

Научная статья

УДК 621.311.25

EDN: HNSEUI

DOI: 10.21285/1814-3520-2023-4-737-748

ЭНЕРГЕТИКА



Исследование работы солнечной электростанции с двухосевым солнечным трекером

С.В. Митрофанов^{1✉}, Д.К. Байкаменов²^{1,2}Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

Резюме. Цель – оценка выработки электрической энергии солнечной электростанцией, оснащенной системой слежения за Солнцем с помощью метода расчета солнечной инсоляции ASHRAE (чистого неба). Математический алгоритм реализован с помощью системы MathCad с выгрузкой и анализом данных в Microsoft Excel. Для достижения цели использовались данные о выработке электроэнергии за месяц и период эксплуатации в течение 2022–2023 гг. солнечными станциями с оптимальным неизменяющимся углом наклона солнечной панели и с системой слежения за Солнцем. Приведенный алгоритм расчета выработанной электроэнергии солнечной станцией, с учетом изменяющейся температуры окружающего воздуха, запыленности и пропускания солнечного света покрытием солнечной фотоэлектрической панели, позволил спрогнозировать выработку электроэнергии со средней абсолютной ошибкой от 0,22 до 9,8. С помощью специализированного программного обеспечения MathCad разработана математическая модель для определения солнечной инсоляции для произвольного дня и географических координат местности, на которой предполагается строительство солнечной электростанции. Приведенные экспериментальные и расчетные исследования для выбранных ясных дней, с учетом погодных условий, показали адекватность рассматриваемого метода и возможность его использования для прогнозирования выработки электроэнергии с различными углами наклона солнечной фотоэлектрической панели. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что солнечная станция с системой слежения за Солнцем выработала за год на 37% больше электроэнергии, чем станция с неподвижными солнечными панелями. Метод расчета солнечной инсоляции ASHRAE (чистого неба) позволяет оценить объем выработанной электроэнергии для произвольного региона с минимальными входными данными. В дальнейшем будет проведена работа по поиску и совершенствованию методов для прогнозирования выработки электроэнергии солнечной электростанцией в пасмурные дни.

Ключевые слова: инсоляция, солнечная электростанция, угол наклона, фотоэлектрическая панель, система слежения

Для цитирования: Митрофанов С.В., Байкаменов Д.К. Исследование работы солнечной электростанции с двухосевым солнечным трекером // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 4. С. 737–748. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-737-748>. EDN: HNSEUI.

POWER ENGINEERING

Original article

Operation of a solar power plant with dual-axis solar tracker

Sergey V. Mitrofanov^{1✉}, Damir K. Baykasenov²^{1,2}Orenburg State University, Orenburg, Russia

Abstract. The paper evaluates the generation of electrical energy by a solar power plant equipped with a solar tracking system using the ASHRAE clear-sky method for calculating solar insolation. The mathematical algorithm uses the MathCad system with data export and analysis in Microsoft Excel. Collected over a month and the operation period in 2022–2023, data on electricity generation by solar stations characterised by an optimal constant angle of inclination of the solar panel and equipped with a solar tracking system were used. By taking into account the varying ambient temperature, dust content, and solar transmission by the solar panel coating, the given algorithm allowed electricity generation by a solar panel to be forecasted with an average absolute error ranging from 0.22 to 9.8. To determine solar insolation for a specific day and the geographical coordinates of the intended construction site of a solar power plant, a mathematical model was developed using MathCad software. The experimental and computational studies carried out on selected clear days,

© Митрофанов С.В., Байкаменов Д.К., 2023

accounting for varying weather conditions, demonstrated the adequacy of this method and its applicability for forecasting electricity generation with different inclination angles of a solar panel. It was established that a solar power plant with a solar tracking system generated 37% more electricity per year than that with fixed solar panels. The ASHRAE Clear-Sky method for calculating solar insolation allows the amount of electricity generated for a specific region to be estimated with minimal input data. Further research will focus on defining and improving methods for forecasting electricity generation by a solar power plant on overcast days.

Keywords: insolation, solar power plant, tilt angle, photovoltaic panel, tracking system

For citation: Mitrofanov S.V., Baykasenov D.K. Operation of a solar power plant with dual-axis solar tracker. *iPolytech Journal*. 2023;27(4):737-748. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-4-737-748>. EDN: HNSEUI.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие возобновляемой энергетики (ВЭ) в России и мире позволит не только уменьшить углеродный след, но и обеспечит удаленным потребителям качественное и надежное энергоснабжение. По объему выработки солнечными электростанциями (СЭС) и ветроэлектростанциями (ВЭС) в общей выработке электроэнергии Россия занимает одно из последних мест в мире. Доля выработки электроэнергии такими электростанциями в общей доле всей вырабатываемой электроэнергии в России в 2022 г. составила всего 0,5%, но это в три раза больше, чем в 2019 г. По данным статистического ежегодника мировой энергетики³ [1], в 2022 г. доля выработки электроэнергии СЭС и ВЭС в общем объеме вырабатываемой электроэнергии в Португалии составила 34,8%, в Испании – 33,2%, Германии – 32,5%, в Нидерландах – 32,2%, в Великобритании – 29%. В мире наблюдается активный рост количества вновь вводимых в эксплуатацию СЭС. Это обусловлено снижением затрат на производство и установку энергетического оборудования для строительства таких станций. Согласно статистике, за последние десять лет объем строительства СЭС в мире вырос на 35%. За последние пять лет в России было введено в эксплуатацию более 1,5 ГВт СЭС, что в 3,5 раза больше всей ранее установленной мощности. Общая установленная мощность всех СЭС на 2022 г. составила 1,93 ГВт. По данным Всемирной ветроэнергетической ассоциации (WWEA), в 2022 г. произошло увеличение мощности ВЭС более чем на 88,6 ГВт. На сегодняшний день в мире общая мощность установленных ВЭС составляет более 934 ГВт. Страны, занимающие лидирующие позиции в выработке электроэнергии с помощью ВЭС и СЭС, – Испания, Португалия, Германия, Великобритания, Новая Зеландия, Нидерланды, Чили, Австралия, Италия, Бельгия, Швеция и

Турция. В России за последние четыре года произошло активное строительство крупных ВЭС, в эксплуатацию было введено около 600 МВт мощностей. Их общая установленная мощность на 2022 г. составила 713 МВт.

Оренбургская область не осталась в стороне от масштабных изменений, происходящих в ВЭ России. Начиная с 2017 г., в эксплуатацию было введено более 330 МВт мощностей СЭС, что составило около 20% всех СЭС в России. Это такие СЭС, как Сорочинская СЭС (СЭС Уран), Новосергиевская СЭС, СЭС «Нептун», Орская СЭС им. А.А. Влазнева, Чкаловская СЭС, Светлинская СЭС, Соль-Илецкая СЭС, Елшанская СЭС, Домбаровская СЭС, СЭС «Нептун-2», Грачевская СЭС, Плешановская СЭС, Григорьевская СЭС, Переволоцкая СЭС. На сегодняшний день в Оренбургской области действуют четыре ВЭС сравнительно небольшой мощности: Тамар-Уткульская (2,725 МВт), Орская (650 кВт), «Вишневые горки» (400 кВт) и «Самородово» (200 кВт). Ведутся работы по проектированию новых ВЭС и определяются места их расположения. Перспективным является размещение новых ВЭС в предгорьях Южного Урала (г. Кувандык, г. Медногорск, ст. Сара) и восточном Оренбуржье (г. Орск).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для дальнейшего развития ВЭ в России необходимо идти по пути повышения энергетической эффективности построенных или вновь проектируемых СЭС и ВЭС. Такой подход позволит уменьшить сроки окупаемости и увеличить инвестиции в проекты ВЭ. Основными направлениями повышения надежности, экономичности и энергоэффективности являются:

- продолжение политики поддержки государством производителей оборудования для строительства объектов ВЭ;
- развитие строительства заводов по выпуску комплектующих для объектов ВЭ для

³Статистический справочник мировой энергетики [Электронный ресурс]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru> (23.04.2023).

100% локализации производства на территории России;

- снижение затрат на производство комплектующих и сопутствующих изделий, необходимых для строительства станций ВЭ;
- повышение КПД преобразователей напряжения, установленных на объектах ВЭ;
- повышение энергетической эффективности уже построенных объектов ВЭ.

В данной работе рассмотрено направление, касающееся повышения энергетической эффективности СЭС. Один из способов повышения энергетической эффективности СЭС – это оснащение СЭС поворотными системами, следящими за Солнцем в автоматическом режиме, в том числе с помощью математических алгоритмов, заложенных в систему управления. Оценивая такой способ, необходимо учитывать и экономичность такой системы, чтобы установленная система не увеличивала срок окупаемости солнечной станции. В данной работе рассмотрен именно такой способ повышения энергетической эффективности работы СЭС.

Выходная мощность фотоэлектрической панели (ФЭП) зависит от погодных условий и времени суток, поскольку солнечное излучение имеет разное значение в течение всего светового дня. Из-за меняющихся погодных условий и внезапного затенения облаками ФЭП считаются нелинейными системами. Система слежения за Солнцем контролирует положение ФЭП и поддерживает ее под углом, обеспечивающим наилучшую выходную мощность. Для эффективного отслеживания Солнца учеными было разработано несколько принципов и способов слежения за Солнцем. В основе разработки систем слежения за Солнцем лежит поворотная платформа, на которой расположена ФЭП [2]. В мире ведутся работы по получению максимально возможной мощности от СЭС в течение всего светового дня. Эти работы развиваются по нескольким направлениям. Первое – разработка следящих систем за Солнцем на основе поиска точки максимальной мощности СЭС. Оно отражено в работах [3–6]. Данный способ основан на поиске максимальной вырабатываемой мощности ФЭП путем сравнения значения вырабатываемой мощности в текущий и предыдущий периоды времени и передачи сигнала от микроконтроллера на поворот ФЭП исполнительным механизмам, поворачи-

вающим платформу с ФЭП под нужным углом к Солнцу. Таким образом, достигается максимально вырабатываемая мощность СЭС. Основная задача – это минимизация числа колебаний следящей системы при поиске точки максимальной мощности. Недостатком такой системы является увеличение потребляемой мощности следящей системы при поиске точки максимальной мощности в момент затенения ФЭП облаками. Второе направление – разработка одно- или двухосевых солнечных трекеров, работающих на основе непосредственного измерения солнечной инсоляции путем отдельных фотоэлементов или фоторезисторов, установленных непосредственно на ФЭП. Это направление разработок отражено в работах [7–12]. Принцип работы сформирован на получении и обработке информации, получаемой с фотоэлементов или фоторезисторов. По полученным сведениям, осуществляется ориентация ФЭП на Солнце. В данной работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования СЭС с двухосевой системой слежения за Солнцем, построенной на основе фоторезисторов.

Проектирование устройств слежения за Солнцем для увеличения электрической энергии, вырабатываемой СЭС, является актуальной задачей. При этом самыми эффективными системами слежения за Солнцем являются системы с дублированием. Они имеют возможность измерения солнечной инсоляции и встроенный математический алгоритм для корректировки угла наклона ФЭП в момент затенения ее облаками. Для использования математического аппарата в системах проектирования СЭС с трекерами требуются разработка имитационных моделей и проведение экспериментальных исследований на физических моделях. Имитационные модели позволят не только разработать эффективные алгоритмы управления системой слежения за Солнцем путем вычисления оптимального угла наклона ФЭП, но и получить предварительные данные о вырабатываемой электроэнергии и сроках окупаемости. Целью исследования является обоснование применения расчетного математического метода для прогнозирования объема вырабатываемой энергии СЭС с одно- или двухосевой системой слежения за Солнцем.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из исходных параметров для расчетов является солнечная инсоляция, получаемая ФЭП в течение всего светового дня с учетом входящих в нее составляющих. Вырабатываемая мощность ФЭП, согласно [13], определяется по формуле:

$$P = N \cdot f \cdot P_n \frac{G_\beta}{G_n} [1 - \sigma (T - T_{25^\circ\text{C}})], \quad (1)$$

где N – число фотоэлектрических панелей в СМ; f – коэффициент, описывающий снижение выходной мощности ФЭП из-за деградации и загрязнения (принимается равным 0,9 согласно [13]), о.е.; P_n – номинальная мощность одной ФЭП, Вт; G_β – фактическая солнечная инсоляция в месте установки СЭС, Вт·ч/м²; G_n – номинальная солнечная инсоляция, принимаемая за 1 кВт·ч/м²; σ – температурный коэффициент (по данным завода-изготовителя ФЭП), %/°С; T – рабочая температура поверхности ячейки ФЭП, °С; $T_{25^\circ\text{C}}$ – стандартная температура ФЭП, обычно принимаемая равной 25°С [14].

Рабочая температура поверхности ячейки ФЭП может быть найдена, согласно [15], по формуле:

$$T = T_a + \frac{G_\beta}{800} (T_n - T_{20^\circ\text{C}}) \left(1 - \frac{\eta}{\tau}\right), \quad (2)$$

где T_a – температура окружающей среды, °С; T_n – номинальная рабочая температура ФЭП (по данным завода-изготовителя), °С; $T_{20^\circ\text{C}}$ – температура окружающей среды, при которой определяется номинальная рабочая температура, принимается согласно [15] равной 20°С; η – коэффициент полезного действия ФЭП (по данным завода-изготовителя) в о.е.; τ – коэффициент пропускания солнечного света покрытием над ФЭП (согласно [16] принимается равным 0,9).

Рассмотрим произвольное положение ФЭП в пространстве, изображенное на рис. 1. Ориентация ФЭП выполняется по двум осям – по углу наклона к горизонтальной поверхности β и по азимутальному углу γ относительно перпендикуляра к поверхности ФЭП (на рис. 1 – вектора PV). Угол θ – угол между падающими лучами Солнца и вектором-перпендикуляром PV к поверхности ФЭП (угол падения). При правильной ориентации ФЭП на Солнце угол наклона ФЭП β будет равен зенитному углу θ_z ,

а азимутальный угол γ будет равен солнечному азимутальному углу γ_s . Углы θ_z , γ_s можно определить по методике, изложенной в [25] для произвольного номера дня в году i и времени суток t_k .

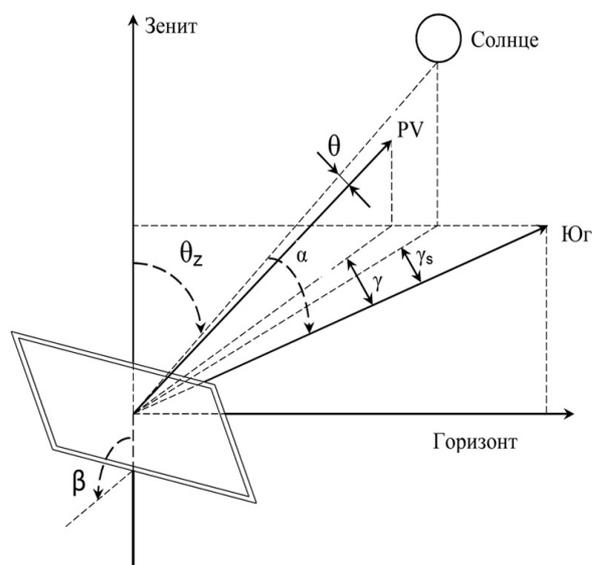


Рис. 1. Схематическое расположение фотоэлектрической панели в пространстве
Fig. 1. Schematic arrangement of the photovoltaic panel in space

Фактическая солнечная инсоляция G_β в формулах (1) и (2) изменяется в зависимости от положения Солнца на небе, времени суток, погодных условий, географического региона [10, 17, 18].

При проектировании, внедрении и установке систем слежения за Солнцем необходимо учитывать несколько параметров солнечной энергии для прогнозирования вырабатываемой электроэнергии. Лучи внеземного солнечного излучения проникают через атмосферу Земли и поглощаются молекулами воздуха, некоторые из них рассеиваются. Установлено, что в день ясного неба около 70% глобальной солнечной радиации приходится на прямое солнечное излучение [18]. Ослабление солнечного луча из-за пыли, загрязнения воздуха, водяного пара, облаков и мутности можно смоделировать. Было предпринято много попыток смоделировать это затухание в зависимости от номера дня. Одной из таких моделей является модель ASHRAE (чистого неба), используемая в работах [19, 20], предложенная Б.Ю.Х. Лю и Р.К. Джордан [21, 22] и частично примененная в [23, 24]. Метод чистого неба

²Безруких П.П., Безруких П.П. (мл.), Грибков С.В. Ветроэнергетика: справ.-метод. издание / под общ. ред. П.П. Безруких. М.: ИнтехэнергоИздат; Теплоэнергетик, 2014. 304 с.

является простым и надежным методом для математической реализации, требует минимального объема исходных данных. Он подходит для прогнозирования выработки электроэнергии СЭС в ясные дни.

Фактическая солнечная инсоляция G_{β} , для произвольного номера дня в году i и произвольного времени суток t_k светового дня, падающая на наклонную поверхность, может быть найдена по формуле [19]:

$$G_{\beta(i,k)} = G_{b(i,k)} R_{b(i,k)} f(\theta) + G_{d(i,k)} R_{d(i,k)} + G_{r(i,k)} R_{r(i,k)}, \quad (3)$$

где $G_{b(i,k)}$ – прямое солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность ФЭП, Вт·ч/м²; $G_{d(i,k)}$ – рассеянное солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность ФЭП, Вт·ч/м²; $G_{r(i,k)}$ – отраженное солнечное излучение, Вт·ч/м²; $R_{b(i,k)}$ – отношение прямого солнечного излучения на наклонной поверхности к прямому солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП; $R_{d(i,k)}$ – отношение рассеянного солнечного излучения на наклонной поверхности к рассеянному солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП; $R_{r(i,k)}$ – коэффициент отраженной солнечной энергии на наклонную поверхность ФЭП; $f(\theta)$ – управляющая функция, принимает значение 1, если $\cos(\theta) \geq 0$ или 0, в противном случае это означает, что прямое солнечное излучение на поверхность ФЭП не попадает в данный момент времени.

Индексы в формуле (3) представлены для удобства представления зависимости величин, участвующих в расчетах, от номера дня в году i и времени суток t_k .

Прямое солнечное излучение, падающее на горизонтальную поверхность, определяется [19] как

$$G_{b(i,k)} = G_{bn(i,k)} \sin(\alpha_{(i,k)}), \quad (4)$$

где $G_{bn(i,k)}$ – прямое солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, Вт·ч/м²; $\alpha_{(i,k)}$ – угол солнечной высоты, т.е. угол между горизонтальной поверхностью Земли и линией, направленной к Солнцу.

Согласно рассматриваемой модели ASHRAE [19], прямое солнечное излучение, достигающее поверхности Земли, может быть выражено как

$$G_{bn(i,k)} = A_i e^{\left(\frac{-K_i}{\sin(\alpha_{(i,k)})}\right)}, \quad (5)$$

где A_i – видимый внеземной поток солнечного излучения, Вт·ч/м²; K_i – оптическая глубина, о.е.

Видимый внеземной поток солнечного излучения может быть определен как

$$A_i = 1160 + \left[75 \sin\left(\frac{360}{365}(i - 275)\right) \right], \quad (6)$$

Оптическая глубина:

$$K_i = 0,174 + \left[0,035 \sin\left(\frac{360}{365}(i - 100)\right) \right], \quad (7)$$

Угол солнечной высоты находится, согласно [25], по формуле:

$$\alpha_{(i,k)} = \arcsin(\sin(\delta_i) \sin(\varphi) + \cos(\delta_i) \cos(\varphi) \cos(\omega_{(i,k)})), \quad (8)$$

где δ_i – склонение Солнца, в зависимости от номера дня i , рад; φ – широта местности, рад; $\omega_{(i,k)}$ – часовой угол, в зависимости от номера дня i и времени суток t_k , рад.

Величины δ_i , $\omega_{(i,k)}$, входящие в формулу (8), могут быть определены по известным формулам для произвольного дня и времени суток по [25].

Расчет рассеянного излучения, падающего на горизонтальную поверхность ФЭП, является более сложным по сравнению с расчетом прямого солнечного излучения. Получаемое ФЭП солнечное излучение может рассеиваться от атмосферных частиц и водяного пара, а также отражаться облаками. Некоторое излучение отражается от поверхности в небо и снова рассеивается обратно на Землю. Простейшие модели рассеянного излучения предполагают, что оно поступает на объект с одинаковой интенсивностью со всех направлений, то есть небо считается изотропным. Рассеянное солнечное излучение, согласно [19], можно записать как

$$G_{d(i,k)} = 0,095 + \left[0,04 \sin\left(\frac{360}{365}(i - 100)\right) \right] G_{bn(i,k)}. \quad (9)$$

Отраженное от поверхности Земли солнечное излучение на наклонную поверхность ФЭП можно определить как

$$G_{r(i,k)} = \rho (G_{b(i,k)} + G_{d(i,k)}), \quad (10)$$

где ρ – альbedo земной поверхности, в данном исследовании принимаем среднее значение 0,3 [19].

Отношение прямого солнечного излучения на наклонной поверхности к прямому солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП, согласно [19, 20]:

$$R_{b(i,k)} = \frac{\cos(\varphi - \beta_{i,k}) \cos(\delta_i) \sin(\omega_{s(i)}) + \omega_{s(i)} \sin(\varphi - \beta_{i,k}) \sin(\delta_i)}{\cos(\varphi) \cos(\delta_i) \sin(\omega_{s(i)}) + \omega_{s(i)} \sin(\varphi) \sin(\delta_i)} \quad (11)$$

где $\beta_{i,k}$ – угол наклона ФЭП в произвольный момент времени; $\omega_{s(i)}$ – часовой угол захода Солнца для произвольного дня, определяется по [25].

Отношение рассеянного солнечного излучения на наклонной поверхности к рассеянному солнечному излучению на горизонтальной поверхности ФЭП, согласно [19]:

$$R_{d(i,k)} = \frac{1 + \cos(\beta_{i,k})}{2}. \quad (12)$$

Коэффициент отраженной солнечной энергии на наклонной поверхности ФЭП, согласно [19]:

$$R_{r(i,k)} = \frac{1 - \cos(\beta_{i,k})}{2}. \quad (13)$$

В общем случае угол между вектором PV и лучами Солнца может быть найден, согласно [10, 18, 25], как

$$\theta_{(i,k)} = \cos(\theta_{z(i,k)}) \cos(\beta_{(i,k)}) + \sin(\theta_{z(i,k)}) \sin(\beta_{(i,k)}) \cos(\gamma_{s(i,k)} - \gamma_{(i,k)}). \quad (14)$$

В случае правильной ориентации на Солнце угол наклона ФЭП $\beta_{(i,k)} = \theta_{z(i,k)}$, а азимутальный угол ФЭП $\gamma_{s(i,k)} = \gamma_{(i,k)}$, тогда угол θ будет равен 0. Все остальные случаи расположения ФЭП в пространстве станут считаться общими и могут быть учтены в расчетных формулах, приведенных выше.

В Оренбургском государственном университете ведутся работы по направлению развития систем слежения за Солнцем и их адаптации к реальным климатическим условиям. На крыше одного из учебных корпусов университета расположена учебно-научная СЭС общей мощностью 800 Вт. Она была запущена в опытную эксплуатацию в фев-

рале 2022 г. с новой (по сравнению с действующей ранее) автоматизированной системой мониторинга, рассмотренной в [8]. СЭС состоит из двух автономных частей. Две ФЭП общей мощностью 400 Вт расположены на подвижной платформе с возможностью слежения за Солнцем, а две другие ФЭП, идентичные первым, расположены неподвижно под оптимальным углом 52° (угол наклона ФЭП равен углу широты местности, в которой установлена СЭС). Этот угол был выбран на основании математических исследований, представленных в [26], для исследуемого региона. Платформа, на которой расположены ФЭП, перемещаются с помощью двух линейных актуаторов, запитанных от сети переменного тока через источник постоянного тока. С целью экономии электроэнергии поворот платформы по зенитному углу выполняется один раз в час, а по углу склонения – один раз в три часа.

На рис. 2 показан общий вид экспериментальной СЭС и электрический щит подключения ее к системе внутреннего электроснабжения учебного корпуса. Подключение СЭС выполнено через сетевые инверторы, которые имеют возможность мониторинга и архивации данных с интервалом в одну минуту. В месте установки СЭС установлена метеостанция, которая ведет измерение и архивацию показаний солнечной инсоляции, температуры воздуха, влажности воздуха, атмосферного давления, скорости ветра и других метеорологических параметров с интервалом в одну минуту. На рис. 3 показана принципиальная схема сетевой фотоэлектрической станции с системой слежения за Солнцем.



Рис. 2. Экспериментальная учебно-научная солнечная электростанция
Fig. 2. Experimental training and scientific solar power plant

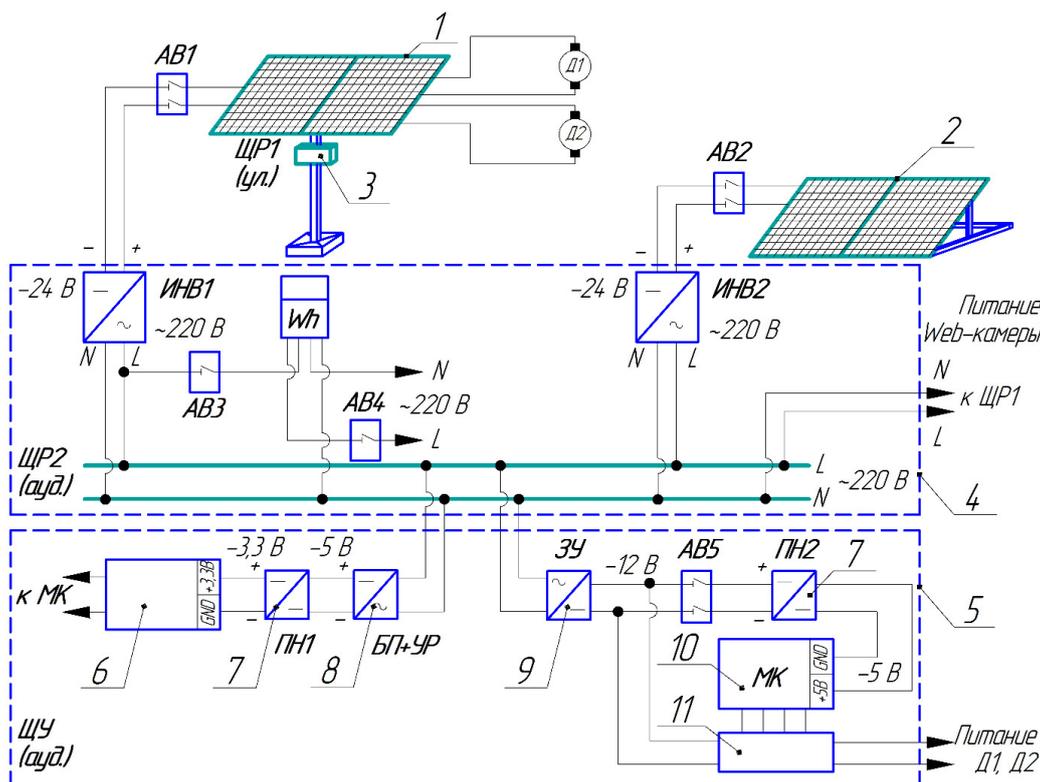


Рис. 3. Принципиальная схема сетевой фотоэлектрической станции с системой слежения за Солнцем (1 – фотоэлектрические панели с системой слежения за Солнцем (400 Вт); 2 – стационарные фотоэлектрические панели (400 Вт); 3 – распределительный щит № 1, установленный на мачте фотоэлектрической панели с системой слежения (на крыше здания); 4 – лабораторный распределительный щит № 2 с силовым оборудованием фотоэлектрической панели; 5 – лабораторный щит системы управления; 6 – WiFi модуль; 7 – преобразователь напряжения; 8 – блок питания и умная WiFi розетка; 9 – зарядное устройство; 10 – микроконтроллер; 11 – драйвер двигателей постоянного тока)
Fig. 3. Schematic diagram of a grid-connected photovoltaic power plant with a solar tracking system (1 – photovoltaic panels with a solar tracking system (400 W); 2 – stationary photovoltaic panels (400 W); 3 – distribution board no.1 installed on the mast of the photovoltaic panel with the tracking system (on the roof of the building); 4 – laboratory distribution board no.2 with photovoltaic panel power equipment; 5 – laboratory board of the control system; 6 – Wi-Fi module; 7 – voltage converter; 8 – power supply and a smart Wi-Fi socket; 9 – charger; 10 – microcontroller; 11 – DC motor driver)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки адекватности представленной математической модели и применимости ее к рассматриваемой местности (г. Оренбург) были выполнены расчетные и экспериментальные исследования.

Начиная с февраля 2022 г., ведется сбор информации с построенной учебно-научной солнечной станции и установленной метеостанции. На рис. 4 показана диаграмма выработки электроэнергии за апрель 2023 г. Из рис. 4 видно, что солнечная станция с системой слежения за Солнцем произвела на 40% больше электроэнергии, чем станция, имеющая стационарные ФЭП. Выработанная электроэнергия СЭС с системой слежения за Солнцем показана за вычетом потребления линейных актуаторов.

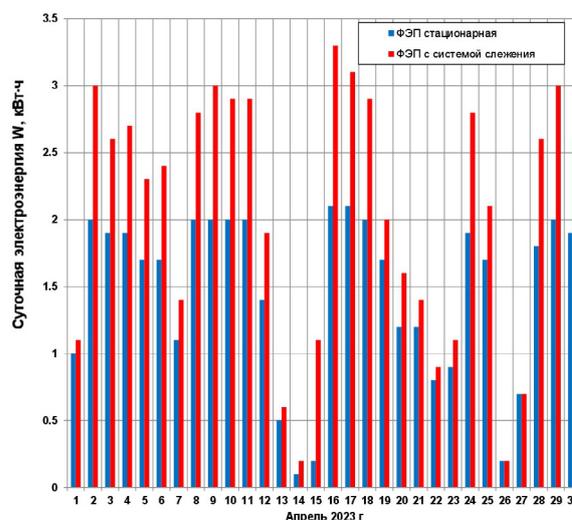


Рис. 4. Электрическая энергия, полученная учебно-научной солнечной электростанцией за апрель 2023 г.
Fig. 4. Electrical energy produced by the training and scientific solar power plant in April 2023

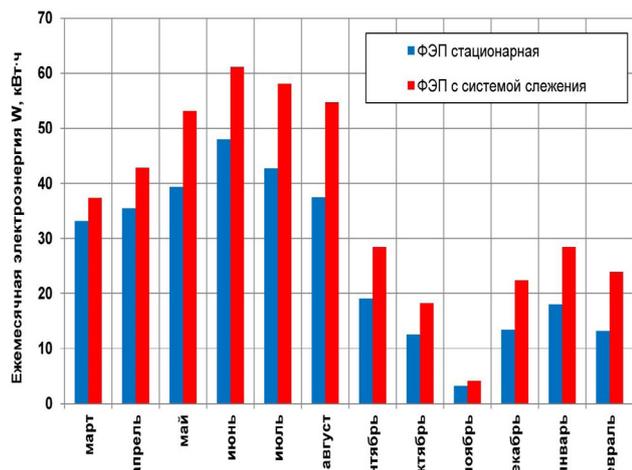


Рис. 5. Электрическая энергия, полученная учебно-научной солнечной электростанцией в течение марта 2022 – февраля 2023 г.

Fig. 5. Electrical energy produced by the training and scientific solar power plant for the period from March 2022 to February 2023

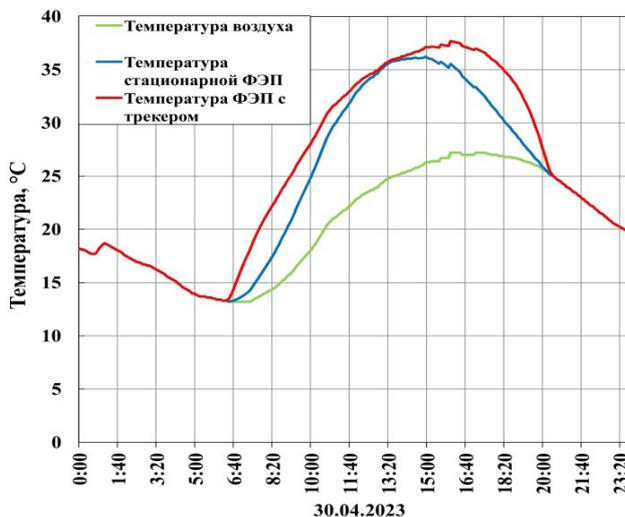
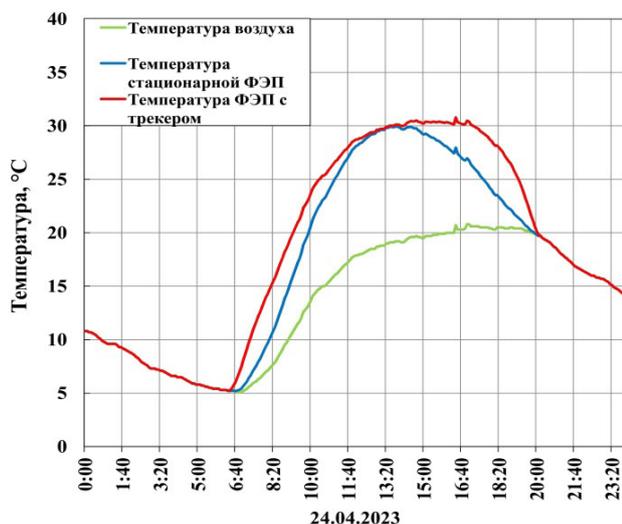
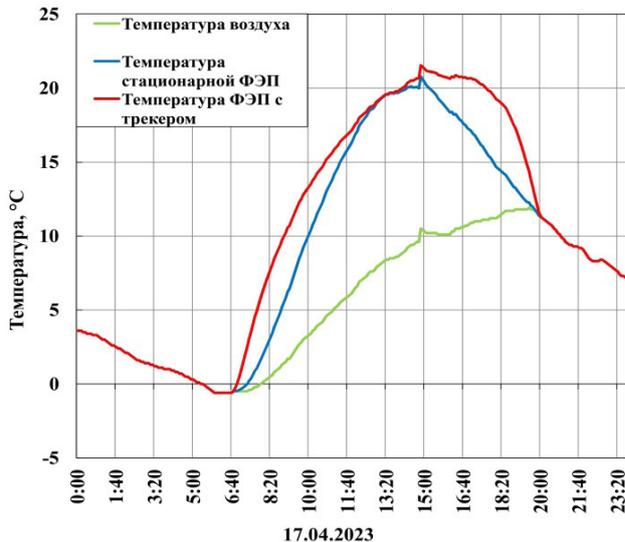
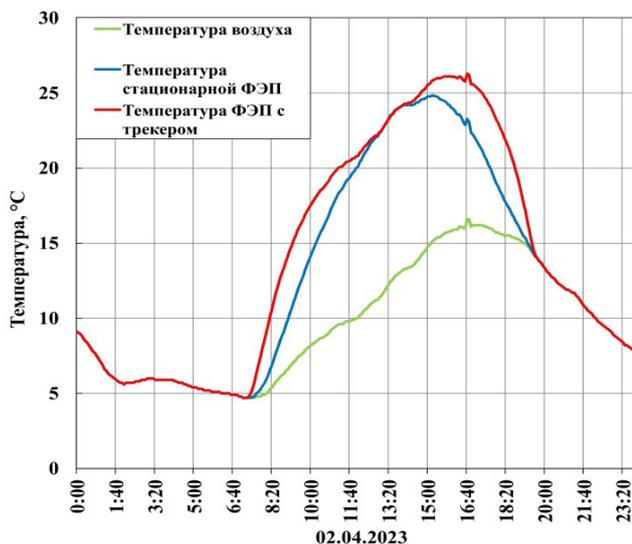


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные данные о температуре окружающего воздуха и поверхности фотоэлектрических панелей в рассматриваемые дни
Fig. 6. Calculated and experimental data on the temperature of the ambient air and the photovoltaic panel surface on the days under consideration

На рис. 5 показана диаграмма выработки электроэнергии в период, начиная с марта 2022 по февраль 2023 г. Годовой прирост вырабатываемой электроэнергии за счет установленной системы слежения составил в среднем 37%. Выполнив анализ выработки электроэнергии в течение всего года, можно сделать вывод о том, что максимальный прирост отмечен в апреле, так как среднесуточные температуры окружающей среды еще относительно невысоки.

Для проверки адекватности представленной математической модели в результате изучения погодных условий и полученных данных выбраны ясные солнечные дни в апреле 2023 г. Такими датами являются 02.04.2023 г., 17.04.2023 г., 24.04.2023 г. и 30.04.2023 г. Расчеты вырабатываемой мощности учебно-научной СЭС выполнялись по формулам (1)–(14) для подвижной и неподвижной ФЭП с учетом тем-

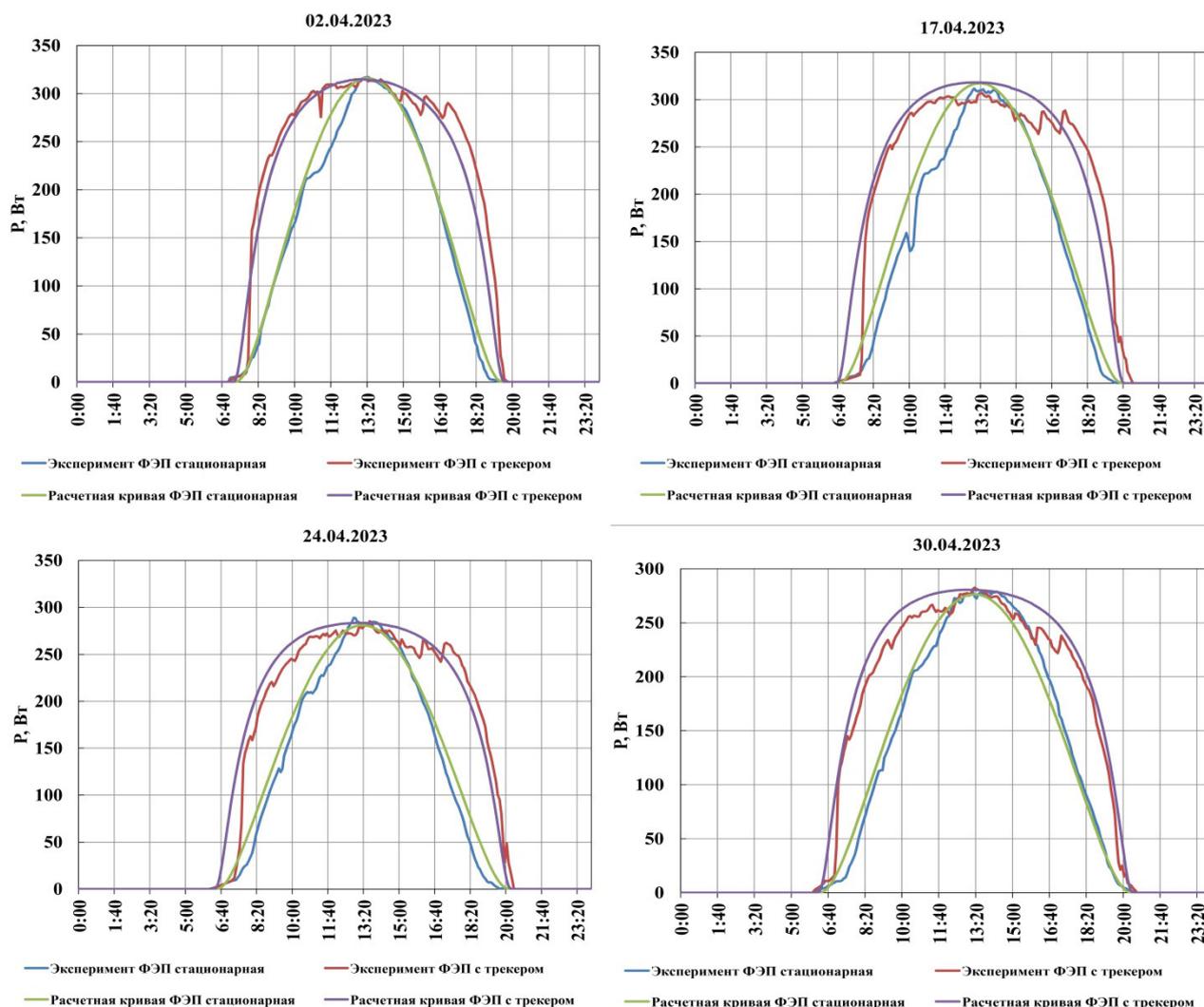


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные кривые, полученные с помощью математической и физической моделей солнечной электростанции

Fig. 7. Calculated and experimental curves obtained using mathematical and physical models of a solar power plant

температуры их поверхности. Температуры окружающей среды и поверхностей исследуемых ФЭП представлены на рис. 6. Из рис. 7 видно, что температура поверхностей исследуемых ФЭП разная в течение практически всего светового дня, за исключением времени солнцестояния. В представленной математической модели учтен этот факт, что позволило снизить погрешность расчета.

На рис. 7 показаны расчетные и экспериментальные зависимости вырабатываемой

мощности от времени суток в рассматриваемые дни.

В таблице приведены результаты расчета средней абсолютной ошибки (MAE) для рассматриваемых дней.

Хорошая точность приведенной методики расчета позволяет спрогнозировать выработку электроэнергии солнечными электростанциями и принять решение об их строительстве на местности с привязкой к конкретным географическим координатам.

Средняя абсолютная ошибка
Average absolute error

Дата	Стационарная ФЭП	ФЭП с трекером
02.04.2023 г.	4,01	5,07
17.04.2023 г.	9,8	4,96
24.04.2023 г.	6,56	4,74
30.04.2023 г.	0,22	9,23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования выполнены с помощью экспериментальной учебно-научной солнечной станции, которая имеет систему непрерывного мониторинга и систему слежения за Солнцем. Станция позволила проверить адекватность метода расчета солнечной инсоляции ASHRAE (чистого неба) с учетом реальной температуры подвижной и неподвижной ФЭП. В работе показано, что метод расчета солнечной инсоляции подходит для предварительной оценки объема выработанной солнечными панелями электроэнергии, находящимися под произвольным углом относительно горизонтальной поверхности Земли и азимута. Этот метод хорошо работает в ясные солнечные дни. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают адекватность представленной математической модели,

которую можно использовать для оценки потенциала солнечной энергии для всей территории России в ясные солнечные дни. Для территорий, находящихся за Полярным кругом, при расчетах следует учитывать полярный день и полярную ночь.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что солнечная станция, оснащенная системой слежения за Солнцем, вырабатывает за год на 37% электроэнергии больше, чем станция, солнечные панели которой расположены под оптимальным неизменяющимся углом. Применение подобных систем слежения за Солнцем оправданы несмотря на капитальные и эксплуатационные затраты. В работе показано, что разработка экономичных и надежных систем слежения за Солнцем является актуальной задачей на сегодняшний день.

Список источников

1. Безруких П.П. Тенденции развития электроэнергетики мира в XXI веке // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2022. № 3. С. 43–52. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-3-43-52>. EDN: RSVNKW.
2. Обухов С.Г., Плотников И.А. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 95–106. <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2109>. EDN YNVYDZ.
3. Aguila-Leon J., Vargas-Salgado C., Chiñas-Palacios C.D., Díaz-Bello D. Solar photovoltaic maximum power point tracking controller optimization using grey wolf optimizer: a performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms // Expert Systems With Applications. 2023. Vol. 211. Iss. 5. P. 118700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118700>.
4. Hanzaei S.H., Gorji S.A., Ektesabi M. A scheme-based Review of MPPT techniques with respect to input variables including solar irradiance and pv arrays' temperature // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 182229–182239. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028580>.
5. Dhawan A., Malik O.P., Kumar R. Solar tracker implementation using MATLAB/SIMULINK // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2018. Vol. 5. Iss. 5. P. 178–189.
6. Мухамбедьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полюга Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1099–1107. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107>.
7. AL-Rousan N., Isa N.A.M., Desa M.K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. Vol. 82. Iss. 1. P. 2548–2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>.
8. Митрофанов С.В., Немальцев А.Ю., Байкасанов Д.К. Первичная апробация автоматизированного двухкоординатного солнечного трекера в климатических условиях Оренбургской области как перспектива создания программно-аппаратного комплекса // Альтернативная энергетика и экология. 2018. № 7-9. С. 43–54. <https://doi.org/10.15518/isaee.2018.07-09.043-054>.
9. Hafez A.Z., Yousef A.M., Harag N.M. Solar tracking systems: technologies and trackers drive types – a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 754–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>.
10. Batayneh W., Bataineh A., Soliman I., Hafees S.A. Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuations and maximum energy collection // Automation in Construction. 2019. Vol. 98. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.011>.
11. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa // Applied Energy. 2016. Vol. 177. P. 896–906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.103>.
12. De Sá Campos M.H., Tiba C. npTrack: a n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 4. P. 925. <https://doi.org/10.3390/en14040925>.
13. Fodhil F., Hamidat A., Nadjemi O. Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria // Energy. 2019. Vol. 169. P. 613–624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.049>.
14. Abdelshafy A.M., Hassan H., Jurasz J. Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 173. P. 331–347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.083>.
15. Brandoni C., Renzi M. Optimal sizing of hybrid solar micro-CHP systems for the household sector // Applied Thermal

- Engineering. 2015. Vol. 75. P. 896–907. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.023>.
16. Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance // *Renewable Energy*. 2006. Vol. 31. Iss. 4. P. 553–567. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010>.
17. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 113. P. 563–579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.
18. Bakhshi-Jafarabadi R., Sadeh J. A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid-connected photovoltaic systems // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 94. P. 524–536. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.091>.
19. Khatib T., Deria R. East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 266. Iss. 15. P. 115810. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115810>.
20. Yadav A.K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. P. 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>.
21. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator // *ASHRAE Transactions*. 1962, Vol. 67. P. 526–541.
22. Liu B.Y.H., Jordan R.C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors // *Solar Energy*. 1963. Vol. 7. Iss. 2. P. 53–74. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(63\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0038-092x(63)90006-9).
23. Обухов С.Г., Плотников И.А. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России // *Альтернативная энергетика и экология*. 2017. № 16-18. С. 43–56. <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056>. EDN: ZEJFDD.
24. Коновалов Ю.В., Хазиев А.Н. Расчет инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом геолокационных и погодных параметров // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 3. С. 439–450. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>. EDN: CQEYQC.
25. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar engineering of thermal processes*. Madison, Wisconsin: John Wiley & Sons, 2013. P. 770–781.
26. Митрофанов С.В. Выбор оптимального угла наклона солнечных панелей для размещения их в произвольном регионе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2023. Т. 23. № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.14529/power230101>. EDN: ZDAYFE.

References

1. Bezrukih P.P. Development trends of the global electric power industry in the 21st century. *Vestnik Moskovskogo ehnergeticheskogo institute = Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*. 2022;3:43-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-3-43-52>. EDN: RSVNKKW.
2. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Choosing the parameters and analyzing the efficiency of solar tracking systems. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018;329(10):95-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/10/2109>. EDN DAVIDS.
3. Aguila-Leon J., Vargas-Salgado C., Chiñas-Palacios C.D., Díaz-Bello D. Solar photovoltaic maximum power point tracking controller optimization using grey wolf optimizer: a performance comparison between bio-inspired and traditional algorithms. *Expert Systems with Applications*. 2023;211(5):118700. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118700>.
4. Hanzaei S.H., Gorji S.A., Ektesabi M. A scheme-based review of MPPT techniques with respect to input variables including solar irradiance and PV arrays' temperature. *IEEE Access*. 2020;8:182229-182239. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028580>.
5. Dhawan A., Malik O.P., Kumar R. Solar tracker implementation using MATLAB/SIMULINK. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2018;5(5):178-189.
6. Mukhambdyarov B.B., Lukichev D.V., Polyuga N.L. Study of maximum power point tracking algorithms for efficiency growth of photovoltaic cells. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Bulletin of information Technologies, Mechanics and Optics*. 2018;18(6):1099-1107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107>.
7. AL-Rousan N., Isa N.A.M., Desa M.K.M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018;82(1):2548-2569. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.077>.
8. Mitrofanov S.V., Nematsev A.U., Baykasenov D.K. Primary testing of automated dual-axis solar tracker in the climatic conditions of the Orenburg region as the prospects for the establishment of a hardware-software complex. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*. 2018;(7-9):43-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2018.07-09.043-054>.
9. Hafez A.Z., Yousef A.M., Harag N.M. Solar tracking systems: technologies and trackers drive types – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;91:754-782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.094>.
10. Batayneh W., Bataineh A., Soliman I., Hafees S.A. Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuators and maximum energy collection. *Automation in Construction*. 2019;98:102-109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.011>.
11. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. The effect of latitude on the performance of different solar trackers in Europe and Africa. *Applied Energy*. 2016;177:896-906. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.103>.
12. De Sá Campos M.H., Tiba C. npTrack: A n-position single axis solar tracker model for optimized energy collection. *Energies*. 2021;14(4):925. <https://doi.org/10.3390/en14040925>.
13. Fodhil F., Hamidat A., Nadjemi O. Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria. *Energy*. 2019;169:613-624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.049>.

14. Abdelshafy A.M., Hassan H., Jurasz J. Optimal design of a grid-connected desalination plant powered by renewable energy resources using a hybrid PSO–GWO approach. *Energy Conversion and Management*. 2018;173:331-347. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.083>.
15. Brandoni C., Renzi M. Optimal sizing of hybrid solar micro-CHP systems for the household sector. *Applied Thermal Engineering*. 2015;75:896-907. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.023>.
16. Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable Energy*. 2006;31(4):553-567. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010>.
17. Bahrami A., Okoye C.O., Atikol U. Technical and economic assessment of fixed, single and dual-axis tracking PV panels in low latitude countries. *Renewable Energy*. 2017;113:563-579. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.095>.
18. Bakhshi-Jafarabadi R., Sadeh J. A comprehensive economic analysis method for selecting the PV array structure in grid-connected photovoltaic systems. *Renewable Energy*. 2016;94:524-536. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.091>.
19. Khatib T., Deria R. East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 266. Iss. 15. P. 115810. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115810>.
20. Yadav A.K., Chandel S.S. Tilt angle optimization to maximize incident solar radiation: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;23:503-513. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.027>.
21. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. *ASHRAE Transactions*. 1962;67:526-541.
22. Liu B.Y.H., Jordan R.C. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. *Solar Energy*. 1963;7(2):53-74. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(63\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0038-092x(63)90006-9).
23. Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Mathematical model of solar radiation incident on an arbitrarily oriented surface for any region in Russia. *Альтернативная энергетика и экология = Alternative Energy and Ecology*. 2017;16-18:43-56. (In Russ.). <https://doi.org/10.15518/isjaee.2017.16-18.043-056>.
24. Konovalov Yu.V., Khaziev A.N. Insolation calculations of a photovoltaic power plant taking into account location-based and weather parameters. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):439-450. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>. EDN: CQEYQC.
25. Duffie J.A., Beckman W.A. *Solar engineering of thermal processes*. Madison, Wisconsin: John Wiley & Sons; 2013, p. 770-781.
26. Mitrofanov S.V. Choosing the optimal angle of inclination of solar panels in an arbitrary region. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika = Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23(1):5-11. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power230101>. EDN: ZDAYFE.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митрофанов Сергей Владимирович,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры электро- и теплоэнергетики,
директор Института энергетике, электроники и связи,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13, Россия
✉ mitser2002@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6640-8434>

Байкашенов Дамир Куандыкович,

аспирант,
Оренбургский государственный университет,
460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13, Россия
baykasenov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8810-4335>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.08.2023 г.;
одобрена после рецензирования 10.10.2023 г.;
принята к публикации 15.10.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Mitrofanov,

Cand. Sci (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of
Electrical and Thermal Power Engineering,
Director of the Institute of Energy,
Electronics and Communications,
Orenburg State University,
13 Pobedy pr., Orenburg 460018, Russia
✉ mitser2002@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6640-8434>

Damir K. Baykasenov,

Postgraduate student,
Orenburg State University,
13 Pobedy pr., Orenburg 460018, Russia
baykasenov@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8810-4335>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 25.08.2023;
approved after reviewing 10.10.2023;
accepted for publication 15.10.2023.