

УДК 621.311.25

к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: yrvaskon@mail.ru

Хазиев Алексей Нурисламович,
обучающийся группы ЭЭ-19-1,

ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail:
ixaziewaa@gmail.com

ПРОГРАММА РАСЧЕТА СОЛНЕЧНОЙ ИНСОЛЯЦИИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Konvalov Y.V., Khaziev A.N.

SOLAR INSOLATION CALCULATION PROGRAM IN MATLAB / SIMULINK ENVIRONMENT

Аннотация. В статье рассмотрено описание математического вычисления притока солнечной инсоляции, устройство и работа программы расчета инсоляции, получены графики, отображающие изменение радиации в зависимости от влияния погодных факторов, местности установки гелиоприемников.

Ключевые слова: MATLAB, электроэнергетика, калькулятор, инсоляция, гелиоприемник.

Abstract. The article describes the mathematical calculation of the inflow of solar insolation, the device and operation of the insolation calculation program, graphs showing the change in radiation from the influence of weather factors, the location of the installation of solar receivers are obtained.

Keywords: matlab, electric power industry, calculator, insolation, solar collector.

С каждым годом мировое энергопроизводство неуклонно растет, что является следствием растущего энергопотребления населением, беря в учет то, что большая часть производимой электроэнергии вырабатывается на теплоэлектростанциях, наносящих значительный вред окружающей среде выбросами в атмосферу, в настоящее время развитые страны активно заняты переходом своей энергетики на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Значительный процент стран, входящих в Европейский союз, используют в своем энергопроизводстве электростанции, построенные на ВИЭ [1-3].

Одной из самых перспективных отраслей возобновляемой энергетики является солнечная энергия, так как является неисчерпаемым, возобновляемым и экологически чистым источником энергии. Поэтому солнечные фотоэлектрические электростанции (СФЭС) занимают большой процент в выработке электроэнергии, среди станций на ВИЭ. Актуальность создания программы расчета солнечной инсоляции обуславливается необходимостью иметь полную картину солнечных энергоресурсов местности установки принимающих панелей, включающую в себя градацию изменения уровня инсоляции от варьирования азимутального и отно-

сительно земли углов наклона панелей, разного альbedo подстилающей поверхности, влияющего на отражательную способность поверхности. Таким образом, с помощью программы можно моделировать разные погодные сценарии, тем самым определяя целесообразность установки панелей в большей степени [2-5].

На энергетические характеристики фотоэлектрических преобразователей (ФП) существенное влияние оказывает интенсивность солнечного излучения и температура окружающего воздуха. Величина тока фотоэлектрических модулей определяется количеством поступающей солнечной радиации, т.е. при увеличении инсоляции увеличивается и выработка энергии ФП. Величина первичной солнечной энергии, которая доступна для преобразования ФЭС, определяется интенсивностью суммарного солнечного излучения в месте ее установки и зависит от географических координат месторасположения ФЭС, пространственной ориентации солнечной батареи, а также от внешних метеорологических факторов: температуры воздуха, уровня облачности, коэффициента отражения земной поверхности [6-7].

Для повышения поступления солнечной инсоляции, принимающую поверхность

стараяются поворачивать перпендикулярно к солнцу, т.е. так чтобы угол между солнцем и принимающей панелью был минимальным, рисунок 1 показывает характеристики задающие расположение приемной площадки относительно положения солнца, где β – угол наклона панели относительно земли, γ – азимутальный угол, горизонтально отсчитываемый от севера до солнца, ϑ_z – зенитный угол, ϑ – угол падения солнечного излучения, 1 и 2 – нормали к горизонтальной и наклонной плоскостям, W, S, E, N – стороны света соответственно [8].

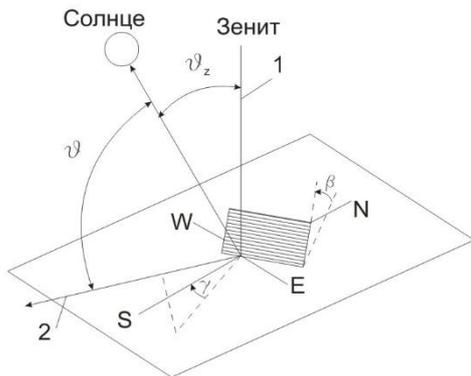


Рисунок 1 – Характеристики ориентации солнечного приемника

Инсоляция (лат. insolatio, от insolo – выставлять на солнце), облучение земной поверхности суммарной солнечной радиацией, выражается количеством солнечной энергии, приходящей в единицу времени на единицу облучаемой поверхности, и измеряется в Вт/м² [9].

Суммарная солнечная радиация равна сумме прямой, отраженной, рассеянной инсоляций [10]:

$$I_{\text{сум}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma} = I_{\text{пр}}^{\text{гор}} \frac{\cos \vartheta_z}{\vartheta} + I_{\text{расс}}^{\text{гор}} \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho I_{\text{сум}}^{\text{гор}} \frac{1 - \cos \beta}{2},$$

где $I_{\text{пр}}^{\beta\gamma} + I_{\text{расс}}^{\beta\gamma} + I_{\text{отр}}^{\beta\gamma}$ значения суммарной, 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, падающей на горизонтальную поверхность, падающей на горизонтальную поверхность, падающей на горизонтальную поверхность, ρ – альbedo земной поверхности.

Величина угла ϑ определяется из решения уравнения [11]:

$$\cos \vartheta = (A - B) \cdot \sin \sigma +$$

$$+ [C \cdot \sin \omega + (D + E) \cdot \cos \omega] \cdot \cos \sigma.$$

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

$$A = \sin \varphi \cdot \cos \beta; B = \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma;$$

$$C = \sin \beta \cdot \sin \gamma; D = \cos \varphi \cdot \cos \beta;$$

$$E = \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma,$$

где φ – широта местности в точке установки панелей; σ – угол склонения Солнца; β – угол наклона приемной площадки к земной плоскости; γ – азимутальный угол установки приемной площадки (при направлении на Юг $\gamma=0^\circ$, при отклонении к Востоку γ считается положительным, при отклонении к Западу – отрицательным); ω – часовой угол Солнца.

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\vartheta_z = \arccos[\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega, \text{ град.}]$$

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом h вычисляется по формуле:

$$h = 90^\circ - \vartheta_z.$$

Азимутальный угол положения Солнца Az является решением уравнения:

$$\cos Az = \frac{\sin \varphi \cdot \sin h - \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos h}.$$

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12 - T_{\text{ys}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi, \text{ град.}]$$

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

Временная поправка на уравнение времени определяется по формуле:

$$T_{\text{ys}} = \frac{1}{60} \cdot [9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos B - 1,5 \sin(B)],$$

где $B = B_0 \cdot (N - 81)$, град.; $B_0=360/365$; N – номер календарного дня с начала года.

Угол склонения находится по формуле Купера [11]:

$$\delta = 23,45 \sin[B_0 \cdot (N + 284)], \text{ град.}]$$

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

$$\omega_{SS}, \omega_{Sr} = 0 \pm \arccos[-\tan \varphi \cdot \tan \delta].$$

Для учета реальных характеристик солнечной радиации, приходящей на определенную территорию, при моделировании используются средние для заданного месяца значения индекса прозрачности атмосферы K_T , полученные из базы данных космического агентства США NASA SSE [11] за 22-летний период наблюдений с 1983 по 2004 гг.

При этом считается, что индекс прозрачности для текущих суточных значений солнечной радиации равен его среднесуточному значению для данного месяца:

$$K_T = \frac{I_{сум}^{гор}}{I_0},$$

где I_0 – внеатмосферная радиация на горизонтальную поверхность, которая определяется по формуле Спенсера [11]:

$$I_0 = I_{sun} \cdot [1 + 0,033 \cos(B_0 N)] \cdot \vartheta_z,$$

где $I_{sun}=1367 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная.

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

$$K_d = \frac{I_{расс}^{гор}}{I_{сум}^{гор}}.$$

Для нахождения K_d используется методология NASA [12], 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.

Солнечная инсоляция за сутки определяется:

$$W_{сум}(N) = \int_0^{24} I_{сум}^{\beta y} dt, \text{ Вт} \cdot \text{ч/м}^2,$$

где N – номер дня с начала года.

Simulink – это компонент среды MATLAB, предназначенный для структурно-функционального имитационного моделирования и анализа динамических систем. Он состоит из инструмента составления блочных диаграмм и изменяемого набора библиотек блоков (элементов). Simulink позволяет провести интеграцию построенных диаграмм с остальной средой MATLAB. Возможен вызов на выполнение моделей Simulink из сценариев и функций MATLAB и вызов функций MATLAB из блоков Simulink. Компонент широко используется в области теории управления и цифровой обработки сигналов для моделирования и проектирования [13].

Устройство калькулятора можно разделить ряд подсистем, этими подсистемами, в соответствии с рисунком 2 являются:

Ввод данных: введенные переменные расчета инсоляции записываются и отправляются в последующие блоки. Присваивает некоторые переменные глобальному типу.

Состоит из следующих элементов: constant, signal builder.

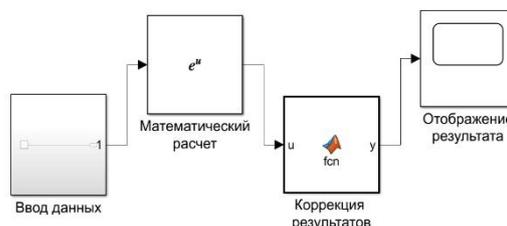


Рисунок 2 – Структурная схема калькулятора инсоляции

Математический расчет: в подсистему входит ряд блоков, последовательно вычисляющих операции умножения, деления, интегрирования и тригонометрические функции, выполняющих расчет углов высоты и азимута Солнца, солнечного времени восхода (захода) Солнца, угла между направлением потока солнечного излучения к поверхности и нормалью к ней, диффузного коэффициента, прямого и рассеянного солнечного излучения, часового угла по местному официальному времени. Связь блоков между собой организована элементами goto, from, это позволяет визуально не усложнять схему расчета. В состав входят следующие функциональные элементы: product, trigonometric functions block, gain, sum, subtract, integrator.

Коррекция 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: saturation, программируемый matlab function, random number generator.

Отображение результата: подсистема фиксирует промежуточные осциллограммы, числа и с помощью элемента to workspace конечный результат в рабочую область matlab в виде 24 часового графика. Составлен из: display, scope.

На рисунке 3 отображено окно ввода основных параметров, влияющих на значение инсоляции.

Для панелей, не оборудованных системой трекинга по солнцу имеет смысл определять оптимальный угол наклона приемной солнечной панели который в следствии вращения земли вокруг солнца в течении года меняется. Соответствующее изменение инсоляции летним днем в Ангарске, в зависи-

мости от угла наклона приемной площадки показано на рисунке 4 [14].

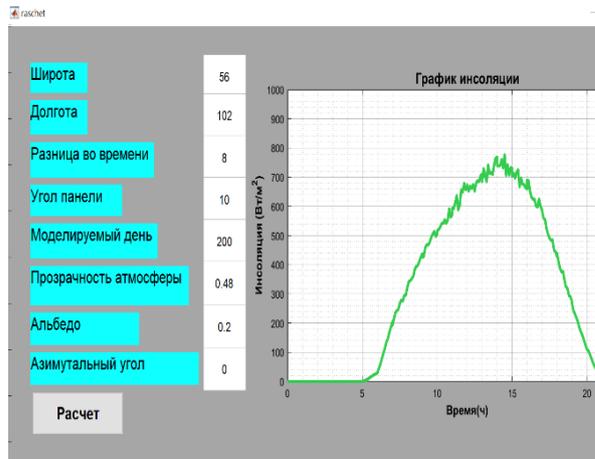


Рисунок 3 – Графическое окно ввода параметров программы

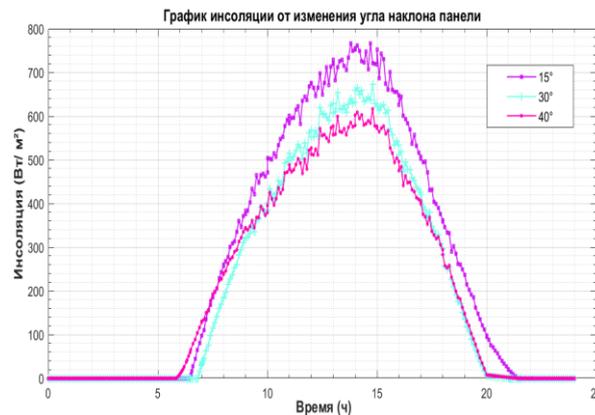


Рисунок 4 – График инсоляции в зависимости от угла панели

Реальные характеристики солнечной радиации, приходящей на определенную территорию, используя данный метод расчета, невозможно получить без использования средних для определенного месяца значений прозрачности атмосферы, полученных из соответствующих баз данных. Коэффициент прозрачности (КП) показывает, какая доля солнечной радиации доходит до земной поверхности при отвесном падении солнечных лучей. Изменение КП обусловлено преимущественно изменениями аэрозольной составляющей и влагосодержанием атмосферы. График значений инсоляции от изменения коэффициента прозрачности атмосферы, показан на рисунке 5 [15, 16].

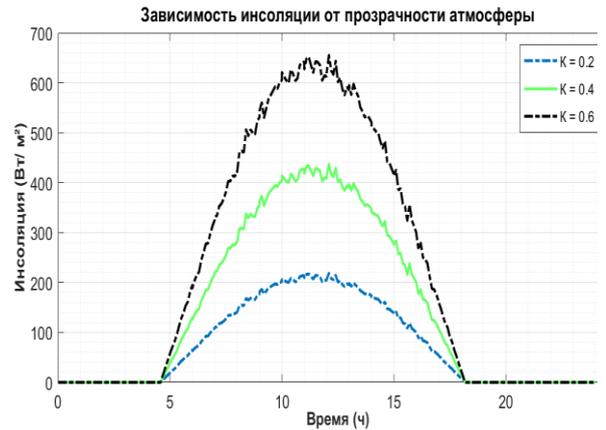


Рисунок 5 – Зависимость инсоляции от коэффициента прозрачности атмосферы

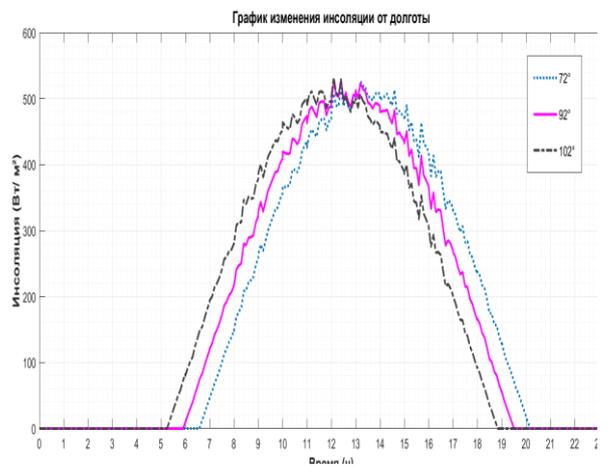


Рисунок 6 – График инсоляции в зависимости от долготы местности

Изменение долготы местности приемной площадки напрямую влияет на время восхода, заката солнца, т.е. меняется часовой пояс. На рисунке 6 отражено изменение графика инсоляции от долготы: например, 102° восточной долготы соответствует городу Ангарску, 92° – Красноярску, 72° – Омску.

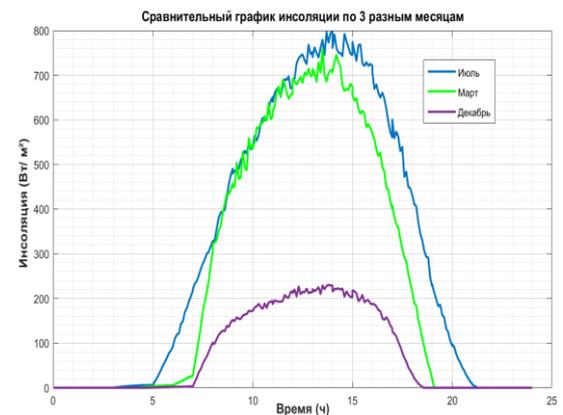


Рисунок 7 – Изменение графика инсоляции по разным месяцам

Солнечная инсоляция значительно меняется в течении года, в следствии изменения альbedo поверхности, положения солнца, прозрачности атмосферы, детальное сравнение графиков трех разных месяцев года показано на рисунке 7, из него видно изменение времени продолжительности солнечного сияния, размера инсоляции. На рисунке 8 показано изменение суточных сумм инсоляции в течении года, которая в январе от 1000 Вт/м² до 6500 Вт/м² в июле.

В данной работе была создана компьютерная программа в среде MATLAB с применением расширения Simulink, позволяющая по указанным начальным данным независимо от места установки и наличия следящего трекара, проводить вычисление падающего потока солнечной инсоляции на произвольно ориентированную приемную панель с учетом разной отражательной способности земной поверхности и поглощения солнечных лучей в

атмосфере, также способная рассчитывать суммарные значения суточной инсоляции.



Рисунок 8 – Годовой график суммарной суточной инсоляции

Программа может подойти для применения при проектировании и оптимизации устройства систем энергоснабжения, организованных на использовании солнечной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигматулин Б.И. Прогноз мирового электропроизводства на АЭС на период до 2050 г. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7390>
2. Архипов Н. А., Кулагин В.А. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года ФГБУН ИЭРАН. – С. 17-36.
3. Ana-Maria Marola. Share of renewable energy in the EU up to 18.0%, С. 1-3.
4. Dave Jones. Global Electricity Review. 2021. [Электронный ресурс] // URL: <https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2021/03/Global-Electricity-Review-2021.pdf>.
5. Григораш О.В., Степура Ю.П. Возобновляемые источники энергии // Труды КубГАУ. – Краснодар, 2011. № 5 – С. 189-192.
6. Handbook of photovoltaic science and engineering / ed. By A. Luque, S. Hegedus. – Southern Gate, Chichester England, John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 1179 p.
7. Practical handbook of photovoltaics: Fundamentals and applications / ed. by T. Markvart, L. Castafier. – Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2012. – 1244 p.
8. Попель О.С., Фрид С.Е. Климатические данные для возобновляемой энергетики России. Изд-во МФТИ, 2010. – С. 15-16.
9. Горчаков Г. И. Инсоляция // Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс](2016);https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2012680.
10. Liu B.Y.H., Jordan R.C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator // ASHRAE Journal. – 1961. – V. 3. – P. 53-59.
11. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. fourth edition. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013. – 910 p.
12. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. [Электронный ресурс] URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
13. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7 Самоучитель. ДМК-Пресс, 2008. – С. 34-35.
14. Прокопья И.Н., Петровская Т.А. Исследование фотоэлектрического преобразователя энергии. Минск, БНТУ, 2018. – С. 46-48.
15. Гусаров А.В., Наумов Э.П. Гидрология и климатология. КПФУ, Казань, 2014. – С. 17-19.
16. Израэль Ю.А., д.г.н. проф. Черногаева Г.М., к.х.н. Егоров В.И. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в российской федерации. Росгидромет, Москва, 2012. – С. 34-35.