

Зибалов Дмитро Сергійович, аспірант, асистент кафедри «Кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем», +38(067)707-60-55, zybalov.d.s@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5891-9325.

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького 19, м. Дніпро, Україна, 49005*

ВПЛИВ КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ГЕНЕРОВАНУ ПОТУЖНІСТЬ В УМОВАХ ХМАРНOSTІ ТА СТАТИСТИЧНИЙ КРИТЕРІЙ ДОЦІЛЬНОСТІ ТРЕКІНГУ

***Анотація.** Експериментально досліджено вплив кута нахилу сонячного фотоелектричного перетворювача (СФП) на генеровану потужність. Показано, що при наявності хмар оптимальний кут нахилу СФП зміщується відносно нормалі до напрямку сонячного випромінювання. На основі отриманих експериментальних даних визначено характерні ознаки хмарності у вигляді швидких флуктуацій іррадіації та відповідних змін генерованої потужності. Розроблено алгоритм виявлення хмарності, який ґрунтується на статистичному аналізі потужності, що дозволяє ідентифікувати появу, зникнення та інтенсивність хмарних утворень у реальному часі. Отримані результати мають практичне значення для застосування при розробці оптимальних алгоритмів трекерних систем керування положенням СФП у просторі.*

***Ключові слова:** сонячний фотоелектричний перетворювач, кут нахилу, генерована потужність, іррадіація, хмарність, змінна інсоляція, алгоритм виявлення хмарності, статистичний аналіз, часові ряди, системи керування.*

Zybalov Dmytro, postgraduate student, assistant at the Department of «Cyber-Physical and Information-Measuring Systems», +38(067)707-60-55, zybalov.d.s@nmu.one, ORCID ID: 0000-0001-5891-9325.

*Dnipro University of Technology
19 Dmytra Yavornytskoho St., Dnipro, Ukraine, 49005*

INFLUENCE OF THE TILT ANGLE OF A PV MODULE ON GENERATED POWER UNDER CLOUDY CONDITIONS AND A STATISTICAL CRITERION FOR TRACKING

***Abstract.** The influence of the tilt angle of a solar photovoltaic converter -SPC- on the generated power has been experimentally investigated. It is shown that under cloudy conditions the optimal tilt angle shifts relative to the normal to the direction of solar radiation. Based on the obtained experimental data, characteristic features of cloudiness have been identified in the form of rapid fluctuations of irradiance and corresponding variations in the generated power. A cloud detection algorithm has been developed, based on the statistical analysis of power, which enables real-time identification of the occurrence, disappearance, and intensity of cloud formations. The obtained results have practical significance for the development of optimal control algorithms for solar tracking systems that regulate the spatial orientation of the SPC.*

***Keywords:** solar photovoltaic converter, tilt angle, generated power, irradiance, cloudiness, variable insolation, cloud detection algorithm, statistical analysis, time series, control systems.*

Актуальність роботи. Існуючі системи сонячного трекінгу не враховують наявність хмарності при виборі напрямку орієнтації сонячного фотоелектричного перетворювача (СФП) у просторі, що призводить до зниження ефективності роботи в умовах переважаючої розсіяної сонячної енергії. За таких умов традиційні алгоритми орієнтації СФП не забезпечують оптимального положення СФП, що спричиняє додаткові енергетичні втрати на переміщення СФП. У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення адаптивних алгоритмів керування положенням СФП в умовах хмарності. Застосування таких алгоритмів дозволить підвищити енергетичну ефективність автономних трекерних сонячних систем, зменшити апаратну складність і енергоспоживання системи керування, а також забезпечити більш раціональне використання сонячної енергії в реальних умовах експлуатації.

Мета. Дослідити вплив кута нахилу СФП на генеровану потужність в умовах хмарної погоди, а також розробити алгоритм виявлення хмарності на основі статистичного аналізу змін генерованої потужності з метою виявлення оптимального положення СФП у просторі в хмарну погоду, при якому буде максимум генерованої енергії.

Матеріали та результати досліджень. Дослідження виконано експериментально шляхом вимірювання генерованої потужності СФП в горизонтальному положенні та в положенні по нормалі до сонячного випромінювання при різних умовах змінної хмарності. Для виявлення рівня хмарності отримані часові ряди потужності статистично обробляються з метою виділення характерних флуктуацій, що відповідають появі хмар. Обробка даних здійснювалася із застосуванням мікроконтролерної системи збору даних та програмної реалізації алгоритму статистичного аналізу сигналу.

На основі аналізу потужності, яку генерує СФП, розроблено алгоритм виявлення хмарності, що використовує статистичні критерії змін сигналу для ідентифікації наявності хмар. Виявлення хмарності є необхідним для трекерних систем, оскільки дозволяє визначати умови, за яких трекінг є неефективним. Трекінг без урахування хмарності призводить до зниження генерованої потужності, втрат енергії на трекінг та підвищеного зносу механічної частини

системи. Запропонований підхід забезпечує підвищення ефективності роботи трекерних систем за рахунок зниження витрат енергії на трекінг.

Наукова новизна. У результаті проведених досліджень встановлено, що в умовах хмарності горизонтальне положення СФП може бути енергетично більш ефективним порівняно з орієнтацією по нормалі до напрямку на Сонце. Розроблено спосіб виявлення метеорологічних умов, за яких застосування трекерних систем є недоцільним, що дозволяє підвищити ефективність генерації та зменшити знос механічних елементів.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані при розробці та вдосконаленні трекерних систем СФП для підвищення ефективності генерації електричної енергії в умовах змінної хмарності. Запропонований алгоритм виявлення хмарності дозволяє змінювати режими роботи трекера або тимчасово відмовлятися від трекінгу за умов його неефективності, що зменшує втрати енергії та знос механічних компонентів. Практичне впровадження підходу забезпечує підвищення надійності та енергоефективності фотоелектричних систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботі [1] показано, що врахування динаміки хмарності та супутникових даних суттєво підвищує точність прогнозування сонячної іррадіації в умовах змінної хмарності. У дослідженні [2] встановлено, що хмарність є основним фактором короткочасної варіабельності іррадіації, яка проявляється у вигляді швидких флуктуацій сонячного випромінювання. У роботі [3] детально проаналізовано просторово-часову мінливість іррадіації під впливом купчастих хмар, який призводить до значних коливань потужності СФП. У оглядовій статті [4] показано, що ефективність трекерних систем суттєво знижується в умовах домінування розсіяного випромінювання, характерного для хмарної погоди. У статті [5] узагальнено сучасні методи виявлення хмарності, більшість з яких базуються на супутникових або оптичних даних і потребують складних технічних засобів.

Разом з тим аналіз літератури показує, що питання визначення хмарності безпосередньо за електричними параметрами СФП, зокрема за змінами

генерованої потужності, залишається недостатньо дослідженим. Також обмежено висвітлено вплив кута нахилу СФП на ефективність генерації саме в умовах хмарної погоди та відсутні прості алгоритми, які дозволяють у реальному часі визначати доцільність використання трекерних систем. Це зумовлює актуальність проведення даного дослідження, спрямованого на поєднання аналізу енергетичних характеристик СФП із задачами виявлення хмарності та ефективного керування їх орієнтацією.

Вирішення проблеми. При хмарній погоді інтенсивність прямої іррадіації істотно зменшується, внаслідок чого починає переважати дифузна складова іррадіації. Дифузне випромінювання формується внаслідок багаторазового розсіювання сонячного потоку в атмосфері та надходить на поверхню СФП практично з усіх напрямків. Тип такого випромінювання близький до ізотропного. Загальну іррадіацію можна розрахувати за формулою 1.

$$I = I_b * \cos \theta + I_d * k_s + I_r * k_g, \quad (1)$$

де I_b – пряма складова іррадіації, I_d – дифузна складова, I_r – відбита складова, θ – кут між нормаллю до поверхні СФП та напрямком на Сонце, k_s – коефіцієнт видимості небесної півсфери, k_g – коефіцієнт видимості земної поверхні. Для поверхні, яка знаходиться під кутом нахилу β коефіцієнт видимості небесної півсфери $k_s = \frac{1 + \cos \beta}{2}$. При щільній хмарності орієнтація СФП по нормалі до Сонця втрачає свою ефективність, оскільки внесок прямої складової зменшується, а дифузна складова стає домінуючою. Внесок дифузної складової складає максимум свого значення, так як при горизонтальному розташуванні СФП кут напрямку на сонце $\beta = 0$, а значить $k_s = 1$, що відповідає максимальному огляду небесної півсфери та забезпечує найбільше значення дифузної іррадіації. Зі збільшенням кута нахилу зменшується k_s , що призводить до зниження внеску дифузної складової в загальний енергетичний баланс. Для підтвердження ефективності роботи СФП у горизонтальному положенні в хмарну погоду було проведено дослід, результати якого приведено на рис. 1.

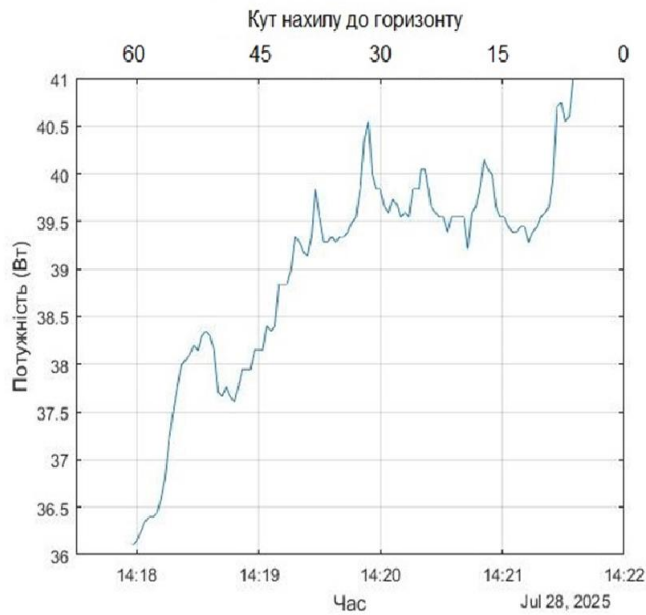


Рисунок 1 – Дослідження впливу зміни кута нахилу СФП в хмарну погоду на генеровану потужність.

За результатами проведеного експерименту різниця генерованої потужності між напрямком по нормалі до променів Сонця та горизонтальним положенням для СФП потужністю 290 Вт монокристалічного типу становить усього 3 Вт. Це свідчить про незначний вплив орієнтації на енергетичну ефективність у досліджуваних умовах та підтверджує домінування дифузної складової сонячної іррадіації.

Отриманий результат підтверджує, що в умовах хмарної погоди застосування трекерних систем не забезпечує суттєвого приросту генерованої потужності, оскільки орієнтація СФП по нормалі до напрямку на Сонце не призводить до значного збільшення поглиненої енергії. Більше того, використання трекінгу в таких умовах є недоцільним з енергетичної точки зору, оскільки додаткові витрати енергії на приводи та керування, а також знос механічних елементів не компенсуються приростом генерації. Таким чином, у випадках домінування дифузної складової іррадіації доцільним є застосування фіксованого режиму роботи системи позиціонування СФП, при якому кут нахилу змінюється лише за умов достатнього рівня прямого сонячного випромінювання. Це обґрунтовує необхідність впровадження алгоритмів виявлення хмарності для

прийняття рішень щодо доцільності використання трекерних систем у реальному часі.

Одержання та аналіз результатів. Аналіз експериментальних даних виконано в рамках статистичної обробки випадкових процесів, що описують зміну потужності СФП у часі. Вихідні дані сформовані у вигляді дискретної часової вибірки, отриманої з фіксованим інтервалом дискретизації. Значення миттєвої потужності визначаються як добуток вимірних миттєвих значень напруги та струму. Сигнал потужності $P_i = m_i + \varepsilon_i$ розглядається як реалізація стохастичного процесу, який може бути представлений у вигляді суми детермінованої m_i та випадкової ε_i складових. Детермінована складова m_i відображає тренд, зумовлений добовим рухом Сонця та зміною геометричних умов інсоляції, випадкова складова ε_i відображає короточасні флуктуації іррадіації, спричиненими хмарністю. Оцінювання детермінованої складової виконується за допомогою усереднення, внаслідок чого отримується оцінка

математичного сподівання $P_C = \frac{1}{N} * \sum_{n=0}^{N-1} P[n]$, яке характеризує середній рівень

генерації електричної енергії на заданому інтервалі часу. Однак зазначена величина не відображає структури варіацій сигналу та не дозволяє оцінити ступінь нестабільності процесу. З метою виділення випадкової складової здійснюється центрування сигналу $x[n] = P[n] - P_C$, що дозволяє усунути вплив детермінованого тренду та перейти до аналізу флуктуацій відносно середнього рівня. Кількісна оцінка інтенсивності випадкових відхилень здійснюється за

допомогою дисперсії $D = \frac{1}{N-1} * \sum_{n=1}^N (x[n])^2$, яка характеризує енергетичну міру

варіацій сигналу потужності. Зростання значення дисперсії свідчить про підвищення рівня нестабільності генерації, що є характерною ознакою наявності хмарності. Середньоквадратичне відхилення $\sigma = \sqrt{D}$ визначає характерний масштаб флуктуацій потужності та дозволяє оцінити середній рівень відхилення миттєвих значень від середнього. Для забезпечення інваріантності оцінок відносно абсолютного рівня генерації використовується коефіцієнт варіації

$C_v = \frac{\sigma}{P_s}$, який відображає відносну інтенсивність флуктуацій і є безрозмірним критерієм нестабільності процесу. Результати обробки масивів даних потужності при хмарній і сонячній погоді приведено на рис. 2.

При безхмарному небі сигнал потужності характеризується високим ступенем гладкості та монотонною зміною, обумовленою переважно геометрією руху Сонця та атмосферною екстинкцією, що відповідає малим значенням дисперсії та коефіцієнта варіації. Натомість за умов змінної хмарності спостерігається різке зростання варіабельності сигналу, що проявляється у вигляді високочастотних флуктуацій значної амплітуди, які призводять до збільшення дисперсії та коефіцієнта варіації.

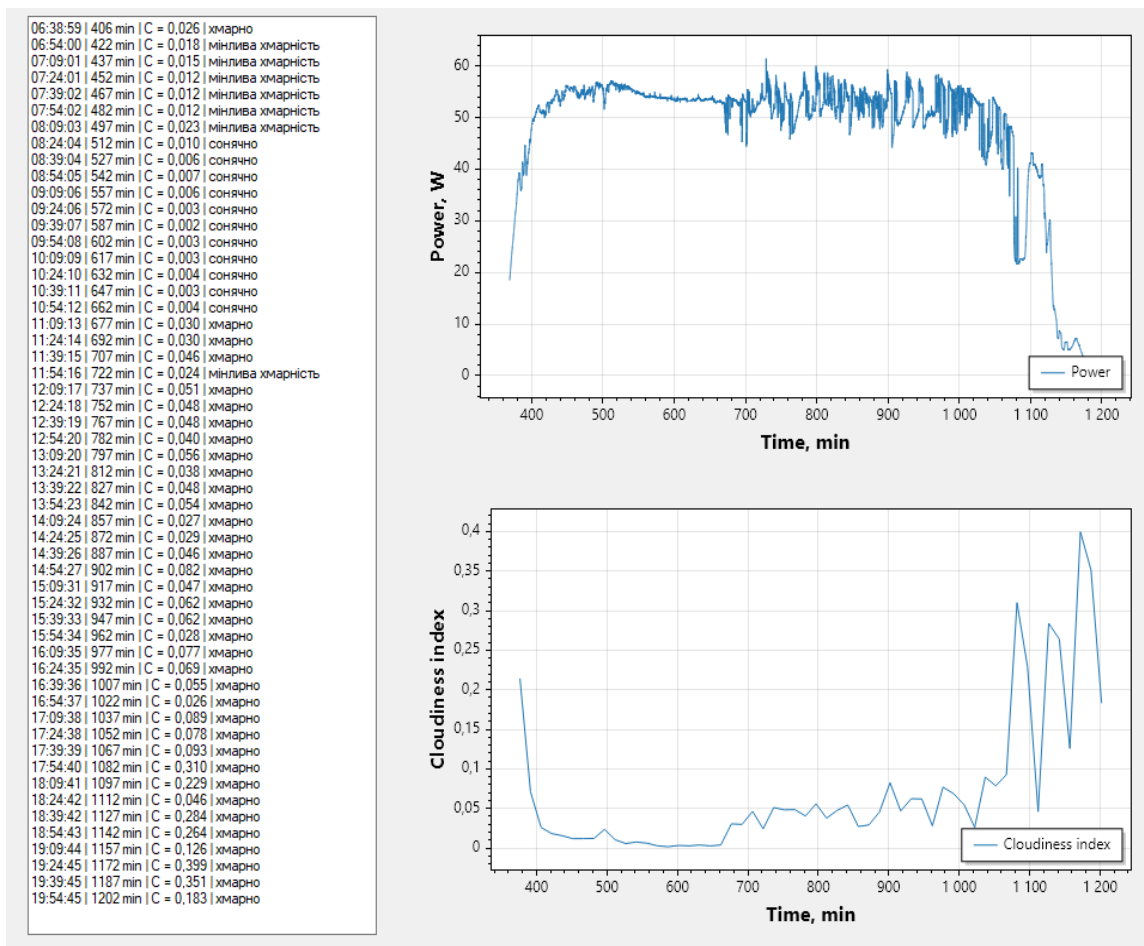


Рисунок 2 – Результати обробки масивів даних потужності при хмарній і сонячній погоді.

Висновки та перспективи. У роботі наведено результати експериментального дослідження впливу кута нахилу СФП на генеровану

потужність в умовах змінної хмарності. Дослідження проведено на основі аналізу часового ряду генерованої потужності при різних кутах орієнтації СФП відносно Сонця в хмарну погоду. Встановлено, що в умовах хмарної погоди залежність потужності від кута нахилу має нелінійний характер і суттєво відрізняється від умов безхмарного неба, що зумовлено зростанням частки розсіяної складової сонячного випромінювання. Відображено, що при наявності хмар оптимальний кут нахилу СФП зміщується відносно геометрично розрахованого положення, що відповідає максимуму прямої інсоляції, а вплив орієнтації на вихідну потужність зменшується. На основі отриманих експериментальних даних визначено характерні ознаки хмарності у вигляді змін генерованої потужності. Розроблено алгоритм виявлення хмарності, який ґрунтується на статистичному аналізі потужності, що дозволяє ідентифікувати появу, зникнення та інтенсивність хмарних утворень у реальному часі. Запропонований підхід не потребує використання додаткових метеорологічних сенсорів і може бути реалізований виключно на основі електричних параметрів СФП. Статистичні характеристики сигналу потужності СФП можуть бути використані як інформативні ознаки для ідентифікації хмарності та оцінювання динамічного стану інсоляції. Це створює підґрунтя для розробки алгоритмів адаптивного керування режимами роботи трекерних систем позиціонування СФП, зокрема в задачах оптимізації орієнтації та підвищення ефективності генерації електричної енергії.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Bu Q., Zhuang S., Luo F., Ye Z., Yuan Y., Ma T., Da T. Improving Solar Radiation Forecasting in Cloudy Conditions by Integrating Satellite Observations. *Energies*, 2024. Vol. 17(24). Art. 6222. DOI: 10.3390/en17246222.
2. Gueymard C. A. та ін. Influence of cloudy and clear-sky conditions on surface solar irradiance variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024. Vol. 24. P. 12375–12400. DOI: 10.5194/acp-24-12375-2024.
3. Schmidt T. та ін. Combining observations and simulations to investigate the small-scale variability of surface solar irradiance under continental cumulus clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024. Vol. 24. P. 11391–11420. DOI: 10.5194/acp-24-11391-2024.
4. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems // *Energies*, 2025. Vol. 18(10). Art. 2553. DOI: 10.3390/en18102553.
5. Li X., Zhang L. та ін. The State-of-the-Art Progress in Cloud Detection, Identification, and Tracking Approaches: A Systematic Review. *Energies*, 2021. Vol. 14(23). Art. 8119. DOI: 10.3390/en14238119.

REFERENCES:

1. Bu Q., Zhuang S., Luo F., Ye Z., Yuan Y., Ma T., Da T. Improving Solar Radiation Forecasting in Cloudy Conditions by Integrating Satellite Observations. *Energies*, 2024. Vol. 17(24). Art. 6222. DOI: 10.3390/en17246222.
2. Gueymard C. A. та ін. Influence of cloudy and clear-sky conditions on surface solar irradiance variability. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024. Vol. 24. P. 12375–12400. DOI: 10.5194/acp-24-12375-2024.
3. Schmidt T. та ін. Combining observations and simulations to investigate the small-scale variability of surface solar irradiance under continental cumulus clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024. Vol. 24. P. 11391–11420. DOI: 10.5194/acp-24-11391-2024.
4. A Review and Comparative Analysis of Solar Tracking Systems // *Energies*, 2025. Vol. 18(10). Art. 2553. DOI: 10.3390/en18102553.
5. Li X., Zhang L. та ін. The State-of-the-Art Progress in Cloud Detection, Identification, and Tracking Approaches: A Systematic Review. *Energies*, 2021. Vol. 14(23). Art. 8119. DOI: 10.3390/en14238119.

Стаття надійшла до редакції: 08.04.2026; рецензування: 15.04.2026;

прийнята до публікації 21.04.2026. Автори прочитали и дали згоду рукопису.

The article was submitted on 08.04.2026; revised on 15.04.2026; and accepted for publication on 21.04.2026. The authors read and approved the final version of the manuscript.