

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-15-26>

УДК 620 (075.8)

Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии

В. И. Мирончук¹⁾, А. А. Вельченко²⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье представлен анализ развития солнечной энергетики в странах Европы и Республике Беларусь в 2020 г. Предложен алгоритм повышения коэффициента полезного действия для солнечных энергетических установок (СЭУ) за счет локализации солнечной траектории в зависимости от широты и долготы местности. В частности, с учетом угла положения Солнца над горизонтом и угла азимута Солнца рассчитано повышение КПД СЭУ для Республики Беларусь. На основе данного алгоритма написана программа, позволяющая построить диаграмму солнечной траектории. Проведен анализ степени локализации солнечной энергии для дней солнцестояния в шести белорусских областных центрах. Выявлено, что самая высокая интенсивность солнечного излучения наблюдается в Бресте и Гомеле, средняя – в Гродно, Минске и Могилеве, низкая – в Витебске. Проведен сравнительный анализ солнечных траекторий для Берлина (Германия), Гомеля и Бреста. Разработаны рекомендации для эффективной работы СЭУ в течение года в автономном и комбинированном режимах в областных городах Республики Беларусь. Полученные численные расчеты солнечной траектории позволяют проводить оптимизацию ориентации солнечных панелей для стационарно установленных панелей и автоматизированных систем слежения за Солнцем, а также подбор оптимальной комплектации оборудования энергетической установки для любой географической местности.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, диаграмма солнечной траектории, солнечное склонение, локализация солнечной энергии, дни солнцестояния, азимут Солнца

Для цитирования: Мирончук, В. И. Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии / В. И. Мирончук, А. А. Вельченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 15–26. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-15-26>

Increasing the Efficiency Factor of Solar Power Plants Due to Solar Energy Localizing

V. I. Mironchuk¹⁾, A. A. Velchenko²⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents an analysis of the state of development of solar energy in Europe and the Republic of Belarus for 2020. An algorithm for increasing the efficiency factor of solar

Адрес для переписки

Вельченко Анна Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
anna.velchenko@gmail.com

Address for correspondence

Velchenko Anna A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
anna.velchenko@gmail.com

power plants by localizing the solar trajectory depending on the latitude and longitude of the area has been proposed. In particular, taking into account the angle of the Sun position above the horizon and the azimuth angle of the Sun, the increase in the efficiency factor of solar power plants for the Republic of Belarus is calculated. Based on this algorithm, a program has been written that makes it possible to draw a diagram of the solar trajectory. An analysis has been made of the degree of localization of solar energy for solstice days in 6 oblast (regional) centers of the Republic of Belarus; it is found that the highest intensity of solar radiation is observed in Brest and Gomel, the average in Grodno, Minsk and Mogilev, while the lowest one – in the city of Vitebsk. A comparative analysis of the solar trajectory of the city of Berlin (Germany) with the city of Gomel and the city of Brest is carried out. Recommendations have been developed for the effective operation of solar power plants in the oblast (regional) cities of the Republic of Belarus during the year in an autonomous and combined mode of operation. The obtained numerical calculations of the solar trajectory make it possible to optimize the orientation of solar panels for permanently installed panels and for automated solar tracking systems, as well as to select the optimal configuration of the power plant equipment for any geographic area.

Keywords: renewable energy, solar trajectory diagram, solar declination, localization of solar energy, solstice days, azimuth of the Sun

For citation: Mironchuk V. I., Velchenko A. A. (2021) Increasing the Efficiency Factor of Solar Power Plants Due to Solar Energy Localizing. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 15–26. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-15-26> (in Russian)

Введение

В настоящее время возобновляемая энергетика является приоритетным направлением и стремительно развивается во всех странах мира [1–4]. Это обусловлено исчерпаемостью ископаемых природных ресурсов, а также необходимостью сократить химическое и тепловое загрязнение окружающей среды, способное привести к необратимым процессам изменения климата.

Развитие возобновляемой энергетики зависит от климатических условий, в которых находится страна, и оказываемой данному направлению государственной поддержки. В европейских странах с 2010 г. реализуется программа Energy 2020, согласно которой к 2020 г. доля энергии, получаемой из возобновляемых источников, должна составлять: 49 % от общего объема в Швеции, 38 – в Финляндии, 40 – в Латвии, 34 – в Австрии, 30 – в Дании, 23 – во Франции, 18 – в Германии, 16 % – в Болгарии.

В Республике Беларусь активное развитие возобновляемой энергетики началось в 2010 г. с принятием Закона «О возобновляемых источниках энергии» [5]. Государственной программой «Энергосбережение» на 2016–2020 гг. возобновляемая энергетика отнесена к приоритетным направлениям [6]. На данный момент в стране насчитывается свыше 300 действующих установок на основе возобновляемых источников энергии общей мощностью 500 МВт: 98 установок по использованию энергии ветра (110 МВт), 95 – по использованию энергии солнца (более 150 МВт), 29 гидроэнергетических (86,06 МВт), 32 биогазовые установки (41,3 МВт). Согласно Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, соотношение объема производства первичной энергии из возобновляемых источников к валовому потреблению топливно-энергетических ресурсов должно составлять: в 2020 г. – 6 %, в 2030 г. – 8, в 2035 г. – 9 %.

Повышение эффективности электроснабжения потребителей заключается в максимальном использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (солнечных батарей, ветроэнергетических установок и др.), что позволит улучшить энергообеспечение и электровооруженность без дополнительной нагрузки на централизованную электрическую сеть.

Перспективной технологией использования солнечной энергии для выработки электричества является фотовольтаика. При расчете и моделировании регенеративных энергетических систем необходимо точное определение локализации количества солнечного излучения в центрах размещения СЭУ.

Большой вклад в развитие теории и практики применения возобновляемых источников энергии для электроснабжения потребителей внесли такие ученые, как Д. С. Стребков, П. П. Безруких, В. И. Виссарионов, О. С. Попель, Е. В. Соломин, Л. А. Саплин, Р. А. Амерханов, С. М. Воронин, С. К. Шерьязов, Б. В. Лукутин и др. [7–11]. Существует много работ, посвященных методикам расчета потенциала возобновляемых энергоресурсов, параметров энергоустановок и совершенствованию технологий производства СЭУ. Однако в научной литературе практически не уделяется внимание решению проблемы повышения КПД СЭУ за счет локализации интенсивности излучения, падающего на поверхность фотопреобразователей, в широком оптическом спектральном диапазоне в зависимости от конкретной локальной области поверхности Земли, которая определяется углом положения Солнца и азимутом Солнца.

Постановка задачи

Интенсивность солнечного излучения на поверхности Земли обычно ниже, чем в открытом космосе, что связано с потерями излучения при прохождении через атмосферу. Для повышения КПД СЭУ большое значение имеют как интенсивность, так и спектральный диапазон солнечного излучения, которое доходит до конкретной точки поверхности Земли и определяется углом положения Солнца над горизонтом и азимутом Солнца. Данная зависимость углов характеризует солнечную траекторию, ее анализ для Республики Беларусь ранее не проводился.

Солнечную траекторию можно рассчитать на основе алгоритма DIN. Более точные результаты при определении высоты Солнца дает симулятор солнечной системы SUNAE, учитывающий влияние преломления солнечного света в атмосфере, но некоторые рассчитываемые области локализации интенсивности света на поверхности Земли получаются с большой погрешностью (60 %).

В данной статье предлагается алгоритм расчета солнечной траектории, разработанный авторами на языке программирования Java на основе алгоритма DIN, для областных центров Республики Беларусь в дни солнцестояния.

Целью работы является развитие алгоритма расчета солнечной траектории в течение дней солнцестояния с учетом влияния преломления солнечного света в атмосфере и КПД СЭУ в зависимости от локализации солнечной энергии в изучаемых городах.

Основная часть

На рис. 1 изображено движение Земли вокруг своей оси. Земная ось перпендикулярна экваториальной плоскости планеты. Поверхность Земли характеризуется двумя основными параметрами: географической широтой φ , величина которой положительна для точек, лежащих севернее экватора ($0-90^\circ$), и отрицательна для точек южнее экватора ($0-90^\circ$), а также географической долготой ψ .

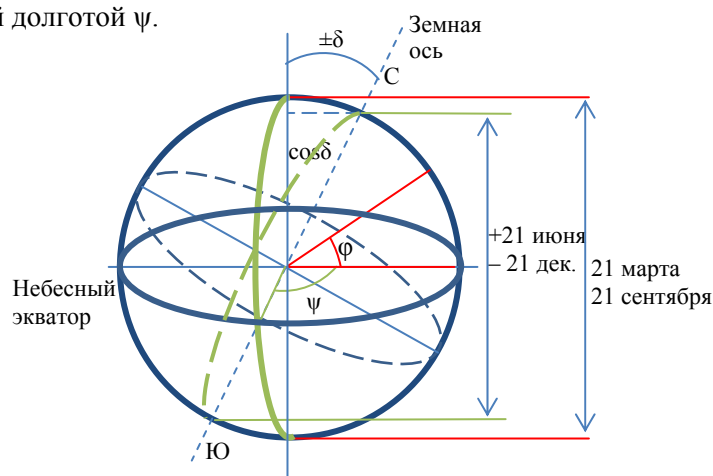


Рис. 1. Движение Земли вокруг своей оси: δ – склонение Солнца; С – северный полюс; Ю – южный полюс; φ – географическая широта; ψ – географическая долгота

Fig. 1. The motion of the Earth around its axis in space: δ – declination of the sun; N – north pole; S – south pole; φ – latitude; ψ – geographic longitude

Угол между средней точкой Солнца и небесным экватором называется солнечным склонением δ и является мерой сезонных изменений. В северном полушарии δ плавно изменяется от $+23,5^\circ$ в период летнего солнцестояния до $-23,5^\circ$ в период зимнего солнцестояния, т. е. в течение года находится в диапазоне $-23,5^\circ \leq \delta \leq 23,5^\circ$. Склонение Солнца рассчитываем по формуле Купера

$$\delta = \delta_0 \sin [360(284 + n)/365], \quad (1)$$

где n – день года ($n = 1$ соответствует 1 января).

На основании географической широты местности и часового угла рассчитываются угол положения Солнца над горизонтом γ_c и азимут Солнца α_c [12]:

$$\gamma_c = \arcsin(\cos \omega \cos \varphi \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta); \quad (2)$$

$$\alpha_c = \begin{cases} 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_c \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_c \cos \varphi} & \text{для } T_{\text{полд}} \leq 12:00; \\ 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_c \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_c \cos \varphi} & \text{для } T_{\text{полд}} \geq 12:00, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{\text{полд}}$ – реальное местное время солнечного полдня; ω – часовой угол Солнца, характеризующий угол поворота с момента солнечного полдня.

На основании представленного расчета геометрических параметров положения Солнца (1)–(3) достаточно трудно провести анализ локализации солнечной энергии в течение дня на поверхности Земли с определенными географическими координатами (широта, долгота) [13]. Для этих целей используем диаграмму солнечной траектории, т. е. зависимость угла положения Солнца над горизонтом от азимута Солнца для различных дней солнцестояния (21 декабря, 21 марта, 21 июня, 21 сентября). В качестве дополнительного параметра на графиках указано время суток.

Для построения диаграммы солнечной траектории написана программа на языке Java, с помощью которой рассчитаны значение азимута Солнца и положение Солнца над горизонтом для конкретного дня, широты, долготы и времени суток.

На рис. 2 представлен численный расчет диаграммы солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь в день зимнего солнцестояния.

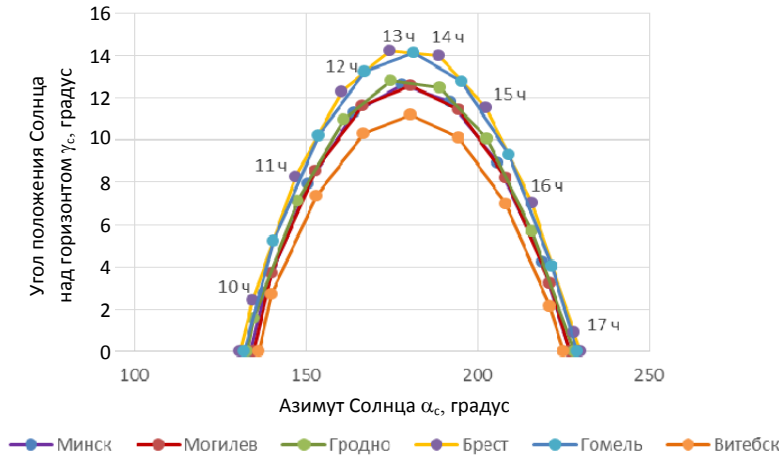


Рис. 2. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 декабря)

Fig. 2. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (December, 21)

Как следует из рис. 2, максимальный угол склонения Солнца над горизонтом наблюдается в Бресте и Гомеле. Кривые локализации солнечного излучения (диаграмма солнечной траектории) находятся практически рядом, имеется лишь смещение по времени, например угол положения

Солнца γ_c в 10 часов утра в Бресте практически вдвое меньше, чем в то же самое время в Гомеле.

Для Гродно, Минска и Могилева траектории солнечного излучения находятся очень близко друг к другу, а угол положения Солнца по времени в каждом городе имеет свое значение, например для 11:00 в Минске $\gamma_c \approx 8^\circ$, в Гродно он меньше примерно на 1° , а в Могилеве примерно на 1° больше.

Самая низкая солнечная траектория наблюдается в Витебске, и Витебская область по сравнению с другими регионами Беларуси имеет более низкую интенсивность солнечного излучения. Это объясняется тем, что чем меньше угол положения Солнца над горизонтом, тем больше путь солнечного излучения через атмосферу Земли, следовательно, увеличиваются в атмосфере потери интенсивности в спектре солнечного излучения.

На рис. 3 графически представлено сравнение солнечной траектории для четырех белорусских городов: Бреста, Гомеля, где наблюдаются максимальные значения локализации интенсивности солнечного излучения; Витебска, где указанные значения минимальны; Минска, где диаграмма солнечной траектории схожа с диаграммами для Гродно и Могилева.

Как видно из рис. 3, угол положения Солнца незначительно отличается по времени в Гомеле, Минске, Витебске. В Бресте он существенно больше, чем в других областных центрах в аналогичное время суток.

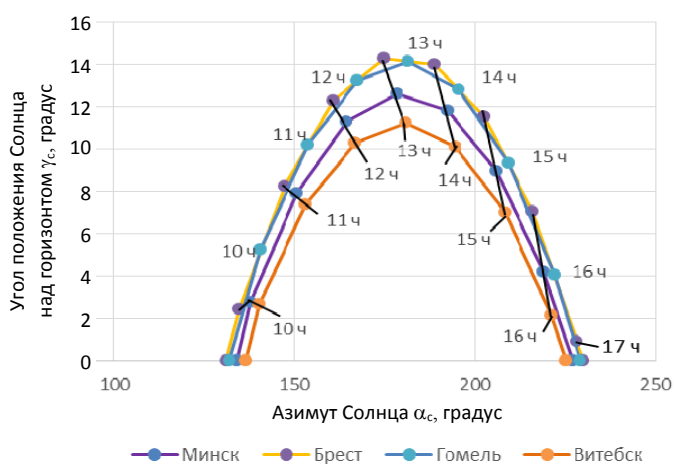


Рис. 3. Диаграмма солнечной траектории для четырех областных центров Республики Беларусь (21 декабря)

Fig.3. The diagram of the solar trajectory for four oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (December, 21)

Для сравнения представим диаграмму солнечной траектории для 21 декабря в Берлине (Германия) и белорусских Бресте и Гомеле (рис. 4). Так, диаграммы солнечной траектории Берлина ($\varphi - 52,30$; $\psi - 13,20$) и Гомеля ($\varphi - 53,54$; $\psi - 27,34$) практически совпадают. Единственное отличие на графике – это смещение Солнца по высоте в данных городах: в Берлине оно позже встает, но и позже заходит, чем в Гомеле. Солнечная траектория

Бреста превосходит солнечную траекторию Берлина и по значениям угла положения Солнца над горизонтом, и по продолжительности дня.

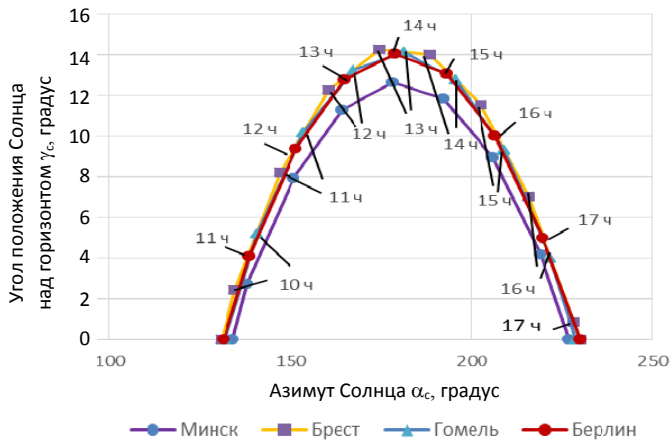


Рис. 4. Диаграмма солнечной траектории для 21 декабря в Берлине, Бресте и Гомеле

Fig. 4. Diagram of the solar trajectory for December, 21, in Berlin, Brest and Gomel

На рис. 5 показана диаграмма для областных центров Республики Беларусь в весенний день солнцестояния (21 марта). Овалом выделены значения угла положения Солнца в определенное время суток. Как видно, по сравнению со значениями на 21 декабря (рис. 2) угол положения Солнца возрос практически в три раза для всех исследуемых городов. Траектории солнечного излучения с 7 до 8 часов утра, а также в вечернее время с 18 до 19 часов по азимуту Солнца практически совпадают, отличаются только по высоте Солнца над горизонтом относительно азимута Солнца и времени суток.

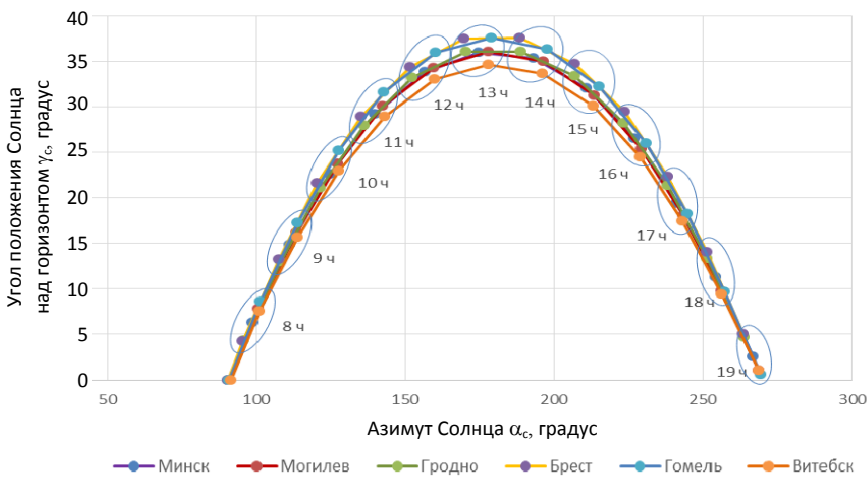


Рис. 5. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 марта)

Fig. 5. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (March, 21)

На рис. 6 показана диаграмма солнечной траектории для областных центров в летний день солнцестояния (21 июня). Существенно расширился диапазон значений азимута Солнца. Угол положения Солнца над горизонтом возрос в 1,5 раза для всех исследуемых городов по сравнению с 21 марта. Также отмечается увеличение долготы дня и более быстрое набирание высоты Солнца в течение суток. Так, в весенний день солнцестояния $\gamma_c = 5^\circ$ около 8 часов утра (рис. 5), а в летний – с 5 до 6 часов утра (рис. 6). Солнечные траектории в утреннее время с 5 до 8 часов, а также вечером с 18 до 21 часа по азимуту практически совпадают, отличаясь, как и в весенний день солнцестояния, только по высоте Солнца над горизонтом относительно азимута Солнца и времени суток.

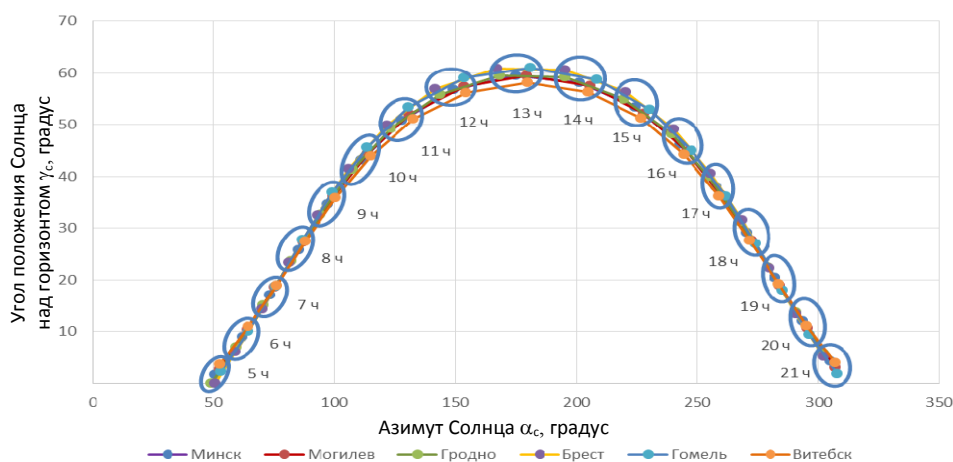


Рис. 6. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 июня)

Fig. 6. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (June, 21)

На рис. 7 представлены численные расчеты диаграммы солнечной траектории для осеннего дня солнцестояния (21 сентября). Она схожа с диаграммой для весеннего дня солнцестояния (рис. 5), где близки значения угла положения Солнца над горизонтом и азимута Солнца. Вместе с тем значения угла положения Солнца отличаются в зависимости от времени суток. Например, в изучаемых городах в 7 часов утра 21 марта (рис. 5) Солнце еще не достигло горизонта, а в 19 часов находится над горизонтом. А 21 сентября (рис. 7) в 7 часов утра в Минске, Витебске и Гомеле, а также в 19 часов в Бресте, Гродно и Минске Солнце находится над горизонтом.

Из представленных результатов (рис. 5, 7) следует, что степень локализации интенсивности солнечного излучения максимальна в утренние часы для 21 марта и в вечернее время для 21 сентября.

Таким образом, полученные в ходе исследования численные результаты солнечной траектории (рис. 2–7) позволяют провести анализ пространственно-временной степени локализации солнечной энергии для областных центров Республики Беларусь и дать рекомендации для повышения КПД СЭУ.

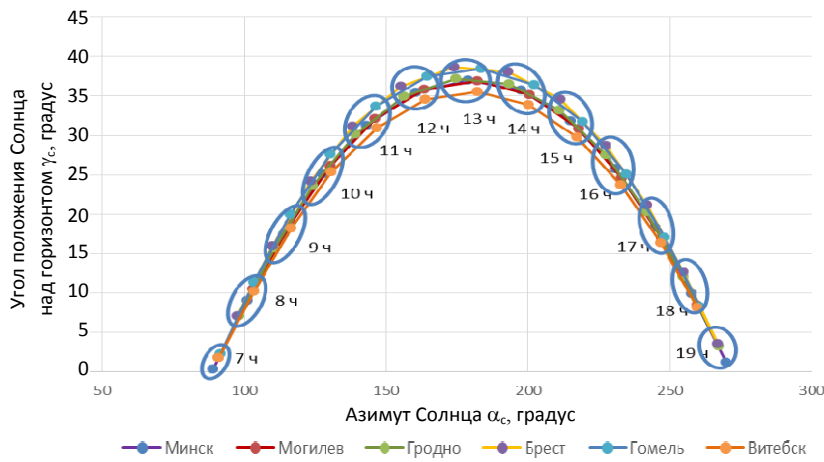


Рис. 7. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 сентября)

Fig. 7. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (September, 21)

Повышение КПД ($\Delta\eta$) пропорционально углу γ_c , который зависит от азимутального угла α_c , т. е. $\Delta\eta = k\gamma_c$, где $\gamma_c = f(\alpha_c)$, k – характеризует параметр солнечной энергетической установки. Используя формулу для функциональной зависимости $\Delta\eta = f(\gamma_c, \alpha_c)$ с учетом зависимости угла положения Солнца над горизонтом от азимута Солнца (рис. 2–7), вычислим относительное изменение КПД для дней солнцестояния по следующей формуле:

$$P(\%) = \frac{\Delta\eta_i - \Delta\eta_j}{\Delta\eta_i} \cdot 100\% = \frac{\gamma_{ic} - \gamma_{jc}}{\gamma_{ic}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где i, j – значения углов положения Солнца над горизонтом для областных центров Республики Беларусь.

В табл. 1 приведены численные расчеты относительного изменения КПД для максимального угла положения Солнца над горизонтом, соответствующего времени 13.00, в дни солнцестояния в исследуемых городах.

На основании данных, представленных в табл. 1, и численных расчетов солнечных диаграмм (рис. 2–7) можно предложить следующие рекомендации для более эффективной работы СЭУ.

Наименьшее отклонение относительного изменения КПД в зависимости от времени года наблюдается в Бресте и Гомеле, наибольшее – в Витебске. Таким образом, в декабре КПД СЭУ, установленной в Витебске, на 20 % ниже, чем расположенной в Бресте и Гомеле, и в среднем на 10 % ниже, чем находящейся в других городах.

СЭУ в автономном режиме с максимальной эффективностью могут использоваться:

- в течение года в Бресте и Гомеле;
- с марта по сентябрь в Минске, Гродно и Могилеве;
- в летний период в Витебске.

Таблица 1

Относительное изменение коэффициента полезного действия в дни солнцестояния для максимального угла положения Солнца над горизонтом (время 13:00)

Relative change in the efficiency coefficient at the solstice for the maximum angle from the position of the Sun above the horizon (at 13:00)

Название областного центра	Относительное изменение КПД, %			
	21 декабря	21 марта	21 июня	21 сентября
Брест	0	0,43	0,28	0
Витебск	21,36	7,81	4,80	8,00
Гомель	0,91	0	0	0,47
Гродно	10,22	4,23	2,59	3,75
Минск	11,41	4,28	2,57	4,25
Могилев	11,69	4,17	2,54	4,40

Комбинированные энергоустановки более эффективно использовать с октября по февраль в Минске, Гродно и Могилеве; с сентября по май в Витебске.

Для обеспечения максимальной эффективности СЭУ ее принимающую поверхность (фотопреобразователь, гелиоколлектор и др.) необходимо ориентировать перпендикулярно к траектории солнечного луча на протяжении солнечного дня. В частности, максимальный эффект будет достигаться: в Гомеле, Могилеве, Витебске – до полудня; в Бресте, Гродно – после полудня; в Минске – в полдень.

ВЫВОДЫ

1. В статье развит алгоритм расчета солнечной траектории, который реализован на языке программирования Java. Представлены в виде графиков численные результаты зависимости угла положения Солнца над горизонтом от азимута Солнца для различных дней солнцестояния в областных центрах Республики Беларусь. Предложен способ повышения коэффициента полезного действия солнечной энергетической установки путем оптимизации угла наклона принимающей поверхности, подбора оборудования энергоустановки.

2. Проведенный анализ степени локализации солнечной энергии в Республике Беларусь показал, что самая высокая интенсивность солнечного излучения наблюдается в Бресте и Гомеле, средняя инсоляция характерна для Гродно, Минска, Могилева, самая низкая – в Витебске.

3. Сравнительный анализ солнечной траектории показал, что интенсивность солнечного излучения в Бресте больше, чем в Берлине, тогда как показатели для Гомеля и Берлина находятся практически на одном уровне.

4. Разработанный авторами алгоритм расчета солнечной траектории для Республики Беларусь позволит уточнить методику расчета солнечной инсоляции с учетом географических и климатических условий местности [14], что имеет большую значимость при инженерных расчетах и проектировании солнечных энергетических станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 90 p.
2. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Саникович, В. И. Мирончук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>.
3. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое / Т. Н. Нгуен [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>.
4. Best Research – Cell Efficiencies [Electronic resource]. Mode of access: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Date of access: 20.02.2018.
5. О возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 27 декабря 2010 г., № 204-З. Режим доступа: https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_vozobnovlyаемых_istochnikah_energii.htm. Дата доступа: 25.01.2020.
6. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 годы: утв. пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 28 марта 2016 г. № 248; в ред. от 31.12.2019 № 972 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/2016-2020>. Дата доступа: 02.02.2020.
7. Обухов, С. Г. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии / С. Г. Обухов. Томск, 2013. 41 с.
8. Шерьязов, С. К. Методология рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей / С. К. Шерьязов. Челябинск, 2011. 398 с.
9. Стребков, Д. С. Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович; под ред. Д. С. Стребкова. 2-е изд., испр. М.: Юрайт, 2019. 265 с.
10. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2015. 128 с.
11. Солнечная энергетика / В. И. Виссарионов [и др.]; под ред. В. И. Виссарионова. М.: ИД МЭИ, 2008. 317 с.
12. Quaschnig, V. Regenerative Energiesysteme / V. Quaschnig // 10 Aktualisierte und Erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2019. 468 p. <https://doi.org/10.3139/9783446461147.fm>.
13. Мирончук, В. И. Алгоритм расчета солнечной траектории в течении дня для нескольких областных центров Республики Беларусь / В. И. Мирончук, А. А. Вельченко, В. М. Андрианов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 декабря 2019 г. Минск: БГАТУ, 2019. С. 105–107.
14. Мирончук, В. И. Методика расчета солнечной энергетической станции с учетом климатических условий местности / В. И. Мирончук, В. М. Андрианов, А. А. Вельченко // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 ноября 2017 г. Минск: БГАТУ, 2017. С. 122–123.

Поступила 29.04.2020 Подписана в печать 26.11.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Jeger-Waldau A. (2017) *PV Status Report 2017*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 90.
2. Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current Status and Development Prospects. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions*

- and Power Engineering Associations, 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian).
3. Nguyen T. N., Sizov V. D., Vu M. P., Cu T. T. H. (2020) Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41> (in Russian).
 4. *Best Research – Cell Efficiencies*. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png (Accessed 20 February 2018).
 5. *Renewable Energy Sources. Law of the Republic of Belarus*, December 27, 2010, No 204-3. Available at: https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_vozobnovlyaemyh_istochnikah_energii.htm. (Accessed 25 January 2020) (in Russian).
 6. *State Program “Energy Saving” for 2016–2020 (as Amended by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of December 31, 2019 No 972)*. Available at: <http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/2016-2020>. (Accessed 2 February 2020) (in Russian).
 7. Obukhov S. G. (2013) *Improving the Effectiveness of Combined Autonomous Renewable Energy Systems Energy*. Tomsk, 41 (in Russian).
 8. Sher'yazov S. K. (2011) *Methodology of Rational Combination of Traditional and Renewable Energy Resources in the Agricultural Consumers Energy Supply System*. Chelyabinsk. 398 (in Russian).
 9. Strebkov D. S., Tver'yanovich E. V. (2019) *Solar Power Plants: Concentrators of Solar Radiation*. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publ. 265 (in Russian).
 10. Lukutin B. V., Muravlev I. O., Plotnikov I. A. (2015) *Power Supply Systems with Wind and Solar Power Plants*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. 128 (in Russian).
 11. Vissarionov V. I., Deryugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. (2008) *Solar Energy*. Moscow, MPEI Publ. House. 317 (in Russian).
 12. Quaschnig V. (2019) *Regenerative Energiesysteme*. 10 Aktualisierte und Erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag. 468. <https://doi.org/10.3139/9783446461147.fm>.
 13. Mironchuk V. I., Vel'chenko A. A., Andrianov V. M. An Algorithm for Calculating the Solar Trajectory during the Day for Several Oblast Centers of the Republic of Belarus. *Energosberezhenie – Vazhneishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 19–20 Dekab. 2019 g.* [Energy Saving as the Most Important Condition for the Innovative Development of Agro-Industrial Complex: Collected Scientific Papers of the International Scientific and Technical Conference. Minsk, Dec. 19–20, 2019]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 105–107 (in Russian).
 14. Mironchuk V. I., Andrianov V. M., Vel'chenko A. A. (2017) Methodology for Calculating the Solar Power Station Taking into Account the Climatic Conditions of the Area. *Energosberezhenie – Vazhneishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiya APK: Sbornik Nauch. Statei Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 23–24 Noyab. 2017 g.* [Energy Saving as the Most Important Condition for the Innovative Development of Agro-Industrial Complex: Collected Scientific Papers of the International Scientific and Technical Conference. Minsk, Nov. 23–24, 2017]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 122–123 (in Russian).