



Научная статья

УДК 621.311.25

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-439-450>

Расчет инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом геолокационных и погодных параметров

Юрий Васильевич Коновалов^{1✉}, Алексей Нурисламович Хазиев²¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия²Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия¹yrvaskon@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2557-8477²uxaziewaaa@gmail.com

Резюме. Цель – разработать методику расчета инсоляции солнечной фотоэлектрической электростанции с учетом максимального количества значимых входных параметров и ее территориальной адаптации. При решении поставленной задачи применялось имитационное моделирование, реализованное средствами MATLAB. Используются функциональные возможности по синтезу моделей из имеющихся элементов с интеграцией алгоритмов и результатов моделирования между блоками подсистемы Simulink. В качестве значимых входных параметров рассматривались географические координаты, местное время, угол наклона приемной солнечной панели, моделируемый день, коэффициент прозрачности атмосферы, альбедо и азимутальный угол. Разработана компьютерная модель солнечной фотоэлектрической электростанции, позволяющая исследовать работу фотоэлектрических элементов в зависимости от координат их установки, геометрических параметров солнечных панелей, температуры и отражающей способности окружающей среды. При моделировании работы солнечной электростанции визуализируются графические зависимости солнечной инсоляции от угла наклона солнечной панели, от прозрачности атмосферы, от географических координат объекта, от текущего месяца или дня года. Анализ результатов показал, что варьирование угла наклона солнечной панели на 15° модифицирует солнечную инсоляцию на 10–15%, изменение коэффициента прозрачности атмосферы на 20% приводит к изменению уровня инсоляции на 30–50%, суточные суммы инсоляций в течение года для г. Ангарск подвергаются модификации от 1000 до 6500 Вт/м². Представленные результаты исследования регионально адаптированной фотоэлектрической электростанции показали необходимость учета геолокационных и погодных параметров при расчете инсоляции для определения целесообразности ее применения. Предложенная математическая модель расчета солнечной инсоляции для фотоэлектрической электростанции может быть использована при проектировании и оптимизации систем энергоснабжения в комбинации с данными солнечными фотоэлектрическими электростанциями.

Ключевые слова: солнечная электростанция, моделирование, инсоляция, координаты, погодные условия, MATLAB

Для цитирования: 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>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Insolation calculations of a photovoltaic power plant taking into account location-based and weather parameters

Yuri V. Konovalov^{1✉}, Aleksey N. Khaziev²¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia²Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia¹yrvaskon@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2557-8477²uxaziewaaa@gmail.com

Abstract. In this study, we set out to develop a methodology for calculating insolation of a photovoltaic power plant taking into account the maximum number of significant input parameters and its territorial adaptation. To this end, simulation modelling implemented in the MATLAB environment was used. Functional possibilities for the synthesis of models using existing elements with the integration of algorithms and modelling results between the blocks of the Simulink subsystem were used. In terms of significant input parameters, geographical coordinates, local time, tilt of the receiving solar panel, modelled day, atmospheric transparency coefficient, albedo and azimuthal angle were considered. A computer model of a photovoltaic power plant was developed for investigating the operation of photovoltaic cells depending on the coordinates of their installation, geometric parameters of solar panels, as well as the temperature and reflectivity of the environment. The performed modelling of the photovoltaic power plant operation visualised graphic dependences of insolation on the tilt of the solar panel, atmospheric transparency coefficient, geographical coordinates of the object and the current month or day. According to the analysis, 15° variations in the solar panel tilt modifies insolation by 10–15%, while variations in the atmospheric transparency coefficient result in 30–50% variations of insolation. As a result, the daily insolation values for the city of Angarsk throughout a year can be modified by 1000–6500 W/m². The presented results of investigating a regionally adapted photovoltaic power plant demonstrated the need for accounting for location-based and weather parameters during the calculation of insolation for determining the applicability of a plant. The proposed mathematical model for calculating insolation of a photovoltaic power plant can be used for the design and optimization of power supply systems in combination with the specified photovoltaic solar power plants.

Keywords: solar power plant, modeling, insolation, coordinates, weather conditions, MATLAB

For citation: 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>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время такие виды традиционного топлива, как уголь, газ и нефтепродукты, не являются безусловными лидерами в процессе выработки электрической энергии. Традиционные системы электроснабжения, как бы они не развивались технически, уступают место либо полностью возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), либо комбинированным в сочетании с отдельными видами ВИЭ. Рост доли ВИЭ с 24% в 2021 г. достигнет уровня около 50% в 2040 г. Выбор определенного вида ВИЭ выполняется исходя из экономических и технических показателей для заданных условий [1–6]. Поэтому одной из главных проблем гарантированного энергоснабжения является адаптация и интеграция ВИЭ в существующие системы электроснабжения (СЭС). В связи с этим мировая тенденция развития цифровых технологий в совокупности с внедрением альтернативной энергетики ставит задачу развития методов компьютерного моделирования режимов работы существующих СЭС в совокупности с ВИЭ [7–16]. Эта проблема связана с необходимостью учитывать множество входных параметров, имеющих стохастический характер, и при отсутствии детерминированных связей между режимами энергопотребления и приоритетностью использования отдельно-

го вида ВИЭ. По комплексу интегральных показателей наиболее перспективным источником из существующих ВИЭ во многих случаях является солнечная энергетика. Поэтому солнечные фотоэлектрические электростанции (СФЭС) занимают значительную долю в выработке электроэнергии среди электростанций на ВИЭ. В этом случае актуальной задачей становится расчет солнечного излучения, принимаемого панелями СФЭС, являющегося функцией многих переменных, таких как географическое положение, погодные условия, градация изменения уровня инсоляции от варьирования азимутального и относительно земли углов наклона панелей, разного альbedo подстилающей поверхности, влияющего на отражательную способность поверхности. Решение этой задачи путем компьютерного моделирования позволит оценить целесообразность использования СФЭС и ее оптимальную конфигурацию.

МЕТОДЫ

В качестве инструмента моделирования выбрана подпрограмма Simulink, которая позволяет реализовать функциональные возможности синтеза моделей из имеющихся элементов с интеграцией алгоритмов и результатов моделирования между блоками подсистемы Simulink (рис. 1).

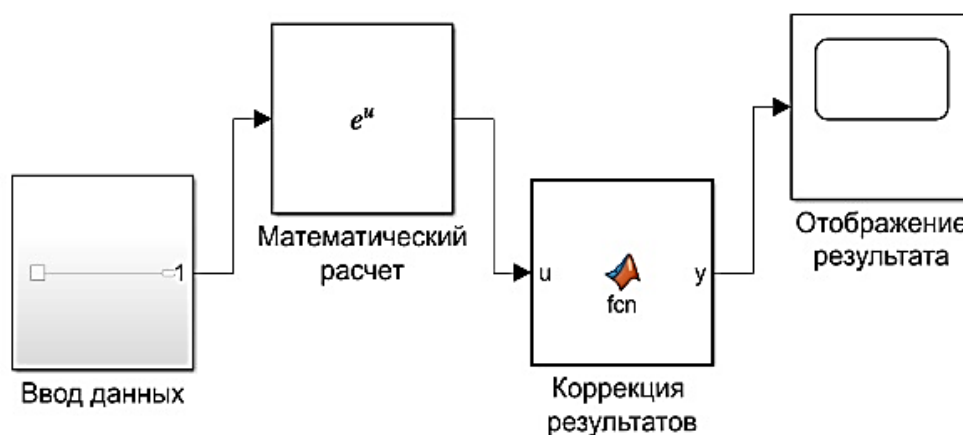


Рис. 1. Структурная схема модели расчета солнечной инсоляции
 Fig. 1. Structural diagram of the solar insolation calculation model

Структура модели расчета солнечной инсоляции наглядно показывает, что ее можно разделить на ряд подсистем. Этими подсистемами, в соответствии с рис. 1, являются:

Блок ввода данных: введенные переменные расчета инсоляции записываются и отправляются в последующие блоки. Присваивает некоторые переменные глобальному типу. Состоит из следующих элементов: «Constant», «Signal builder».

Блок математических расчетов: в подсистему входит ряд блоков, последовательно осуществляющих операции умножения, деления, интегрирования и тригонометрические функции. При этом выполняется расчет параметров солнечной инсоляции, значение которых необходимо знать для определения ориентации солнечного приемника. Связь блоков между собой организована элементами «Go to», «From», это позволяет визуально не усложнять схему расчета. В состав входят следующие функциональные элементы: «Product», «Trigonometric functions block», «Gain», «Sum», «Subtract», «Integrator».

Блок коррекции результатов: подсистема выполняет функцию контроля значений полученных в блоке математических расчетов, при необходимости корректирует результаты, а также вносит стохастический характер в график инсоляции. В его составе имеются элементы: «Saturation», «Matlab function», «Random number generator».

Блок отображения результатов: подси-

стема фиксирует промежуточные функциональные зависимости, формирует базы данных, и с помощью элемента «To workspace» конечный результат направляет в рабочую область MATLAB в виде суточного графика. Содержит блоки: «Display», «Score».

Эксплуатационные характеристики СФЭС в основном определяются величиной полученного солнечного излучения и погодных условий. Для определения солнечной энергии, доступной для трансформирования СФЭС, необходимо определить количественную величину солнечного излучения в зависимости от координат установки СФЭС, геометрических параметров панелей СФЭС, температуры и отражающих способностей окружающей среды³ [17–19].

Для повышения поступления солнечной инсоляции принимающую поверхность стараются поворачивать перпендикулярно к солнцу, т.е. так, чтобы угол между солнцем и принимающей панелью был минимальным. На рис. 2 показаны характеристики, задающие расположение приемной площадки относительно положения солнца, где β – угол наклона панели относительно земли; γ – азимутальный угол установки приемной панелью, град.; φ_z – зенитный угол, град.; ϑ – угол падения солнечного излучения, град.; 1 и 2 – нормали к горизонтальной и наклонной плоскостям; W, S, E, N – стороны света, соответственно.

³Попель О. С., Фрид С. Е., Киселева С. В., Коломиец Ю. Г., Лисицкая Н. В. Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): учеб. пособ. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 56 с.

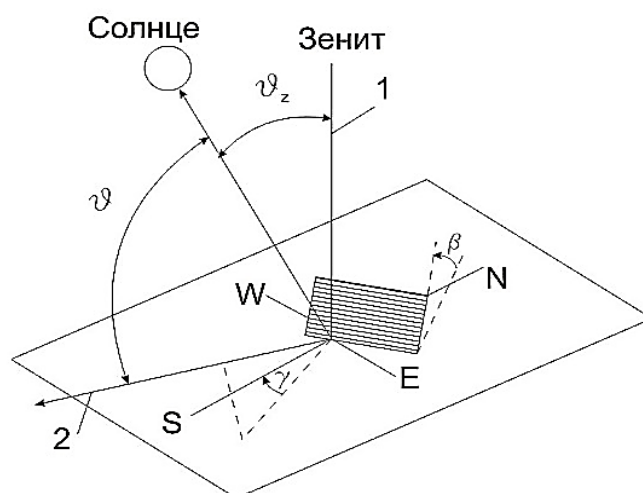


Рис. 2. Характеристики ориентации солнечного приемника
Fig. 2. Solar receiver orientation characteristics

Предлагается методика вычисления инсоляции в соответствии с известными положениями⁴⁻⁶ [20–22], отличающаяся комплексным учетом программируемых параметров, наиболее полно характеризующих условия функционирования фотоэлектрической электростанции. Инсоляция является интегральной величиной солнечной радиации земной поверхности.

Суммарная солнечная радиация равна сумме прямой, рассеянной и отраженной инсоляций:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \theta_z}{\cos \theta} + I_{\text{расс}}^{\text{гор}} \frac{1 + \cos \beta}{\cos \theta} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1 - \cos \beta}{\cos \theta}, \quad (1)$$

где $I_{\text{пр}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{расс}}^{\beta\gamma}$, $I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$ – значения прямой, рассеянной от облаков и аэрозолей, и отраженной от земной поверхности радиации на наклонную поверхность, соответственно; $I_{\text{пр}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{расс}}^{\text{гор}}$, $I_{\text{сум}}^{\text{гор}}$ – значения прямой, рассеянной и суммарной солнечной радиации, падающей

на горизонтальную поверхность; ρ – альбедо земной поверхности.

Величина угла θ определяется из решения уравнения:

$$\cos \theta = (A - B) \cdot \sin \sigma + [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cdot \cos \omega] \cdot \cos \sigma. \quad (2)$$

Коэффициенты A , B , C , D , E вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} A &= \sin \phi \cdot \cos \beta; \quad B = \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma; \\ C &= \sin \beta \cdot \sin \gamma; \quad D = \cos \phi \cdot \cos \beta; \\ E &= \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma, \end{aligned} \quad (3)$$

где ϕ – широта местности в точке установки панелей, град.; σ – угол склонения Солнца, град.; γ – азимутальный угол установки приемной площадки, который при направлении на юг, град.; $\gamma = 0^\circ$, при отклонении к востоку γ считается положительным, при отклонении к западу – отрицательным; ω – часовой угол Солнца, град.

⁴Surface meteorology and Solar Energy. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (17.02.2022).

⁵Прокопеня И. Н., Петровская Т. А., Богдан А. А., Игнатович Р. С., Павлович И. В. Исследование фотоэлектрического преобразователя энергии – солнечной батареи: для энергетических специальностей ВУЗа. Минск: Изд-во БНТУ, 2018. 57 с.

⁶Гусаров А. В., Наумов Э. П. Практические и семинарские занятия по курсу Гидрология и климатология: учеб.-метод. рук-во. Казань: Изд-во КФУ, 2014. 17 с.

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\vartheta_z = \arccos[\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega]. \quad (4)$$

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом h вычисляется по формуле:

$$h = 90^\circ - \vartheta_z. \quad (5)$$

Азимутальный угол положения Солнца A_z является решением уравнения:

$$\cos A_z = \frac{\sin \phi \cdot \sin h - \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos h}. \quad (6)$$

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12 - T_{\text{ув}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \quad (7)$$

где t – текущее официальное местное время, ч; ΔT_{UTC} – разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, ч; ψ – географическая долгота точки размещения приемной площадки, град.

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{\text{ув}} = 0,11 \cdot \sin(2B) - 0,08 \cdot \cos(B) - \sin(B), \quad (8)$$

где $B = (0,986 \cdot N - 79,866)$, град.; N – номер календарного дня с начала года.

Угол склонения находится по формуле:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(0,986 \cdot N + 280,024). \quad (9)$$

Углы восхода ω_n и заката ω_k Солнца по солнечному времени определяются из выражений:

$$\omega_n, \omega_k = 0 \pm \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta]. \quad (10)$$

Для учета реальных характеристик солнечной радиации, приходящей на опреде-

ленную территорию, при моделировании используются средние для заданного месяца значения индекса прозрачности атмосферы K_T , полученные из базы данных космического агентства США NASA SSE [21, 22] за более чем двадцатилетний период наблюдений. При этом считается, что индекс прозрачности для текущих суточных значений солнечной радиации равен его среднесуточному значению для данного месяца:

$$K_T = \frac{I_{\text{гор}}^{\text{сум}}}{I_0}, \quad (11)$$

где I_0 – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность, которая определяется по формуле:

$$I_0 = I_{\text{sun}} \cdot [1 + 0,033 \cos(0,986 \cdot N)] \cdot \vartheta_z, \quad (12)$$

где $I_{\text{sun}} = 1367$ – солнечная постоянная, Вт/м².

Величина рассеянной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, определяется через диффузный коэффициент K_d , характеризующий долю рассеянной радиации в суммарном излучении:

$$K_d = \frac{I_{\text{расс}}^{\text{гор}}}{I_{\text{сум}}^{\text{гор}}}. \quad (13)$$

Для нахождения K_d используется методология NASA [22], по которой доля рассеянной радиации определяется из системы полиномиальных уравнений в функции от широты местности, индекса прозрачности, часового угла заката и полуденного угла высоты Солнца над горизонтом.

В итоге солнечная инсоляция за сутки определяется по формуле:

$$W_{\text{сут}}(N) = \int_0^{24} I_{\text{сум}}^{\text{БГ}} dt. \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения результатов расчета инсоляции СФЭС в блок ввода данных заносятся входные параметры для расчета, такие как географические координаты – широта и долгота, разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, угол наклона приемной солнечной панели, моделируемый день (номер дня с начала года), коэффициент прозрачности атмосферы, альbedo и азимутальный угол. На рис. 3 отображено окно ввода основных параметров, влияющих на значение инсоляции, значение которой выводится в виде графика.

Для необорудованных системой трекинга панелей по солнцу имеет смысл определять оптимальный угол наклона приемной солнечной панели, который вследствие вращения земли вокруг солнца в течение года меняется⁷ [23]. Соответствующее изменение инсоляции летним днем в г. Ангарск, в зависимости от угла наклона солнечной панели, показано на рис. 4. Как видно из графиков рис. 4, изменение угла наклона панели на 15° уменьшает или увеличивает инсоляцию (при неизменных остальных параметрах) на 10–15%. Доля солнечной радиации, доходящей до поверхности земли, определяется коэффициентом прозрачности (K). Изменение

этого коэффициента обусловлено преимущественно изменениями аэрозольной составляющей и влагосодержанием атмосферы. График значений инсоляции от изменения коэффициента прозрачности атмосферы показан на рис. 5. Вариация данного коэффициента на 20% приводит к изменению уровня инсоляции на 30–50%.

Изменение долготы местности приемной панели напрямую влияет на время восхода, заката солнца, т.е. меняется часовой пояс. На рис. 6 отражено изменение графика инсоляции от долготы: например, 102° восточной долготы соответствует г. Ангарск, 92° – г. Красноярск, 72° – г. Омск. Исследование влияния географических координат показало, что наибольшее влияние на инсоляцию оказывает значение координаты – широта.

Солнечная инсоляция значительно меняется в течение года вследствие изменения альbedo поверхности, положения солнца, прозрачности атмосферы. Сравнение графиков для трех разных месяцев года (декабрь, март и июль) показано на рис. 7, из него видно изменение времени продолжительности солнечного сияния и размера инсоляции. На рис. 8 показано изменение суточных сумм инсоляции в течение года. В январе суточная инсоляция составляет около 1000 Вт/м^2 , а в июле достигает 6500 Вт/м^2 .

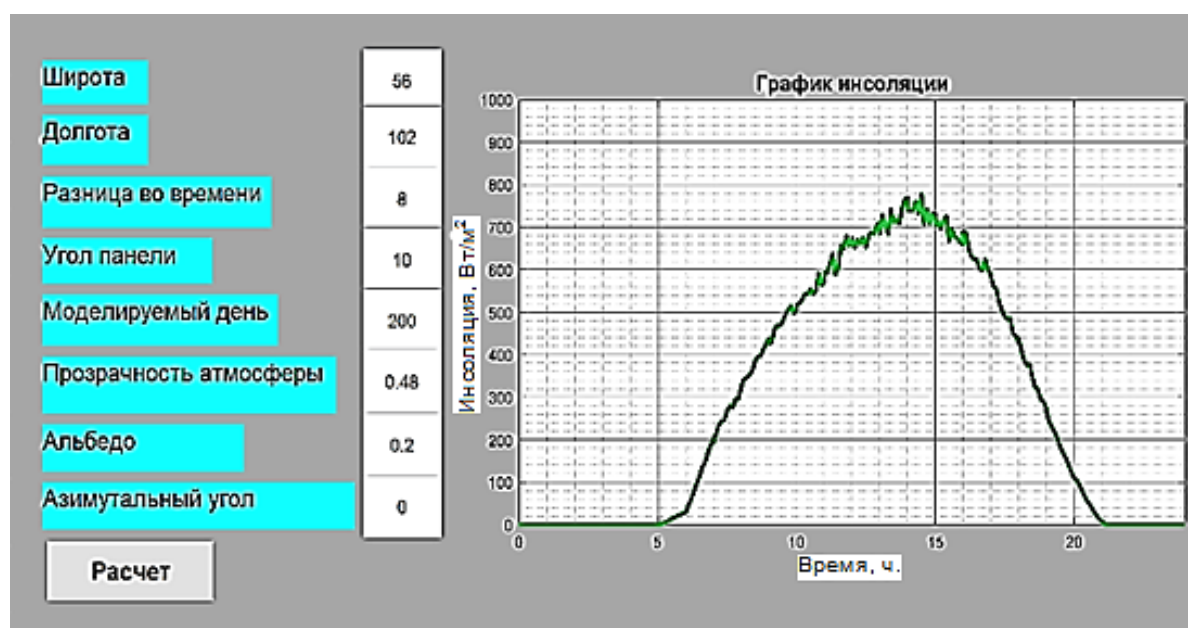


Рис. 3. Графическое окно ввода параметров расчета
Fig. 3. Graphical input window for calculation parameters

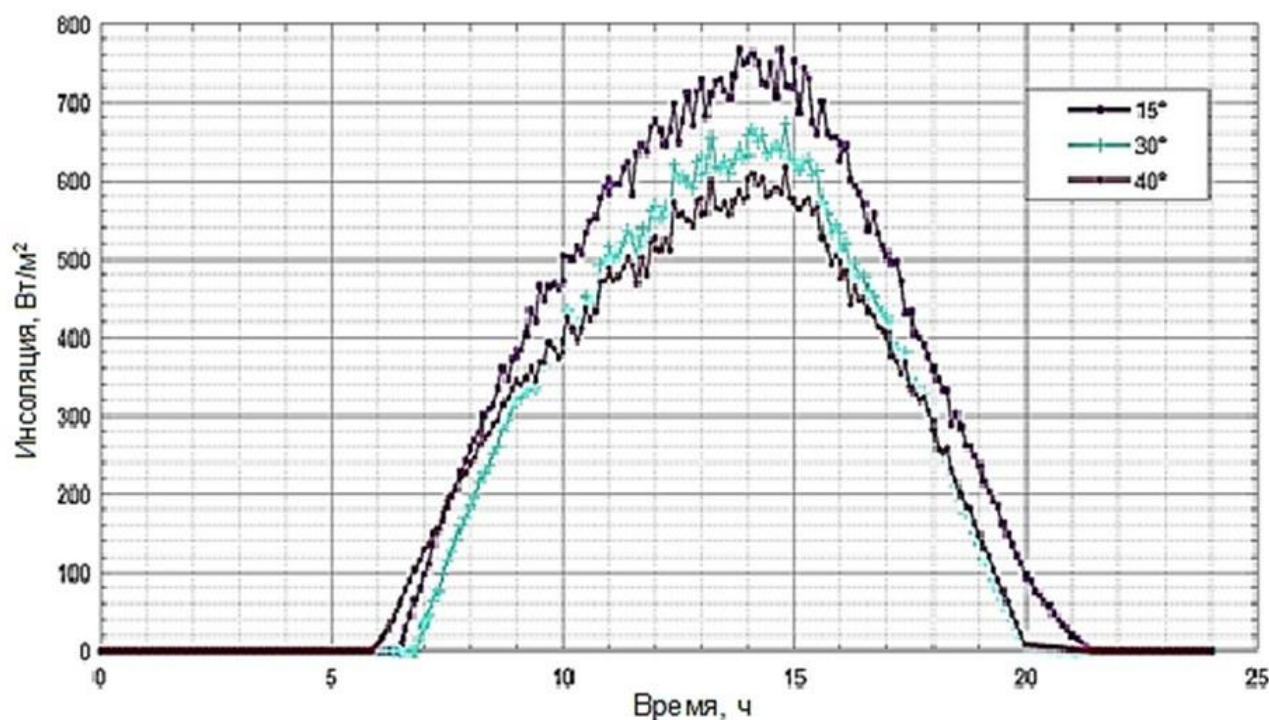


Рис. 4. График инсоляции в зависимости от угла панели
 Fig. 4. Insolation vs the panel angle

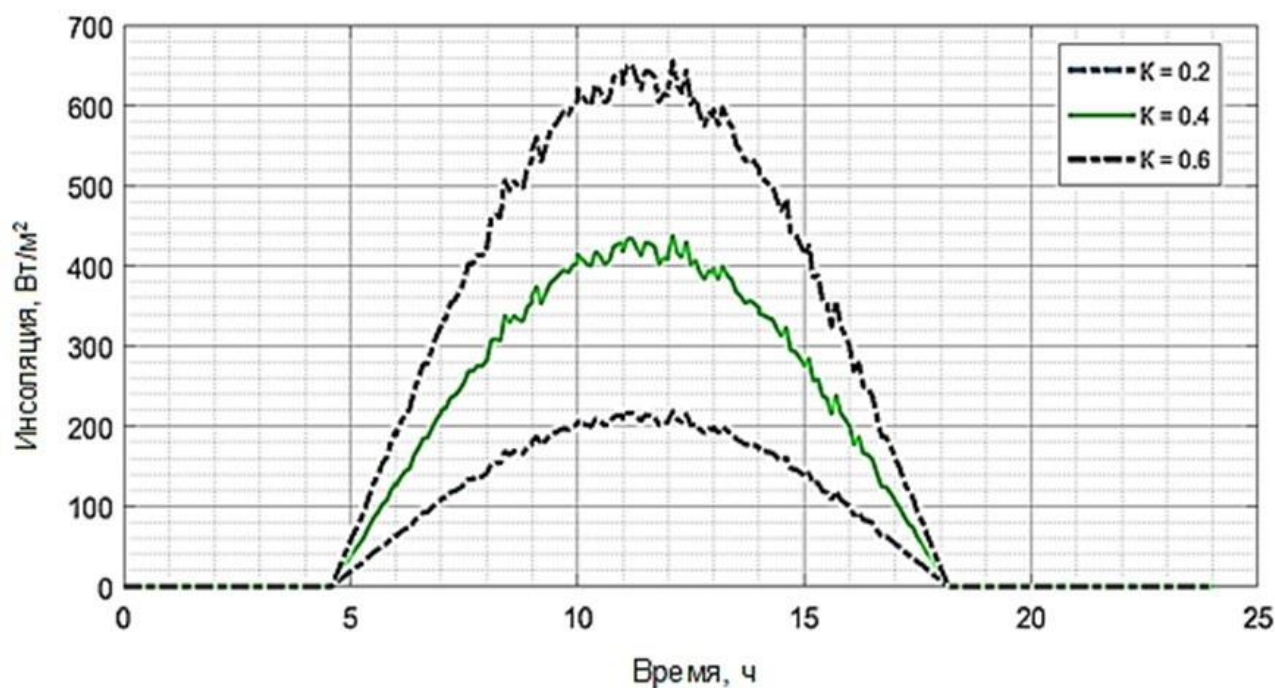


Рис. 5. Зависимость инсоляции от коэффициента прозрачности атмосферы
 Fig. 5. Insolation vs atmospheric transparency factor

⁷ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2019 год / отв. ред. Г. М. Черногаева. М.: Изд-во «Росгидромет», 2020. 247 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2019&ID=90> (18.02.2022).

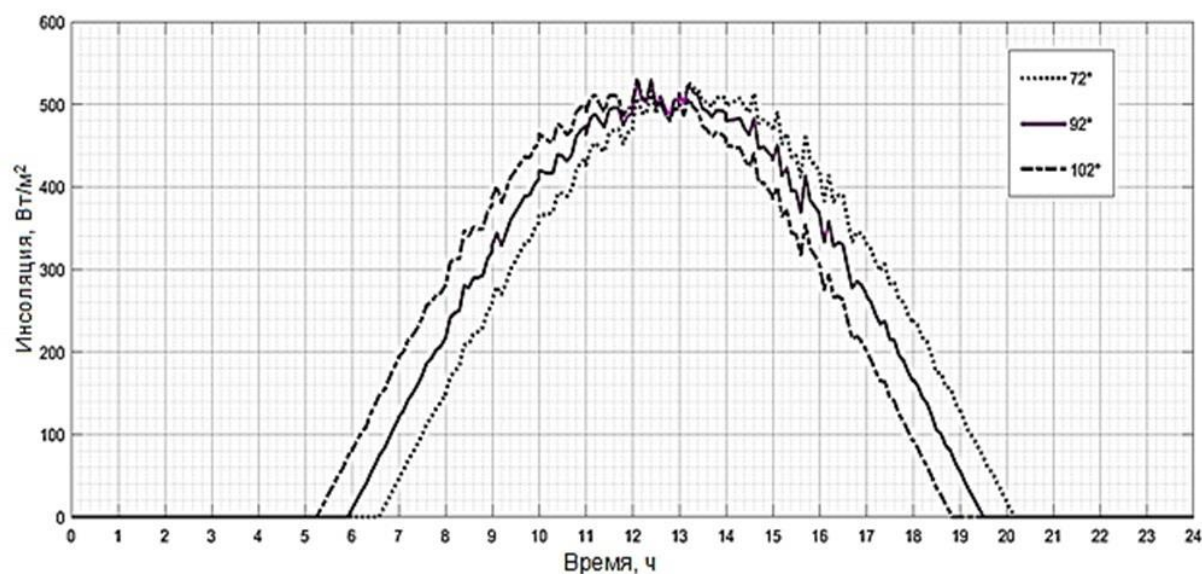


Рис. 6. График инсоляции в зависимости от долготы местности
Fig. 6. Insolation curve depending on the terrain longitude

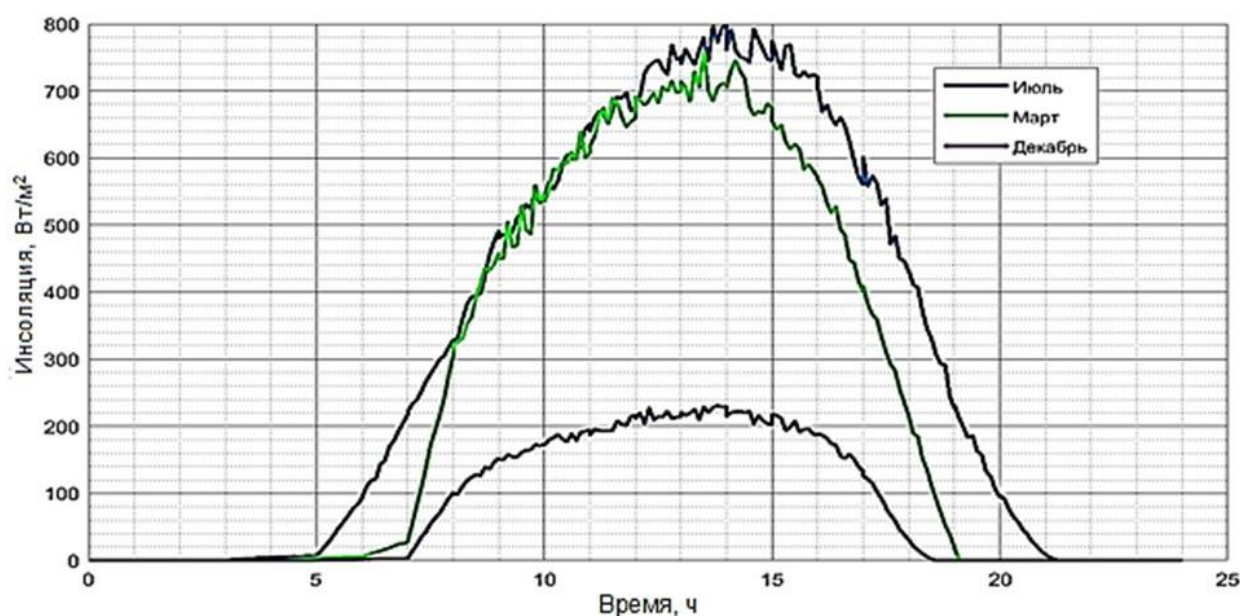


Рис. 7. Изменение графика инсоляции по разным месяцам
Fig. 7. Monthly variation of the insolation curve

Разработанная методика расчета инсоляции солнечной фотоэлектрической станции позволяет осуществлять цифровое моделирование режимов работы этих электростанций с учетом максимального количества значимых входных параметров. С учетом внедрения комплексного подхода в электроснабжении используют кроме традиционных СЭС другие ВИЭ, такие как солнечные фотоэлектрические станции, ветроустановки (ВУ), ди-

зель-электрические станции (ДЭС). Данная методика позволит осуществить выбор оптимального сочетания конфигурации СФЭС с различными источниками электроснабжения: традиционными СЭС, ВУ, ДЭС и малыми гидроэлектростанциями, в условиях неопределенности входных параметров (географических, погодных, температурных, экологических и др.).

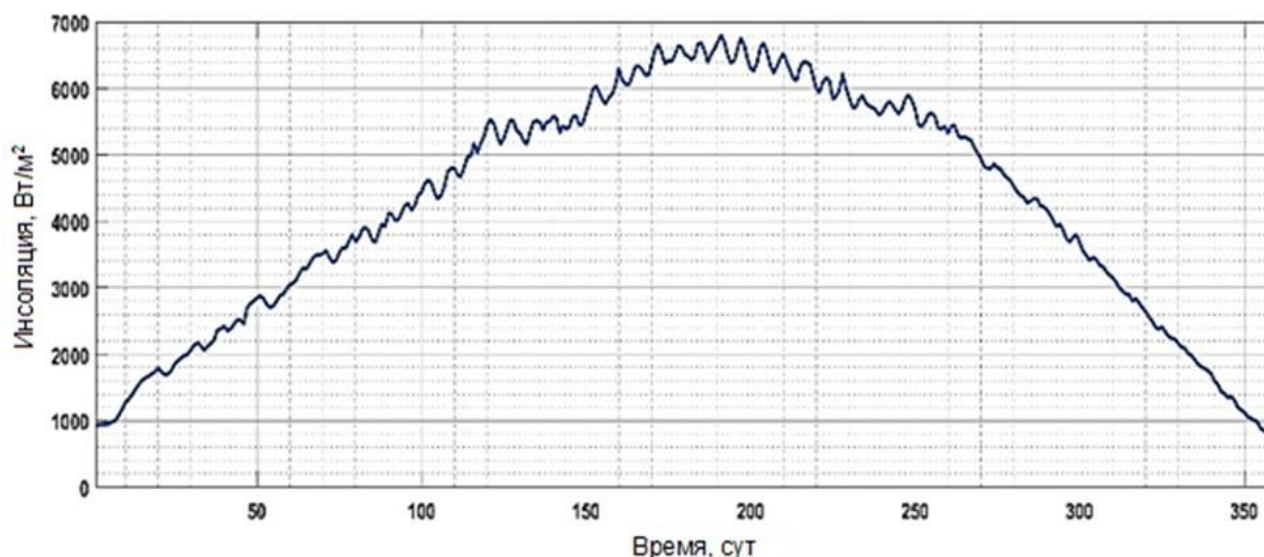


Рис. 8. Годовой график суммарной суточной инсоляции
Fig. 8. Annual curve of total daily insolation

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены результаты расчетов инсоляции в среде MATLAB с применением расширения Simulink. Расчеты выполнены по методике, позволяющей по исходным данным (широта и долгота объекта, разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, угол наклона приемной солнечной панели, номер дня с начала года, коэффициент прозрачности атмосферы, альbedo и азимутальный угол), независимо от места установки и

наличия следящего трекера, проводить вычисление падающего потока инсоляции на произвольно ориентированную солнечную панель с учетом разной отражательной способности земной поверхности и поглощения солнечных лучей в атмосфере.

Программа расчета по данной методике может быть использована при проектировании и оптимизации систем энергоснабжения, организованных при применении солнечных фотозлектрических станций.

Список источников

1. Rylov A. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Suslov K. V. Testing photovoltaic power plants for participation in general primary frequency control under various topology and operating conditions // *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 16. P. 5179. <https://doi.org/10.3390/en14165179>.
2. Karamov D. N., Suslov K. V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.059>.
3. Suslov K., Solodusha S., Gerasimov D. Integral models for control of smart power networks // *IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49. Iss. 27. P. 439–444. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.772>.
4. Suslov K. V., Shushpanov I. N., Buryanina N. S., Ilyushin P. V. Flexible power distribution networks: new opportunities and applications // *Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems - SMARTGREENS*. 2020. Vol. 1. P. 57–64. <https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.
5. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Учет данных метеостанций при анализе эффективности применения солнечных энергетических установок // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015. № 3. С. 227–232.
6. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Методика учета влияния облачности на поток солнечной радиации по данным архивов метеостанций // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 4. С. 79–83.
7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Korotkova K. E. Digital Twin of the distributed generation plant // *Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection. International Scientific and Practical Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 976. P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012024>.
8. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Arsentiev G. O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers // *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2018.

<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728738>.

9. Шайхутдинов А. М. Возможности использования облачных технологий в энергетике // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2-3. [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> (14.02.2022).
10. Глущенко П. В. Перспективы облачных технологий в математических и инструментальных методах исследования и управления в интеллектуальном электроэнергетическом комплексе экономики России. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-oblachnyh-tehnologiy-v-matematicheskikh-i-instrumentalnyh-metodah-issledovaniya-i-upravleniya-v-intellektualnom/viewer> (14.02.2022).
11. Nurbosynov D., Tabachnikova T., Bashirov R., Batanin A. Simulation model of the electrical complex of auxiliary equipment of an oil and gas production enterprise // International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 643. P. 012096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012096>.
12. Tabachnikova T., Makht A., Nurbosynov E. Analytical studies of transformers operating modes in supply and distribution electric network of a field substation // International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2019. Vol. 643. P. 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012090>.
13. Obukhov S., Plotnikov I., Kryuchkova M. Simulation of Electrical Characteristics of a Solar Panel // 15th International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2016. Vol. 132. Iss. 1. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/132/1/012017>.
14. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? // Renewable Energy. 2016. Vol. 90. P. 532–541.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.

15. Luque A., Hegedus S. Handbook of photovoltaic science and engineering. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 1179 p. <https://doi.org/10.1002/0470014008>.
16. Markvart T., Castaner L. Practical handbook of photovoltaics. Fundamentals and applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 1244 p.
17. Шакиров В. А., Артемьев А. Ю. Оценка ветроэнергетического потенциала района средствами компьютерного моделирования // Прикладная информатика. 2015. Т. 10. № 4. С. 93–104.
18. Liu B. Y. H., Jordan R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // ASHRAE Journal. 1961. Vol. 3. P. 53–59.
19. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 910 p.
20. Панкратьев П. С., Шакиров В. А. Методика определения перспективных электрических нагрузок удаленных электрических станций на основе кластерного анализа // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 68–71.
21. Еремеев В. С., Кирилин А. А., Шевченко М. А., Шувалов С. П., Струмяляк А. В., Булатов Ю. Н., Шакиров В. А. Электроснабжение удаленных потребителей в условиях Сибири с использованием энергии солнца // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. Т. 1. С. 49–53.
22. Гусаров А. В. Основные закономерности соотношения русловой и бассейновой составляющих эрозии и стока взвешенных наносов в речных бассейнах Северной Евразии. Геоморфология. 2015. № 4. С. 3–20. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-4-3-20>.
23. Исаков С. В., Шкляев В. А. Оценка поступления солнечной радиации на естественные поверхности с применением геоинформационных систем // Географический вестник. 2012. № 1. С. 72–80.

References

1. Rylov A. V., Ilyushin P. V., Kulikov A. L., Suslov K. V. Testing photovoltaic power plants for participation in general primary frequency control under various topology and operating conditions. *Energies*. 2021;14(16):5179. <https://doi.org/10.3390/en14165179>.
2. Karamov D. N., Suslov K. V. Structural optimization of autonomous photovoltaic systems with storage battery replacements. *Energy Reports*. 2021;7:349-358. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.059>.
3. Suslov K., Solodusha S., Gerasimov D. Integral models for control of smart power networks. *IFAC-PapersOnLine*. 2016;49(27):439-444. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.772>.
4. Suslov K. V., Shushpanov I. N., Buryanina N. S., Ilyushin P. V. Flexible power distribution networks: new opportunities and applications. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems - SMARTGREENS*. 2020;1:57-64.

<https://doi.org/10.5220/0009393300570064>.

5. Shakirov V. A., Artemiev A. Yu. Accounting weather station data in the analysis of solar power systems application efficiency. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015;3:227-232. (In Russ.).
6. Shakirov V. A., Artemyev A. Y. Technique for considering the influence of cloudiness on the solar radiation flux according to the archives of meteorological stations. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2014;4:79-83. (In Russ.).
7. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Korotkova K. E. Digital twin of the distributed generation plant. In: *Actual problems of the energy complex: mining, production, transmission, processing and environmental protection. International Scientific and Practical Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;976:012024. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/976/1/012024>.

899X/976/1/012024.

8. Bulatov Yu. N., Kryukov A. V., Arsentiev G. O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers. In: *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2018. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2018.8728738>.

9. Shaikhutdinov A. M. The possibility of using cloud technologies in energy sector. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii = Modern scientific researches and innovations*. 2015;2-3. Available from: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> [Accessed 14th February 2022]. (In Russ.).

10. Glushchenko P. V. Prospects of cloud technologies in mathematical and instrumental methods of study and management of intellectual power complex of the Russian economy. 2020. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-oblachnyh-tehnologiy-v-matematicheskikh-i-instrumental'nyh-metodakh-issledovaniya-i-upravleniya-v-intellektual'nom/viewer> [Accessed 14th February 2022].

11. Nurbosynov D., Tabachnikova T., Bashirov R., Batanin A. Simulation model of the electrical complex of auxiliary equipment of an oil and gas production enterprise. In: *International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;643:012096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012096>.

12. Tabachnikova T., Makht A., Nurbosynov E. Analytical studies of transformers operating modes in supply and distribution electric network of a field substation. In: *International Scientific Electric Power Conference. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2019;643:012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012090>.

13. Obukhov S., Plotnikov I., Kryuchkova M. Simulation of electrical characteristics of a solar panel. In: *15th International Conference on Modern Technologies for Non-Destructive Testing. Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2016;132(1):012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/132/1/012017>.

14. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N., Styczynski Z. A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies? *Renewable Energy*. 2016;90:532-541.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>.

15. Luque A., Hegedus S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Chichester: John Wiley & Sons; 2003, 1179 p. <https://doi.org/10.1002/0470014008>.

16. Markvart T., Castaner L. *Practical handbook of photovoltaics. Fundamentals and applications*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012, 1244 p.

17. Shakirov V. A., Artem'ev A. Yu. Computer simulation in solving the problem of estimating the wind power potential of the region. *Prikladnaya informatika = Journal of Applied Informatics*. 2015;10(4):93-104. (In Russ.).

18. Liu B. Y. H., Jordan R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. *ASHRAE Journal*. 1961;3:53-59.

19. Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2013, 910 p.

20. Pankratiev P. S., Shakirov V. A. Cluster analysis-based methodology for determining the promising electrical loads of remote power plants. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014;1:68-71. (In Russ.).

21. Ereemeev V. S., Kirilin A. A., Shevchenko M. A., Shuvalov S. P., Strumelyak A. V., Bulatov Yu. N., Shakirov V. A. Power supply of remote consumers in Siberian conditions using solar energy. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2014;1:49-53. (In Russ.).

22. Gusarov A. V. The main regularities of the ratio between riverbed and basin components of erosion and suspended sediment flux in the Northern Eurasia's river basins. *Geomorfologiya*. 2015;(4):3-20. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2015-4-3-20>.

23. Isakov S. V., Shklyayev V. A. Estimation of receipt of solar radiation on natural surfaces with application of geoinformation systems. *Geograficheskii vestnik*. 2012;1:72-80. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коновалов Юрий Васильевич,

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электропривода и электрического транспорта,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

Хазиев Алексей Нурисламович,

студент,
Ангарский государственный технический университет,
665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri V. Konovalev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

Aleksey N. Khaziev,

Student,
Angarsk State Technical University,
60 Tchaikovsky St., Angarsk 665835, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.12.2021; одобрена после рецензирования 28.03.2022; принята к публикации 15.08.2022.

Information about the article

The article was submitted 01.12.2021; approved after reviewing 28.03.2022; accepted for publication 15.08.2022.