

УДК 620.92

*Підгородецький О.В., Тітова О.В., Кравець В.І.*

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ ТРЕКІНГОВИХ СИСТЕМ З ДВОМА СТУПЕНЯМИ СВОБОДИ

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

У статті порушено проблему підвищення продуктивності функціонування сонячних електростанцій. Ефективним шляхом збільшення потоку сонячної енергії на похилу площину фотоперетворювачів є впровадження систем, що здатні змінювати просторову орієнтацію сонячних модулів протягом світлового дня за вертикальною та горизонтальною траєкторією. Основну увагу в роботі акцентовано на визначенні кількісних показників прийдешньої сонячної енергії, при застосуванні орієнтованої у просторі та стаціонарної системи інсталяції фотомодулів. Обрана авторами методика розрахунку, дозволяє знайти інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні площини спрямованій в будь-якому напрямку, для типового дня та за різних погодних умов. Порядком виконання розрахунку передбачено: визначення схилення Сонця до північної півкулі, часу сходу та заходу небесного світила для обраної місцевості, встановлення висоти Сонця і кута падіння сонячного випромінювання на поверхню площею  $1 \text{ м}^2$ , орієнтовану під різними кутами до горизонтальної площини. Обчислення загальної сонячної інсоляції виконано шляхом інтегрування попередньо знайдених величин радіаційного балансу, за визначеної тривалості одного світлового дня. Подано порівняння інтенсивності надходження сонячної енергії на стаціонарну та орієнтовану площини, протягом одного року експлуатації. Встановлено, що найбільш сприятливий період часу для максимального використання потенціалу трекінгових систем визначається тривалістю світлового дня. Так, найбільша ефективність використання орієнтованої технології установки фотомодулів, стає доступною у весняний та літній періоди часу. Найменша продуктивність таких систем відносно стаціонарних спостерігається протягом зимової пори року, коли тривалість світлового дня є мінімальною, а тому, визначено доцільним змінювати режим роботи системи у відповідні проміжки часу. Виконані розрахунки дозволяють спрогнозувати економічний ефект від впровадження систем орієнтації сонячних фотомодулів з двома ступенями свободи, в залежності від робочих характеристик і вартості окремих систем.

**Ключові слова:** сонячна енергія, трекінг, фотоперетворювач, радіаційний баланс, випромінювання.

DOI: 10.32434/2521-6406-2020-1-7-46-50

### *Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій*

Протягом останніх десятиліть спостерігається збільшення населення та виробничих потужностей в усьому світі. Серед основних видів енергії, що забезпечують потреби людства, основні позиції на сьогоднішній день займають невідновлювальні джерела (нафта, газ, вугілля). Не виключенням у даному випадку є і енергетичний сектор України.

Основними недоліками використання вичерпних джерел енергії є їх негативний вплив на екологію навколишнього середовища, зміна клімату та обмежений характер. Крім того, варто відзначити геополітичну складову вартості традиційних джерел енергії. Так, політична нестабільність на території України, що досягла свого піка в 2014 році, девальвація гривні та початок віськового конфлікту на сході України, негативно позначилися на енергетичному сек-

торі держави.

Зазначені вище проблеми, викликали значний інтерес до стрімко зростаючого тренду впровадження альтернативних джерел енергії. Найбільш швидкозростаючою відновлювальною технологією видобутку електроенергії є сонячна енергія, яка володіє низкою переваг: легке поєднанням з традиційними джерелами, гнучкість інсталяції, екологічність у роботі та мінімальна необхідність в обслуговуванні. Окрім цього, широке розповсюдження сонячної енергетики на території України зумовлено сприятливим правовим полем і високим рівнем інсоляції.

Густина потужності сонячного випромінювання, яке надходить на поверхню землі складає близько  $1300 \text{ Вт/м}^2$ . Однак, в електроенергію перетворюється лише частина випромінювання, що визначається коефіцієнтом корисної дії фотоперетворювачів. Серед основних факторів впливаючих на роботу сонячних панелей [1], виділяються ступінь освітлення та просторове розташування панелей.

Застосування динамічних пристроїв – сонячних трекерів, дозволяє значно підвищити кількість продукованої електроенергії, шляхом перпендикулярної орієнтації площини фотоперетворювача відносно сонячних променів. За ступенем свободи, розрізняють трекари з однією віссю обертання (як правило азимутальною) та двома (азимутальною і зенітною).

Найпродуктивнішими з точки зору збільшення обсягів виробництва електроенергії є трекінгові установки з двома ступенями свободи. Ефективність роботи сонячної електростанції після впровадження даної технології збільшується від 25% [2–3] та залежить від низки факторів – погодні умови, місце експлуатації та безумовно вартість системи, оскільки даний різновид установок володіє складнішим конструктивним виконанням порівняно з одновісними та стаціонарними сонячними станціями.

Близько 27% експлуатованих у світі сонячних електростанцій обладнані системами стеження за Сонцем [4], проте на сьогодні дана технологія збільшення коефіцієнта корисної дії сонячних систем не отримала широкого розповсюдження на території нашої країни.

#### **Постановка задачі**

Задачею дослідження є визначення показників річної ефективності роботи трекінгової системи з двома ступенями свободи, розташованої на території України.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Для розрахунку показників ефективності

роботи системи орієнтації сонячних фотомодулів, використовується методика [5], яка дозволяє обчислити погодинний потік загальної сонячної радіації, що падає на поверхню площини під будь-яким кутом до горизонту і орієнтовану в будь-якому напрямку.

Розрахунок інтенсивності сонячного світла, що надходить на похилу площину, відбувається за допомогою схеми, зображеної на рис. 1.

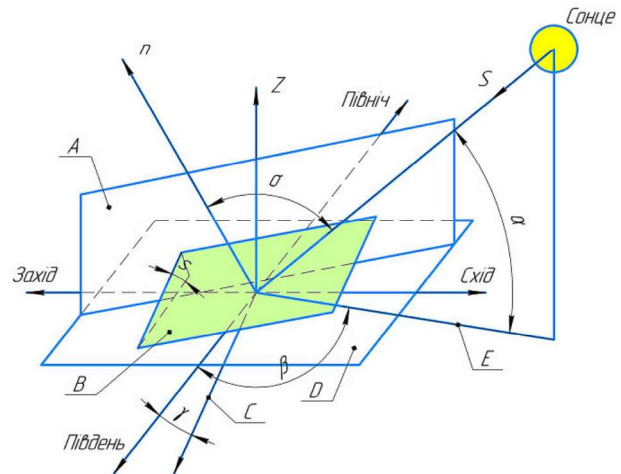


Рис. 1. Діаграма визначення сонячного випромінювання для орієнтованої площини

На рис. 1 наведено наступні позначення: А – вертикальна площина; В – похила площина фотоперетворювача; С – горизонтальна проекція нормалі на похилу площину; D – горизонтальна площина; E – горизонтальна проекція сонячного світла; Z – нормаль до горизонтальної площини; n – нормаль до похилої площини; S – пряме сонячне світло;  $\alpha$  – сонячна висота;  $\beta$  – кут азимуту сонячної енергії;  $\gamma$  – кут азимуту площини;  $\sigma$  – кут падіння прямого сонячного випромінювання;  $s$  – кут нахилу площини.

При обчисленні загальної сонячної радіації ( $Q_{\text{inc}}$ ) враховується три компоненти радіаційного балансу [5]:

$$Q_{\text{inc}} = S_{\text{inc}} + D_{\text{inc}} + R_{\text{inc}}, \quad (1)$$

де  $S_{\text{inc}}$  – пряме сонячне випромінювання на похилу поверхню,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $D_{\text{inc}}$  – дифузна сонячна енергія,  $\text{Вт/м}^2$ ;  $R_{\text{inc}}$  – випромінювання відбите від поверхні Землі,  $\text{Вт/м}^2$ .

Пряме сонячне випромінювання, що надходить на земну поверхню, залежить від випро-

мінювання в ортогональній площині та кута падіння:

$$S_{\text{inc}} = S_{\text{ort}} + \cos(\sigma), \quad (2)$$

де  $S_{\text{ort}}$  – пряме сонячне випромінювання, яке падає в ортогонально орієнтованій площині до променів Сонця, Вт/м<sup>2</sup>.

Сонячне випромінювання ортогональної площини розраховується за формулою

$$S_{\text{ort}} = \frac{S_0 \cdot \sin(\alpha)}{\sin(\alpha) + c}, \quad (3)$$

де  $S_0$  – сонячна постійна, що дорівнює інтенсивності сонячної інсоляції для обраного регіону, Вт/м<sup>2</sup>;  $c$  – безрозмірний коефіцієнт, характеризуючий ступінь прозорості атмосфери.

У випадку стаціонарно встановленого фотоперетворювача, падіння сонячного світла під різними кутами до його площини визначається:

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

де  $\varphi$  – географічна широта, рад;  $\delta$  – схилення сонця, рад;  $\gamma$  – кут азимута площини, рад;  $\omega$  – годинний кут, рад;  $s$  – кут нахилу площини, рад.

Дифузне сонячне випромінювання, що надходить на поверхню модуля, визначається за формулою

$$D_{\text{inc}} = D_{\text{hor}} \cdot (0,55 + 0,434 \cdot \cos(\sigma) + 0,313 \cdot (\cos(\sigma))^2), \quad (5)$$

де  $D_{\text{hor}}$  – потік дифузного сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню, Вт/м<sup>2</sup>.

Оскільки відбита сонячна радіація від поверхні землі, що падає на похилу площину незначна, вона не має суттєвого впливу на загальну кількість енергії Сонця прийдешньої на планету. Таким чином, використовуючи наведені вище формули, можна обчислити загальну сонячну радіацію, що надходить на поверхню Землі:

$$Q_{\text{inc}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) = (S_{\text{inc}}(\varphi, \omega, \gamma, s, N) + D_{\text{inc}}(\varphi, \omega, s, N)). \quad (6)$$

Загальна питома енергія, що падає на поверхню фотомодуля площею 1 м<sup>2</sup>, дорівнює:

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} Q_{\text{inc}}(\omega) \cdot \frac{24}{2 \cdot \pi} \cdot d\omega, \quad (7)$$

де  $\omega_1, \omega_2$  – годинний кут, пов'язаний з моментом початку і закінчення радіаційного процесу відповідно, рад.

Таким чином, використовуючи вищеописану методику, розраховується рівень питомої інсоляції для типового дня за різних погодних умов. Характеристики хмарності визначаються на основі баз даних метеорологічних спостережень.

В якості географічних координат умовного розташування трекінгової системи та стаціонарно встановлених фотомодулів, визначено південну частину обласного центру Дніпропетровської області. Точні географічні координати місцезнаходження: 48,37 градусів північної широти та 35,04 градусів східної довготи. Варіант стаціонарного розташування сонячних панелей передбачає їх орієнтацію на південь, з фіксованим кутом нахилу у 45 градусів. Ступінь траєкторії руху трекінгової системи має кути переміщення 200 та 90 градусів за азимутальним і зенітним напрямками відповідно.

Показники ефективності надходження сонячного випромінювання на стаціонарну та двовісну сонячні системи визначені з допомогою високорівневої мови програмування Python, використовуючи модулі для візуалізації (Matplotlib) та розрахунків (SciPy).

На рис. 2 зображено порівняльну характеристику роботи стаціонарної та трекінгової системи протягом одного року експлуатації.

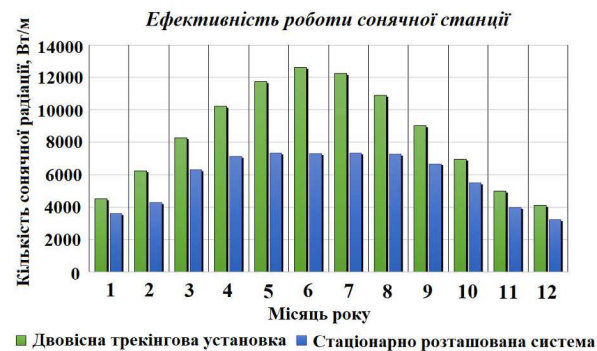


Рис. 2. Характеристика роботи сонячних систем протягом одного року експлуатації

Відповідно до наведених графіків, продуктивність трекінгової установки з двома ступенями свободи є найбільшою, протягом періоду часу з квітня по вересень. Виробництво електроенергії досягає свого піку у червні (рис. 3), коли фотомодулі, розташовані на трекінговій системі, здатні генерувати на 72,03% більше

енергії, аніж стаціонарно встановлені фотоперетворювачі.

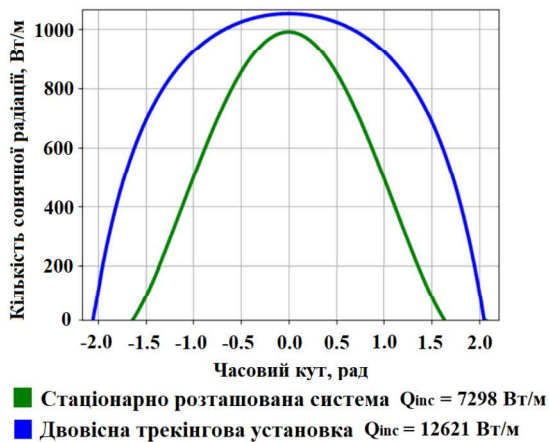


Рис. 3. Надходження сонячної енергії на  $1 \text{ м}^2$  орієнтованого та стаціонарно встановленого фотоперетворювача протягом 15 червня

Найменш оптимальним періодом для експлуатації орієнтованої системи з точки зору її ефективності є зимовий період часу. У грудні кількість сонячної енергії, поглинутої поверхнею фотомодулів трекінгової установки, збільшується лише на 26,11% відносно стаціонарної системи (рис. 4).

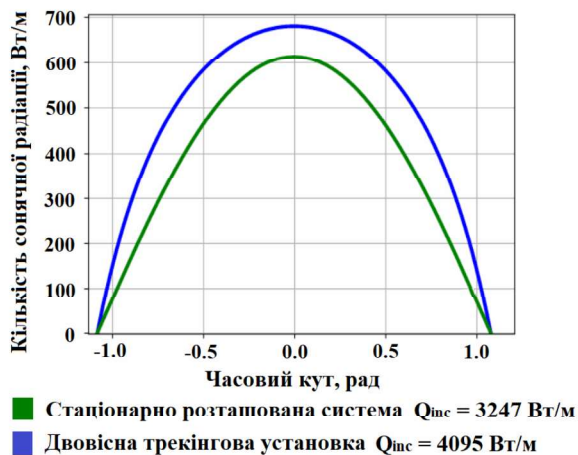


Рис. 4. Надходження сонячної енергії на  $1 \text{ м}^2$  орієнтованого та стаціонарно встановленого фотоперетворювача протягом 15 грудня

З вище представлених рисунків видно, що в період скорочення тривалості сонячного дня, відбувається часткове нівелювання переваги орієнтованої системи, сприймати поверхнею фо-

томодулів більшу кількість сонячного випромінювання на початку та закінченні світлового дня.

Таким чином, враховуючи низьке положення Сонця над горизонтом та коротку тривалість світлої пори доби протягом зимового періоду, для оптимізації співвідношення «ефективність роботи – енерговитрати» трекінгової системи, слід розглянути часткове обмеження амплітуди роботи установки за двома площинами.

Загальна питома енергія, що надходить на площину  $1 \text{ м}^2$  стаціонарно встановленого фотоперетворювача протягом одного року експлуатації, становить 69937 Вт. Застосування трекінгової системи з двома ступенями свободи дозволяє збільшити кількість поглинутої сонячної енергії до 101815 Вт.

Відтак, ефективність роботи сонячної станції розташованої в південній частині м. Дніпро з застосуванням трекінгової технології збільшується в середньорічній перспективі на 45%.

### Висновки

В результаті здійсненого дослідження визначено ефективність роботи фотоперетворювача, розташованого на орієнтованій в двох площинах та стаціонарній конструкції, протягом одного року експлуатації. Отримані дані дозволяють спрогнозувати економічну доцільність від застосування трекінгової системи з двома ступенями свободи, розташованої на території Дніпропетровської області.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vidyandandan K.V. An overview of factors affecting the performance of solar PV systems. Energy Scan House J Corp Plan NTPC Ltd New Delhi. – 2017. – № 27. – P.2-8.
2. Розробка системи стеження за рухом сонця для підвищення ККД сонячних електростанцій. / Я.А. Кулик, Б.П. Книш, М.В. Шкуран, О.В. Черноволик. – Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 20. – С.19-24.
3. Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants. / S. Bazyari, R. Keypour, S. Farhangi, A. Ghaedi, K. Bazyari. – A Journal of Power and Energy Engineering. – 2014. – № 2. – P.718-728. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24096>
4. Comparison of Efficiencies of Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. / S. Deepthi, A. Ponni, R. Ranjitha, R. Dhanabal. // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. – 2013. – Vol.2, Issue 2. – P.425-430.

5. Balzhinimaev B. Usage of solar trackers in PV systems. Poster 2017 Conference. — Prague, Czech Republic. — 2017. — P.1-6.

Надійшла до редакції 13.01.2020

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ТРЕКИНГОВЫХ СИСТЕМ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Подгородецкий А.В., Титова Е.В., Кравец В.И.

В статье затронута проблема повышения производительности функционирования солнечных электростанций. Эффективным путем увеличения потока солнечной энергии на наклонную плоскость фотопреобразователей является внедрение систем, которые способны менять пространственную ориентацию солнечных модулей в течение светового дня в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Основное внимание в работе акцентировано на определении количественных показателей падающей солнечной энергии при применении ориентированной в пространстве и стационарной системы установки фотомодулей. Выбранная авторами методика расчета позволяет найти интенсивность солнечного излучения на поверхности плоскости направленной в любом направлении для типичного дня и при разных погодных условиях. Порядком проведения расчета предусмотрено: определение склонения Солнца к северному полушарию, времени рассвета и заката небесного светила для выбранной местности, установление высоты Солнца и угла падения солнечного излучения на поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , ориентированную под разными углами к горизонтальной плоскости. Вычисления общей солнечной инсоляции выполнено путем интегрирования найденных величин радиационного баланса, по определенной продолжительности одного светового дня. Представлено сравнение интенсивности поступления солнечной энергии на стационарную и ориентированную плоскости в течение одного года эксплуатации. Установлено, что наиболее благоприятный период времени для максимального использования потенциала трекинговых систем определяется продолжительностью светового дня. Так, наибольшая эффективность использования ориентированной технологии установки фотомодулей становится доступной в весенний и летний периоды времени. Наименьшая производительность таких систем относительно стационарных наблюдается в течение зимнего времени года, когда продолжительность светового дня минимальна, а потому, определено целесообразным изменять режим работы системы в соответствующие промежутки времени. Проведенные расчеты позволяют спрогнозировать экономический эффект от внедрения систем ориентации солнечных фотомодулей с двумя степенями свободы в зависимости от рабочих характеристик и стоимости отдельных систем.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, трекинг, фотопреобразователь, радиационный баланс, излучение.

## EFFICIENCY OF USING SOLAR TRACKING SYSTEMS WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

Pidhorodetskiy O.V., Titova O.V., Kravets V.I.

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

The article touches upon the problem of increasing the efficiency of the functioning of solar power plants. An effective way to increase the flow of solar energy to the inclined plane of photo converters is the introduction of systems that are able to change the spatial orientation of solar modules during daylight hours in the vertical and horizontal planes. The work focuses on determining the quantitative indicators of incident solar energy when using a space-oriented and stationary installation system of photo modules. The calculation method chosen by the authors allows finding the intensity of solar radiation on the surface of a plane oriented in any direction, for a typical day and under different weather conditions. The calculation procedure is built for: determining the declination of the Sun to the northern hemisphere, the time of sunrise and sunset of the celestial body for the selected area, establishing the height of the Sun and the angle of incidence of solar radiation on a surface of  $1 \text{ m}^2$ , oriented at different angles to the horizontal plane. Calculation of total solar insolation is performed by integrating the found values of the radiation balance over a specific duration of daylight. A comparison of the intensity of the supply of solar energy to a stationary and oriented plane during one year of operation is presented. It has been established that the most favourable period of time for maximum use of the potential of tracking systems is determined by the length of daylight hours. So, the highest efficiency of using oriented technology for installing photomodels becomes available in spring and summer. The lowest efficiency of such systems relative to stationary counterparts is observed during the winter season, when the daylight hours are minimal, and therefore, the change of the mode of operation of the system at appropriate intervals is required. The calculations allow predicting the economic effect of the introduction of orientation systems for solar photomodels with two degrees of freedom, depending on the performance and cost of individual systems.

**Keywords:** solar energy, tracking, photovoltaic converter, radiation balance, radiation.

## REFERENCES

1. Vidyandandan K. V. An overview of factors affecting the performance of solar PV systems. Energy Scan House J Corp Plan NTPC Ltd New Delhi, 2017, no. 27, pp.2-8.
2. Rozrobka systemy stezhennja za rukom soncja dlja pidvyshhennja KKD sonjachnyh elektrostancij. Ja.A. Kulyk, B.P. Knysh, M.V. Shkuran, O.V. Chernovolyk [Development of the solar tracking system to increase the efficiency of solar power plants]. *Visnyk NTU «HPI»*. Serija «Mehaniko-tehnologichni systemy ta komplekсы» [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes]. 2017, no. 20, pp.19-24. (in Ukrainian).
3. A Study on the Effects of Solar Tracking Systems on the Performance of Photovoltaic Power Plants. S. Bazyari, R. Keypour, S. Farhangi, A. Ghaedi, K. Bazyari. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, no. 2, pp.718-728. <https://doi.org/10.4236/jpee.2014.24096>
4. Comparison of Efficiencies of Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. S. Deepthi, A. Ponni, R. Ranjitha, R. Dhanabal. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, 2013, vol.2, Issue 2, pp.425-430.
5. Balzhinimaev B. Usage of solar trackers in PV systems. Poster 2017 Conference, 2017, pp.1-6.