

А. С. Горбачов; О. В. Піонткевич, канд. техн. наук, доц.

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ОРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

В Україні значна кількість домогосподарств та підприємств переорієнтовуються на встановлення сонячних електростанцій. Це зумовлено зменшенням вартості комплектуючих та забезпеченням енергетичної незалежності від росту тарифів на електроенергію. Енергетична характеристика таких сонячних електростанцій суттєво залежить від регіону розміщення, їхнього клімату, оптимальної орієнтації сонячних панелей, наявності затінення та інших факторів. Аналіз сучасних сонячних панелей показав їхній низький коефіцієнт корисної дії, що зумовлює ретельно ставитися до експлуатаційних умов, засобів орієнтації сонячних панелей та слугує актуальним науковим напрямком дослідження.

У статті розглядаються різні конструктивні рішення та фактори, які впливають на ефективне орієнтування сонячних панелей. Аналіз охоплює вибір місця, орієнтацію та кут нахилу, особливості даху чи земельної ділянки, спосіб монтажу рами, а також сучасні методи моделювання руху сонця та наявності затінення протягом року. Зроблено акцент на трекові сонячні електростанції за рахунок їх високих показників генерації електроенергії, а також на доцільність використання двосторонніх сонячних панелей, в зв'язку з підвищеними показниками коефіцієнту корисної дії порівняно із звичайними сонячними панелями. Запропоновано рекомендації для практичного застосування в умовах України.

В результаті сформульовано основні інтеграційні підходи для максимізації ефективності сонячних електростанцій. Обґрунтовано переваги, недоліки та доцільність використання різних конструктивних рішень для орієнтації сонячних панелей. Продемонстровано конструктивні рішення для різних тип конструкцій рам сонячних електростанцій. Наведено перспективні напрямки подальших досліджень сонячних електростанцій для підвищення показників ефективності генерації електроенергії.

Ключові слова: сонячна панель, рама сонячної електростанції, трекер, генерація електроенергії, коефіцієнт корисної дії.

Вступ

За останні роки альтернативні джерела енергії є державною політикою провідних країн світу [1, 2, 3]. Рядові громадяни та бізнес підтримують цей шлях розвитку, вкладають значні кошти в розвиток, навчання фахівців та будівництво альтернативних джерел енергії [4, 5]. Розбудова сонячної енергетики вносить значний вклад у досягнення сталого розвитку та енергетичної незалежності [6, 7]. Сонячні батареї служать для використання самого екологічного джерела енергії [8, 9]. Однак, згідно заводських характеристик сонячних батарей, коефіцієнт корисної дії (ККД) наближається до 25 %. Також суттєво знижується ККД сонячних панелей та загалом сонячних електростанцій через вплив кліматичних умов, попадання тіні на них, або відсутності повноцінного перпендикулярного кута попадання сонячних променів [10, 11, 12]. Щоб уникнути зниження ККД сонячних електростанцій використовують інтеграцію різних підходів монтажу та сучасні конструктивні рішення для їх рам.

Постановка проблеми

У контексті зростання тарифів на електроенергію, а також зниження вартості компонентів сонячних електростанцій роблять більш привабливими встановлення сонячних панелей, як джерело електроенергії для приватних домогосподарств і підприємств. Одним із ключових факторів, який часто недооцінюють, є саме орієнтація сонячних панелей – правильне розташування, позиціонування, нахил, забезпечення належного фундаменту і зменшення втрат, пов'язаних із затіненням чи нестандартною геометрією даху чи ділянки [13, 14, 15].

Актуальність досліджень у цій галузі досягається значною кількістю наукових публікацій,

присвячених різним конструктивним рішенням підвищення ККД сонячних електростанцій, досягнення оптимального кута нахилу сонячних панелей та забезпеченню їх надійної роботи [16, 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі з підвищення ефективності альтернативних джерел енергії активно досліджується сучасними науковцями [18, 19]. Серед ключових напрямків досліджень можна виділити зростаючий попит на сонячні електростанції.

Дослідники з Автономного університету Керетаро всебічно аналізували механічні, екологічні та регуляторні фактори, що впливають на вибір матеріалів та конструктивне проектування систем кріплення сонячних панелей [20]. Їх дослідження показують, що адекватне узгодження між проектними та кліматичними умовами покращує стабільність, ефективність та термін служби системи. Запропоновано надійну та контекстуалізовану технічну основу, яка сприяє прийняттю обґрунтованих рішень у проєктах сонячної енергетики.

Питаннями вивчення оптимальної орієнтації сонячних панелей (рис. 1) на основі кліматичних даних досліджено в роботі [21]. Автори запропонували модель оптимізації, яка простіша за моделі коефіцієнту прозорості та базується на погодинних кліматичних даних. В автоматичному режимі визначається оптимальний кут нахилу та кут азимуту сонячної панелі для максимального виробництва електроенергії, враховуючи добові зміни кліматичних умов. Отримані результати показують ефективну генерацію електроенергії порівняно із фіксованими сонячними панелями орієнтованими на південь.

Проведено порівняльний аналіз різних способів орієнтування сонячних панелей з визначенням їх ефективності [22]. Автори ставлять акцент на найбільш ефективну установку для генерації електричної енергії на основі сонячних трекерів та пропонують використовувати автономні системи електроживлення стаціонарних пунктів управління.

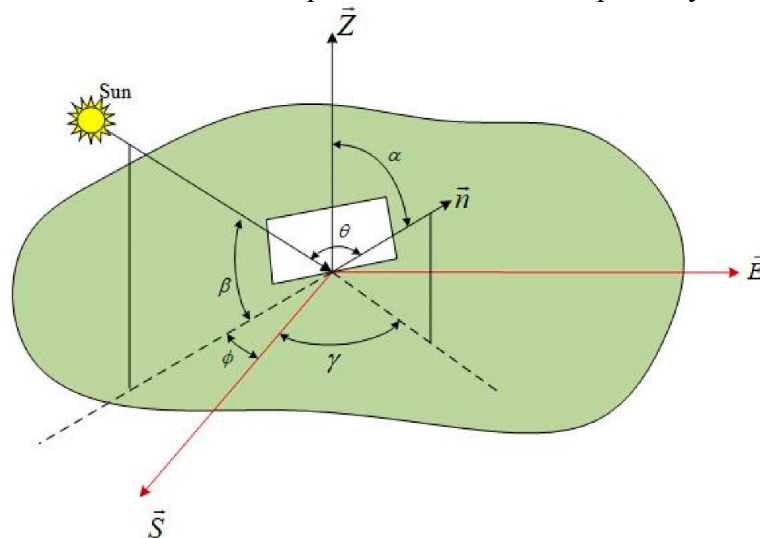


Рис. 1. Орієнтація сонячної панелі та кути падіння сонячних променів[21]. Вектори $\vec{S}$ та $\vec{E}$ представляють південний та східний напрямки відповідно. Вектор $\vec{n}$ є нормаллю до площини сонячної панелі. $\vec{Z}$ позначає вектор зеніту, перпендикулярний до площини південно-східного поля

Автори роботи [23] провели комплексний аналіз роботи сонячних панелей в екваторіальних регіонах світу. Вони визначали як температура навколишнього середовища, швидкість вітру, накопичений пил та частота очищення впливають на генерацію електричної енергії сонячними панелями. Результати показують на 1,5 % вищі оцінки виробництва електроенергії за допомогою ізотропної моделі порівняно з анізотропною моделлю в літні місяці. А також позитивний ефект в генерації від частоти очищення панелей та швидкості вітру.

Автори роботи [24] запропонували новітній метод з використанням чотирьох фотодетекторів для знаходження напрямку максимального випромінювання. Цей метод підходить для портативних систем із автоматичним регулюванням нахилу й азимуту.

У роботі [25, 26] проведено аналіз вертикальних двосторонніх панелей. Запропоновано оптимальну ширину ряду, дизайн, взаємне затінення. Побудовані сонячні електростанції на основі двосторонніх панелей показують зростання ефективності за різних умов. А оптимальне їх розміщення дозволяє підняти ефективність генерації на 30 %.

Авторами роботи [27] запропоновано розрахунки по несучій здатності металевих забивних паликових стійок у складних геологічних умовах. Аналізуючи одержані результати було підтверджено техніко-економічна доцільність використання забивних паликових стійок для будівництва фіксованих конструкцій рам сонячних електростанцій.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є комплексний аналіз сучасних підходів до підвищення ефективності генерації електричної енергії сонячних електростанцій на основі аналізу актуальних наукових публікацій та вибору конструктивних рішень для орієнтації сонячних панелей. Щоб досягнути поставлену мету, сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати основні напрямки досліджень у галузі сонячної енергетики;
- виконати порівняльний аналіз різних конструктивних рішень рам сонячних електростанцій з погляду на їх ефективності, надійності та доцільності застосування;
- проаналізувати інтеграцію різних підходів для комплексного підвищення ефективності сонячних електростанцій;
- визначити перспективні напрямки подальших досліджень у галузі сонячної енергетики.

Основні фактори, що впливають на продуктивність сонячних електростанцій

На основі аналізу опрацьованих наукових публікацій виділимо ключові фактори, що впливають на ефективність роботи сонячних електростанцій:

- географічне розташування та кліматичні умови;
- інсоляція та оптимальний кут нахилу (орієнтації);
- особливості конструкції даху чи ландшафту земельної ділянки;
- аналіз затінення протягом дня і року.

Найкращий потенціал для встановлення сонячних електростанцій мають регіони з більшою кількістю сонячного випромінювання, меншою хмарністю та оптимальним балансом температур (щоб не перегрівалися сонячні панелі). В Україні інсоляція суттєво зростає від північних до південних регіонів [13]. Також залежно від регіону суттєво змінюється їх кліматичні особливості: частота та інтенсивність снігопадів, запиленість повітря, хмарність, можливість навантаження вітром. Ці фактори диктують вибір кута нахилу (Таблиця 1), матеріали обладнання, що використовується, а також системи очищення та конструкції, які витримують механічні навантаження.

Таблиця 1

Порівняння методів вибору оптимального кута нахилу сонячних панелей

Метод	Потрібні дані	Точність	Гнучкість	Коментар
CDDOP	Погодинні дані NREL	Висока	Висока	Надточне розрахування
ClearSky	Теоретичні умови	Занижена	Середня	Ігнорує хмарність та реальні умови
Коефіцієнт прозорості	Місячні дані	Середня	Низька	Не враховує щоденні коливання
Правило "широта=нахил"	Мінімальні дані	Середня	Обмежена	Просте, але неточне

Аналіз сонячного потенціалу місця базування сонячної електростанції дозволяє максимально ефективно інвестувати. Важливу роль у цьому відіграють інсоляційні карти, які дають графічне зображення розподілу сонячної радіації по території. Детальні інсоляційні карти для всіх регіонів України доступні на ресурсах PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), Global Solar Atlas, NASA Power Data Access Viewer.

Сонячні панелі найбільш ефективні, коли промені сонця падають на них під максимально близьким до нормалі кутом. В Україні оптимальний напрям сонячної панелі – це південь, але допускаються відхилення на південний схід чи південний захід. Кут нахилу має бути якнайближче до географічної широти об'єкта. Наприклад, для України на півночі – ближче до 35° , у центральних регіонах – приблизно $32 - 34^\circ$, та на півдні – приблизно $30 - 32^\circ$ [13]. Відхилення від цих значень буде призводити до втрат у виробленні електроенергії від часу доби і сезону.

Для сонячних панелей, які встановлюються на даху, важливо врахувати тип покрівельного матеріалу, стан і вік даху, несучу здатність конструкції будівлі в цілому, вентиляцію під сонячними панелями (для зменшення їх перегріву).

У випадку наземного розміщення сонячних панелей, потрібно перевірити стабільність ґрунту, рівень дренажу (щоб уникнути затоплення обладнання чи застій води), доступ для обслуговування, захист від активності дітей і тварин, відстань до джерел тіні.

Навіть часткове затінення окремих частин сонячної панелі може призвести до значних втрат у генерації електроенергії, особливо якщо сонячні панелі підключені послідовно. Саме тому необхідно враховувати джерела тіней: дерева, будівлі, антени, супутникові тарілки, громовідводи, димарі, або водостічні системи. Також потрібно враховувати і сезонне, і добове (ранкове чи вечірнє) затінення. При цьому методи аналізу зазвичай включають моделювання траєкторії руху сонця з використанням мобільних додатків (Sun Surveyor, Sun Seeker) або спеціальних пристроїв.

Порівняльний аналіз конструктивних рішень для підвищення ефективності сонячних електростанцій

Встановлення сонячних панелей на даху будинків є найпопулярнішим рішенням для домовласників [13]. Це зумовлено економією земельної площі та природним захистом від вандалізму. Наявні рішення по монтажу сонячних електростанцій на двосхилому або односхилому типів даху будинків зазвичай обмежуються фіксованими конструкціями рам. Для плоского типу даху будинку популярним рішенням є баластні системи з регульованим кутом нахилу сонячних панелей, що дозволяє встановлювати її під оптимальним кутом та орієнтацією. Для шатрового або мансардного типів даху будівлі застосовують складну систему кріплень з розподілом сонячних панелей на кількох схилах та одночасним встановлення мікроінверторів або оптимізаторів потужності.

В свою чергу наземне розміщення сонячних електростанцій дає можливість вибору оптимальної орієнтації, має кращу вентиляцію сонячних панелей та простіше в обслуговуванні. Виробники сонячних електростанцій пропонують виконувати наступні типи конструкції рам: фіксовані, сезонно-регульовані, одноосьові та двохосьові трекари.

Найдешевшим в монтажу є фіксовані конструкції рами сонячної електростанції. Розрізняють одно-або двох- або трьохопорну фіксовану конструкцію рами (рис. 2). На вибір кількості опор впливає вага сонячної електростанції, а також кліматичні умови на ділянці розміщення. Негативно впливають на вартість виготовлення сонячної електростанції зростання кількості опор.

Гарним рішенням для підвищення ефективності сонячних електростанцій на $5 - 8 \%$ порівняно з фіксованими є використання сезонно-регульованих конструкції рам (рис. 3). В результаті необхідно виконувати $2 - 4$ рази на рік переналагодження кута нахилу сонячних панелей, що може бути суттєвим недоліком в обслуговуванні сонячної електростанції.



Рис. 2. Двохопорна фіксована конструкція рами сонячної електростанції

Переваги, недоліки та доцільність використання різних типів конструкцій рам сонячних електростанцій наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз конструктивних рішень несучої конструкції рами сонячної панелі

Тип конструкції	Переваги	Недоліки	Коли доцільно
Фіксовані конструкції рами	Простота монтажу, низькі експлуатаційні витрати, менше рухомих частин	Не можна змінити кут нахилу чи орієнтацію, втрати продуктивності в негоду чи взимку	Для невеликих систем, бюджетних проєктів, коли дах чи ділянка вже має близький до оптимального кута нахилу і орієнтацію
Сезонно-регульовані конструкції рам	Можна підлаштовувати кут під різні сезони, збільшення продуктивності порівняно з фіксованими конструкціями рам	Потрібно ручне чи напівавтоматичне регулювання, додаткові витрати на кріплення	У регіонах з вираженими сезонними змінами, коли зима і літо мають дуже різні кути падіння сонячних променів
Баластні системи на плоских дахах	Не потрібно порушувати покрівлю, можна встановити під правильним кутом; часто прості в монтажі	Можуть бути важкими, потреба в захисті від вітрових навантажень або додаткової фіксації; обмеження щодо максимальної ваги даху	Для плоских дахів, коли товщина покрівельного шару мала, коли не бажано чи неможливо кріпити через дах
Одноосьові трекеři	Висока продуктивність за рахунок слідування за сонцем зі сходу на захід	Високі витрати на будівництво, складна конструкція, необхідність обслуговування рухомих елементів	Великі наземні електростанції, коли додаткові витрати окупаються через збільшений випуск; коли є достатній простір і бюджет
Двохосьові трекеři	Найвища продуктивність за рахунок слідування за сонцем як по горизонталі, так і по вертикалі	Найвищі витрати під час будівництва, складна конструкція, найскладніше обслуговування, ризики поломок і зносу	



Рис. 3. Сезонно-регульована конструкція рами сонячної панелі

Максимально ефективним рішенням для сучасних сонячних електростанцій є встановлення слідкуючих систем (трекерів), які дозволяють повертати сонячні панелі до сонця за рахунок обертання навколо однієї (рис. 4, а) або двох (рис. 4, б) осей.



Рис. 4. Конструкції рам сонячних електростанцій з одноосьовим (а) та двохосьовим (б) трекером

Інтеграція різних підходів для максимізації ефективності сонячних електростанцій

Для досягнення максимальної ефективності сонячних електростанцій доцільно проводити комплексні підходи для вибору та встановлення оптимальної конструкції рами. Варто орієнтуватися на інсоляційні карти, особливості затінення з лазерним скануванням та моделюванням тіней протягом року, структурний аналіз несучої здатності даху або ґрунтів та інше.

Ідеальних умов орієнтації сонячних панелей досягнути не завжди можливо. Розглянуто підходи, які дозволяють мінімізувати втрати за різних обмежень:

- для даху, який не має оптимальної орієнтації, можна розділити сонячну електростанцію з одночасним встановленням сонячних панелей на схід та на захід, щоб забезпечити рівномірну генерацію електроенергії протягом дня;
- ефективним є застосування сонячних панелей з технологією Half-cut для зменшення чутливості затінення та внутрішніх втрат;
- використання сонячних панелей з високим ККД дає одразу високу генерацію електроенергії, однак, якщо маємо нестандартні поверхні для монтажу, то краще використовувати гнучкі сонячні панелі з нижчим ККД, відповідно;

- рекомендовано регулярно проводити очищення від пилу, бруду чи снігу, перевірку кріплень і стану даху;
- необхідно виконувати моніторинг виробництва електроенергії чи падіння продуктивності сонячної електростанції для виявлення несправності;
- для наземної установки використовуйте тремери, якщо дозволяє бюджет і умови експлуатації, при цьому слід врахувати додаткові витрати на обслуговування і механіку;
- розташування наземних сонячних електростанцій має бути якомога ближчим до точки підключення, адже велика відстань збільшує витрати на електричний кабель та зменшує ККД сонячної електростанції.

Важливим аспектом інтеграції різних підходів є забезпечення оптимальної орієнтації сонячної панелі із досягненням рівномірної ефективності протягом дня та якнайшвидшим поверненням інвестицій.

Висновки

Проведений аналіз сучасних конструктивних рішень для орієнтації сонячних панелей дозволяє зробити висновки, що розглянуті дослідження суттєво підвищують ефективності генерації електроенергії. Оптимальне функціонування сонячної електростанції значною мірою залежить від правильного розташування сонячної панелі – орієнтації, кута нахилу, врахування затінення та інженерних характеристик рам. В першу чергу це стосується слідкуючих систем (трекерів), які підтримують перпендикулярний кут попадання сонячних променів.

Планування будівництва сонячної електростанції відіграє ключову роль для правильного інвестування коштів. В першу чергу необхідно провести аналіз місцезнаходження сонячної електростанції за допомогою моделей, інсоляційних карт, мобільних або професійних інструментів, що дозволить зменшити ризики і втрати пов'язані з неоптимальним розташуванням.

Інтеграція різних підходів для створення сонячних електростанцій дозволяє досягти максимальної ефективності генерації електроенергії. Найбільший потенціал має комбінування сонячних трекерів з двосторонніми сонячними панелями, які займають оптимальну орієнтацію відносно сонячних променів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Перспективи розвитку сонячної енергетики в світі та в Україні / В. В. Пирогов та ін. *Молодий вчений*. 2017. №52 (12). С. 534–543.
2. 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. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/627/589>.
3. Березюк О. В., Лемешев М. С. Удосконалення математичної моделі ефективності видобування звалищного газу. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2023. Вип. 44. С. 10–16. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.44.12-16>.
4. Захарова О. В. Спроможність системи вищої освіти України забезпечити кадрові потреби національної відновлювальної енергетики. *Збірник наукових праць Черкаського державного технологічного університету. Серія: Економічні науки*. 2023. №68. С. 73–84. DOI: 10.24025/2306-4420.68.2023.284595.
5. Березюк О. В. Моделювання ефективності видобування звалищного газу для розробки обладнання та стратегії поводження з твердими побутовими відходами. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. № 6. С. 21–24.
6. Перспективність використання сонячної енергії / С. О. Тимофеев та ін. *I Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція*. 8-26 червня 2020 р. С. 2. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ettp/wp-content/uploads/sites/25/23-tymofeyev-abramenko-postnikova.pdf> (дата звернення: 01.09.2025).
7. Гончарук І. В. Енергетична незалежність як суспільно-економічне явище. *Економіка та держава*. 2020. №8. С. 71–77. DOI: 10.32702/2306-6806.2020.8.71.
8. Державне підприємство «Енергоринок». URL: <http://www.er.gov.ua/> (дата звернення: 02.09.2025).
9. Маляренко В. А., Тимченко С. П. Стан, проблеми та перспективи розвитку сонячної енергетики України. *Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві*, 2012. С. 3. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/32016/1/7.pdf> (дата звернення: 01.09.2025).

10. A numerical simulation of solar cells based on the CuO and Cu₂O absorber layers with ZnMgO window layer / M. M. Ivashchenko et al. *Materials Science and Engineering B*. 2024. V. 300. P. 117133. DOI: 10.1016/j.mseb.2023.117133.
11. Numerical optimization and performance evaluation of Zn PC: PC70BM based dye-sensitized solarcell / G. A. Nowsherwan et al. *Sci Rep*. 2023. V. 13. P. 10431. DOI: 10.1038/s41598-023-37486-2.
12. Recent advances in two-dimensional photo voltaic devices / H. Y. Wang et al. *Journal of Semiconductors*. 2024. №45 (5). P. 051701. DOI: 10.1088/1674-4926/45/5/051701.
13. Як вибрати місце для встановлення сонячних панелей на даху чи ділянці. URL: https://pipl.ua/article/yak-vibrati-misce-dlya-vstanovlennya-sonyachnih-panelei-na-dahu-chi-dilyanci?srsId=AfmBOooRy2q9p26jzG9nQXbvsnUE_1N_437VwWzUVKSDJEQeu3sScjSn (дата звернення: 05.09.2025).
14. Ричка Р. Оптимізація розташування сонячних панелей для досягнення максимальної виробничої потужності. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2024. № 1 (281). С. 76–84. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-281-1-76-84>.
15. Білоконь М., Смаглюк А. Економічна безпека України в умовах гібридних загроз. *Український економічний часопис*. 2024. № 5. С. 118–124. DOI: 10.32782/2786-8273/2024-5-21.
16. Zavorotnyi V. F., Borisov O. The laboratory tester of solarcells with dynamic reconfiguration of measuring system. *Microsyst Electron Acoust*. 2018. Vol. 23, №. 1. P. 23–29. DOI: 10.20535/2523-4455.2018.23.1.104069.
17. Operating temperature effect on the thin film solar cell efficiency / R. V. Zaitsev et al. *J. Nano- Electron. Phys*. 2019. V. 11, №4. P. 04029-6. DOI: 10.21272/jnep.11(4).04029.
18. Березюк О. В. Виявлення параметрів впливу на питомий об'єм видобування звалищного газу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 3. С. 20–23.
19. Березюк О. В., Лемешев М. С. Регресійна залежність динаміки зростання кількості біогазових установок в Україні. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2024. Вип. 49. С. 16–25. DOI: 10.32347/2409-2606.2024.49.
20. Advances in Mounting Structures for Photovoltaic Systems: Sustainable Materials and Efficient Design / L. A. Iturralde Carrera et al. *Technologies*. 2025. №13 (5), 204. P. 1–34. DOI: 10.3390/technologies13050204.
21. Naraghi M. H., Atefi E. Optimum Solar Panel Orientation and Performance: A Climatic Data-Driven Metaheuristic Approach. *Energies*. 2022. №15, 624. P. 1 – 16. DOI: 10.3390/en15020624.
22. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пункту управління. Системи управління, навігації та зв'язку / О. О. Казіміров та ін. *Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка*. 2021. Вип. 1 (63). С. 45–48. DOI:10.26906/SUNZ.2021.1.045.
23. Optimizing the orientation of solar photo voltaic systems considering the effects of irradiation and cell temperature models with dust accumulation / L. Al-Ghussain et al. *Solar Energy*. 2023. V. 249. P. 67–80. DOI: 10.1016/j.solener.2022.11.029
24. Klotz J., Nayar S. K. Minimal Sensing for Orienting a Solar Panel. *Solar Energy*. 2025. V. 300. P. 113833. DOI: 10.1016/j.solener.2025.113833.
25. Vertical bifacial solarfarms: Physics, design, and global optimization / M. R. Khan et al. *Applied Energy*. 2017. №206. P. 240–248. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.042.
26. Optimization and performance of bifacial solarmodules: a global perspective / X. Sun et al. *Appl. Energy*. 2018. V. 212. P. 1601–1610. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.041.
27. Оцінка несучої здатності металевих пальових стійок каркасно-модульних конструкцій фотогальванічної електростанції на слабких ґрунтах / А. М. Белокоп'я та ін. *Наука та будівництво*. 2019. Вип. 22 (4). С. 60–67. DOI: 10.33644/scienceandconstruction.v22i4.121.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2025.

Стаття пройшла рецензування 28.09.2025.

Горбачов Антон Сергійович – аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: toha.gorbi@gmail.com.

Піонткевич Олег Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: piontkevych@vntu.edu.ua.

Вінницький національний технічний університет.