

Автор:  
Федотов А.Ю.,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия.

## ОПТИМАЛЬНЫЙ УГОЛ НАКЛОНА НЕПОДВИЖНЫХ ФОТОМОДУЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Аннотация: фотомодули часто устанавливают в одном положении, без возможности его изменения. В этом случае необходимо определить для них оптимальный угол наклона, при котором выработка электроэнергии за год будет наибольшей. При определении угла наклона фотомодулей можно ориентироваться на широту места установки солнечной электростанции. Для точного определения оптимального угла наклона можно рассчитать с помощью метеорологических данных, паспортных данных фотомодулей и координат места установки солнечной электростанции солнечное излучение, падающее на поверхность фотомодулей в течение года в диапазоне углов. Принять угол, соответствующий наибольшему солнечному излучению, в качестве оптимального.

Ключевые слова: фотоэлектрические модули, угол наклона фотомодулей.



**Федотов Александр Юрьевич**  
В 2017 г. окончил факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, магистр по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Аспирант ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Инженер ООО НПП «ЭКРА».

### Введение

Солнечное излучение, падающее на поверхность фотомодулей, наибольшего значения достигает в полуденные часы, когда солнце на максимальной высоте. Поэтому фотомодули без поворотных механизмов и трекеров солнца, фиксируемые в одном положении, устанавливаются по направлению к экватору. Угол наклона фотомодулей выбирается таким образом, чтобы они улавливали максимальное солнечное излучение за год.

В статье приводятся общие сведения о фотомодулях, рассматривается способ определения оптимального угла наклона фиксированных фотомодулей и приводятся результаты расчета этого угла для макета солнечной электростанции (СЭС) НПП «ЭКРА». В первом приближении угол наклона фотомодулей определяется исходя из широты места установки СЭС, склонения солнца и данных о мощности солнечного излучения за год. Затем проводится расчет мощности солнечного излучения и выработки электроэнергии за год в диапазоне углов около ранее определенного.

### Фотоэлектрические модули

Фотоэлектрические модули (фотомодули) – это полупроводниковые устройства, которые преобразовывают солнечное излучение, падающее на их поверхность, в элек-

трическую энергию. Функционирование фотомодулей основано на явлении внутреннего фотоэффекта. Под воздействием солнечного света электроны внутри полупроводника переходят из связанного состояния в свободное, их концентрация увеличивается и появляется электродвижущая сила.

Большая часть фотомодулей производится на основе кремния. В них используются комбинации кремния N-типа и P-типа, легированного фосфором и бором соответственно, для создания *p-n-перехода*. В фотомодулях N-типа основа из кремния легирована фосфором и используется тонкий слой кремния P-типа и, наоборот, в фотомодулях P-типа основа легирована бором и используется тонкий слой кремния N-типа. В фотомодулях HJT N-типа к основе из кремния N-типа с обеих сторон добавляется слой аморфного кремния для формирования гетероперехода. Средний КПД кремниевых фотомодулей за счет совершенствования технологий изготовления в последние годы существенно вырос. По состоянию на 2020 г. производительность фотомодулей, изготовленных по разным технологиям: поликристаллический – от 15 до 18%; монокристаллический – от 16,5 до 19%; поликристаллический PERC – от 17 до 19,5%; монокристаллический PERC – от 17,5 до 20%; монокристаллический N-типа – от 19 до 20,5%; монокристаллический HJT N-типа

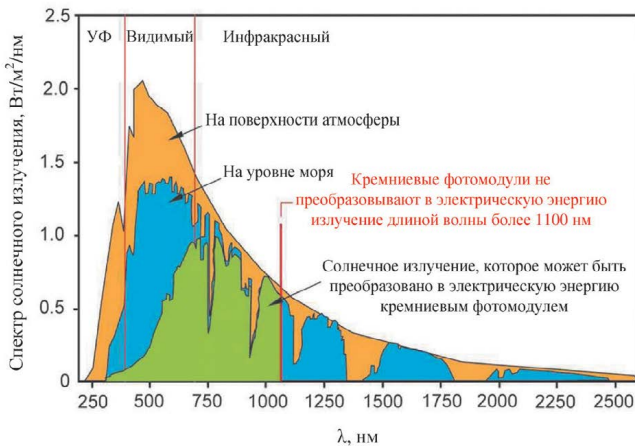


Рис. 1. Энергетический спектр солнечного излучения

– от 19 до 21,7%; монокристаллический IBC N-типа – от 20 до 22,6%. В 2022 г. более 20 производителей предлагают промышленные фотомодули на основе кремния с КПД выше 20% [14].

Солнечное излучение состоит из ультрафиолетовой части (до 400 нм), видимой части (от 400-750 нм) и инфракрасной (от 750 до 4000 нм). Энергетический спектр солнечного излучения представлен на рис. 1. Мощность солнечного излучения на единицу площади поверхности атмосферы называется солнечной постоянной, которая равна 1361 Вт/м<sup>2</sup>. Солнечное излучение частично поглощается и рассеивается атмосферными газами и аэрозолями, вследствие чего его мощность на уровне моря существенно снижается. Фотоны с длиной волны 1100 нм и короче обладают достаточной энергией для того, чтобы вызвать перераспределение зарядов в ячейке фотомодуля. Фотоны с длиной волны более 1100 нм нагревают фотомодуль или же проходят насквозь. Из-за предела Шокли-Квиссера у фотоэлемента с единственным p-n переходом эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую не может превышать 33,7%. Одним из вариантов повышения эффективности фотомодулей является использование многослойных структур с несколькими p-n переходами.

### Модель солнечного излучения

Солнечное излучение измеряется метеослужбами для горизонтальной поверхности. При этом фотоэлектрические модули должны устанавливаться под оптимальным углом  $\beta_{\text{опт}}$  к горизонтали для получения наибольшего солнечного излучения так, что на модули падает излучение ( $H_{\text{глоб}}$ ), состоящее из трех компонентов (1): прямого солнечного излучения ( $H_{\text{прям}}$ ), рассеянного ( $H_{\text{рассеян}}$ ) и отраженного ( $H_{\text{отражен}}$ ):

$$H_{\text{глоб}} = H_{\text{прям}} + H_{\text{рассеян}} + H_{\text{отражен}} \quad (1)$$

Существуют модели солнечного излучения (Лю и Джордана, Кляухера, Переса и т.д.), в основном отличаю-

щиеся способом определения рассеянного излучения, падающего на поверхность фотомодуля [9]. В данной статье используется модель Лю и Джордана [7].

Определение оптимального угла установки  $\beta_{\text{опт}}$  фиксированных в одном положении фотомодулей сводится к нахождению угла наклона  $\beta$ , при котором излучение  $H_{\text{глоб}}$  за год наибольшее.

Рассмотрим составляющие солнечного излучения, падающего на поверхность фотомодуля. Геометрия этого излучения [8-9, 12] представлена на рис. 2 и 3.

Прямое солнечное излучение на наклоненную поверхность фотомодуля:

$$H_{\text{прям}} = H_{\text{прям,гор}} R_{\text{прям}} \quad (2)$$

определяется коэффициентом  $R_{\text{прям}}$ , который связывает величину прямого солнечного излучения на горизонтальную поверхность  $H_{\text{прям,гор}}$  с прямым излучением на поверхность фотомодуля.

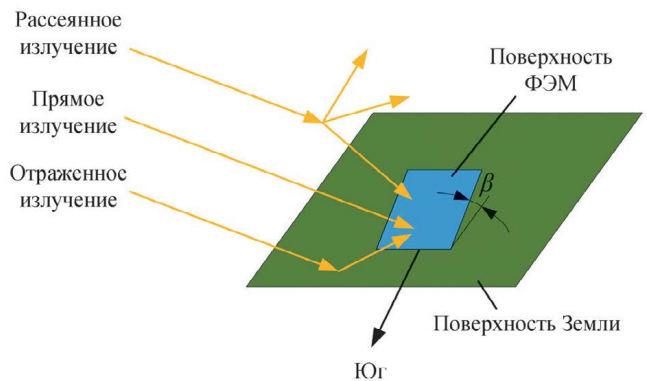


Рис. 2. Составляющие солнечного излучения

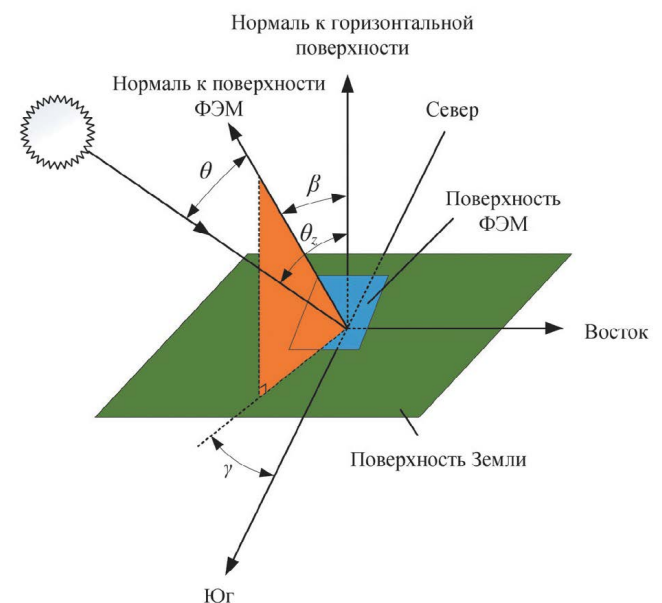


Рис. 3. Связь угла установки фотомодуля с солнечным излучением

Коэффициент  $R_{\text{прям}}$  зависит от угла  $\theta$  между солнечными лучами и нормалью к поверхности фотомодуля и угла  $\theta_z$  между солнечными лучами и нормалью к горизонтали:

$$R_{\text{прям}} = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}. \quad (3)$$

В свою очередь, угол  $\theta$  определяется с помощью угла наклона фотомодуля  $\beta$ , азимута  $\gamma$  – угла между проекцией нормали к поверхности фотомодуля на горизонтали и направлением на юг, угла склонения солнца  $\delta$  и широты  $\varphi$  места установки СЭС:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta)\sin(\varphi)\cos(\beta) - \\ & -\sin(\delta)\cos(\varphi)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \\ & +\cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\beta)\cos(\omega) + \\ & +\cos(\delta)\sin(\varphi)\sin(\beta)\cos(\omega)\cos(\gamma) + \\ & +\cos(\delta)\sin(\beta)\sin(\gamma)\sin(\omega) \end{aligned}, \quad (4)$$

где  $\omega$  – часовой угол.

Зенитный угол  $\theta_z$  может быть найден, как

$$\cos(\theta_z) = \sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega). \quad (5)$$

Склонение ( $\delta$ ) – это угол между лучами солнца и плоскостью экватора (рис. 4), который для каждых суток определяется по формуле Купера [13]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360^\circ \frac{284 + n}{365}\right), \quad (6)$$

где  $n$  – номер суток, начиная с 1 января, угол  $23,45^\circ$  – угол между осью вращения и перпендикуляром к орбите

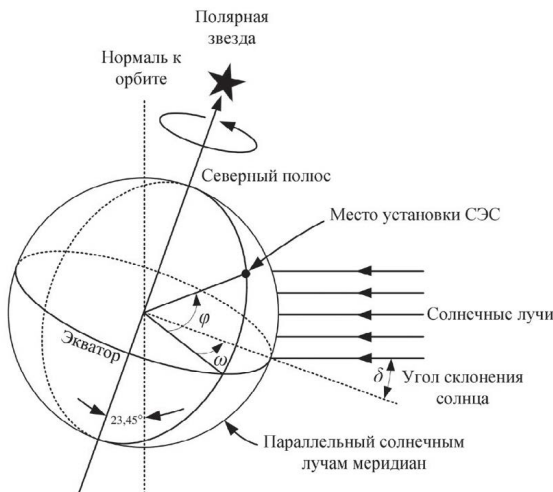


Рис. 4. Влияние на освещенность СЭС широты  $\varphi$ , угла склонения солнца  $\delta$  и часового угла  $\omega$

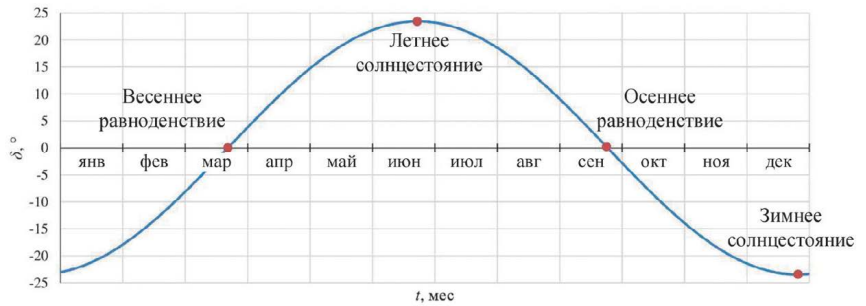


Рис. 5. Изменение склонения солнца за год

Земли. Склонение солнца [9, 12] равно нулю в дни весеннего и осеннего равноденствия и максимально в абсолютном исчислении в дни летнего и зимнего солнцестояния (рис. 5).

Рассеянное излучение  $H_{\text{рассеян}}$ , падающее на поверхность фотомодуля, можно определить по формуле (7):

$$H_{\text{рассеян}} = H_{\text{рассеян,гор}} \frac{1 + \cos(\beta)}{2}, \quad (7)$$

где  $H_{\text{рассеян,гор}}$  – рассеянное излучение, падающее на горизонтальную поверхность.

Отраженное излучение зависит от других составляющих солнечного излучения и отражающей поверхности  $\rho$  (8):

$$H_{\text{отражен}} = \rho \left( H_{\text{прям,гор}} + H_{\text{рассеян,гор}} \right) \frac{1 - \cos(\beta)}{2}. \quad (8)$$

После определения мощности солнечного излучения на поверхности фотомодулей по (1) можно рассчитать выработку электроэнергии  $E$  СЭС:

$$E = H_{\text{глоб}} S,$$

где  $S$  – площадь фотомодулей СЭС.

Величины  $H_{\text{прям,гор}}$  и  $H_{\text{рассеян,гор}}$  могут быть получены из метеорологических данных. Зачастую из метеоданных доступно только глобальное солнечное излучение на горизонтальную поверхность без разделения на прямое и рассеянное. В таком случае можно рассчитать прямое и рассеянное солнечное излучение, воспользовавшись способами [5-7].

С помощью модели солнечного излучения и актуальных метеоданных проведен расчет по определению оптимального угла наклона фотомодулей для макета СЭС, установленного на крыше здания в пределах г. Чебоксары.

### Макет СЭС НПП «ЭКРА»

Макет СЭС НПП «ЭКРА» сделан из 36 фотомодулей Hevel HVL300, собранных в 3 стринга по 12 (рис. 6). Каждый стринг подключен к отдельному MPPT-устройству с алгоритмом P&O для отслеживания точки максимальной мощности [1-4, 10]. Выходы MPPT-устройств объ-

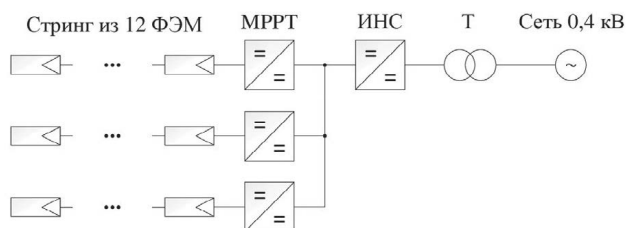


Рис. 6. Схема макета СЭС

единены и подключены к инвертору. Для гальванической развязки использован силовой трансформатор.

В отсутствие трекеров солнца и поворотных механизмов фотомодули ориентированы строго на юг ( $\gamma = 0^\circ$ ).

Исходными данными для расчета являются паспортные параметры фотомодуля Hevel HVL300 (табл. 1), среднемесячная мощность солнечного излучения (рис. 7) и температура окружающей среды (рис. 8) согласно [11], координаты места установки СЭС:  $56,11^\circ$  с.ш. и  $47,34^\circ$  в.д. СЭС работает только в светлое время суток в условиях, когда средняя температура окружающей среды выше среднесуточной, поэтому расчеты проведены для среднесуточной и среднесуточной температур.

В первом приближении, для определения угла наклона  $\beta$  можно ориентироваться на широту места

Таблица 1. Паспортные параметры фотомодуля HVL300

Номинальная мощность $P_{ном}$ , Вт	300
Допустимое отклонение мощности $\Delta P_{ном}$ , Вт	$\pm 5$
КПД, %	17,92
Ток в рабочей точке $I_{mp}$ , А	8,58
Напряжение в рабочей точке $U_{mp}$ , В	35,05
Ток короткого замыкания $I_{sc}$ , А	9,21
Напряжение короткого замыкания $U_{oc}$ , В	43,38
Температурный коэффициент $U_{oc}$ , %/°C	-0,25
Температурный коэффициент $I_{sc}$ , %/°C	0,04

установки СЭС. Для неподвижных фотомодулей, ориентированных к экватору, в литературе [15] Хоттел предлагает принять  $\beta_{opt} = \varphi + 20$ , Тайбут и Лоф принимают  $\beta_{opt} = \varphi + (10 \rightarrow 20) + 10$ , Хейвуд  $\beta_{opt} = \varphi - 10$ , Керн и Харрис  $\beta_{opt} = \varphi + 10$ . Йеллот и Льюис предлагают принимать  $\beta_{opt} = \varphi \pm 20$  и  $\beta_{opt} = \varphi \pm 8$  соответственно, со знаком «+» для зимы и «-» для лета.

В [12] угол наклона предлагают связать со склонением солнца и определять с помощью выражения:

$$\beta = |\varphi - \delta|, \quad (9)$$

где  $\varphi$  – константа, широта места установки СЭС, а склонение солнца  $\delta$  определяется по формуле (6). После чего не составляет труда рассчитать средневзвешен-

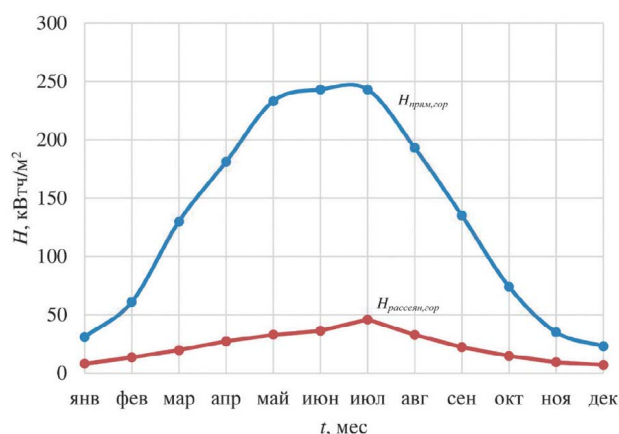


Рис. 7. Изменение мощности солнечного излучения за год

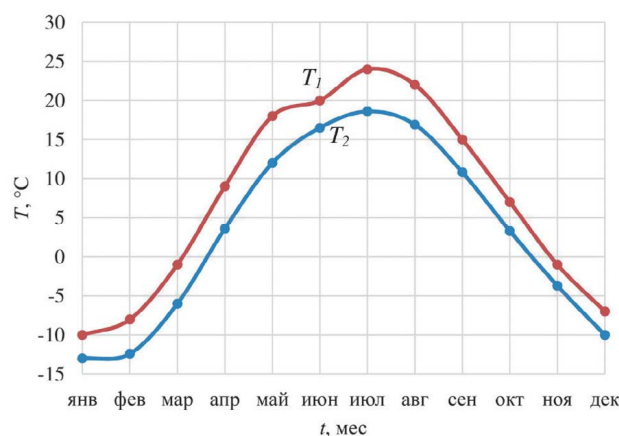


Рис. 8. Изменение температуры за год.  $T_1$  – среднесуточная температура,  $T_2$  – среднесуточная температура [11]

ное значение  $\beta$  относительно мощности потока солнечного излучения для целого года, а также для зимы, весны, лета и осени. Оптимальный угол наклона фотомодулей, полученный данным способом, для макета СЭС составил  $46^\circ$ .

Более точный способ определения оптимального угла заключается в расчете солнечного излучения, падающего на поверхность фотомодулей, и выработки мощности в течение года в некотором диапазоне углов. Проведен расчет выработки мощности макетом СЭС за год в диапазоне углов  $\beta$  от  $40^\circ$  до  $70^\circ$ . Максимальная расчетная выработка мощности получена при угле наклона фотомодулей  $52^\circ$  и составляет 23,369 МВтч.

При анализе результатов расчетов оптимального угла наклона выявлено, что если в выражении (9) уменьшить величину склонения солнца вдвое (10), то средневзвешенное значение  $\beta$  за год составит  $51^\circ$ :

$$\beta = |\varphi - 0,5\delta|. \quad (10)$$



Результаты расчетов с помощью выражения (10) показаны на рис. 9.

Результаты расчета составляющих солнечного излучения для оптимального угла наклона  $52^\circ$  в виде графика приведены на рис. 10, выработки электроэнергии за год на рис. 11. При использовании в расчетах среднедневной температуры расчетная выработка электроэнергии  $E_1$  получилась меньше на 1,23%.

Таким образом, для сокращения рассматриваемого диапазона углов наклона фотомодулей можно сделать следующее: рассчитать угол наклона для каждого дня года с помощью выражения (10); определить средневзвешенное значение угла наклона относительно мощности солнечного излучения; рассчитать выработку

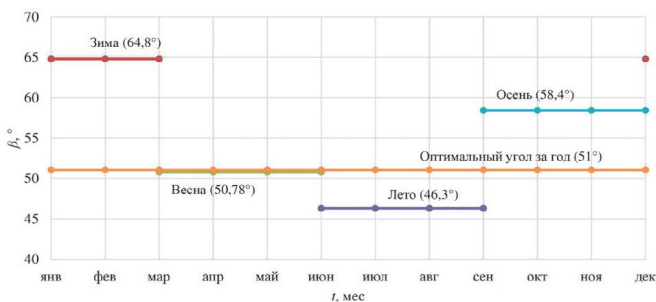


Рис. 9. Оптимальный угол наклона фотомодулей за год и по сезонам

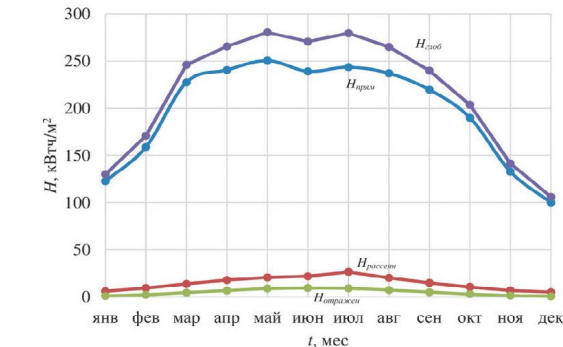


Рис. 10. Расчетная выработка мощности за год при учете средней  $E_1$  и среднесуточной  $E_2$  температуры

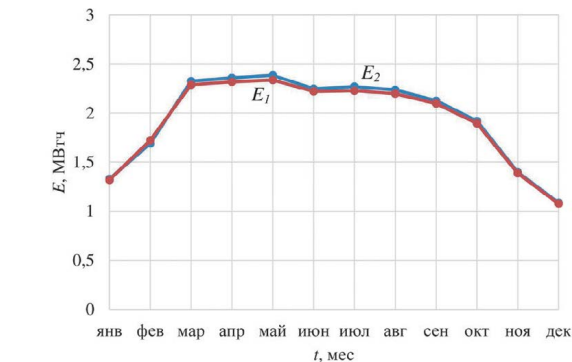


Рис. 11. Расчетная выработка мощности за год при учете средней  $E_1$  и среднесуточной  $E_2$  температуры

электроэнергии в диапазоне углов от средневзвешенного значения.

### Выводы

На выработку электроэнергии ФЭМ влияют многие параметры, такие как ветер, влажность и т.д., но в первую очередь солнечное излучение и температура. В отсутствие трекеров солнца и поворотных механизмов, т.е. при фиксированном положении фотомодули необходимо устанавливать по направлению к экватору под оптимальным углом к горизонту. При определении оптимального угла можно ориентироваться на широту места установки СЭС, но более точным методом является расчет выработки электроэнергии СЭС с изменением угла наклона. Для макета СЭС, установленного в г. Чебоксары, получен угол наклона равный  $52^\circ$ .

Солнечная электростанция функционирует только в дневное время суток, поэтому при использовании в расчетах данных о среднесуточной температуре следует иметь в виду, что выработка электроэнергии из-за температурных коэффициентов фотомодулей окажется завышенной. Результат расчета выработки электроэнергии макета СЭС при учете среднедневной температуры оказался меньше на 1,23%, чем при использовании среднесуточной.

### Литература:

- Hohm D. P., Ropp M. E. «Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms». Progress in Photovoltaics: Research and Applications, pp. 47–62. doi:10.1002/ptp.459.
- Viridian Solar. URL: <https://www.viridiansolar.co.uk/index.html> (дата обр.: 27.01.2022).
- Федотов А.Ю. Обеспечение эффективности солнечной фотоэлектрической станции в условиях быстро меняющейся конфигурации освещенности / Федотов А.Ю., Степанова Д.А., Наумов В.А., Антонов В.И. // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – №1 (38). – С. 42–47.
- Stepanova D. A., Fedotov A. Y., Antonov V. I. Features of Precedents Space of Artificial Neural Networks for the Solar PV Station Control, 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5.
- Liu X. Calculation and Analysis of Optimal Tilt Angle for PV/T Hybrid Collector. 2012 Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, 2012, pp. 791-795, doi: 10.1109/ISdea.2012.702.
- Perez R., Ineichen P., Maxwell E., Seals R., Zelenka A. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models. ASHRAE Transactions, 98, 1992, pp. 354-369.
- Liu B.Y., Jordan R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 4, 1960, pp. 1-19.
- Despotovic M., Nedic V. Comparison of optimum tilt angles of solar collectors determined at yearly, seasonal and monthly levels. Energy Conversion and Management, Volume 97, 2015, pp. 121-131.
- Khoo Y. S. et al. Optimal Orientation and Tilt Angle for Maximizing in-Plane Solar Irradiation for PV Applications in Singapore. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 4, no. 2, pp. 647-653, March 2014.
- Быков К.В. Макет солнечной электростанции НПП «ЭКРА» / Быков К.В., Ерезеев А.Н., Иванов А.Л. и др. // Релейная защита и автоматизация. – 2020. – №4 (41). – С. 62–64.
- СНИП 23-01-99\*. Строительная климатология: принят и введен в действие приказом Минстроя России от 24.12.2020 № 859). — Текст: электронный // Техэксперт: [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обр.: 20.10.2021).
- Karafil A., Ozbay H., Kesler M., Parmaksiz H. Calculation of optimum fixed tilt angle of PV panels depending on solar angles and comparison of the results with experimental study conducted in summer in Bilecik, Turkey. 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2015, pp. 971-976, doi: 10.1109/ELECO.2015.7394517.
- Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills. Solar Energy, vol. 12, pp. 333-346, 1969.
- Clean Energy Reviews. URL: <https://www.cleanenergyreviews.info> (дата обращения 27.01.2022)
- Soulayman S. Sh., On the optimum tilt of solar absorber plates, Renewable Energy Vol.1, No. 3/4, 1991, pp. 551-554.