

УДК 621.311.243

О.В. Чуніцький, студент гр. ПБ-41мп, к.т.н., доц. Вонсевич К.П.

КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАВЕДЕННЯ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

Анотація. У роботі було представлено особливості математичного моделювання та експериментального дослідження ефективності застосування стаціонарних та гібридних систем сонячних панелей на основі технологій комп'ютерного зору. Проведено теоретичне та практичне порівняння енергоефективності системи зі стаціонарною панеллю і автоматизованим трекером. Встановлено, що гібридний підхід на основі поєднання CV технологій і астрономічних алгоритмів забезпечує максимальний приріст генерації енергії на рівні 48,2 % порівняно зі стаціонарною панеллю. Дослідження також підтвердило, що реальна експлуатаційна перевага автоматизованих трекерів значно перевищує теоретичні прогнози математичних моделей.

Ключові слова: сонячна панель, комп'ютерний зір, астрономічні алгоритми, автоматизована система, енергоефективність.

ВСТУП

Ефективність сонячних електростанцій безпосередньо залежить від кута падіння променів на поверхню фотоелектричних модулів. Стаціонарні панелі втрачають значну частину потенційної енергії через неможливість адаптації до руху Сонця впродовж доби, тому впровадження автоматизованих модулів позиціонування (трекерів) є актуальним напрямом підвищення продуктивності геліосистем. В умовах сучасних викликів для енергосистеми України збереження максимальної ефективності автономних джерел живлення набуває особливої ваги, дозволяючи збільшити виробіток енергії при загальному дефіциті потужностей. У цій роботі запропоновано реалізацію гібридного сонячного трекера, який крім стаціонарної сонячної панелі поєднує в складі однієї системи також технології комп'ютерного зору (штучні нейронні мережі на базі алгоритму YOLOv8), алгоритми астрономічного розрахунку і рухомі привідні механізми.

ОСОБЛИВОСТІ ПОСТАНОВКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для оцінювання ефективності розробленої системи було проведено її математичне моделювання та експериментальне дослідження. Теоретична модель генерації енергії, враховувала геометричні параметри інсоляції, температуру та вологість середовища за принципами представленими у роботі [1]. При цьому, як математичне моделювання так і експериментальна апробація виконувались для трьох конфігурацій вимірювальної системи: визначення показників без використання автоматизованого позиціонування (стаціонарна панель), трекер що використовує технології комп'ютерного зору (CV) та трекер з гібридним позиціонуванням (одночасно CV і астрономічна модель). Гібридна система трекеру крім сонячної панелі включала в себе також сервопривід, модуль 4 Мрх камери, MCU на основі мікроконтролера ESP32 та програмне забезпечення для керування рухом привідних механізмів і організації обміну інформацією за допомогою веб-технологій. Розрахункові дані отримані при математичному моделюванні і симуляції роботи різних систем представлено у Таблиці 1.

Таблиця 1. Результати моделювання генерації енергії з сонячної панелі

°C	φ	Час	<i>Трекер-гібрид</i>			<i>Трекер-зір</i>			<i>Панель</i>		
			I,А	U,В	P,Вт	I,А	U,В	P,Вт	I,А	U,В	P,Вт
3	98	7:30	0.14	11.7	1.585	0.14	11.7	1.581	0.14	10.8	1.581
3	94	8:00	0.13	11.7	1.528	0.13	11.7	1.517	0.14	10.8	1.505
4	86	9:00	0.15	11.7	1.735	0.15	11.7	1.735	0.15	10.8	1.674
5	78	10:00	0.19	11.7	2.235	0.19	11.7	2.235	0.20	10.9	2.158
6	70	11:00	0.22	11.8	2.630	0.22	11.8	2.629	0.23	11.0	2.564
7	62	12:00	0.23	11.8	2.710	0.23	11.8	2.710	0.24	11.0	2.650
7	54	13:00	0.21	11.8	2.523	0.21	11.8	2.523	0.22	11.0	2.451
8	46	14:00	0.18	11.7	2.083	0.18	11.7	2.083	0.18	10.9	1.989
9	40	15:00	0.12	11.6	1.430	0.12	11.6	1.430	0.12	10.8	1.330
10	40	16:00	0.06	11.6	0.639	0.06	11.6	0.639	0.06	10.6	0.600

Тут °C — температура навколишнього середовища, а φ — кут нахилу панелі. Водночас вимірювання показників під час експериментальної апробації проводилося у польових умовах поблизу одного з населених пунктів Броварського району, Київської області і тривали три дні, охоплюючи повний світловий період з 07:30 до 16:00 за місцевим часом. Протягом експерименту макет сонячної панелі розташовувався перпендикулярно до сонця, а всі дані реєструвалися у вигляді зміни показників вихідної напруги, струму та потужності з подальшим записом у внутрішню пам'ять системи. Отримані числові результати експерименту представлено у таблиці 2, де показники для трьох конфігурацій підписано як: «Трекер-гібрид», «Трекер-зір» та «Панель».

Таблиця 2. Зміна вихідних показників сонячної панелі з часом

			<i>Трекер-гібрид</i>			<i>Трекер-зір</i>			<i>Панель</i>		
°C	φ	Час	I,А	U,В	P,Вт	I,А	U,В	P,Вт	I,А	U,В	P,Вт
3	98	7:30	0,04	11,0	0,44	0,02	10,8	0,21	0,00	9,5	0,00
4	96	8:00	0,12	11,5	1,38	0,07	11,2	0,78	0,02	10,0	0,20
5	94	9:00	0,22	11,8	2,59	0,14	11,5	1,61	0,06	10,2	0,61
6	90	10:00	0,30	12,0	3,60	0,22	11,6	2,55	0,12	10,3	1,23
7	85	11:00	0,4	12,1	4,84	0,35	11,3	3,95	0,18	10,4	1,87
8	82	12:00	0,37	11,6	4,29	0,37	11,7	4,32	0,22	10,9	2,39
9	78	13:00	0,41	12,1	4,96	0,40	12,1	4,84	0,31	11,7	4,68
9	76	14:00	0,42	12,2	5,12	0,41	12,1	4,96	0,34	12,2	5,12
8	80	15:00	0,39	11,8	4,60	0,22	10,9	2,39	0,3	11,6	4,52
7	84	16:00	0,37	11,7	4,32	0,1	10,1	1,01	0,1	11,1	3,77

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В процесі експериментальної апробації розробленої системи було підтверджено значну перевагу активних сонячних трекерів у ранковий період (07:30–11:00). Як видно з результатів експерименту, в період часового вікна до 10:00 системи «Трекер-гібрид» та «Трекер-зір» мали суттєво вищі показники генеруємої потужності (3,60 Вт і 2,55 Вт) порівняно зі стаціонарною панеллю (1,23 Вт). Такий результат наочно демонструє правдивість гіпотези про додаткове підвищення ефективності відстеження ранкового положення сонця

моторизованими системами [2]. Водночас, у часовий період близько полудня, коли кут падіння променів був оптимальним, показники потужності для різних систем зрівнялися. Близько 14:00 стаціонарна панель досягла піку показників (5,12 Вт), демонструючи при цьому ідентичні результати з системою типу «Трекер-гібрид». Більш критичною різниця у показниках між системами із автоматизованим позиціонуванням виявилася у другій половині дня (ближче до 16:00), коли генерація на «Трекер-зір» різко впала до показників на рівні 1,01 Вт. Така тенденція є наслідком помилок оптичного розпізнавання YOLOv8 в умовах змінного освітлення, що може бути характерно і для інших CV алгоритмів (FOMO [3], Deep SORT, тощо). Натомість система «Трекер-гібрид» продемонструвала високу продуктивність і в умовах зменшення інтенсивності сонячного випромінювання завдяки поєднанню нейромережі з точним астрономічним розрахунком положення сонця [4]. У підсумку, в рамках експериментального дослідження найвищі показники було продемонстровано системою «Трекер-гібрид» із середньою потужністю 3,61 Вт, що забезпечує приріст ефективності на 48,2 % порівняно з стандартними стаціонарними панелями. Водночас система типу «Трекер-зір», незважаючи на зниження показників у вечірній час, перевищує ефективність стаціонарної сонячної панелі на 9,1 %, завдяки більшій потужності генерації у ранковий період.

У процесі порівняння прогностичної моделі роботи системи та результатів реального експерименту можна побачити розбіжність у досягнутих абсолютних значеннях потужності панелей. Максимальна розрахункова потужність у симуляції склала лише 2,71 Вт о 12:00, тоді як реальний експеримент зафіксував пік 5,12 Вт о 14:00. Така різниця пояснюється консервативністю закладених у модель параметрів атмосфери, характерних для пізньої осені, тоді як реальні заміри проводилися в день з винятково високою прозорістю атмосфери та прямою інсоляцією. Найбільш цінним у цьому випадку є порівняння відносної ефективності. Математична модель прогнозувала, що різниця між трекером і стаціонарною панеллю буде мінімальною. Натомість експериментальні дані демонструють значно більший розкид значень, де крива продуктивності «Трекер-гібрида» піднімається набагато стрімкіше за показники стаціонарної панелі, особливо в ранкові години з 08:00 до 11:00. Така ситуація може свідчити про те, що модель не повністю враховує втрати на відбиття світла від поверхні стаціонарної панелі при гострих кутах падіння променів. У реальних умовах трекер, повертаючись перпендикулярно до сонця, усуває ці втрати, забезпечуючи значно більший приріст енергії (+48,2 %), ніж передбачено у математичній моделі.

ВИСНОВКИ

У цій роботі було представлено особливості математичного моделювання та експериментального дослідження ефективності застосування стаціонарних та гібридних систем сонячних панелей для генерування електричної енергії. Зокрема проведено теоретичне та практичне порівняння енергоефективності системи зі стаціонарною панеллю, з автоматизованим трекером що керується базуючись виключно на оптичному методі позиціонування, а також трекері який використовує

технології комп'ютерного зору сумісно з астрономічними алгоритмами. Проведене експериментальне дослідження підтвердило високу ефективність розробленої системи сонячного трекінгу в реальних польових умовах. Отримані результати свідчать про те, що використання активних систем стеження дозволяє суттєво розширити часове вікно ефективної генерації електроенергії, особливо в ранкові та вечірні години, коли стаціонарні системи демонструють мінімальну продуктивність через несприятливий кут падіння сонячних променів. Дослідження також виявило критичні обмеження систем, що базуються виключно на технологіях комп'ютерного зору. Система «Трекер-зір», яка використовує лише нейромережу YOLOv8, хоча і перевершила стаціонарну панель на 9,1 % за загальною ефективністю, проте продемонструвала нестабільність у другій половині дня. Зниження освітленості та зміна спектральних характеристик світла призвели до помилок у розпізнаванні сонця та втрати ефективності. Це підтвердило необхідність дублювання оптичних сенсорів астрономічними алгоритмами, що було реалізовано в системі типу «Трекер-гібрид». Завдяки інтеграції двох методів просторової орієнтації система «Трекер-гібрид» забезпечила приріст генерації електроенергії на 48,2 % порівняно зі стаціонарною панеллю, нівелюючи проблему нестабільності притаманну оптичним сенсором у вечірній час доби.

Крім того, виконана верифікація експериментальних даних відносно математичної моделі засвідчила, що при моделюванні теоретичних розрахунків часто недооціненою залишається реальна експлуатаційна перевага активних систем стеження. Зокрема, теоретичні розрахунки можуть недооцінювати реальну вигоду від використання трекерів. У польових умовах, де на роботу стаціонарної панелі впливають фізичні фактори відбиття світла та кутові втрати, трекер забезпечує значно більшу перевагу, ніж прогнозує ідеалізована математична модель. А це в свою чергу означає, що реальна економічна доцільність впровадження подібних систем є вищою за розрахункову. Таким чином, робота доводить, що мультимодальний підхід до керування та автоматизація просторового позиціонування сонячних панелей є перспективним рішенням для підвищення рентабельності автономних установок генерації електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – New York: Wiley, 2013. – 928 p.
- [2] A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output / H. Mousazadeh et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, no. 8. P. 1800–1818. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.022>.
- [3] Lobur, Y.; Vonsevych, K.; Bezugla, N. Spatial identification of manipulable objects for a bionic hand prosthesis. Appl. Comput. Sci. 2025, 21, 18–30. https://doi.org/10.35784/acs_6867
- [4] Reda I., Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications // Solar Energy. – 2004. – Vol. 76, Issue 5. – P. 577-589.