определение корреляции, существующей между климатическими факторами в системах, использующих солнечную энергию, и энергией, вырабатываемой этими системами. Это связано с тем, что на эффективность генерации влияют климатические факторы, как на увеличение, так и на уменьшение эффективности. Данная исследовательская работа направлена на определение влияния различных климатических факторов на производство электроэнергии с учетом географического положения объекта исследования. Изучение статистических моделей важно тем, что позволяет установить степень симметрии (или асимметрии), то есть распределения вероятностей случайной величины, не прибегая к ее графическому представлению.

На основе анализа статистических данных, учитывающих наибольшее влияние на производство энергии солнечной электростанцией на этапе проектирования, можно будет определить наиболее эффективное географическое расположение электростанции [31] или ее компонентный состав. Полученные зависимости позволят повысить производительность солнечных электростанций прямого преобразования.

В данной работе представлен анализ электротехнического комплекса с маломощной солнечной электростанцией (5 кВт), подключенной к электрической сети провинции Сантьяго-де-Куба, Республика Куба. Для оценки энергии, вырабатываемой пятикиловаттной солнечной системой, необходимо провести исследования с учетом различных климатических условий. Такой подход позволит определить зависимость климатических факторов, влияющих на выработку электроэнергии в фотоэлектрических системах.

4. Моделирование электротехнического комплекса с фотоэлектрической системой

В ходе предыдущих исследований была разработана модель, реализованная в программе Matlab, для моделирования пятикиловаттной фотоэлектрической системы, представленной на рисунке 1 [32]. Эта модель позволяет исследовать основные электрические переменные, такие как энергия, вырабатываемая системой в определенных климатических условиях. Модель включает уравнения поверхности отклика для оценки генерируемой энергии. Таким образом, можно сравнить выработанную энергию, рассчитанную на основе математической модели комплекса, с уравнениями поверхности отклика, полученными с помощью статистических моделей, а также проверить их эффективность при оценке выработанной энергии. Исследуемая система расположена на территории Сантьяго-де-Куба (широта 20.0208° N и долгота 75.8267° W).

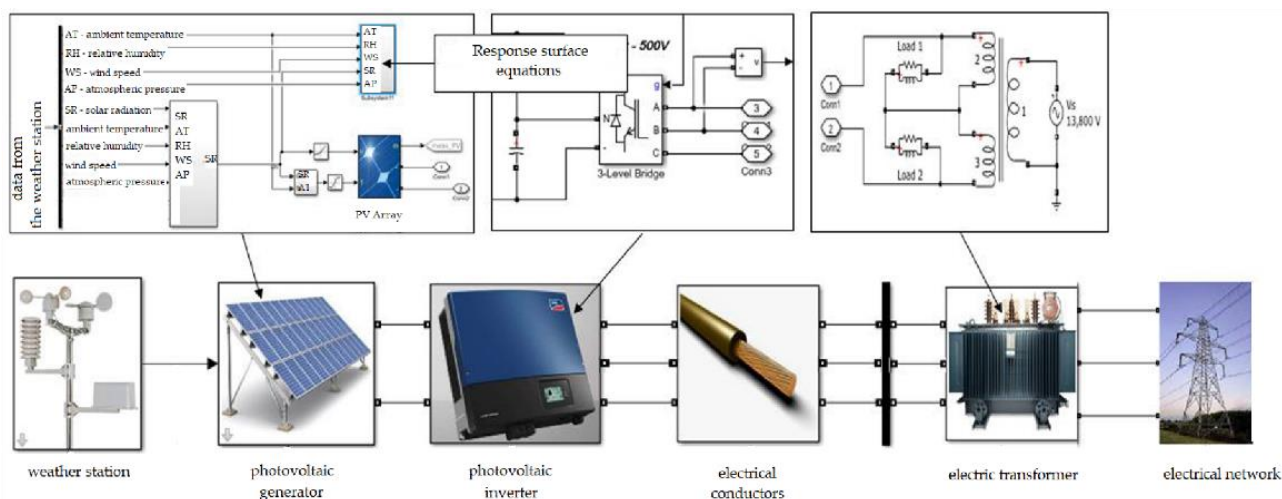


Рис. 1. Модель электротехнического комплекса с фотоэлектрической системой мощностью 5 кВт

В данной фотоэлектрической энергосистеме используются панели марки NUMEN SOLAR, модель DSM-240-C, которые соединены между собой, что позволяет вырабатывать электроэнергию. В таблице 1 приведены технические параметры панелей с излучением 1000 Вт/м^2 и температурой окружающей среды 25°C .

Таблица 1

Технические характеристики солнечного модуля DSM-240-C

Переменные	Технические данные
Тип модуля	поликристаллический
Напряжение разомкнутой цепи (V_{oc})	37
Ток короткого замыкания (I_{sc})	8,54
Напряжение МПП (V_{MPPT})	29,8
Ток МПП (I_{MPPT})	8,19
Эффективность (%)	16

С помощью метеостанции, установленной в районе исследования, были получены следующие данные (2020):

- горизонтальная глобальная радиация;
- скорость ветра;
- температура окружающей среды;
- относительная влажность воздуха;
- атмосферное давление.

Результаты измерений были введены в разработанную компьютерную модель. Для моделирования фотоэлектрического генератора и введения его в солнечную генераторную установку были использованы следующие математические средства: уравнения поверхности отклика, найденные с помощью статистической программы Minitab и данные, измеренные метеостанцией. Затем сравнивались значения энергии, полученные с помощью обеих моделей. Такой подход позволил проверить эффективность статистической модели.

В автоматических расчетах разработанной программы солнечная радиация рассчитывается в наклонной плоскости в соответствии с наклоном солнечного генератора.

5. Корреляция метеорологических переменных

Для определения взаимосвязи между различными переменными было проведено корреляционное исследование. Для этого с помощью пакетов Matlab (версия R2018a) и Minitab Statistical Software (версия 18.0) был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона (P) для каждой из выбранных переменных (горизонтальная глобальная радиация, скорость ветра, температура окружающей среды, относительная влажность и атмосферное давление). На основе расчетов было определено, является ли корреляция между исследуемыми переменными значимой, чтобы р-значение было меньше 0,05.

Результаты, полученные с помощью обоих программных пакетов, представлены в таблицах 2 и 3. В первой таблице представлены значения корреляции между метеорологическими переменными и электрической энергией, получаемой от маломощной солнечной системы, рассчитанные с помощью статистических пакетов Matlab и Minitab, а во второй – значения корреляции между метеорологическими переменными из обоих программных пакетов.

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между энергетическими и атмосферными переменными, рассчитанные с помощью программ Matlab и Minitab

Переменные	E	E (кВт) (Matlab)	E (кВт) (Minitab)
Температура окружающей среды	AT (°C)	0,75005	0,750
Скорость ветра	WS (м/с)	0,54787	0,548
Относительная влажность	RH (%)	−0,72428	−0,725
Солнечная радиация	SR (Вт/м²)	0,69986	0,700
Атмосферное давление	AP (бар)	−0,13067	−0,131

Таблица 3

Расчеты коэффициентов корреляции с помощью программ Matlab и Minitab

V	Mat	Min	Mat	Min	Mat	Min	Mat	Min
	AT (°C)		WS (м/с)		RH (%)		SR (Вт/м²)	
WS	0,407/0°	0,41	–	–	–	–	–	–
RH	−0,91/0°	−0,91	−0,39/0°	−0,39	–	–	–	–
SR	0,74/0°	0,74	0,38/0°	0,38	−0,73/0°	−0,73	–	–
AP	−0,05/0,85°	−0,05	−0,2/0°	−0,20	−0,01/0°	−0,01	0,12/0°	0,12

На основании результатов, представленных в таблице 2, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты корреляции между переменными, найденные с помощью обоих программных пакетов, одинаковы.

2. Есть четыре метеорологические переменные, имеющие большую корреляцию с электрической энергией, вырабатываемой солнечной электростанцией: солнечная радиация, температура окружающей среды, относительная влажность и скорость ветра, хотя и в меньшей степени.

3. Существует прямая зависимость между солнечной радиацией и температурой окружающей среды и энергией, что означает, что они прямо пропорциональны.

4. Существует обратная корреляция между относительной влажностью и энергией, что означает их обратную пропорциональность.

5. Атмосферное давление имеет очень низкую корреляцию с электрической энергией, получаемой от солнечной системы, вырабатываемой солнечной электростанцией.

В таблице 3 представлены различия в расчетах коэффициентов корреляции, полученных с помощью программных пакетов Matlab и Minitab. Как видно из таблицы, результаты для обоих программных пакетов одинаковы.

На основании результатов, представленных в таблице 2, можно сделать следующие выводы:

1. Существует высокая обратная корреляция ($K = -0,91$) между относительной влажностью и температурой окружающей среды.

2. Существует высокая прямая зависимость ($K = 0,74$) между солнечной радиацией и температурой окружающей среды.

3. Существует высокая и обратная корреляция ($K = -0,73$) между солнечной радиацией и относительной влажностью.

4. Существует средняя и прямая корреляция ($K = 0,407$) между температурой окружающей среды и скоростью ветра.

5. Другие корреляции, отмеченные красным цветом, низкие или нулевые.

6. Атмосферное давление имеет низкую или нулевую корреляцию с другими метеорологическими переменными.

На рисунке 2 представлено графическое изображение взаимосвязи между метеорологическими переменными, полученными с метеорологической станции, расположенной в исследуемом регионе в провинции Сантьяго-де-Куба, Республика Куба.

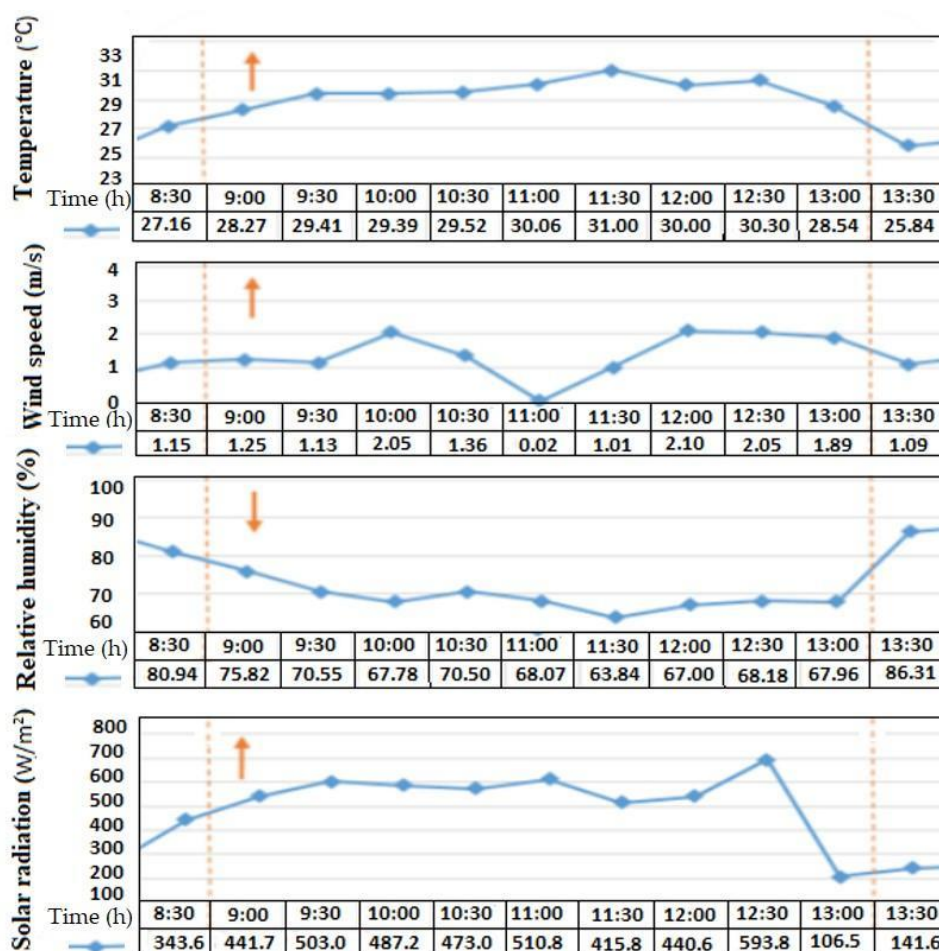


Рис. 2. Поведение метеорологических переменных в обычный день (23 октября 2020 года)

Поведение измеренных переменных подтверждает результаты, полученные в соответствии с таблицей 3, поскольку наблюдается следующее явление: с увеличением солнечной радиации в интервале времени с 9:00 до 13:00, температура окружающей среды также пропорционально увеличивается, и в меньшей степени, как и скорость ветра. Относительная влажность демонстрирует противоположное поведение – уменьшается, как и было получено ранее (табл. 3).

Результаты корреляционных расчетов подтверждают эффективность математической модели, поскольку они совпадают с данными измерений метеостанции.

6. Расчет главных компонент

В статистике анализ главных компонент (АГК) – это метод, используемый для определения набора данных в терминах новых некоррелированных переменных («компонент») [33]. Компоненты упорядочиваются по величине определяемой ими исходной дисперсии, поэтому этот метод эффективен для снижения размерности набора данных [34].

Технически АГК – это поиск предсказания, в соответствии с которым данные лучше всего представляются в терминах наименьших квадратов [35]. Он преобразует набор наблюдений за возможно коррелированными переменными в набор значений линейно некоррелированных переменных, называемых главными компонентами.

Что касается применения, то метод главных компонент рассматривается как способ сокращения числа исходных переменных, учитываемых при анализе [36].

Данный метод необходим для определения пяти метеорологических переменных, связь между которыми необходимо изучить (солнечная радиация, температура окружающей среды, относительная влажность, скорость ветра и атмосферное давление). Необходимо определить, какие переменные оказывают наибольшее влияние на выработку электроэнергии комплексом. Этот метод позволяет определить наиболее влияющие переменные, поэтому именно они должны учитываться при расчетах. В конечном итоге можно будет сократить количество переменных в уравнении, тем самым уменьшив ошибки оценки.

Существует два основных способа использования АГК:

- Метод, основанный на корреляционной матрице, используется, когда данные неоднородны по размерности или порядок измеряемых случайных величин не одинаков [37].
- Метод, основанный на ковариации, используется, когда данные однородны по размерности и имеют схожие средние значения [38].

Для целей данного исследования был использован первый метод АГК, поскольку данные переменных неоднородны.

Метод начинается с построения корреляционной матрицы. Далее рассматриваются значения каждой из m случайных величин F_j^β . Для каждой из n особей были взяты значения этих переменных, и набор данных был записан в матричной форме [39]:

$$(F_j^\beta) \quad \begin{matrix} \beta = 1, \dots, n \\ j = 1, \dots, m \end{matrix} \quad (1)$$

где каждое множество

$$M_j = \{F_j^\beta \mid \beta = 1, \dots, n\} \quad (2)$$

можно считать случайной выборкой для переменной F_j . Из данных $m \times n$, соответствующих m случайным величинам, можно построить выборочную корреляционную матрицу, которая определяется следующим образом:

$$R = [r_{ij}] \in M_{m \times m} \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(F_i, F_j)}{\sqrt{\text{var}(F_i) * \text{var}(F_j)}} \quad (4)$$

Поскольку корреляционная матрица симметрична, она диагонализируема, и ее собственные значения λ_i , проверяются

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = m \quad (5)$$

В силу предыдущего свойства эти собственные значения называются весами каждой из m главных компонент. Основные математически идентифицированные факторы представлены базисом собственных векторов матрицы R . Каждая из переменных может быть выражена как линейная комбинация собственных векторов или главных компонент [40].

Используя метод АГК, с помощью программы Matlab был рассчитан коэффициент АД (%), содержащий процент общей дисперсии, который в свою очередь объясняет каждый главный компонент изучаемой зависимой переменной.

Согласно результатам, полученным в таблице 4, из расчета главных компонент можно сделать вывод, что метеорологическими переменными с наибольшей корреляцией с энергией, получаемой от фотоэлектрических систем, являются солнечная радиация, температура окружающей среды и скорость ветра. Солнечная радиация и температура окружающей среды являются климатическими переменными с наибольшей корреляцией с энергией, поставляемой фотоэлектрическими системами.

С другой стороны, относительная влажность сильно влияет на поведение температуры окружающей среды (см. табл. 2), поэтому и температура окружающей среды, и солнечная радиация являются основными метеорологическими переменными, которые учитываются при оценке энергии, поставляемой фотоэлектрическими системами.

Таблица 4

Расчеты главных компонент были получены с помощью статистической программы Minitab

Переменные	E	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Температура окружающей среды	AT (°C)	0,488	0,076	0,283	0,367	0,067
Скорость ветра	WS (м/с)	0,322	−0,39	−0,81	0,20	0,18
Относительная влажность	RH (%)	−0,482	−0,13	−0,24	−0,47	−0,073
Солнечная радиация	SR (Вт/м²)	0,451	0,23	0,01	−0,67	0,53
Атмосферное давление	AP (бар)	−0,03	0,86	−0,44	0,12	−0,16
Энергия	E (кВтч)	0,470	−0,1	−0,03	−0,35	−0,8

7. Метод поверхности отклика

Концепция поверхности отклика включает зависимую переменную Y , называемую переменной отклика, и несколько независимых или контролируемых переменных. Если предусмотрено, что все эти переменные поддаются измерению, поверхность отклика можно выразить как

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (6)$$

Для получения уравнения поверхности отклика было разработано несколько специальных экспериментальных планов, направленных на аппроксимацию этого уравнения с помощью минимально возможного количества экспериментов. В двумерной задаче простейшей поверхностью является плоскость, определяемая уравнением [41]:

$$Y = B_0 * X_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + \epsilon \quad (7)$$

где X – значения независимых переменных, а B – коэффициенты, рассчитанные для каждой из независимых переменных. Наблюдаемый отклик принимается равным единице, а оценки для B должны быть определены методом наименьших квадратов, который минимизирует сумму квадратных ошибок. Это уравнение называется уравнением первой степени, поскольку экспонента каждой независимой переменной равна единице.

Если есть основания полагать, что поверхность не является плоской, то наиболее подходящей моделью может быть уравнение второй степени с двумя неизвестными [42]:

$$Y = B_0 * X_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + B_{11} * X_1^2 + B_{12} * X_1 * X_2 + B_{22} * X_2^2 + \epsilon \quad (8)$$

Чтобы эффективно оценить параметры модели, необходимо применить соответствующий экспериментальный план для сбора требуемых данных [43]. Ниже приведены некоторые из ключевых особенностей:

1. Обеспечивает разумное распределение точек данных и, следовательно, информации.
2. Не требует проведения большого количества экспериментов.

3. Позволяет изучить адекватность модели.
4. Обеспечивает точные оценки коэффициентов модели.
5. Обеспечивает оценку внутренней ошибки.
6. Позволяет проводить эксперименты блоками.
7. Не требует слишком большого количества уровней независимых переменных.

По мере усложнения поверхности необходимо оценивать большее количество коэффициентов, а количество экспериментальных точек неизбежно увеличивается [44].

На основе полученных результатов было найдено уравнение поверхности отклика для двух факторов, а именно для двух независимых переменных и одной зависимой переменной, с использованием программы Minitab 18. По результатам моделирования можно сделать вывод, что для получения уравнения отклика необходимо использовать только две независимые переменные, которыми будут температура окружающей среды и солнечная радиация, так как более 85 % переменной отклика, в данном случае энергии, можно объяснить только двумя независимыми переменными.

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Для определения изменения энергии, вырабатываемой солнечной электростанцией, с учетом пяти изученных метеорологических переменных (скорость ветра, относительная влажность, температура окружающей среды, солнечная радиация, атмосферное давление), используемая модель объяснит только 58 % отклика.
2. Если учитывать четыре метеорологические переменные (скорость ветра, относительную влажность, температуру окружающей среды, солнечную радиацию), то используемая модель объяснит только 67 % отклика.
3. Если учитывать три метеорологические переменные (скорость ветра, температура окружающей среды, солнечная радиация), то используемая модель объяснит только 85 % отклика.
4. Если учитывать только две метеорологические переменные (температура окружающей среды, солнечная радиация), то используемая модель объяснит только 87 % отклика.

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что для оценки энергии, вырабатываемой комплексом в конкретных климатических и географических условиях региона, три наиболее влияющие переменные включают: температуру окружающей среды и солнечную радиацию (с объяснением зависимой переменной на 87 %).

8. Результаты и обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: для двух уравнений поверхности отклика уравнение, связывающее независимые переменные, температуру окружающей среды и солнечную радиацию, дает лучший ответ по сравнению с уравнением, связывающим независимые переменные, температуру окружающей среды и относительную влажность.

Результаты из таблицы 4 показывают, что уравнение два (солнечная радиация и температура окружающей среды) дает наилучшую оценку энергии, произведенной системой мощностью пять киловатт.

На рисунке 3 красными столбцами показана средняя энергия, вырабатываемая электротехническим комплексом с пятикиловаттной фотоэлектрической установкой в день и рассчитанная по уравнению (таблица 1). Средняя энергия, вырабатываемая электротехническим комплексом с пятикиловаттной фотоэлектрической установкой в сутки, и рассчитанная с помощью математической модели (рис. 1), представлена синими столбцами.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Полученные значения энергии оцениваются уравнением поверхности отклика, приведенным в таблице 5 (красные столбцы); оно с высокой точностью приближается к энергии, полученной с помощью математической модели пятикиловаттной фотоэлектрической системы, смоделированной с помощью программы Matlab/Simulink (синие столбцы).
2. Низкие средние значения энергии, вырабатываемой за день, как показано на рисунке 3 (область 1), являются результатом низких средних значений солнечной радиации и низких средних значений температуры окружающей среды, связанных с высокими средними значениями относительной влажности и снижением средней скорости ветра в течение дня.

3. Согласно рисунку 3 (область 2), средняя энергия, произведенная в дни 9, 10, 11 и 14, несмотря на то, что значения солнечной радиации и скорости ветра ниже, чем в дни 12, 13 и 15, примерно на 100 Вт/м^2 представляет собой несколько более высокие значения по сравнению с энергией, произведенной в дни 12, 13 и 15. В дни 9, 10, 11 и 14 наблюдаются более высокие значения относительной влажности, которые влияют на снижение температуры окружающей среды. Последняя напрямую связана с рабочей температурой солнечной панели.

4. Наибольшие средние значения энергии, вырабатываемой за день, как показано на рисунке 3 (область 3), являются результатом высоких средних значений солнечной радиации и высоких средних значений температуры окружающей среды, связанных с низкими средними значениями относительной влажности и увеличением средней скорости ветра в течение дня.

5. При оценке энергии системы достаточно учитывать только две метеорологические переменные (температуру окружающей среды и солнечную радиацию), поскольку обе они объясняют более 85 % отклика системы и вносят значительную асимметрию в распределение случайной переменной генерируемой энергии (рис. 3).

6. На рисунке 3 видно, что при высоких скоростях ветра фотоэлектрические системы получают дополнительное охлаждение, поскольку известно, что с повышением рабочей температуры эффективность фотоэлектрического модуля снижается. Это обстоятельство также вносит определенную асимметрию в энергию.

7. Существует прямая зависимость между температурой окружающей среды и солнечной радиацией и обратная зависимость относительной влажности от солнечной радиации и температуры окружающей среды.

8. Можно доказать, что атмосферное давление практически не влияет на энергетические характеристики фотоэлектрических систем в рассматриваемых условиях, что указывает на отсутствие случайного изменения энергии, однако существует теоретическая возможность того, что атмосферное давление влияет на энергетические характеристики при изменении географического положения объекта исследования.

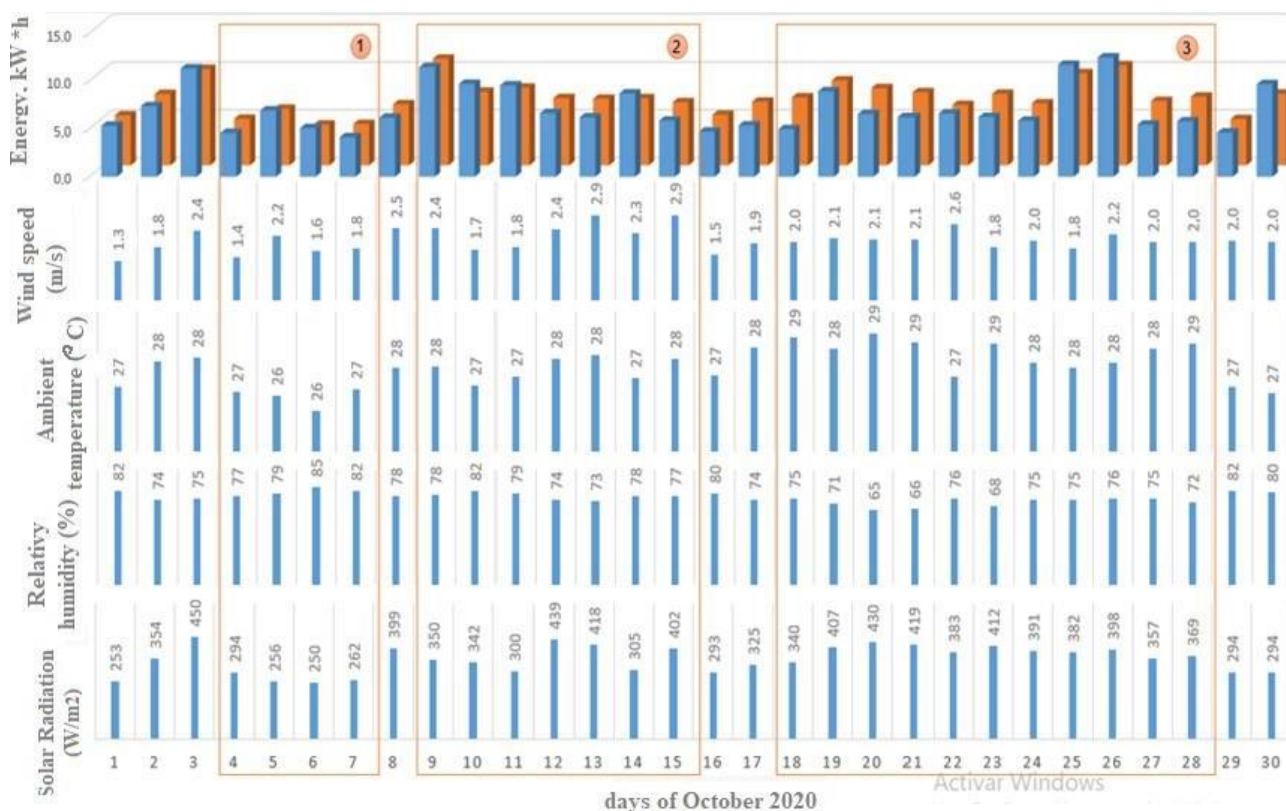


Рис. 3. Производство энергии в день фотоэлектрической системой мощностью 5 кВт (октябрь 2020 года) в зависимости от метеорологических переменных (температура окружающей среды, солнечная радиация, относительная влажность, скорость ветра)

Уравнения поверхности отклика

№	Уравнение	ЕС (кВтч)	ЕЕ (кВтч)	D (кВтч)
	$E = (604 - 117.7 * T_a + 1.4 * G_h + 3.84 * T_a^2) * 10$	214	213,6	-0,4

Здесь ЕС – средняя энергия за месяц, рассчитанная с помощью программы Matlab, ЕЕ – средняя энергия за месяц, рассчитанная в соответствии с уравнениями поверхности отклика, D – разница между средней энергией, полученной обоими методами в октябре.

Существует ряд статей, посвященных оценке выработки электроэнергии солнечными панелями в зависимости от различных факторов, в том числе климатических условий, например, работы [45–48]. В этих исследованиях учитывается только солнечная радиация, другие климатические факторы не представлены. Также в этих работах отсутствует подробное описание расчетных моделей и статистический анализ влияния климатических факторов на производимую энергию. В статье [49] описана модель определения угла наклона к горизонту (по отношению к земле) солнечной энергетической системы путем оценки среднемесячной суточной глобальной солнечной радиации на наклонных поверхностях, обращенных непосредственно к экватору, которая основана на среднемесячных суточных данных о глобальной солнечной радиации, полученных на основе данных типичного метеорологического года (ТМГ). Недостатком предложенной модели является отсутствие корреляции с другими климатическими факторами, которые также могут случайным образом изменяться и влиять на солнечную радиацию. Такую же оценку можно дать и модели фотоэлектрической системы, представленной в статье [50].

Кроме того, в статье [51] представлены модель и самообучающаяся система для оценки запыленности фотоэлектрических панелей на основе данных о солнечной радиации, температуре окружающей среды и выходной мощности, вырабатываемой солнечными панелями, а также о количестве пыли в этих условиях. Такой подход имеет много преимуществ, однако при построении модели не используются данные о скорости ветра и влажности, которые оказывают большое влияние на образование пыли.

Также в настоящее время существуют модели ясного неба, которые учитывают влияние облаков на солнечную радиацию и не принимают во внимание другие климатические факторы.

В солнечных приложениях наиболее распространенные модели облученности ясного неба (ОЯН) дают прогнозы широкополосного облучения, основанные на ряде упрощений и/или эмпирических компонентов, по сравнению со строгими моделями радиационного переноса, используемыми в атмосферных науках. Таким образом, эти распространенные модели ОЯН должны проходить постоянную оценку качества, чтобы определить диапазон достоверности таких упрощений. Традиционно эти оценки состоят из прямых сравнений с высококачественными наземными наблюдениями [52].

Принимая во внимание результаты этих исследований и ограниченный опыт существующих систем и моделей оценки выработки электроэнергии солнечными панелями в зависимости от климатических условий, следует сделать вывод, что предлагаемые методы пригодны для использования в конкретных географических условиях.

9. Выводы

Предложенный в данной работе вычислительный инструментарий предназначен для оценки энергии, вырабатываемой маломощными фотоэлектрическими системами, исходя из конкретных условий исследуемого региона. Такой подход позволит определить взаимосвязь между климатическими факторами, влияющими на производство энергии в фотоэлектрических системах, работающих в любом регионе. Такой подход позволяет оценить наиболее благоприятное географическое расположение фотоэлектрических панелей, что способствует повышению эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. Описанный в данной работе подход к оценке значимости климатических параметров также позволит определить компонентный состав солнечной электростанции с точки зрения автоматизации и алгоритма ее работы. Результаты оценки энергии, полученные с помощью уравнений поверхности отклика и полученные в ходе данного исследования для

конкретных климатических условий Республики Куба, соответствуют одному месяцу исследования (октябрь 2020 года), что является небольшой выборкой. Для адекватной оценки энергии необходимы годовые метеорологические данные и произведенная энергия.

Согласно результатам, полученным в ходе данного исследования, при оценке энергии, вырабатываемой электротехническим комплексом с пятикиловаттной фотоэлектрической установкой, с помощью статистических методов можно утверждать, что статистическая асимметрия отражает степень, в которой наблюдения распределены равномерно и пропорционально выше и ниже центральной (наивысшей) точки распределения. В том случае, когда указанное распределение является сбалансированным, оно называется симметричным. Таким образом, исходя из представленных исследований, три климатических фактора способствуют асимметрии и оказывают наибольшее влияние на распределение случайной величины генерируемой энергии: температура окружающей среды, солнечная радиация и скорость ветра.

Сокращения

В данной статье используются следующие сокращения:

ТОС	Температура окружающей среды
СВ	Скорость ветра
ОВВ	Относительная влажность воздуха
СР	Солнечная радиация
АД	Атмосферное давление
СР	Солнечная радиация
АГК	Анализ главных компонент
ОЯН	Облученность ясного неба
ТМГ	Типичный метеорологический год

Вклад авторов: концептуализация, А.Т. и И.В.; методология, Д.Г.; программное обеспечение, Д.Г.; валидация, А.Т., И.В. и Д.Г.; формальный анализ, И.В.; исследование, И.В.; ресурсы, Д.Г.; курирование данных, А.Т.; написание – подготовка первоначального варианта, А.Т.; написание – рецензирование и редактирование, И.В.; визуализация, Д.Г.; руководство, А.Т.; администрирование проекта, А.Т. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: Не применимо.

Благодарности: Мы признательны за поддержку Исследовательскому центру солнечной энергии в Сантьяго-де-Куба и кафедре общей электротехники Санкт-Петербургского горного университета.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

ЛИТЕРАТУРА

1. Pirog, S.; AGH Scientific and Technical University; Shklyarskiy, Y.; Skamyin, A. Saint Petersburg Mining University Non-linear Electrical Load Location Identification. *J. Min. Inst.* 2019, 237, 317–321. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.317>
2. Bolshunova, O.; Kamyshian, A.; Bolshunov, A. Diagnostics of career dump truck traction induction motors technical condition using wavelet analysis. In Proceedings of the 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics, Omsk, Russia, 15–17 November 2016. <http://doi.org/10.1109/Dynamics.2016.7818988>
3. Malarev, V.; Kopteva, A.; Koptev, V.; Gotsul, Y. Improvement of Efficiency of Steam-Thermal Treatment of High-Viscous Oil Formations Using Downhole Electric Steam Generators. *J. Ecol. Eng.* 2021, 22, 17–24. <http://doi.org/10.12911/22998993/130630>
4. Iakovleva, E.; Belova, M.; Soares, A. Specific Features of Mapping Large Discontinuous Faults by the Method of Electromagnetic Emission. *Resources* 2020, 9, 135. <http://doi.org/10.3390/resources9110135>
5. Koteleva, N.; Buslaev, G.; Valnev, V.; Kunshin, A. Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps. *Int. J. Eng.* 2020, 33, 1620–1628. <http://doi.org/10.5829/ije.2020.33.08b.20>
6. Eder, L.; Provornaya, I.; Filimonova, I.; Kozhevnikov, V.; Komarova, A. World energy market in the conditions of low oil prices, the role of renewable energy sources. *Energy Procedia* 2018, 153, 112–117. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.068>
7. Munoz-Guijosa, J.M.; Kryltcov, S.B.; Solovev, S.V. Application of an active rectifier used to mitigate currents distortion in 6–10 KV distribution grids. *J. Min. Inst.* 2019, 236, 229–238.
8. Rassõlkin, A.; Sell, R.; Leier, M. Development case study of the first estonian self-driving car, iseauto. *Electr. Control. Commun. Eng.* 2018, 14, 81–88. <http://doi.org/10.2478/ecce-2018-0009>
9. National Research Council. *The Power of Renewables: Opportunities and Challenges for China and the United States*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2011; pp. 1–240. <http://doi.org/10.17226/12987>
10. Kozioł, J.; Mendecka, B. Evaluation of Economic, Energy-environmental and Sociological Effects of Substituting Non-renewable Energy with Renewable Energy Sources. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.* 2015, 3, 333–343. <http://doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0025>
11. Boikov, A.V.; Savelev, R.V.; Payor, V.A.; Potapov, A.V. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2. *CIS Iron Steel Rev.* 2020, 20, 3–6. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.01>

12. Bardanov, A.I.; Pudkova, T.V. Control of D-STATCOM for asymmetric voltage dips compensation. In Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, St. Petersburg and Moscow, Russia, 28–31 January 2019; pp. 430–433. <http://doi.org/10.1109/ElConRus.2019.8657254>
13. Ragazzi, M.; Ionescu, G.; Cioranu, S.; Brebbia, C.A.; Polonara, F.; Magaril, E.R.; Passerini, G. Assessment of environmental impact from renewable and non-renewable energy sources. *Int. J. Energy Prod. Manag.* 2017, 2, 8–16. <http://doi.org/10.2495/EQ-V2-N1-8-16>
14. Furlan, C.; Mortarino, C. Forecasting the impact of renewable energies in competition with non-renewable sources. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 81, 1879–1886. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.284>
15. Baranes, E.; Jacqmin, J.; Poudou, J.-C. Non-renewable and intermittent renewable energy sources: Friends and foes? *Energy Policy* 2017, 111, 58–67. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.018>
16. Lakatos, L.; Hevessy, G.; Kovács, J. Advantages and Disadvantages of Solar Energy and Wind-Power Utilization. *World Futur.* 2011, 67, 395–408. <http://doi.org/10.1080/02604020903021776>
17. Bardanov, A.I.; Vasilkov, O.S.; Pudkova, T.V. Modeling the process of redistributing power consumption using energy storage system with various configurations to align the electrical loads schedule. *J. Physics Conf. Ser.* 2021, 1753, 012013.
18. Carrizosa, M.J.; Stankovic, N.; Vannier, J.-C.; Shklyarskiy, Y.E.; Bardanov, A.I. Multi-terminal dc grid overall control with modular multilevel converters. *J. Min. Inst.* 2020, 243, 357. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.357>
19. Ivanchenko, D.I.; Belsky, A.A.; Dobush, V.S. Application of Kalman filter for prevention of unrequired operation of power transformer differential protection. *J. Phys. Conf. Series* 2020, 1652, 012001. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1652/1/012001>
20. Peng, Z.; Herfatmanesh, M.R.; Liu, Y. Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy Convers. Manag.* 2017, 150, 949–955. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.007>
21. Buonomano, A.; Calise, F.; D'Accadia, M.D.; Vicidomini, M. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment. *Energy* 2018, 155, 174–189. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.006>
22. Fakouriyan, S.; Saboohi, Y.; Fathi, A. Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production. *Renew. Energy* 2019, 134, 1362–1368. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.054>
23. Poulek, V.; Safrankova, J.; Cerna, L.; Libra, M.; Beranek, V.; Finsterle, T.; Hrzina, P. PV Panel and PV Inverter Damages Caused by Combination of Edge Delamination, Water Penetration, and High String Voltage in Moderate Climate. *IEEE J. Photovolt.* 2021, 11, 561–565. <http://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3050984>
24. Setiawan, E.A.; Setiawan, A.; Siregar, D. Analysis on solar panel performance and PV-inverter configuration for tropical region. *J. Therm. Eng.* 2017, 3, 1259–1270. <http://doi.org/10.18186/journal-of-thermal-engineering.323392>
25. Ngoc, T.N.; Phung, Q.N.; Tung, L.N.; Sanseverino, E.R.; Romano, P.; Viola, F. Increasing efficiency of photovoltaic systems under non-homogeneous solar irradiation using improved Dynamic Programming methods. *Sol. Energy* 2017, 150, 325–334. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.057>
26. Zamyatina, E.N.; Zamyatin, E.O.; Shafkhatov, E.R. Criteria for Assessing the Energy Efficiency of the Electrical Complex. In Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus, St. Petersburg and Moscow, Russia, 27–30 January 2020; pp. 1344–1346.
27. Liu, H.-D.; Lin, C.-H.; Pai, K.-J.; Lin, Y.-L. A novel photovoltaic system control strategies for improving hill climbing algorithm efficiencies in consideration of radian and load effect. *Energy Convers. Manag.* 2018, 165, 815–826. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.081>
28. Zhang, L.; Yu, S.S.; Fernando, T.; Iu, H.H.-C.; Wong, K.P. An online maximum power point capturing technique for high-efficiency power generation of solar photovoltaic systems. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2019, 7, 357–368. <http://doi.org/10.1007/s40565-018-0440-2>
29. Alferov, Z.I.; Andreev, V.M.; Rumyantsev, V.D. III-V heterostructures in photovoltaics. In *Concentrator Photovoltaics*; Luque, A., Vacheslav, A., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2007; Volume 130, pp. 25–50.
30. Untila, G.; Kost, T.; Chebotareva, A.; Zaks, M.; Sitnikov, A.; Solodukha, O.; Shvarts, M. Concentrator bifacial Ag-free LGCells. *Sol. Energy* 2014, 106, 88–94. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2013.11.034>
31. Alves, P.; Fernandes, J.F.; Torres, J.P.N.; Branco, P.C.; Fernandes, C.; Gomes, J. From Sweden to Portugal: The effect of very distinct climate zones on energy efficiency of a concentrating photovoltaic/thermal system (CPV/T). *Sol. Energy* 2019, 188, 96–110. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.038>
32. Gerra, D.D.; Iakovleva, E. Sun tracking system for photovoltaic batteries in climatic conditions of the Republic of Cuba. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2019, 643, 012155. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012155>
33. Zhukovskiy, Y.L.; Korolev, N.A.; Babanova, I.S.; Boikov, A.V. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network. *IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci.* 2017, 87, 032056. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032056>
34. Abdi, H.; Williams, L.; Valentin, D. Multiple factor analysis: Principal component analysis for multitable and multiblock data sets. *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.* 2013, 5, 149–179. <http://doi.org/10.1002/wics.1246>
35. Cardot, H.; Degras, D. Online Principal Component Analysis in High Dimension: Which Algorithm to Choose? *Int. Stat. Rev.* 2017, 86, 29–50. <http://doi.org/10.1111/insr.12220>
36. Ma, Z. Sparse principal component analysis and iterative thresholding. *Ann. Stat.* 2013, 41, 772–801. <http://doi.org/10.1214/13-AOS1097>
37. Happ, C.; Greven, S. Multivariate Functional Principal Component Analysis for Data Observed on Different (Dimensional) Domains. *J. Am. Stat. Assoc.* 2018, 113, 649–659. <http://doi.org/10.1080/01621459.2016.1273115>
38. Fan, J.; Liao, Y.; Wang, W. Projected principal component analysis in factor models. *Ann. Stat.* 2016, 44, 219–254. <http://doi.org/10.1214/15-AOS1364>
39. Chiou, J.-M.; Yang, Y.-F.; Chen, Y.-T. Multivariate functional principal component analysis: A normalization approach. *Stat. Sin.* 2014, 24, 1571–1596. <http://doi.org/10.5705/ss.2013.305>
40. Ait-Sahalia, Y.; Xiu, D. Principal Component Analysis of High-Frequency Data. *J. Am. Stat. Assoc.* 2019, 114, 287–303. <http://doi.org/10.1080/01621459.2017.1401542>

41. Yu, J. Local and global principal component analysis for process monitoring. *J. Process. Control.* 2012, 22, 1358–1373. <http://doi.org/10.1016/j.procont.2012.06.008>
42. Lu, C.; Feng, Y.-W.; Fei, C.-W. Weighted Regression-Based Extremum Response Surface Method for Structural Dynamic Fuzzy Reliability Analysis. *Energies* 2019, 12, 1588. <http://doi.org/10.3390/en12091588>
43. Rezk, H.; Hasaneen, E.-S. A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems. *Ain Shams Eng. J.* 2015, 6, 873–881. <http://doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.001>
44. Sofi, A.; Muscolino, G.; Giunta, F. Propagation of uncertain structural properties described by imprecise Probability Density Functions via response surface method. *Probabilistic Eng. Mech.* 2020, 60, 103020. <http://doi.org/10.1016/j.probengmech.2020.103020>
45. Al-Badi, A.H. Measured performance evaluation of a 1.4 kW grid connected desert type PV in Oman. *Energy Sustain. Dev.* 2018, 47, 107–113. <http://doi.org/10.1016/j.esd.2018.09.007>
46. Eke, R.; Demircan, H. Performance analysis of a multi crystalline Si photovoltaic module under Mugla climatic conditions in Turkey. *Energy Convers. Manag.* 2013, 65, 580–586. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.007>
47. Adaramola, M.S.; Vågnes, E.E. Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. *Energy Convers. Manag.* 2015, 90, 458–465. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.028>
48. Sundaram, S.; Babu, J.S.C. Performance evaluation and validation of 5MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India. *Energy Convers. Manag.* 2015, 100, 429–439. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.069>
49. Zang, H.; Guo, M.; Wei, Z.; Sun, G. Determination of the Optimal Tilt Angle of Solar Collectors for Different Climates of China. *Sustainability* 2016, 8, 654. <http://doi.org/10.3390/su8070654>
50. Markos, F.M.; Sentian, J. Potential of Solar Energy in Kota Kinabalu, Sabah: An Estimate Using a Photovoltaic System Model. *J. Phys Conf. Ser.* 2016, 710, 12032. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012032>
51. Shaaban, M.F.; Alarif, A.; Mokhtar, M.; Tariq, U.; Osman, A.H.; Al-Ali, A.R. A New Data-Based Dust Estimation Unit for PV Panels. *Energies* 2020, 13, 3601. <http://doi.org/10.3390/en13143601>
52. Ruiz-Arias, J.A.; Gueymard, C.A. Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface. *Sol. Energy* 2018, 168, 10–29. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.008>