

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-44>  
УДК 621.311.243

**ГОРБАЧОВ АНТОН**

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0009-0002-1552-7545>  
e-mail: [toha.gorbi@gmail.com](mailto:toha.gorbi@gmail.com)

**ПІОНТКЕВИЧ ОЛЕГ**

Вінницький національний технічний університет  
<https://orcid.org/0000-0002-3460-8060>  
e-mail: [piontkevych@vntu.edu.ua](mailto:piontkevych@vntu.edu.ua)

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІБРИДНОГО АЛГОРИТМУ ДВООСЬОВОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

У статті розглядаються перспективи підвищення ефективності генерації електроенергії сонячними електростанціями за рахунок покращення систем активного стеження за Сонцем. Проаналізовано існуючі методи позиціонування сонячних панелей (сенсорні, астрономічні, гібридні та на основі комп'ютерного зору), виявлено їхні переваги та критичні недоліки в умовах мінливої хмарності.

Запропоновано структуру гібридного алгоритму, що поєднує математичний розрахунок як базовий контур та сенсорне мікродоведення за допомогою оптичних датчиків із застосуванням зони нечутливості для компенсації механічних люфтів. Програмне впровадження порогу хмарності дозволяє системі автоматично перемикатися в режим розрахункового ведення, усуваючи проблему хибних спрацювань і блукання трекера. Удосконалено кінематичну схему установки з використанням черв'ячного азимутального приводу для забезпечення ефекту самозальмування. Виконано порівняльну оцінку техніко-економічних показників для сонячних електростанцій потужністю на 5 кВт. Розрахунки підтвердили, що впровадження запропонованої гібридної системи забезпечує приріст генерації на рівні 35% при раціональних додаткових капіталовкладеннях, що забезпечує термін окупності близько 2,8 року.

Запропоноване комплексне рішення особливо актуальне для приватних домогосподарств та малого бізнесу, що прагнуть максимізувати власну енергетичну автономність. Інтеграція мікроконтролерного розрахунку з бюджетними оптичними модулями формує оптимальний баланс між високою точністю наведення та надійністю механіки без дублювання капітальних витрат. Запропоновано практичні рекомендації щодо вибору апаратного забезпечення двоосьових трекерів. Результати дослідження можуть слугувати інженерною базою для проектування та серійного виробництва вітчизняних комерційних трекерів середнього цінового сегмента.

**Ключові слова:** сонячна електростанція, трекер, гібридний алгоритм, економічна ефективність, надійність.

**HORBACHOV ANTON, PIONTKEVYCH OLEH**

Vinnitsia National Technical University

## EFFICIENCY OF THE HYBRID ALGORITHM FOR TWO-AXIS POSITIONING OF SOLAR PANELS

The article examines the prospects for increasing the efficiency of electricity generation by solar power plants by improving active Sun tracking systems. Existing methods of positioning solar panels (sensor, astronomical, hybrid and based on computer vision) are analyzed, their advantages and critical shortcomings in conditions of variable cloudiness are identified.

A hybrid algorithm structure is proposed that combines mathematical calculation as a basic circuit and sensor micro-adjustment using optical sensors with the use of a dead zone to compensate for mechanical backlash. Software implementation of the cloudiness threshold allows the system to automatically switch to the calculated guidance mode, eliminating the problem of false alarms and tracker wandering. The kinematic scheme of the installation has been improved using a worm azimuth drive to ensure the self-braking effect. A comparative assessment of technical and economic indicators for solar power plants with a capacity of 5 kW is performed. Calculations confirmed that the implementation of the proposed hybrid system provides a 35% increase in generation with rational additional capital investments, which allows for a payback period of about 2.8 years.

The proposed comprehensive solution is especially relevant for private households and small businesses that seek to maximize their own energy autonomy. The integration of microcontroller calculation with budget optical modules forms the optimal balance between high guidance accuracy and mechanical reliability without duplication of capital costs. Practical recommendations are offered for the selection of hardware for two-axis trackers. The results of the study can serve as an engineering basis for the design and serial production of domestic commercial trackers of the middle price segment.

**Keywords:** solar power plant, tracker, hybrid algorithm, economic efficiency, reliability.

Стаття надійшла до редакції / Received 19.03.2026  
Прийнята до друку / Accepted 16.04.2026  
Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Горбачов Антон, Піонткевич Олег

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В умовах інтенсивного розвитку розподіленої генерації та необхідності забезпечення енергетичної автономії об'єктів інфраструктури, підвищення ефективності сонячних електростанцій набуває критичного значення. Попри постійне вдосконалення фотоелектричних перетворювачів, значна частка потенційної енергії втрачається через неоптимальний кут падіння сонячних променів [1, 2, 3]. Застосування динамічних систем стеження дозволяє суттєво збільшити генерацію, проте створює нову інженерну проблему – пошук раціонального компромісу між точністю позиціонування, надійністю та вартістю апаратного забезпечення. Використання виключно оптичних сенсорів часто призводить до збоїв та втрати фокусу у хмарну погоду [4], тоді як

впровадження високоточних систем на базі комп'ютерного зору не виправдано збільшує капітальні витрати та подовжує термін окупності, особливо для малих та середніх сонячних електростанцій.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю обґрунтування ефективності алгоритму керування для забезпечення надійного відстеження Сонця при мінімальних термінах окупності капіталовкладень.

#### Аналіз досліджень та публікацій

За останні роки перехід на альтернативні джерела енергії став пріоритетним напрямком державної політики провідних країн світу [5, 6, 7]. В Україні також активно впроваджується цей шлях через проблеми із централізованою подачею електроенергії, які спричинені систематичними атаками на енергосистему з боку країни-агресора [8, 9]. Сонячна енергетика забезпечує енергетичну незалежність за відносно невеликих витрат, термін окупності яких може становити до 8 років [10].

Встановлено, що коефіцієнт корисної дії комерційних сонячних панелей зазвичай не перевищує 25% [11, 12]. Однак, у реальних умовах експлуатації цей показник суттєво знижується через вплив кліматичних факторів, нагрівання поверхні, часткове затінення, а головне – через відсутність постійного перпендикулярного кута падіння сонячних променів на площину фотоелемента [13, 14].

Щоб уникнути цих втрат і максимізувати генерацію, сучасні конструктивні рішення передбачають перехід від статичних рам до динамічних систем стеження за сонцем – сонячних трекерів [15, 16]. Використання двоосьових трекерів здатне підвищити загальну генерацію електростанції до 40%. Проте, на сьогодні існує значна кількість методів керування такими системами: від простих оптичних датчиків до складних систем на базі комп'ютерного зору та астрономічних розрахунків [17, 18, 19].

Базовим етапом розвитку систем автоматизації в сонячній енергетиці є розробка надійних механічних платформ. У дослідженні [2] автори детально описують принципи створення автоматизованого трекера, фокусуючись на поєднанні апаратної частини та базового алгоритму керування. Робота демонструє, що автоматичне відстеження Сонця дозволяє значно підвищити виробіток енергії порівняно зі статичними конструкціями. Проте, автори також вказують на обмеженість простих систем у складних метеорологічних умовах. Це стимулює подальший пошук методів підвищення точності позиціонування.

Проблема надійності за складних погодних умов детальніше розглядається у праці [18]. Автори пропонують математичну модель двоосьового трекера, інтегровану з монокулярною системою зору. Дослідження включає етап експериментальної валідації на вбудованих системах керування. Це дозволяє синхронізувати теоретичну модель руху Сонця з візуальними даними в режимі реального часу. Для вдосконалення таких алгоритмів дослідники почали використовувати спеціалізовані бази даних.

Важливим інструментом для навчання та перевірки подібних систем є датасет [19]. Він містить велику кількість зображень неба, синхронізованих із показниками сонячної іррадіації. Використання таких даних дозволяє розробникам тестувати алгоритми фільтрації завад без необхідності проведення тривалих польових спостережень. Це значно прискорює процес оптимізації програмного забезпечення для трекерів. На фоні глобальних досліджень особливої ваги набуває адаптація цих технологій до локальних енергетичних систем.

Специфіку керування інтегрованими системами в контексті вітчизняного енергоринку розглянуто у праці [13]. Автор аналізує режими роботи сонячної електростанції, що поєднують різні джерела енергії та системи накопичення. При цьому підкреслюється важливість точного прогнозування та орієнтації панелей для стабілізації вихідної потужності. Проте, аналіз показує, що для широкого впровадження необхідні рішення з мінімальною доданою вартістю.

Одним із останніх розроблених методів стає концепція, представлена у праці [4]. Автори пропонують найбільш збалансований підхід: поєднання астрономічного алгоритму для базового орієнтування та фотодатчиків для фінального корегування (рисунк 1). Це дозволяє системі залишатися працездатною навіть у похмуру погоду, зберігаючи високу точність у сонячні дні. Саме такий гібридний метод забезпечує оптимальне співвідношення між приростом генерації та витратами на обладнання, що є ключовим для скорочення термінів окупності сонячної електростанції.

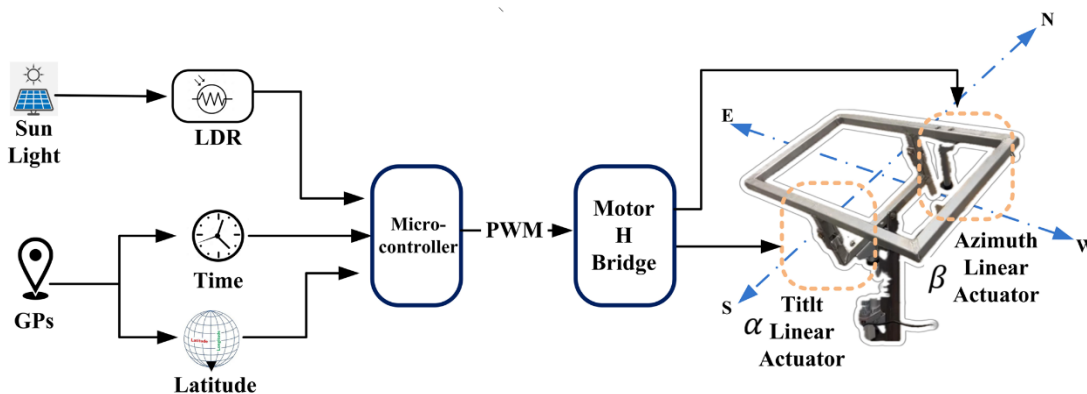


Рис. 1. Гібридна двоосьова система відстеження сонця [4], що поєднує в собі вимірювання сонячного світла в режимі реального часу з GPS-відстеженням на основі часу для оптимізованого захоплення сонячної енергії

У праці [3] досліджується застосування CCD-матриць як датчиків зворотного зв'язку та забезпечується перехід до прецизійних оптичних технологій. Автори доводять, що використання камери дозволяє досягти низької похибки наведення, яка не перевищує частки градуса. Результати польових випробувань підтверджують ефективність такого підходу для висококонцентрованих фотоелектричних систем. Однак складність обробки зображень у реальному часі вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Методи комп'ютерного зору також використано у праці [17]. Дослідження зосереджене на алгоритмічній частині обробки візуальних даних для ідентифікації центру сонячного диска. Автори пропонують ефективні методи фільтрації шуму та розпізнавання об'єктів на фоні неба. Такий підхід дозволяє нівелювати вплив механічних люфтів конструкції трекера. Разом з тим, постає питання стабільності таких алгоритмів за умов мінливої хмарності та атмосферних завад.

Аналіз промислового досвіду провідних виробників показує, що компанії Nextracker (США) та Array Technologies (США) надають перевагу астрономічним методам, компанія Deger Energie (Німеччина) спеціалізується на високоточних сенсорних системах, тоді як компанія Mechatron Solar (ЄС/США) впроваджує гібридні алгоритми для точного керування масивними двоосьовими трекерами.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** обґрунтування ефективності застосування гібридного алгоритму щодо керування двоосьовою сонячною панеллю для максимізації енерговиробітку при мінімізації терміну окупності. Щоб досягти поставленої мети, сформульовано наступні завдання: проаналізувати існуючі методи та системи активного позиціонування сонячних панелей, визначити їхні основні переваги та недоліки в умовах мінливої хмарності; дослідити структуру гібридного алгоритму позиціонування та особливості його апаратної реалізації; виконати порівняльну оцінку техніко-економічних показників різних систем стеження за Сонцем; сформулювати рекомендації щодо вибору оптимального апаратного забезпечення для двоосьових сонячних трекерів з огляду на їх ефективність та економічну доцільність.

#### Виклад основного матеріалу

Гібридна двоосьова система відстеження сонця [4] поєднує надійність математичного моделювання з гнучкістю сенсорної корекції. Такий підхід дозволяє нівелювати накопичення механічних похибок кінематичної схеми та забезпечити безперервне відстеження Сонця навіть за умов щільної хмарності. Однак, авторами запропонована реактивна система. Якщо після довгої хмарності Сонце вийде з іншого боку, LDR-датчикам доведеться шукати його через усе небо, постійно вмикаючи двигуни. Крім цього в якості приводів авторами роботи запропоновано лінійні актуатори, що може бути застосовано для малих лабораторних прототипів. Така кінематична схема фізично не дозволяє повернути панель на 270 градусів і є дуже нестабільною при сильних бокових вітрах.

Тому пропонується вдосконалення кінематичної схеми за рахунок азимутального приводу на основі черв'ячної передачі для однієї центральної опори. Ключовою інженерною перевагою такого рішення є властивість самогальмування: при знеструмленні двигуна або пікових поривах вітру механізм не повертається, що дозволяє відмовитися від складних і дорогих електромагнітних гальм. Обертання в горизонтальній площині забезпечується двигуном постійного струму з планетарним редуктором та магнітним енкодером на валу для підрахунку імпульсів зворотного зв'язку.

У свою чергу для зміни кута нахилу панелей застосовано зенітний привод на основі електромеханічного лінійного актуатора із кульково-гвинтовою передачею. Шток актуатора утворює динамічний трикутник між нерухомою баштою та поворотною рамою.

Керує системою 32-бітний мікроконтролер і до нього інтегровані: модуль GPS, оптичний сенсорний модуль (масив із чотирьох фоторезисторів або фотодіодів, розділених хрестоподібним тіньовим екраном) та драйвери двигунів.

Розроблений гібридний алгоритм (рисунок 2) функціонує як дворівнева система керування, що динамічно перемикається між режимами астрономічний та сенсорний залежно від поточних метеоумов. Гібридний алгоритм враховує такі етапи: ініціалізація та астрономічний прорахунок; оцінка метеорологічних умов; робота в режимі хмарності; гібридна корекція; зона нечутливості.

Ініціалізація та астрономічний прорахунок відбуваються на початку кожного циклу. При цьому мікроконтролер перевіряє поточний час і обчислює ідеальні кути азимута та зеніту. У світлу пору доби запускається алгоритм Solar Position Algorithm, що дає незначну похибку позиціонування.

Оцінка метеорологічних умов забезпечує фільтрацію завад. Мікроконтролер зчитує сумарний рівень освітленості з усіх чотирьох фотодатчиків. Якщо цей рівень нижчий за експериментально встановлений поріг хмарності, система розпізнає небо як затягнуте хмарами.

Робота в режимі хмарності зводиться до того, що оптичний контур зворотного зв'язку програмно відключається. Трекер рухається виключно за математичною траєкторією. Це повністю усуває проблему постійного пошуку Сонця трекером та хибних спрацювань на найяскравіші краї хмар, що характерно для класичних сенсорних систем.

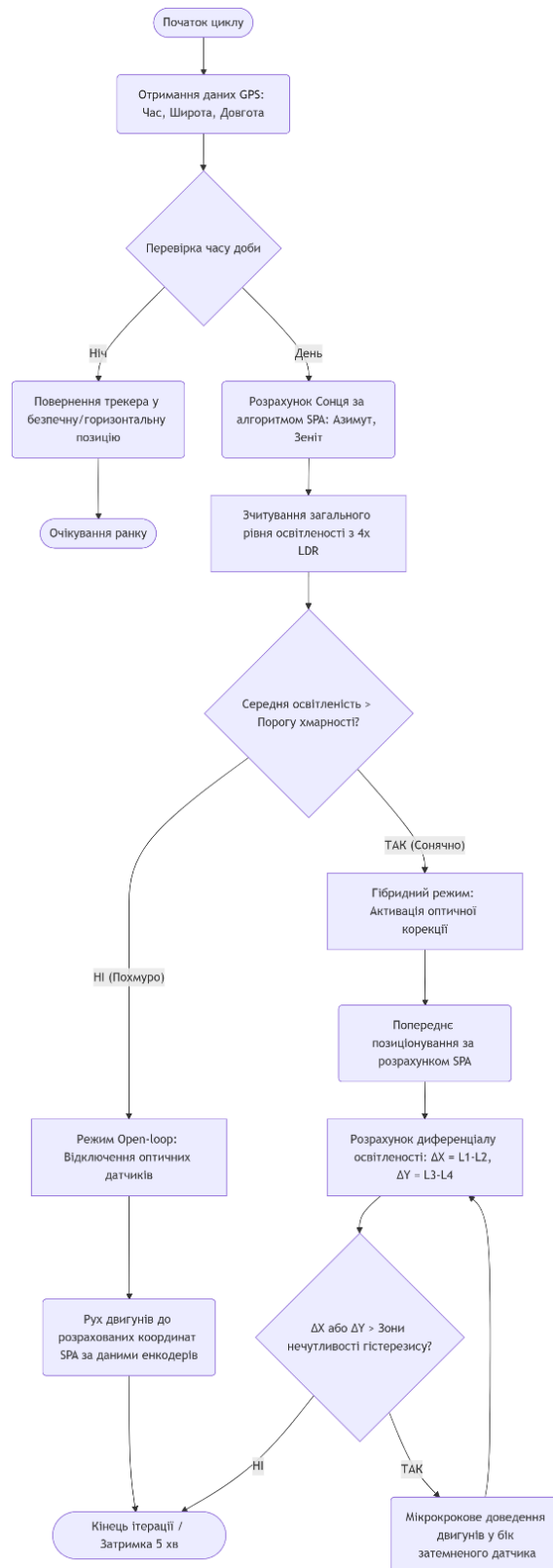


Рис. 2. Блок-схема гібридного алгоритму двоосьового позиціонування сонячних панелей

Гібридна корекція відбувається лише тоді, коли рівень освітленості свідчить про наявність прямого сонячного проміння. Система керування після грубого виходу на розрахункові координати активує контур оптичної корекції. Мікроконтролер обчислює диференціал між східним/західним ( $\Delta X$ ) та верхнім/нижнім ( $\Delta Y$ ) датчиками.

Зона нечутливості реалізується для запобігання вібраціям рами та постійному увімкненню/вимкненню двигунів. Мікродоведення активується лише тоді, коли диференціал освітленості перевищує цей заданий поріг. Завдяки цьому компенсуються будь-які накопичені механічні похибки, температурні розширення елементів кріплення, гарантуючи ідеальний перпендикулярний кут падіння променів.

Для обґрунтування доцільності впровадження запропонованого гібридного алгоритму було проведено техніко-економічне моделювання. В якості базового об'єкта розглядалася сонячна електростанція малої потужності до 5 кВт, розташована за даними PVGIS для координат Вінницької області. Вибір такої потужності зумовлений високим попитом на автономні енергосистеми серед домогосподарств та малого бізнесу.

За даними метеорологічних баз PVGIS, базова річна генерація для статично закріпленої фотоелектричної системи оптимального нахилу в даному регіоні становить орієнтовно 1150 кВт·год на 1 кВт встановленої потужності. Тобто базовий річний виробіток для фіксованої системи на 5 кВт буде складати 5750 кВт·год/рік.

Впровадження двоосьового трекера дозволяє збільшити генерацію за рахунок усунення косинусних втрат у ранкові та вечірні години. Залежно від типу керування, приріст генерації відрізняється:

- сенсорна система [15] забезпечує приріст близько 26% через періодичні збої та втрату фокусу в похмурі дні;
- астрономічна система [12] забезпечує приріст близько 30% через відсутність зворотного зв'язку накопичує кінематичні похибки механіки, що знижує загальний потенціал системи;
- гібридна система [4] забезпечує стабільний приріст близько 35% завдяки безперервному математичному веденню та корекції люфтів;
- система комп'ютерного зору [3] дає максимальний приріст близько 37%, оскільки має найменшу похибку наведення.

Розрахункова генерація гібридної системи складе 7762.5 кВт·год/рік, що додатково дає 2012.5 кВт·год/рік згенерованої енергії. При усередненій вартості зекономленої або реалізованої електроенергії на консервативному рівні 0.15 EUR/кВт·год, додаткова генерація забезпечує прибуток близько 302 EUR на рік. В таблиці 1 наведено зведені результати порівняльної оцінки техніко-економічних показників для сонячних електростанцій з різними системами позиціонування та потужністю 5 кВт.

Таблиця 1

#### Оцінка техніко-економічних показників систем позиціонування

Метод позиціонування	Додаткові витрати, EUR	Очікуваний приріст генерації, %	Додатковий дохід, EUR/рік	Орієнтовний термін окупності, роки
Сенсорний	~ 450	26	224	~ 2.0
Астрономічний	~ 800	30	259	~ 3.1
Гібридний	~ 850	35	302	~ 2.8
Комп'ютерний зір	~ 1150	37	319	~ 3.6

Згідно з таблицею 1 сенсорна система має найменший формальний термін окупності. Однак, вона характеризується найвищим рівнем поломок через надмірну роботу двигунів при пошуку сонця та швидку деградацію оптичних датчиків, що може призвести до прихованих експлуатаційних витрат та простою обладнання. Тому, найбільш ефективною по надійності та терміну окупності вважаємо гібридну двоосьову систему відстеження сонця на основі гібридного алгоритму.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що застосування надточних систем на базі CCD-матриць для малих та середніх сонячних електростанцій є економічно недоцільним. Незначний додатковий приріст генерації не покриває високої вартості мікрокомп'ютерів, камер та складності їхнього калібрування, що подовжує термін окупності майже на рік.

З огляду на надійність та економічну доцільність, для двоосьових трекерів рекомендується застосування гібридної системи керування, яка забезпечує стабільну роботу в похмуру погоду, зберігає високу точність та досягає окупності додаткових інвестицій менш ніж за 3 роки.

Основними рекомендаціями є:

- використання мікроконтролерів із підтримкою реального часу, що дозволяє паралельно обробляти математичні розрахунки та дані з датчиків;
- пріоритетне встановлення черв'ячних редукторів для основної осі, що дозволяє відмовитися від дорогих систем активного гальмування;
- використання магнітних енкодерів на валах двигунів для створення внутрішнього контуру зворотного зв'язку, що компенсує пропуски кроків;
- поєднання мікроконтролерів із підтримкою реального часу з аналоговими оптичними модулями як допоміжного інструменту корекції на розрахункових координатах позиціонування сонячних панелей.

#### Висновки з даного дослідження

##### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За результатами аналізу існуючих методів активного позиціонування встановлено, що ізольоване використання базових технологій має суттєві недоліки в умовах мінливої хмарності. Перевагу варто надавати гібридним системам позиціонування сонячних панелей, які мають вагомий переваги перед іншими методами активного позиціонування.

Досліджено та розроблено структуру гібридного алгоритму позиціонування, яка поєднує математичний розрахунок Сонця як базовий контур та сенсорне мікроведення як коригувальний контур зворотного зв'язку.

Виконано порівняльну оцінку техніко-економічних показників, яка довела високу рентабельність

гібридного методу. Розрахунки показали, що гібридний трекер при прирості генерації на рівні 35% дозволяє окупити інвестиції приблизно за 2,8 року.

Сформульовано рекомендації щодо вибору апаратного забезпечення для двоосових трекерів сонячних електростанцій. За рахунок використання гібридного алгоритму двоосового позиціонування сонячних панелей забезпечується необхідна надійність та економічна ефективність.

### Література

1. Fathabadi H. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems. *Appl. Energy*, 2016. No. 173, P. 448-459. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.109>
2. Tharamuttam J. K., Andrew K. N. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. In *Energy Procedia*, 2017. No. 143, Elsevier Ltd. P. 629-634. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.738>
3. Wu J. C., Lin W. C. High accuracy sun-tracking using CCD and field test for PV system. In *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2013. Vol. 1556, No. 1, pp. 214-217. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4822234>
4. Hammam M. et al. A hybrid dual-axis solar tracking system: Combining light-sensing and time-based GPS for optimal energy efficiency. *Energies*, 2025. No. 18(1), 217. URL: <https://doi.org/10.3390/en18010217>
5. Mengi-Dinçer H., Ediger V.S., Yesevi C.G. Evaluating the International Renewable Energy Agency through the lens of social constructivism. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021; No. 152, 111705 URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111705>
6. Jager-Waldau A. Snapshot of Photovoltaics 2024. *EPJ Photovoltaics*, 2024. No. 15, 21. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024018>
7. Березюк О.В., Краєвський В.О. Світові тенденції збільшення кількості біогазових установок на полігонах твердих побутових відходів. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2021. № 1. 5 с. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2021-1-7-11>
8. Коваленко Ю., Лазаренко Д., Марченко О. Енергетична безпека країни під час війни: Бар'єри та перспективи подолання. Вісник Хмельницького національного університету. 2024 № 1. С. 262-266. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-41>
9. Лісовий А., Андрух О. Енергетична безпека України: виклики війни та перспективи відновлення економічного потенціалу. Український економічний часопис, 2025. № 8. С. 40-43. URL: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-8-7>
10. Green M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 64). *Prog. Photovolt.* 2024. No. 32, P. 425-441. URL: <https://doi.org/10.1002/pip.3831>
11. Li G. et al. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation. *Energy* 2018, No. 158, P. 41-58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>
12. Kumba K. et al. Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions: A review. *Energy Rep.* 2024, No. 12, P. 3566-3583. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2024.09.038>
13. Мартинюк В., Руденко О. Метод керування гібридною сонячною електростанцією. *Measuring and computing devices in technological processes*, No. 4, С. 58-61. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-6>
14. Горбачов А. С., Піонткевич О. В. Аналіз конструктивних рішень для орієнтації сонячних панелей. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Вінниця : ВНТУ, 2025. Вип. 3. С. 198-205. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-3-198-205>
15. Sadeghi R. et al. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems. *Energies*, 2025, No. 18, 2553. URL: <https://doi.org/10.3390/en18102553>
16. Kowalik R., Nesovic A. Stepwise Single-Axis Tracking of Flat-Plate Solar Collectors: Optimal Rotation Step Size in a Continental Climate. *Energies*, 2025, No. 18(21), 5776 URL: <https://doi.org/10.3390/en18215776>
17. Lee C. Y., Chou P. C., Chiang C. M., Lin C. F. The Development of Sun-Tracking System Using Image Processing. *Sensors*, 2013. No. 13(5), P. 5448-5459. URL: <https://doi.org/10.3390/s130505448>
18. Acosta-Banda A. et al. Design, Modeling, and Experimental Validation of a Dual-Axis Solar Tracking System with Embedded Control and Monocular Vision. *Energies*, 2025. No. 18(22), 5951. URL: <https://doi.org/10.3390/en18225951>
19. Terrén-Serrano G., Bashir A., Estrada T., Martínez-Ramón M. Girasol, a sky imaging and global solar irradiance dataset. *Data in Brief*, 2021. No. 35, 106914. 12 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106914>

### References

1. Fathabadi H. Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems. *Appl. Energy*, 2016. No. 173, P. 448-459. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.109>
2. Tharamuttam J. K., Andrew K. N. Design and Development of an Automatic Solar Tracker. In *Energy Procedia*, 2017. No. 143, Elsevier Ltd. P. 629-634. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.738>
3. Wu J. C., Lin W. C. High accuracy sun-tracking using CCD and field test for PV system. In *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2013. Vol. 1556, No. 1, pp. 214-217. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4822234>
4. Hammam M. et al. A hybrid dual-axis solar tracking system: Combining light-sensing and time-based GPS for optimal energy efficiency.

- Energies, 2025. No. 18(1), 217. URL: <https://doi.org/10.3390/en18010217>.
5. Mengi-Dinçer H., Ediger V.S., Yesevi C.G. Evaluating the International Renewable Energy Agency through the lens of social constructivism. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021; No. 152, 111705 URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111705>
  6. Jager-Waldau A. Snapshot of Photovoltaics 2024. *EPJ Photovoltaics*, 2024. No. 15, 21. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1051/epjpv/2024018>
  7. Bereziuk O.V., Kraievskiy V.O. Svitovi tendentsii zbilshennia kilkosti biohazovykh ustanovok na polihonakh tverdykh pobutovykh vidkhodiv. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2021. № 1. 5 s. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2021-1-7-11>
  8. Kovalenko Yu., Lazarenko D., Marchenko O. Enerhetychna bezpeka krainy pid chas viiny: Bariery ta perspektyvy podolannia. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 2024 № 1. S. 262-266. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-326-41>
  9. Lisovyi A., Andrukh O. Enerhetychna bezpeka Ukrainy: vyklyky viiny ta perspektyvy vidnovlennia ekonomichnoho potentsialu. *Ukrainskyi ekonomichnyi chasopys*, 2025. № 8. S. 40-43. URL: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-8-7>
  10. Green M. A. et al. Solar cell efficiency tables (version 64). *Prog. Photovolt.* 2024. No. 32, P. 425-441. URL: <https://doi.org/10.1002/ppp.3831>
  11. Li G. et al. A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation. *Energy* 2018, No. 158, P. 41-58. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.021>
  12. Kumba K. et al. Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions: A review. *Energy Rep.* 2024, No. 12, P. 3566-3583. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyrs.2024.09.038>
  13. Martyniuk V., Rudenok O. Metod keruvannia hibrydnoiu soniachnoiu elektrostantsiieiu. *Measuring and computing devices in technological processes*, No. 4, C. 58-61. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-6>
  14. Horbachov A. S., Piontkevych O. V. Analiz konstruktyvnykh rishen dlia oriiientatsii soniachnykh panelei. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Vinnytsia : VNTU*, 2025. Vyp. 3. S. 198-205. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2025-3-198-205>
  15. Sadeghi R. et al. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems. *Energies*, 2025, No. 18, 2553. URL: <https://doi.org/10.3390/en18102553>
  16. Kowalik R., Nesovic A. Stepwise Single-Axis Tracking of Flat-Plate Solar Collectors: Optimal Rotation Step Size in a Continental Climate. *Energies*, 2025, No. 18(21), 5776 URL: <https://doi.org/10.3390/en18215776>
  17. Lee C. Y., Chou P. C., Chiang C. M., Lin C. F. The Development of Sun-Tracking System Using Image Processing. *Sensors*, 2013. No. 13(5), P. 5448-5459. URL: <https://doi.org/10.3390/s130505448>
  18. Acosta-Banda A. et al. Design, Modeling, and Experimental Validation of a Dual-Axis Solar Tracking System with Embedded Control and Monocular Vision. *Energies*, 2025. No. 18(22), 5951. URL: <https://doi.org/10.3390/en18225951>
  19. Terrén-Serrano G., Bashir A., Estrada T., Martínez-Ramón M. Girasol, a sky imaging and global solar irradiance dataset. *Data in Brief*, 2021. No. 35, 106914. 12 p. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.106914>