

Шпилюр П.С.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

Іваненко Н.П.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

КЛАСИФІКАЦІЯ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

Враховуючи Європейський вектор розвитку України уряд приділяє значну увагу розвитку відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних електростанцій. У 2024 р. уряд України ухвалив цілу низку стратегій і планів, які в тому числі стосуються розвитку відновлюваних джерел енергії. Зокрема у Національному плані енергетики і клімату прогнозується, що частка відновлюваних джерел енергії у структурі загального кінцевого енергоспоживання має становити не менше як 27%, а в загальному виробництві електроенергії на рівні 25% у 2030 році. Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики та клімату України до 2030 року частка сонячної енергії в енергосистемі країни може досягти 5–7%. У статті класифіковано чинники, що впливають на собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями залежить від низки факторів, які можна умовно поділити на технічні, економічні, географічні та політичні. Метою статті є класифікація і оцінка чинників, які впливають на продовження строку експлуатації і підвищення ефективності роботи сонячних панелей, а також створення бази даних з техніко-економічними характеристиками відповідного обладнання, обслуговування і заходів. Наведено технічні рішення щодо зменшення впливу негативних чинників: впровадження наноструктурованих покриттів, систем активного охолодження, трекінгових механізмів і алгоритмів предиктивного обслуговування. Окрему увагу приділено вдосконаленню конструкційних та матеріалознавчих компонентів. Зібрано інформацію щодо техніко-економічних характеристик різних видів сонячних панелей і заходів з підвищення економічної ефективності і подовження строку експлуатації і сформовано відповідну базу даних. Ця база буде слугувати основою для економічної оцінки заходів зі зниження собівартості виробництва електроенергії сонячними панелями на основі розрахунку середньозваженої собівартості. Такі оцінки будуть враховувати кліматичні умови регіонів України.

Ключові слова: сонячні панелі, енергетична ефективність, економічна ефективність, собівартість, строк експлуатації.

Постановка проблеми. Країни ЄС докладають значних зусиль до протидії зміні клімату на відміну від США, які відкликали свій підпис під Паризькою угодою [1], демонструючи свою зневагу до цих проблем. Згідно з Угодою про асоціацію з ЄС [2] Україна повинна враховувати законодавче і нормативно-правове поле ЄС при плануванні розвитку енергетики у повоєнний час. Наріжним каменем політики ЄС щодо відновлюваної енергетики є Директива ЄС 2023/2413 [3], яка встановила ціль у 42,5% для частки відновлюваної енергії (сонячна енергія, енергія вітру, океану та гідроенергії, біомаса та біопаливо) у кінцевому споживанні енергії в ЄС до 2030 року з метою досягнення 45% у перспективі. Директива сприяє розвитку відновлюваних джерел енергії за допомогою національної підтримки та схем фінансування ЄС, оскільки

самі по собі енергетичні ринки не можуть забезпечити бажаний рівень відновлюваних джерел енергії. У 2024 р. уряд України ухвалив цілу низку стратегій і планів [4–6], які в тому числі стосуються розвитку відновлюваних джерел енергії. Зокрема у Національному плані енергетики і клімату [6] прогнозується, що частка відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі загального кінцевого енергоспоживання має становити не менше як 27%, а в загальному виробництві електроенергії на рівні 25% у 2030 році. Згідно з Національним планом дій з відновлюваної енергетики та клімату України до 2030 року [4] частка сонячної енергії в енергосистемі країни може досягти 5–7%.

У цьому розрізі нагальною є проблема зниження середньозваженої собівартості виробництва електроенергії сонячними панелями,

зокрема терміну їх експлуатації і ефективності функціонування. Ці параметри залежать від багатьох чинників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки значну увагу дослідників привертає використання нових матеріалів для виробництва сонячних панелей. Наприклад, використання TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) дозволяє отримати коефіцієнт корисної дії (ККД) до 24–26% і призводить до меншої деградації (<0,4% на рік) [7]. Монокристалічні панелі HJT (Heterojunction) мають ККД до 26% ККД і висока продуктивність при слабкому освітленні [8]. Використання кремній-перовскітних тандемів дає рекордний ККД 33,9% [9], а перовскітні модулі мають строк служби 25+ років, а ККД > 20% [10]. Багато досліджень також проводяться щодо темпів деградації. Наприклад в [11] встановлено, що сучасні сонячні панелі втрачають 0,3–0,5% ККД на рік (проти 0,8–1% у старих моделях). При цьому більше 90% панелей після 25 років зберігають $\geq 80\%$ початкової потужності [12]. Досліджено вплив високих температур на старіння сонячних панелей [13]. При цьому герметизація EVA-плівок покращила стійкість [14]. Дослідники прогнозують до 2030 р. зростання ККД масових панелей до 30% завдяки тандемам [14], а строку служби більше 40 років для нових матеріалів [15–16]. Автори використовують зарубіжні дослідження, але проблема полягає в адаптації цього досвіду до національних обставин, зокрема економічних і кліматичних умов.

Постановка завдання. Метою статті є класифікація і оцінка чинників, які впливають на подовження строку експлуатації і підвищення ефективності роботи сонячних панелей, а також створення бази даних з техніко-економічними характеристиками відповідного обладнання, обслуговування і заходів.

Виклад основного матеріалу. Собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями залежить від низки факторів, які можна умовно поділити на технічні, економічні, географічні та політичні. Нижче перераховані основні з них.

1) Капітальні витрати (CAPEX)

- Вартість сонячних панелей, інверторів, систем кріплення, кабелів тощо.
- Витрати на будівництво, монтаж та підключення до мережі.
- Зниження цін на фотоелектричні модулі значно зменшило CAPEX.

2) Операційні витрати (OPEX)

- Обслуговування, очищення панелей, страхування, ремонт.
- Витрати на моніторинг та управління системою.

3) Коефіцієнт використання потужності (Capacity Factor)

- Залежить від інсоляції (кількості сонячного випромінювання), яка відрізняється за регіонами. Наприклад, в Україні цей показник становить 12–18%, а в Саудівській Аравії – до 25%.
- Кут нахилу панелей, наявність трекерів для слідування за сонцем.

4) Ефективність панелей (ККД)

- Монокристалічні панелі (ККД 18–22%) дорожчі, але продуктивніші за полікристалічні (15–18%) або тонкоплівкові (10–13%).
- Деградація панелей (0,5–1% втрат ефективності на рік).

5) Термін служби та амортизація

- Стандартний термін експлуатації – 25–30 років. Чим довше служба, тим нижча собівартість.

6) Фінансові умови

- Відсоткові ставки за кредити, податкові пільги, субсидії (наприклад, «зелені» тарифи).
- У країнах з підтримкою ВДЕ (як Україна планує до 2030 року) собівартість нижча за даними Держенергоефективності України.

7) Масштаб проекту

- Великі сонячні парки мають економію на масштабі: їхня собівартість може бути 30–50 дол. США/МВт·год, тоді як дахові установки – 80–150 дол. США /МВт·год.

8) Вартість землі та інфраструктура

- Наявність підключення до мережі, відстань до підстанцій.
- Витрати на оренду або купівлю землі.

9) Кліматичні умови

- Часті дощі або запиленість знижують продуктивність і збільшують витрати на очищення.

10) Політика та регуляторні заходи

- Запровадження мита на імпорт обладнання (наприклад, у США та ЄС), податки на «сонячний» прибуток.
- Використання локальних виробників (як це робить Китай) знижує собівартість.

Автори зосередилися на тих факторах, що впливають на строк експлуатації та ефективність сонячних панелей, які можна запровадити на стадії проектування або навіть на стадії експлуатації.

На стадії проектування наріжним каменем є вибір типу сонячних панелей. Суттєво впливає на ефективність також якість виробництва, тому що дешеві модулі швидше деградують через менш міцні матеріали (наприклад, нижчий клас кремнію, тонший захисний шар). Середнє падіння потужності – 0,5–1% на рік для якісних панелей. Дешеві можуть втрачати до 2% і більше. У табл. 1 наведені деякі техніко-економічні характеристики різних типів сонячних панелей.

Автори сформували базу даних з техніко-економічними характеристиками впровадження різних заходів з підвищення ефективності і подовження строку експлуатації сонячних панелей. При цьому беруться до уваги кліматичні умови України (у регіональному розрізі).

Підвищення ефективності сонячних батарей залежить від оптимізації їх роботи, технічних удосконалень та правильного обслуговування. Ось основні способи:

1) Оптимізація розташування та кута нахилу

- Ідеальний кут: Залежить від широти місцевості та сезону. В Україні для максимальної ефективності панелі часто встановлюють під 30–40°.

- Трекер сонця: Системи, що повертають панелі за сонцем, можуть збільшити

виробіток на 20–30%, але дорожчі й потребують обслуговування.

- Відсутність затінення: Навіть часткова тінь (від дерев, труб, антен) різко знижує продуктивність.

2) Покращення технічних параметрів

- Вибір панелей з високим ККД:
- Монокристалічні (до 22–24%) ефективніші за полікристалічні (15–18%).

- PERC-елементи, гетероструктурні (HJT) або tandem-елементи можуть дати +5–10% до ККД.

- Мікроінвертори або оптимізатори потужності: Допомогають уникнути втрат через часткове затінення або різну продуктивність панелей.

- Охолодження: Перегрів знижує ККД. Використовуйте:

- Вентилювані конструкції.
- Пасивні/активні системи охолодження (наприклад, водяне охолодження для великих станцій).

3) Регулярне обслуговування

- Чистка поверхні: Забруднення (пил, пташиний послід) можуть знизити продуктивність на 10–25%.

- В сухих регіонах – очищення кожні 2–3 місяці.

Таблиця 1

Техніко-економічні характеристики різних типів сонячних панелей

№	Тип панелей	Параметри	Значення	Переваги/недоліки
1	Монокристалічні кремнієві панелі (Mono-Si)	ККД Потужність модуля Вартість Площа модуля (550 Вт)	19–23 % 350–700 Вт \$0.18–0.25 /Вт ~2.1 м²	високий ККД, довгий термін служби, естетичність/вища ціна порівняно з полікристалічними
2	Полікристалічні кремнієві панелі (Poly-Si)	ККД Потужність модуля Температурний коефіцієнт Вартість Середня площа модуля (320 Вт)	15–18 % 250–350 Вт –0.40 %/°C \$0.14–0.20 /Вт ~1.9 м²	нижча ціна, простіше виробництво/більші втрати при нагріванні, менша ефективність
3	Тонкоплівкові панелі (CdTe, a-Si, CIGS)	ККД Вартість Температурний коефіцієнт Сфера застосування	11–13 % \$0.12–0.18 /Вт –0.25 %/°C Промислові станції	гнучкість, добра робота при затінненні, низький темп коефіцієнт/складніший процес виробництва, менша надійність
4	Двосторонні панелі (bifacial Mono-Si)	ККД (фронт) Додаткове вироблення (тил) Потужність модуля Вартість	20–22 % +5–15 % 540–700 Вт \$0.23–0.30 /Вт	додаткове вироблення від відбитого світла / вища вартість, потребує спеціального монтажу
5	Пероваскитні (експериментальні/пілотні)	ККД (лабораторний) Вартість Надійність Масштабне виробництво	25–28 % орієнтовно \$0.10–0.15 /Вт Ще тестується у 2024–2025 рр.	дуже високий ККД, дешеві матеріали/недосліджений строк служби, проблеми з деградацією

• В дощових зонах – рідше (дощ частково змиває бруд).

• Діагностика: Перевірка кабелів, контактів, інвертора на нагрівання або пошкодження.

4) Використання додаткових технологій

• Дзеркала та світловідбивні матеріали: Збільшують освітленість панелей, але можуть спричинити перегрів.

• Біфакіальні панелі: Виробляють енергію з обох сторін (+10–30% до виходу), якщо встановлені на світловідбиваючій поверхні.

• Системи накопичення (акумулятори): Дозволяють використовувати «надлишкову» енергію ввечері, підвищуючи загальну ефективність системи.

5) Модернізація електроніки

• Якісний інвертор: Втрати в дешевих інверторах можуть сягати 5–10%. Краще вибрати моделі з ККД >98%.

• MPPT-контролери: Оптимізують роботу панелей при різній освітленості.

У таблиці 2 наведена оцінка ефективності деяких технічних рішень щодо зменшення деградації та підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем

Попередньо можна зазначити, що найбільший ефект можуть дати правильний монтаж (кут, відсутність тіні), вибір якісних панелей (монокристал, PERC, біфакіальні),

регулярне очищення та обслуговування, використання сучасної електроніки (MPPT, мікроінвертори). Навіть прості заходи (наприклад, чистка панелей) можуть дати +15% до виробництва без значних витрат.

Але для повної оцінки економічної ефективності впровадження різних заходів з підвищення ефективності та/або продовження строку експлуатації сонячних панелей необхідно розрахувати середньозважену собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями з та без впровадження заходів. Після закінчення заповнення бази даних автори планують провести такі розрахунки і виробити рекомендації щодо доцільності впровадження тих чи інших заходів.

Висновки. Враховуючи орієнтованість України на вступ до ЄС, уряд України розробив цілу низку законодавчих і нормативно-правових актів, спрямованих на розвиток відновлюваних джерел енергії. У даному дослідженні автори провели класифікацію чинників, від яких залежить собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями. Була запропонована класифікація заходів, які приводять до підвищення ефективності і подовження строку експлуатації фотоелектричних систем і які можна запровадити на стадії їхнього проектування і експлуатації. Проведено попередню оцінку для ідентифікації найбільш перспективних таких заходів.

Таблиця 2

Оцінка ефективності технічних рішень щодо зменшення деградації та підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем

№ п/п	Технічне рішення	Очікуваний ефект, %	Довгострокові переваги	Орієнтовні витрати впровадження, \$
1	Повітряне охолодження	+2,5...3	Стабілізація температурного режиму, зменшення перегріву	Низькі (10–30/модуль)
2	Охолодження водою	+6,0...6,8	Підвищення потужності в умовах високих температур	Середні (50–100/модуль)
3	Використання фазозмінних матеріалів (PCM)	Нестабільне (залежить від умов)	Зниження пікових температур, зменшення матеріалозносу	Високі (100–150/модуль)
4	MPPT-контролери	+15...25	Підвищення енерговіддачі шляхом динамічної оптимізації	Середні (20–80/панель)
5	Автоматизовані системи очищення	Уникнення втрат до 20	Стабілізація продуктивності, зменшення ручних витрат	Високі (200–500/установка)
6	Прогнозне технічне обслуговування (SCADA, IoT)	Зниження простоїв до 30	Подовження строку служби на 5–10 років	Високі (500–1500/система)
7	Профілактичне технічне обслуговування	Подовження ресурсу на 5–10	Зниження кількості відмов і вартості експлуатації	Середні (50–100/рік/система)
8	Використання стійких матеріалів (антикорозійні сплави, УФ-захисне скло)	Річна деградація ≤ 0,5	Збереження ефективності на рівні > 90 % через 20 років	Високі (індивідуально, залежно від виробника)

Автори сформували базу даних для фіксації техніко-економічних характеристик заходів для підвищення ефективності і подовження строку експлуатації фотоелектричних систем. Після її остаточного заповнення автори планують

розрахувати середньозважену собівартість виробництва електроенергії сонячними панелями з та без впровадження заходів. На основі таких розрахунків буде вироблено рекомендації щодо доцільності впровадження тих чи інших заходів.

Список літератури:

1. Закон України від 14 липня 2016 р. № 1469-VIII «Про ратифікацію Паризької угоди». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1469-19#Text>
2. Закон України від 16 вересня 2014 року № 1678-VII «Про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1678-18#n2>
3. Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. PE/36/2023/REV/2. <http://data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
4. Розпорядження КМУ від 13 серпня 2024 р. № 761-р «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>
5. Постанова КМУ від 30 травня вересня 2024 р. № 483-р «Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-%D1%80#Text>.
6. Розпорядження КМУ від 25 червня 2024 р. № 587-р «Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату». <https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df>
7. Fraunhofer ISE Annual Report 2024/25. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/information-material.html>
8. Офіційний сайт LONGi. <https://www.longi.com/eu/>
9. Bodea, G.O., Botto, J.M., Ferreira, M.E. et al. LINE-1 retrotransposons contribute to mouse PV interneuron development. *Nat Neurosci* 27, 1274–1284 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41593-024-01650-2>
10. Severin N. Habisreutinger, Matthew O. Reese, Building perovskite solar cells that last. *Science* 377, 265–266 (2022). DOI:10.1126/science.abq7013
11. NREL's photovoltaic research. <https://www.nrel.gov/pv/>
12. V.K. Budama, J.P. Rincon Duarte, M. Roeb, C. Sattler. Potential of solar thermochemical water-splitting cycles: A review *Solar Energy*, 249 (2023), P. 353-366, 10.1016/j.solener.2022.11.001
13. NREL, “Annual degradation rates of photovoltaic systems”, NREL Technical Report, 2023. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/>
14. ITRPV, “International Technology Roadmap for Photovoltaics”, ITRPV Working Group, 2024. [Online]. Available: <https://www.itrpv.net>
15. ITRPV, 2024. International Technology Roadmap for Photovoltaics (13th ed.). Frankfurt: VDMA. <https://www.itrpv.net>.
16. Ihor Buratynskyi, Tetiana Nechaieva, Sergii Shulzhenko, Nataliia Ivanenko. The Optimization of PV-plant's DC/AC Equipment Ratio Using the Non-linear Least-cost Model. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). <https://ieeexplore.ieee.org/document/9575720>

Shpyliur P.S., Ivanenko N.P. CLASSIFICATION OF FACTORS THAT AFFECT THE INCREASE IN EFFICIENCY AND EXTENSION OF THE SERVICE LIFE OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS

Taking into account the European vector of development of Ukraine, the government pays significant attention to the development of renewable energy sources, in particular solar power plants. In 2024, the government of Ukraine adopted several strategies and plans, including those related to the development of renewable energy sources. In particular, the National Energy and Climate Plan predicts that the share of renewable energy sources in the structure of total final energy consumption should be at least 27%, and in total electricity production at the level of 25% in 2030. According to the National Action Plan for Renewable Energy and Climate of Ukraine, by 2030 the share of solar energy in the country's energy system may reach 5–7%. The article classifies the factors that affect the cost of electricity production by solar panels, which depends on several factors that can be conditionally divided into technical, economic, geographical and political. The purpose of the article is to classify and assess the factors that affect the extension of the service life and increase the efficiency of solar panels, as well as to create a database with the technical and economic characteristics of the relevant equipment, maintenance and measures. Technical solutions

are presented to reduce the impact of negative factors: the introduction of nanostructured coatings, active cooling systems, tracking mechanisms and predictive maintenance algorithms. Special attention is paid to the improvement of structural and materials components. Information on the technical and economic characteristics of various types of solar panels and measures to increase economic efficiency and extend the service life has been collected and a corresponding database has been formed. This database will serve as the basis for the economic assessment of measures to reduce the cost of electricity production by solar panels based on the calculation of the weighted average cost. Such assessments will take into account the climatic conditions of the regions of Ukraine.

Key words: solar panels, energy efficiency, economic efficiency, cost, service life.