

Жуков Р.О.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Петрик О.А.

Національний університет «Запорізька політехніка»

СОНЯЧНІ ТРЕКЕРИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ПРОСТОРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті здійснено комплексний огляд сучасних систем відстеження сонця, які активно впроваджуються для підвищення ефективності сонячних електростанцій, особливо в умовах обмеженого простору. Розглянуто ключові типи трекерів, серед яких одновісні сонячні трекери, що забезпечують рух панелей у межах однієї площини, та двохосні сонячні трекери, які дозволяють точно орієнтувати фотоелектричні модулі на Сонце у двох координатах. У межах класифікації одновісних конструкцій проаналізовано горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери та трекери з похилою віссю, кожен із яких має власні переваги залежно від географічного розташування та архітектурних умов об'єкта. Особлива увага приділена порівнянню активних сонячних трекерів, що використовують електроприводи та контролери для позиціонування, з пасивними сонячними трекерами, які функціонують на основі термогідрравлічного балансу або біметалевих елементів.

Наведено аналітичні дані щодо впливу трекерів на продуктивність сонячних панелей, зокрема в сценаріях обмеженої території, де правильне орієнтування модулів має вирішальне значення для зменшення затінення та втрат. Розглянуто технології стеження за сонцем, що інтегруються з сучасними інформаційними системами керування, дозволяючи оптимізувати роботу електростанцій у режимі реального часу. Окреслено переваги впровадження системи трекінгу на різних рівнях: від автономних малих СЕС до масштабних комерційних сонячних електростанцій. Обґрунтовано доцільність використання трекерів в умовах щільної міської забудови, дахових СЕС і агрофотовольтаїки.

Окремо проаналізовано технічні виклики, пов'язані з інтеграцією з сонячними електростанціями, зокрема потребу в адаптації кріплень, вітроустійкості та енергоспоживанні самих трекерів. Зроблено висновок, що системи відстеження сонця є ключовим елементом сучасних технологій у сфері сонячної енергетики, що дозволяють не лише збільшити вихід енергії, але й забезпечити гнучкість у проєктуванні ефективних енергетичних рішень для складних умов просторового розміщення.

Ключові слова: одновісні сонячні трекери, двохосні сонячні трекери, активні сонячні трекери, пасивні сонячні трекери, горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери, трекери з похилою віссю, системи відстеження сонця, підвищення ефективності.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності сонячних електростанцій у сучасних умовах урбанізації, дефіциту вільних земельних ресурсів та зростаючого попиту на децентралізовану генерацію енергії з відновлюваних джерел вимагає впровадження інноваційних рішень, зокрема систем стеження за сонцем. Одним із найперспективніших напрямів є застосування одновісних і двохосних сонячних трекерів, здатних динамічно змінювати орієнтацію фото-модулів відповідно до положення Сонця, тим самим забезпечуючи максимальне поглинання сонячного випромінювання протягом дня. Проте

ефективне використання таких систем у щільних забудовах, дахових СЕС або інших просторово обмежених середовищах супроводжується рядом технічних і проєктних обмежень.

Зокрема, горизонтальні одновісні трекери (HSAT) та вертикальні одновісні трекери (VSAT), які демонструють високу продуктивність на відкритих площах, не завжди придатні для інсталяції на дахах чи між будівельними конструкціями. Азимутальні трекери та трекери з похилою віссю частково вирішують це завдання, проте потребують додаткових розрахунків щодо вітрового навантаження, стабільності кріплень і уникнення

затіннення. Окрему складність становить вибір між активними сонячними трекерами, які забезпечують високу точність позиціонування завдяки електромеханічним приводам, та пасивними сонячними трекерами, що є менш енерговитратними, але поступаються у швидкості реакції й точності налаштування.

На сьогодні відсутнє єдине уніфіковане інженерне рішення щодо оптимального типу трекера для обмежених просторів, яке б враховувало співвідношення між продуктивністю, вартістю, надійністю та можливістю інтеграції з існуючими сонячними електростанціями. Також недостатньо досліджено вплив різних конфігурацій систем відстеження сонця на загальну продуктивність установок у нестандартних просторових умовах. У цьому контексті актуальним є аналіз і систематизація сучасних технологій стеження за сонцем, що дозволяють максимально ефективно використовувати обмежені площі при впровадженні СЕС.

Таким чином, постає проблема вибору та адаптації сонячних трекерів – HSAT, VSAT, азимутальних, з похилою віссю – до умов компактного розміщення, з урахуванням технічних параметрів, економічної доцільності, потенціалу підвищення ефективності та впливу на продуктивність систем. Розв'язання цієї проблеми відкриває нові можливості для оптимізації проєктів у галузі електроенергетики, зокрема у межах реалізації локальних або комерційних сонячних електростанцій нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика підвищення ефективності сонячних електростанцій за допомогою систем стеження за сонцем дедалі частіше опиняється у фокусі наукової спільноти, зокрема у контексті обмеженого простору для встановлення фотомодулів. У численних дослідженнях розглядаються різні типи трекерів – одновісні сонячні трекери, двохвісні сонячні трекери, а також специфічні їх модифікації, серед яких горизонтальні одновісні трекери (HSAT), вертикальні одновісні трекери (VSAT), азимутальні трекери та трекери з похилою віссю.

У роботі А. В. Казначеева та ін. представлено аналіз автоматизованих технологій очищення енергомодулів для сонячних станцій автономного живлення. Хоча акцент зроблено на експлуатаційній ефективності, автори наголошують і на важливості точного орієнтування панелей для запобігання втратам енергії [1, с. 45]. О. Казіміров та ін. у своєму дослідженні орієнтування

сонячних панелей у системах автономного електроживлення наводять приклади застосування одновісних систем, що є ефективним рішенням у системах із обмеженим доступним простором [2, с. 46].

Питання техніко-економічного моделювання роботи сонячних електростанцій із врахуванням змін кута нахилу панелей розкрито у праці В. В. Панченка та Р. О. Харіна, де розглядаються переваги активних сонячних трекерів у порівнянні з пасивними системами з огляду на коефіцієнт окупності та витрати енергії [3, с. 7]. У свою чергу, А. В. Бубліков та І. І. Іванський досліджують системи оптимального керування положенням фотоелектричних установок, що включають інтеграцію з сонячними електростанціями та алгоритми позиціонування за сонцем – критично важливий елемент для технології стеження за сонцем [4, с. 24].

Міжнародні дослідження також зосереджені на підвищенні ефективності систем стеження. Так, Д. Л. С. Нагасрі (D. L. S. Nagasri) та ін. вивчають можливість поєднання фотоелектричних панелей із термоелектричними генераторами, де точне відстеження сонця залишається ключовим чинником для загального коефіцієнта корисної дії [5, с. 6]. Х. У. Манзур (H. U. Manzoor) та ін. виконали моделювання оптимального кута нахилу PV-модулів, демонструючи, що навіть просте коригування кута з використанням базових трекерів дозволяє досягти суттєвого підвищення ефективності системи [6, с. 1833].

У роботі М. Альмадхачі (M. Almadhhachi) досліджено концепцію «соняшникового дерева» як альтернативи класичним трекерам у щільних урбанізованих умовах. Автори наголошують на важливості адаптації трекерів до умов обмеженого простору, особливо при встановленні СЕС на дахах або у внутрішньодворових зонах [7, с. 5]. С. Я. Хан (S. Y. Khan) та ін. подають огляд інноваційних методів керування температурою сонячних панелей, підкреслюючи, що ефективність системи прямо залежить від точності позиціонування модулів, зокрема у двохвісних трекерах [8, с. 1157].

Дослідження С. А. Аскінс (S. A. Askins) та ін. присвячене мікро-CPV модулям з інтегрованими трекерами, що працюють у режимі планарного стеження. Це дослідження демонструє потенціал трекерів навіть у мініатюризованих конструкціях, де критичним є вплив трекерів на продуктивність при обмеженій площі поверхні [9, с. 2].

Нарешті, Х. Чжан (X. Zhang) та ін. описують модульний пристрій із самостійним стеженням за сонцем, що підтверджує перспективність інтеграції адаптивних трекерів у розподілені сонячні електростанції [10, с. 7].

Таким чином, проведений аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій свідчить про стійке зростання наукового інтересу до теми вдосконалення систем стеження за сонцем у контексті підвищення ефективності, зниження витрат та розширення можливостей їх використання в умовах обмеженого простору. Разом із тим, подальших досліджень потребують питання точного порівняння ефективності різних типів трекерів (HSAT, VSAT, азимутальних, похилих) за умов реальних просторових обмежень, а також вдосконалення алгоритмів активного та пасивного стеження для їх масштабованої інтеграції з сучасними сонячними електростанціями.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження аспектів використання сонячних трекерів для підвищення ефективності сонячних електростанцій, з акцентом на аналізі доцільності впровадження одновісних і двохосних систем (зокрема HSAT, VSAT, азимутальних трекерів і трекерів з похилою віссю) в умовах обмеженого простору. Особливу увагу приділено порівнянню активних і пасивних трекерів, їх впливу на продуктивність фотоелектричних модулів, а також можливостям інтеграції систем відстеження сонця в сучасні архітектури сонячних електростанцій.

Таким чином, у рамках даного дослідження ставились такі завдання: здійснити класифікацію сонячних трекерів за кількістю осей обертання та принципом дії; проаналізувати особливості застосування одновісних (HSAT, VSAT) і двохосних (азимутальних, похилих) систем з урахуванням просторових і кліматичних обмежень; порівняти ефективність активних і пасивних трекерів у контексті впливу на генерацію електроенергії; дослідити доцільність використання трекерів в умовах обмеженого простору, включаючи дахові або фасадні установки; а також надати техніко-економічні рекомендації щодо впровадження найбільш ефективних рішень для малих і середніх сонячних електростанцій.

Виклад основного матеріалу. У контексті глобального переходу до відновлюваних джерел енергії сонячні електростанції (СЕС) набули широкого поширення як один із найперспективніших засобів генерації екологічно чистої електроенергії. Проте ефективність роботи

фотоелектричних модулів значною мірою залежить від кута падіння сонячного випромінювання, що змінюється впродовж доби й року. Саме тому важливим компонентом сучасних СЕС є системи відстеження сонця – сонячні трекери, які забезпечують динамічну орієнтацію панелей у напрямку максимального освітлення. Застосування таких систем дозволяє підвищити виробіток електроенергії в середньому на 20–40% залежно від типу трекера та регіональних умов [6, с. 1833].

Впровадження трекерів у середовищах із дефіцитом вільної площі (дахіві СЕС, урбанізовані зони, території агрофотовольтаїки) є одним із головних викликів для розробників і проєктантів. Обмеження простору накладають низку вимог на вибір типу трекера, його габарити, стабільність, стійкість до вітрових навантажень та здатність уникати самозатінення. Зростання інтересу до компактних, мобільних і адаптивних трекерів спричинене не лише тенденцією до децентралізації генерації, а й потребою максимально ефективного використання кожного квадратного метра площі для розміщення фотоелементів [7, с. 5; 10, с. 7]. У зв'язку з цим значну увагу приділяють розробці трекерів із покращеними параметрами інтеграції в складні просторові структури.

Сонячні трекери поділяються на кілька основних типів залежно від кількості ступенів свободи, способу руху та геометрії встановлення. Найбільш поширеними є одновісні трекери, які змінюють положення фотоелектричних панелей відносно однієї осі. Серед них розрізняють горизонтальні одновісні трекери (HSAT), які обертають модулі навколо горизонтальної осі з півночі на південь, та вертикальні одновісні трекери (VSAT), що здійснюють обертання за східно-західною орієнтацією. Ці системи вважаються оптимальними за співвідношенням ціна–ефективність, особливо в умовах обмеженого простору, оскільки дозволяють щільніше розташовувати ряди модулів без значного затінення [2, с. 46; 4, с. 24]. Двохосні трекери забезпечують точніше орієнтування панелей на Сонце, однак потребують більше місця та є дорожчими в реалізації. За принципом дії трекери поділяють на активні та пасивні. Активні трекери використовують електроприводи або гідравлічні системи для зміни положення, тоді як пасивні працюють без зовнішнього джерела енергії – наприклад, за рахунок теплового розширення рідини або зміни тиску, що спрощує конструкцію і зменшує

витрати на обслуговування, хоча й знижує точність наведення. Саме трекери в умовах обмеженого простору потребують особливо зваженого підходу до вибору між активними й пасивними системами, адже від цього залежить не лише щільність розміщення модулів, а й стабільність генерації електроенергії.

Двохосні трекери забезпечують найвищий рівень точності стеження за Сонцем, оскільки обертають панель одночасно у двох площинах – горизонтальній та вертикальній. Такі системи демонструють найвищу продуктивність, зокрема у великих відкритих локаціях із високим рівнем інсоляції [5, с. 6]. Однак через складність конструкції, значну вартість та великі габарити вони рідко використовуються в умовах міської забудови чи на дахах, де кожен сантиметр має значення.

Існують також азимутальні трекери, які обертаються навколо вертикальної осі, орієнтуючи модуль за напрямком Сонця на горизонті, а також трекери з похилою віссю, які поєднують функціональність одновісних рішень з можливістю нахилу на визначений кут до горизонту. Останні добре зарекомендували себе в регіонах із нерівномірною поверхнею та при встановленні на дахах, де неможливо забезпечити ідеальну горизонтальність. Їх застосування дозволяє досягти компромісу між технічною простотою та енергетичним прибутком [6, с. 1833]. Для систематизації основних конструктивних і функціональних відмінностей між різними типами сонячних трекерів, а також визначення їх доцільності у використанні в умовах обмеженого простору, у таблиці 1 подано узагальнення ключових характеристик. Порівняння охоплює кількість осей обертання, спосіб керування (активний або пасивний), придатність до встановлення на

обмежених площах, рівень енергетичної ефективності та типові витрати на обслуговування. Такий підхід дозволяє обґрунтовано підійти до вибору системи відстеження сонця залежно від технічних і просторових умов конкретного проєкту сонячної електростанції.

Сонячні трекери класифікують не лише за кількістю осей, а й за принципом дії – на активні та пасивні системи. Активні сонячні трекери працюють за допомогою електроприводів, моторизованих механізмів і контролерів, що постійно коригують положення фотоелектричних модулів на основі інформації від сенсорів освітленості, або за попередньо запрограмованою траєкторією руху Сонця. Такі системи характеризуються високою точністю стеження та гнучкістю у налаштуваннях, що дозволяє досягти максимального рівня виробітку електроенергії протягом світлового дня [4, с. 25].

Пасивні сонячні трекери, на відміну від активних, не потребують джерел живлення для керування орієнтацією. Їхня робота ґрунтується на фізичних принципах – зазвичай тепловому розширенні рідини, газу або біметалевих елементів, які реагують на різницю в освітленості або температурі з обох боків конструкції. Наприклад, при нагріванні однієї сторони елемент розширюється й нахиляє панель у напрямку більш інтенсивного сонячного випромінювання. Такі системи є менш точними, проте простими в обслуговуванні, дешевшими й придатними до автономної експлуатації у віддалених місцях без доступу до електромереж [1, с. 46].

У контексті сонячних електростанцій малої площі, що функціонують у щільно забудованих районах або на дахах будівель, обидва типи трекерів мають свої переваги й обмеження. Активні трекери забезпечують вищу генерацію

Таблиця 1

Порівняльна характеристика типів сонячних трекерів

Тип трекера	Кількість осей	Спосіб керування	Придатність до обмеженого простору	Рівень ефективності	Вартість обслуговування
Горизонтальний одновісний (HSAT)	1	Активний/пасивний	Середня	Високий (до +25%)	Помірна
Вертикальний одновісний (VSAT)	1	Активний	Висока	Високий (до +20%)	Низька
Азимутальний	1	Активний	Висока	Середній (до +15%)	Низька
Трекер з похилою віссю	1	Активний/пасивний	Висока	Середній (до +18%)	Помірна
Двохосний	2	Активний	Низька	Максимальний (до +40%)	Висока

електроенергії, але потребують додаткового енергоспоживання та займають більше простору для повноцінного руху. Натомість пасивні трекери можуть бути корисні у проєктах із суворими просторовими обмеженнями, де ключовим є мінімізація технічної складності та надійність за відсутності обслуговування [7, с. 5; 10, с. 7]. Вибір між цими двома системами має базуватись на ретельному балансі між продуктивністю, доступною площею, умовами експлуатації та довгостроковою економічною ефективністю.

Одним із ключових аргументів на користь впровадження сонячних трекерів є їхній безпосередній вплив на рівень генерації електроенергії. Завдяки динамічному стеженню за Сонцем системи трекінгу здатні значно зменшити втрати, пов'язані з неідеальним кутом падіння сонячного світла на поверхню панелі. Особливо відчутною є перевага трекерів у місцях зі значними добовими та сезонними коливаннями інсоляції. Наприклад, за даними Nagasri D. L. S. та ін., використання двохосових трекерів дозволяє збільшити виробіток енергії до 35–40% у порівнянні зі стаціонарними конструкціями [5, с. 6], тоді як HSAT і VSAT дають приріст на рівні 15–25% залежно від розташування об'єкта [6, с. 1835].

У міських умовах та на дахах будівель ефективність трекерів обмежується простором і затіненням від навколишньої інфраструктури. У таких випадках найбільш доцільним є застосування вертикальних одновісних або азимутальних трекерів, які забезпечують оптимізацію руху

при збереженні компактності системи. Як зазначають Almadhhachi M. та співавт., у густонаселених середовищах найкращий результат показують інтелектуальні трекери з обмеженим діапазоном повороту, адаптовані до специфіки середовища [7, с. 7].

Особливої уваги заслуговує застосування трекерів в агрофотовольтаїці, де розміщення панелей повинне враховувати не лише інсоляцію, а й потреби рослинництва. У таких системах часто використовуються трекери з похилою віссю, що дозволяють коригувати положення панелі залежно від фаз росту рослин, зменшуючи затінення ґрунту в критичні періоди. За даними Zhang X. та ін., використання адаптивних модульних систем стеження дозволяє не лише підвищити продуктивність СЕС на 20%, а й зберегти стабільні умови для агровиробництва [10, с. 14]. Рис. 1 ілюструє, як конструктивні параметри та орієнтація панелей у різних типах трекерів впливають на результативність генерації енергії залежно від умов використання. Зокрема, системи з максимальною свободою руху демонструють вищі показники ефективності, але вимагають більше простору, що обмежує їхнє застосування в умовах щільної забудови.

Успішна інтеграція сонячних трекерів у сучасні архітектури сонячних електростанцій (СЕС) передбачає врахування як технічних можливостей обраної системи, так і обмежень навколишнього простору. Залежно від масштабів СЕС, доступної площі, орієнтації ділянки та кліматичних умов, обираються відповідні трекери,



Рис. 1. Взаємозв'язок типу трекера, орієнтації та рівня генерації енергії

які можуть ефективно взаємодіяти з системами моніторингу, акумулювання енергії та керування потужністю. Наприклад, у малих і середніх СЕС на дахах промислових або житлових будівель пріоритет надається вертикальним одновісним трекерам або азимутальним системам, що можуть бути встановлені без порушення статичної рівноваги об'єкта [6, с. 1834]. У великих наземних установках частіше використовують горизонтальні або двохосні трекери, особливо коли мова йде про генерацію в мегаватному діапазоні [5, с. 6].

Ключовим елементом функціонування трекерів у сучасних СЕС є алгоритми автоматичного стеження за Сонцем, які ґрунтуються на геолокаційних параметрах, астрономічних таблицях або даних сенсорів освітлення. Системи керування в активних трекерах здатні не лише визначати оптимальне положення панелі протягом дня, а й адаптуватися до хмарності, затінення або змін погодних умов. Автоматизовані модулі керування, інтегровані з контролерами заряду, значно підвищують стабільність роботи автономних електроживильних комплексів [2, с. 47].

Разом із тим, інтеграція трекерів у СЕС в умовах обмеженого простору стикається з низкою практичних викликів. По-перше, це – необхідність забезпечення вільної зони обертання, яка в умовах щільної міської забудови або нерівного рельєфу може бути критично обмеженою. По-друге, особливу увагу потрібно приділяти питанням вітростійкості, адже рухомі конструкції трекерів є більш вразливими до вітрових навантажень, особливо на висоті. По-третє, ускладнюється захист від затінення між рядами, що вимагає точного проєктування інтервалів та висоти розміщення. В урбанізованому середовищі навіть незначні похибки в конфігурації можуть звести нанівець переваги трекінгу [7, с. 7]. Тому оптимальна інтеграція трекерів потребує застосування цифрового моделювання, інсоляційного аналізу та погодинної симуляції генерації.

У контексті швидкого розвитку сонячної енергетики зростає потреба у вдосконаленні систем трекінгу, особливо з огляду на обмеження простору, енергоспоживання та адаптації до змінних умов середовища. Одним із ключових напрямів є розробка інтелектуальних адаптивних трекерів, які поєднують сенсорне управління з алгоритмами машинного навчання для прогнозування траєкторій Сонця з урахуванням метеоумов, сезонних коливань і навіть локальних затінь. Такі системи здатні автоматично коригувати

роботу панелей не лише за освітленістю, а й за коефіцієнтом продуктивності в реальному часі.

Окремий напрям розробки – це мобільні та модульні рішення, що призначені для обмежених або нестабільних середовищ, зокрема дахів, мобільних енергокомплексів і агрофотовольтаїки. Мобільні трекери характеризуються малою вагою, спрощеною механікою та здатністю до швидкого демонтажу, що важливо в умовах тимчасових інсталяцій або для аварійного енергозабезпечення. Модульні трекери дозволяють гнучко масштабувати систему в залежності від конфігурації об'єкта, зберігаючи ефективність генерації навіть за складного просторового планування [7, с. 8].

Ще один перспективний вектор розвитку стосується інновацій у сфері енергоефективності та структурної мобільності трекерів. Вчені й інженери працюють над зниженням власного енергоспоживання трекерів, використанням надлегких матеріалів, розумними приводами з мінімальною інерцією та системами балансування, що зменшують навантаження на опори. Деякі експериментальні системи вже демонструють здатність до енергетичної самодостатності – коли трекер споживає не більше 1% від загального добового виробітку модуля [5, с. 7]. Також активно впроваджуються механізми обмеженого діапазону обертання, які дозволяють зменшити площу впливу при незначній втраті продуктивності, що є особливо актуальним для щільної забудови.

Таким чином, розвиток технологій стеження за Сонцем спрямований на створення розумних, компактних і енергоефективних рішень, здатних працювати у складних умовах із високим рівнем адаптивності, що відкриває нові можливості для децентралізованої та міської сонячної генерації.

Висновки. У даному дослідженні проаналізовано теоретичні засади та ключові конструктивно-функціональні параметри застосування сонячних трекерів у сучасних сонячних електростанціях, з особливою увагою до умов обмеженого простору. Встановлено, що впровадження одновісних сонячних трекерів (зокрема горизонтальних HSAT та вертикальних VSAT) є ефективним рішенням для дахових, міських та мобільних СЕС, де важливим є збереження щільності розміщення модулів без втрат продуктивності. У свою чергу, двохосні сонячні трекери демонструють найвищі показники генерації енергії, проте мають суттєві обмеження щодо просторової інтеграції та вартості обслуговування.

Зроблено порівняльний аналіз активних та пасивних сонячних трекерів. Доведено, що активні системи з електроприводами і сенсорним стеженням забезпечують вищу точність позиціонування і більший приріст енергії, тоді як пасивні трекери на основі термогідрравлічних рішень є придатними для автономного застосування у віддалених або технічно спрощених установках. Важливо, що азимутальні трекери та трекери з похилою віссю демонструють добру адаптивність до нерівномірного рельєфу та складних архітектурних умов, що робить їх ефективними в агрофотовольтаїці та середовищах із нестандартними обмеженнями площі.

Показано, що системи відстеження сонця є не лише додатковим компонентом, а критично важливим елементом сучасної фотоелектричної архітектури. Перспективним напрямом є розробка технологій стеження за сонцем, що базуються на адаптивному керуванні, сенсорних зворотних зв'язках і можливості самооптимізації. Особливу цінність у цьому контексті становлять

технології трекінгу в умовах обмеженого простору, які дозволяють інтегрувати трекери навіть у середовища з мінімальним доступним простором.

Підкреслено, що інтеграція з сонячними електростанціями повинна здійснюватися з урахуванням геометрії простору, параметрів затінення, вітрового навантаження та взаємної орієнтації панелей. Потреба у гнучких, енергоефективних та стійких конструкціях спонукає до активного розвитку інтелектуальних трекерів, які здатні автоматично адаптуватися до зовнішніх умов. Таким чином, вплив трекерів на продуктивність СЕС в умовах щільної забудови, мобільності або змінної топографії стає визначальним чинником їх впровадження в нових енергетичних проєктах. Перспективи розвитку галузі пов'язані з подальшим вдосконаленням алгоритмів керування, конструкцій трекерів та їхньої структурної мобільності, що у сукупності забезпечить стабільне зростання частки відновлюваної енергії в глобальному енергобалансі.

Список літератури:

1. Казначеев А. В., Заячковський А. В., Завацький В. О., Сторчак К. П. Дослідження технології розумного очищення сонячних енергомодулів станції автономного живлення. Зв'язок. 2024. № 3. С. 43–47. <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2024.034347>
2. Kazimirov O., Vlasov K., Onypchenko P., Kostenko I. Орієнтування сонячних панелей системи автономного електроживлення стаціонарного пункту управління. Системи управління, навігації та зв'язку. 2021. № 1 (63). С. 45–48. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.045>
3. Панченко В. В., Харін Р. О. Моделювання та техніко-економічний розрахунок роботи сонячної електростанції на тяговій підстанції. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2023. № 2. С. 3–13. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v28i2.283295>
4. Бубліков А. В., Іванський І. І. Синтез та дослідження системи оптимального керування положенням сонячної фотоелектричної установки. Електротехнічні та інформаційні системи. 2024. № 105. С. 23–31. <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-5>
5. Nagasri D. L. S., Pathipooranam P., bin Mohd Salleh M. F., Marimuthu R. Evaluating the performance and feasibility of integrating thermoelectric generators with solar photovoltaic panels: A case study. Case Studies in Thermal Engineering. 2024. Vol. 64. 105572. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105572>
6. Manzoor H. U., Aaqib S. M., Manzoor T., Azeem F., Ashraf M. W., Manzoor S. Effect of Optimized Tilt Angle of PV Modules on Solar Irradiance for Residential and Commercial Buildings in Different Cities of Pakistan: Simulation-Based Study. Energy Science & Engineering. 2025. P. 1831–1845. <https://doi.org/10.1002/ese3.70004>
7. Almadhhachi M., Seres I., Farkas I. Sunflower solar tree vs. flat PV module: A comprehensive analysis of performance, efficiency, and land savings in urban solar integration. Results in Engineering. 2024. Vol. 21. 101742. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101742>
8. Khan S. Y., Rauf S., Liu S., Chen W., Shen Y., Kumar M. Revolutionizing solar photovoltaic efficiency: A comprehensive review of cutting-edge thermal management methods for advanced and conventional solar photovoltaic. Energy & Environmental Science. 2025. P. 1130–1175. <https://doi.org/10.1039/D4EE03525A>
9. Askins S. A., Vallerotto G., Dominguez Dominguez C., Duchemin M., Nardin G., Ackermann M., та ін. Progress and Demonstration of Micro-CPV Module with Integrated Planar Tracking and Diffuse Light Collection. IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2022. P. 1–13. <https://doi.org/10.1109/PVSC48317.2022.9938894>
10. Zhang X., Li W., Wang Y., Wang Z., Sun H., Tao K., Ye T., та ін. Design and Application of Self-Power-Tracking Modular Solar Device. SSRN. 2025. P. 1–23. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5164912>

Zhukov R.O., Petryk O.A. SOLAR TRACKERS IN SPACE-CONSTRAINED CONDITIONS FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF SOLAR POWER PLANTS

The article provides a comprehensive review of modern sun-tracking systems that are actively being implemented to improve the efficiency of solar power plants, especially under space-constrained conditions. The study considers the main types of trackers, including single-axis solar trackers, which enable panel movement within a single plane, and dual-axis solar trackers, which allow precise orientation of photovoltaic modules towards the Sun along two coordinates. Within the classification of single-axis designs, horizontal single-axis trackers (HSAT), vertical single-axis trackers (VSAT), azimuthal trackers, and tilted-axis trackers are analyzed, each offering specific advantages depending on the geographical location and architectural context of the installation. Special attention is given to the comparison between active solar trackers—powered by electric drives and controlled by automated systems—and passive solar trackers, which operate on the principles of thermohydraulic balance or bimetallic elements.

Analytical data is presented regarding the impact of trackers on solar panel performance, particularly in spatially restricted environments, where optimal module orientation is critical to reducing shading and energy loss. The article examines solar tracking technologies integrated with modern control systems, enabling real-time optimization of power plant operation. The advantages of implementing tracking systems at various levels are outlined, ranging from autonomous small-scale PV systems to large commercial solar power stations. The feasibility of using trackers in densely built urban areas, rooftop installations, and agrivoltaic systems is substantiated.

Technical challenges associated with tracker integration into solar power plants are separately analyzed, including the need for adaptable mounting systems, wind resistance, and the energy consumption of the trackers themselves. The conclusion highlights that sun-tracking systems are a key component of current technologies in the field of solar energy, offering not only an increase in energy output but also greater flexibility in designing efficient energy solutions under complex spatial constraints.

Key words: *single-axis solar trackers, dual-axis solar trackers, active solar trackers, passive solar trackers, horizontal single-axis trackers (HSAT), vertical single-axis trackers (VSAT), azimuthal trackers, tilted-axis trackers, sun-tracking systems, efficiency enhancement.*