

УДК 620.92

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.155.1086

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

ЮРЧЕНКО Є. Л.¹, канд. техн. наук, доц.,

КОВАЛЬ О. О.², канд. техн. наук, доц.,

ТИМОФЄЄВ В. В.^{3*}, студ.,

ОДНОБУРЦЕВ Р. О.⁴, маг.

¹ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 487-91-73, e-mail: yel@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 92-999-55, e-mail: koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7805-6811

^{3*} Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 632-85-69, e-mail: yovativ@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-3983-199X

⁴ Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +380 (097) 048-13-14, e-mail: rostyslav.odnoburtsev@gmail.com

Анотація. Досліджується питання оптимізації параметрів установлення сонячних панелей для максимізації їх ефективності в умовах сучасної України, де традиційна енергетична інфраструктура зазнає значних руйнувань через війну. Особлива увага приділяється параметрам, таким як кут нахилу та орієнтація сонячних панелей відносно сонця, що впливають на загальну продуктивність системи. Дослідження проводилося на базі сонячної електростанції, розташованої на даху навчального корпусу Українського державного університету науки і технологій у місті Дніпро. Проведено детальний аналіз роботи станції з орієнтацією сонячних масивів на південний захід (азимут 222°) та порівняння результатів із розрахунками, отриманими за допомогою калькулятора PVWatts®, розробленого Національною лабораторією енергетики США (NREL). Результати дослідження показали, що фактична річна генерація електроенергії становила 3 917 кВт·год, що наближається до прогнозованих 3 973 кВт·год, отриманих за допомогою PVWatts®. Аналіз також продемонстрував, що зміна орієнтації сонячних панелей з південного заходу на південь (азимут 180°) може збільшити річну генерацію електроенергії до 4 227 кВт·год, що підтверджує максимальну ефективність південної орієнтації. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації існуючих і майбутніх проектів сонячних електростанцій, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів та підвищення загальної ефективності енергосистем. Це знання сприятиме зниженню залежності від викопних джерел енергії, скороченню викидів парникових газів та забезпеченню безперебійного постачання електроенергії для населення та критично важливих об'єктів в умовах руйнування традиційної енергетичної інфраструктури.

Ключові слова: орієнтація сонячних панелей; ефективність сонячної енергії; оптимальний кут нахилу; відновлювана енергія; продуктивність сонячних панелей

SELECTION OF OPTIMAL SOLAR PANEL ORIENTATION PARAMETERS

YURCHENKO Ye.L.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

KOVAL O.O.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

TIMOFEEV V.V.^{3*}, *Stud.*,

ODNOBURTSEV R.O.⁴, *Master's degree*

¹Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 487-91-73, e-mail: yel@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

² Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 92-999-55, e-mail: koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7805-6811

^{3*} Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 632-85-69, e-mail: vovatim@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-3983-199X

⁴ Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +380 (097) 048-13-14, e-mail: rostyslav.odnoblurtsev@gmail.com

Abstract. The article investigates the issue of optimising the installation parameters of solar panels to maximise their efficiency in the conditions of modern Ukraine, where the traditional energy infrastructure is severely damaged due to military operations. Particular attention is paid to parameters such as the angle of inclination and orientation of solar panels relative to the sun, which affect the overall performance of the system. The study was carried out on the basis of a solar power plant located on the roof of the educational building of the Ukrainian State University of Science and Technology in Dnipro. A detailed analysis of the plant's operation was carried out with the solar arrays oriented to the southwest (azimuth 222°) and the results were compared with the calculations obtained using the PVWatts® calculator developed by the US National Energy Laboratory (NREL). The results of the study showed that the actual annual electricity generation was 3917 kWh, which is close to the predicted 3973 kWh obtained using PVWatts®. The analysis also demonstrated that changing the orientation of the solar panels from southwest to south (180° azimuth) could increase the annual electricity generation to 4227 kWh, which confirms the maximum efficiency of the southern orientation. The findings can be used to optimise existing and future solar power plant projects, ensuring more efficient use of resources and improving the overall efficiency of power systems. This knowledge will help to reduce dependence on fossil energy sources, reduce greenhouse gas emissions and ensure uninterrupted electricity supply for the population and critical facilities in the face of the destruction of traditional energy infrastructure.

Keywords: *solar panel orientation; solar energy efficiency; optimal tilt angle; renewable energy; solar panel performance*

Постановка проблеми. У сучасному світі спостерігається стрімке зростання попиту на відновлювані джерела енергії. Особливо актуальною ця проблема стала для України, яка перебуває у стані війни з росією і нашу енергетичну систему знищує ворог. В умовах руйнування традиційної енергетичної інфраструктури важливо шукати альтернативні джерела енергії, які можуть забезпечити безперебійне постачання електроенергії для населення та критично важливих об'єктів.

Один із найпоширеніших та найперспективніших видів відновлюваної енергії – сонячна. Використання сонячних панелей для генерації електроенергії дозволяє знизити залежність від викопних джерел енергії та скоротити викиди парникових газів, що сприяє збереженню навколишнього середовища.

Проте ефективність роботи сонячних панелей значною мірою залежить від таких параметрів як кут нахилу та орієнтація відносно сонця [1]. Невідповідний вибір цих параметрів може спричинити значні втрати енергії, що знижує загальну ефективність системи та збільшує час окупності

інвестицій у встановлення сонячних панелей.

Існує необхідність в оптимізації параметрів установа сонячних панелей для забезпечення максимальної ефективності генерації електроенергії. Це завдання ускладнюється великою кількістю змінних, які потрібно враховувати, таких як географічне розташування, кліматичні умови, сезонні зміни, а також технічні характеристики самих панелей [4].

Мета статті – детальний аналіз орієнтації сонячних панелей на їх ефективність. Це дозволить визначити оптимальні параметри встановлення, які забезпечать максимальну продуктивність сонячних панелей у різних умовах експлуатації. В результаті дослідження будуть розроблені рекомендації для проектування та встановлення сонячних панелей, що сприятиме підвищенню ефективності використання сонячної енергії.

Об'єкт дослідження – сонячна електростанція, розташована на даху навчального корпусу Українського державного університету науки і технологій,

а також у частині приміщень Енергоінноваційного.

Розташування сонячних панелей та орієнтація за сторонами світу зображені на рисунку 1.

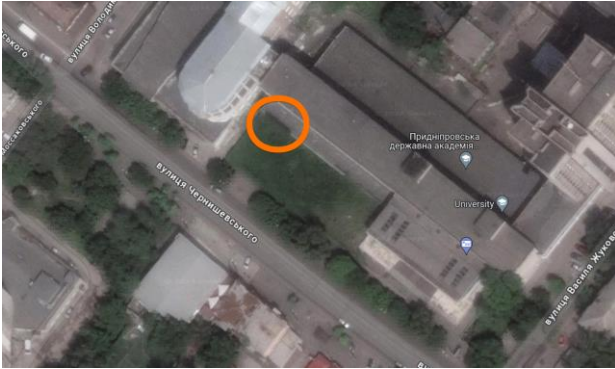


Рис. 1. Розташування сонячних масивів

Сонячна електростанція складається з 20 монокристалічних сонячних панелей моделі UL-405M-144. Ефективність цієї моделі досягає 22,65 %. Високий ККД досягнутий завдяки монокристалічній структурі, використанню половинчастих комірок і технології Tiling Ribbon (TR). TR-технологія передбачає безшовне з'єднання комірок та усунення розривів, що значно підвищує ефективність.

Сонячний масив орієнтований на південний захід. Усі дані про генерацію електроенергії звітуються в електронному форматі, що дозволяє відстежувати та досліджувати генерацію електроенергії та потужність СЕС протягом часу. Це також дозволяє за потреби змінювати кут нахилу сонячних панелей і аналізувати ефективність СЕС.

Конструктивні можливості дозволяють орієнтувати сонячні масиви тільки в південно-західному напрямку. Однак аналіз ефективності роботи можливий шляхом визначення сонячної інсоляції, яка безпосередньо впливає на значну генерацію електроенергії. Аналіз проводиться на основі відстеження генерації електроенергії як у зимовий, так і в літній період для порівняння показників та визначення оптимального орієнтування сонячних масивів щодо сторін світу. Джерелом теплових надходжень від сонця є сонячна радіація, режим якої характерний у даній

місцевості; її визначають орієнтацією сприймальних поверхонь [2].

Максимальні показники генерації електроенергії, тобто максимальна вихідна потужність СЕС, залежать від отриманої максимальної потужності сонячних променів під час пікових сонячних годин. Об'єднавши два значущі фактори — сонячну інсоляцію та показники іррадіації, тобто максимальної кількості сонячної енергії, — можна проаналізувати, яка орієнтація найбільш ефективна для роботи СЕС.

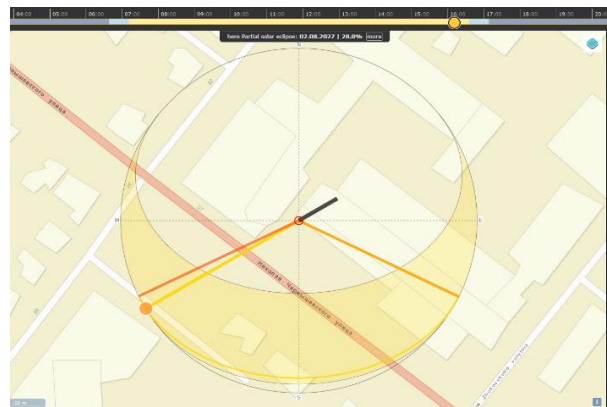


Рис. 2. Дані інсоляції за 30 січня 2023 року

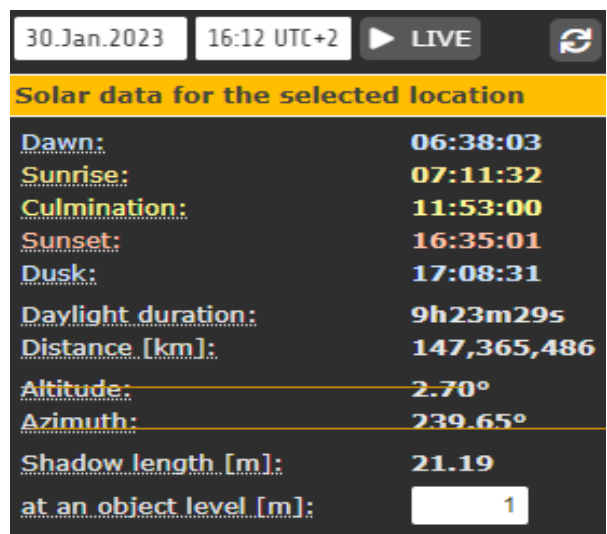


Рис. 3. Характеристики сонячного дня на 30 січня 2023 року

Спершу аналізуємо ефективність роботи СЕС у робочому положенні з орієнтацією сонячних панелей на південний захід. Аналіз базується на зібраних даних за чотири дні різних сезонів: зимовий, весняний, літній та осінній.

Зібрані дані об'єднують у загальну річну генерацію електроенергії та порівнюють із

показниками можливої генерації електроенергії через калькулятор PVWatts, який дозволяє аналізувати генерацію електроенергії протягом року [3].

Порівняння характеристик проводиться залежно від зміни азимуту орієнтації сонячних масивів. У разі орієнтації на південь, де, як зазначалося раніше, є найбільші показники інсоляції, азимут складає 180°, тоді як за орієнтації на південний захід, на який спрямований масив дослідження, азимут складає 222°.

З отриманих результатів генерації електроенергії спостерігається, що максимальне значення потужності фіксується о 12-й годині дня. Початок

генерації електроенергії фіксується о 10-й годині ранку, а спад генерації відбувається близько 16-ї години дня.

З настанням весняного періоду, згідно з результатами інсоляції, видно, що пік сонячних годин значно збільшується, що підвищує генерацію електроенергії. Це підтверджують дані генерації електроенергії за 14 березня 2023 року, де максимальна потужність склала 4 Вт.

Влітку зростає як рівень інсоляції, так і пік сонячних годин, що значно підвищує генерацію електроенергії.

Проведено аналіз за кожен пору року. Зведені дані генерації електроенергії наведені в таблиці.

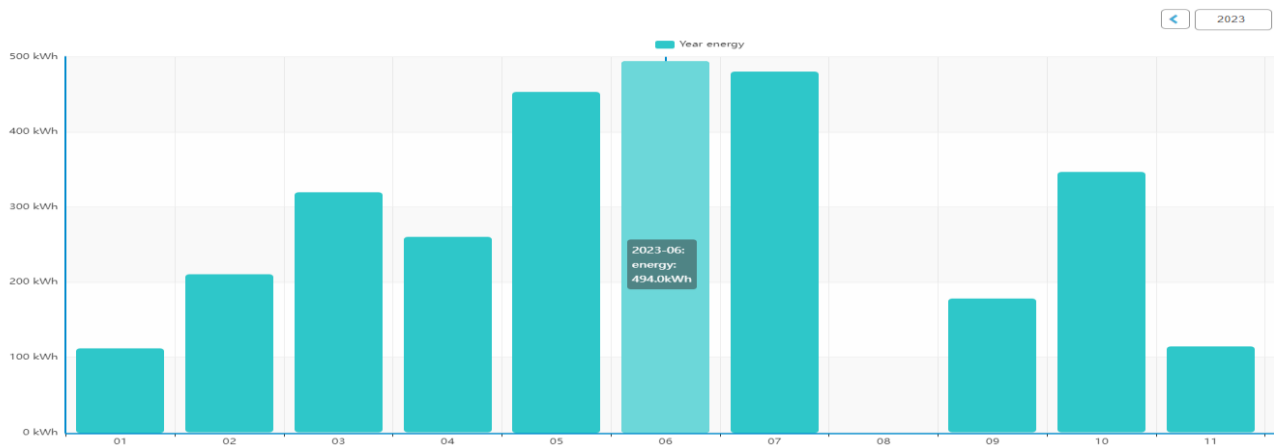


Рис. 4. Генерація електроенергії за 2023 рік

Т а б л и ц я

Зведені показники генерації електроенергії

Місяць	Обсяг виробництва електроенергії, кВт*год
січень	112,0
березень	319,0
червень	494,0
жовтень	346,0
Всього за 2023 рік	3 917,0

Порівняння показників генерації електроенергії з калькулятором PVWatts.

Отримавши зведені результати генерації електроенергії за рік, порівнюємо ефективність роботи сонячної електростанції (СЕС) з розрахунками, проведеними за допомогою калькулятора PVWatts® [3].

Калькулятор PVWatts® – це онлайн-інструмент, розроблений Національною лабораторією енергетики США (NREL),

призначений для прогнозування продуктивності систем сонячних панелей. Цей інструмент широко застосовують як професіонали у сфері сонячної енергетики, так і звичайні користувачі, які бажають встановити сонячні панелі на своїх будинках або підприємствах.

Основна мета PVWatts® – надати оцінку щоденної та щорічної генерації електроенергії сонячною установкою в певному місці [3]. Для обчислення враховується багато факторів, включаючи географічні координати, нахил даху (якщо це установка на даху), орієнтація панелей, тип сонячних панелей та інші параметри.

Користувач вводить дані про місце розташування, характеристики установки та бажаний розмір сонячної системи. Після цього калькулятор надає прогнозовану енергопродуктивність у кіловат-годинах

(кВт-год) на основі місцевих кліматичних умов та інших факторів.

Для розрахунку генерації електроенергії за допомогою PVWatts® використовуються такі вихідні дані:

- Координати СЕС: вулиця, будинок, місто.
- Розмір системи постійного струму: 4 кВт.
- Тип модуля: стандартний.
- Системні втрати: за замовчуванням 14,08 %.
- Кут нахилу панелей: 50°.
- Азимут (орієнтація сонячного масиву): південний захід (222°).

РЕЗУЛЬТАТИ		
Роздрукувати результати		
3973 кВт/год*		
місяць	Сонячна радіація (кВт/год / м / день)	Енергія змінного струму (кВт/год)
січня	0,62	50
лютий	1,90	180
березень	2,97	307
квітень	5,05	477
травень	5,76	548
червень	5,71	514
липень	4,68	431
серпень	6,51	600
вересень	3,75	347
жовтень	3,64	357
листопад	1,44	140
грудень	0,24	21
Річний	3,51	3,972

Рис. 5. Результати розрахунку калькулятора PVWatts (азимут 222°)

Увівши всі вихідні дані, ми отримали такий результат: щорічна генерація електроенергії склала 3 973 кВт-год, що максимально наближено до фактичної генерації електроенергії СЕС за 2023 рік (рис. 5). Наближені значення, розраховані за допомогою калькулятора, демонструють високу точність визначення генерації електроенергії не тільки за рік, а і щомісяця.

Отримавши результати розрахунків за допомогою калькулятора PVWatts, ми можемо підтвердити, що сонячна електростанція ПДАБА, орієнтована на південний захід, демонструє ефективність

роботи на рівні 93 %. Цей показник порівнюється з максимально можливою ефективністю у 100 %, якої можна досягти у разі орієнтації на південь.

Для дослідження максимально можливої ефективності роботи сонячної електростанції ми замінили в розрахунках калькулятора азимут орієнтації сонячних масивів. Як зазначалося раніше, максимальна інсоляція досягається за орієнтації сонячних масивів на південь, тобто з азимутом 180°.

Після зміни значення азимуту ми отримали нові результати: річна генерація електроенергії зросла до 4 227 кВт-год. Це свідчить, що саме південна орієнтація сонячних масивів забезпечує максимальні показники генерації електроенергії, а отже, і найвищу ефективність роботи сонячної електростанції.

Висновки

Аналіз показує, що зміна орієнтації сонячних панелей з південного заходу на південь дозволяє значно підвищити їх продуктивність. Враховуючи ці результати, можна зробити висновок, що для максимального використання сонячної енергії найкращою орієнтацією є південна, що підтверджується як теоретичними розрахунками, так і практичними вимірами.

Ці знання можна застосувати для оптимізації існуючих і майбутніх проектів сонячних електростанцій, забезпечуючи таким чином більш ефективне використання ресурсів та підвищення загальної ефективності енергосистем.

Ефективність роботи СЕС визначається не тільки шляхом перевірки даних через калькулятор, а і через самі значення інсоляції, наведені вище, де чітко зображено, що саме південний напрямок орієнтації сонячних масивів дає більше значення рівня інсоляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Герєга С., Коваль В., Філюк Я. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування : матер. III Всеукр. наук.-техн. конф.* (8–9 червня 2017 р.). ТНТУ, 2017. С. 202.

2. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. [Чинний від 2023–03–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: <http://uas.gov.ua> (Національний стандарт України).
3. Калькулятор PVWatts®. URL: <https://pvwatts.nrel.gov/>
4. Орієнтація та кут нахилу сонячних колекторів. URL: <https://solarsoul.net/uk/oriyentaciya-ta-kut-naxilu-sonyachnix-kolektoriv>

REFERENCES

1. Gerega S., Koval V. and Filiuk Ya. *Zbil'shennya efektyvnosti vykorystannya sonyachnykh paneley* [Increasing the efficiency of using solar panels]. *Teoretychni ta prykladni aspekty radiotekhniki i pryladobuduvannya : Materialy III Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Theoretical and Applied Aspects of Radio Engineering and Instrumentation : Materials of the III All-Ukrainian Scientific and Technical Conference]. June 8–9, TNTU, 2017, 202 p. (in Ukrainian).
2. *DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pid chas opalennya, okholodzhennya, ventylyatsiyi, osvitlennya ta haryachoho vodopostachannya* [DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water]. Valid from 2023–03–01. Kyiv : SE “UkrSSEC” Publ., 2022. URL: <http://uas.gov.ua> (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
3. *Kal'kulyator PVWatts®* [Calculator PVWatts®]. URL: <https://pvwatts.nrel.gov/> (in Ukrainian).
4. *Oriyentatsiya ta kut nakhylu sonyachnykh kolektoriv* [Orientation and angle of inclination of solar collectors]. URL: <https://solarsoul.net/uk/oriyentaciya-ta-kut-naxilu-sonyachnix-kolektoriv> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.04.2024.