

УДК 504.054

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.14>

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ УТВОРЕННЯ ВІДХОДІВ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ В УКРАЇНІ

Самойленко Н.М., Катенін В.Д.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

natalia.samoilenko@khpi.edu.ua, vadym.katenin@mit.khpi.edu.ua

В Україні, де останні десять років сектор сонячної енергетики мав високі темпи зростання, особливо актуально постає питання щодо утворення та управління відходами сонячних панелей. Його важливість збільшується з урахуванням військових дій, які призводять до додаткових викликів у сфері охорони довкілля та обігу відходів. Попри таку складну ситуацію, яка призвела до пошкоджень деяких сонячних електростанцій та втрати контролю над іншими, Україна не припиняє розвитку сектору сонячної енергетики, активно працює над відновленням та розширенням існуючих потужностей, що вказує на збільшення відходів панелей у перспективі. Ефективне вирішення проблем, що постають, вимагає інноваційного підходу до зниження негативного впливу на довкілля, включаючи необхідність розробки і впровадження не тільки передових технологій, але й досконалого управління відходами.

Вивчення тенденцій у зростанні кількості сонячних панелей, як в Україні, так і в усьому світі, має вирішальне значення для глибокого розуміння потенціалу, який відкриває використання відновлюваних джерел енергії. Цей аналіз також важливий для виявлення пов'язаних з даним процесом викликів, включаючи ефективне прогнозування утворення відходів, що виникають внаслідок виведення сонячних панелей з експлуатації, та розробку стратегій їхнього вторинного використання або переробки. Відсутність спеціалізованих досліджень та моделей, які б охоплювали цю проблематику в контексті України, підкреслює актуальність даного дослідження. Пропонована математична модель, що базується на аналізі доступних даних та враховує специфіку українського контексту, дозволяє прогнозувати динаміку утворення відходів сонячних панелей. Модель використовує методи лінійної регресії для аналізу тенденцій зростання кількості сонячних панелей, їхнього терміну служби, а також потенційного впливу військових дій на збільшення обсягів відходів.

Результати дослідження мають значний практичний потенціал, оскільки можуть бути використані для розробки національних стратегій управління відходами сонячних панелей, що, в свою чергу, сприятиме сталому розвитку сонячної енергетики в Україні та зниженню негативного впливу на довкілля. *Ключові слова:* сонячні панелі, відходи, прогнозування, моделювання, управління.

Modeling the dynamics of solar panel waste formation in Ukraine. Samoilenko N., Katenin V.

In Ukraine, where the solar energy sector has experienced high growth rates over the last decade, the issue of the formation and management of solar panel waste is particularly pressing. Its importance is amplified considering the military actions that lead to additional challenges in environmental protection and waste management. Despite such a complex situation, which has led to damage to some solar power plants and loss of control over others, Ukraine continues to develop its solar energy sector, actively working on the restoration and expansion of existing capacities, indicating an increase in panel waste in the future. Effective resolution of these emerging problems requires an innovative approach to reducing environmental impact, including the need for the development and implementation of not only advanced technologies but also sophisticated waste management.

Studying the trends in the increase of solar panels, both in Ukraine and worldwide, is crucial for a deep understanding of the potential that renewable energy sources open up. This analysis is also important for identifying challenges related to this process, including effective forecasting of waste generation resulting from the decommissioning of solar panels, and developing strategies for their reuse or recycling. The lack of specialized studies and models that would cover this issue in the context of Ukraine underscores the relevance of this research. The proposed mathematical model, based on the analysis of available data and taking into account the specifics of the Ukrainian context, allows for predicting the dynamics of solar panel waste generation. The model uses linear regression methods to analyze trends in the growth of solar panels, their lifespan, and the potential impact of military actions on the increase in waste volumes.

The results of the study have significant practical potential, as they can be used to develop national strategies for managing solar panel waste, which, in turn, will contribute to the sustainable development of solar energy in Ukraine and reduce the negative impact on the environment. *Key words:* solar panels, waste, prediction, modeling, management.

Постановка проблеми. Протягом останнього десятиліття сектор сонячної енергетики в Україні зазнав значного росту. Завдяки стійкій тенденції України, щодо інвестицій у зелену енергетику, кількість та ефективність сонячних електростанцій значно збільшились, що сприяло розвитку відновлюваної енергетики в країні. Водночас, виникла суттєва екологічна проблема – управління відходами сонячних фотоелектричних панелей, яке повинно базува-

тися на прогнозах їх утворення, а моделювання кількості відходів від сонячних панелей та їх управління стає критично важливим для забезпечення сталого розвитку цієї індустрії.

Актуальність дослідження. Для ефективного планування процесів утилізації відходів сонячних панелей, ключовим є розуміння загального обсягу відходів сонячних фотоелектричних панелей (ВСФЕП) у країні, динаміки кількості панелей, які

вийдуть з експлуатації у найближчому майбутньому. Тому актуальним є здійснення прогнозів утворення та накопичення ВСФЕП для надання можливості своєчасної розробки та впровадження ефективних стратегій управління відходами.

Війна в Україні призвела до пошкодження та знищення інфраструктури, у т.ч. об'єктів сонячної енергетики, що спричинило не лише втрату енергоресурсів, а й збільшення кількості відходів, які як показують дослідження, здійснюють негативний вплив на довкілля [1]. Ця ситуація ускладнює процеси поводження з відходами панелей, вимагаючи негайного реагування та адаптації існуючих стратегій.

На урбанізованих територіях України з розвинутою інфраструктурою ефективно управління ВСФЕП набуває особливого значення. Створення господарчих структур для здійснення операцій поводження з відходами у міських умовах може сприяти не тільки зниженню екологічного навантаження та забезпечення вторинною ресурсоцінною сировиною промислової галузі, але й утворення нових робочих місць.

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Авторський доробок цієї роботи тісно пов'язаний із важливими та практичними завданнями у сфері управління відходами сонячних панелей. Це дослідження робить важливий крок у напрямку прогнозування обсягів ВСФЕП. Даний прогноз є базовим для розробки стратегій управління відходами, особливо у контексті обставин, які змінюються, у тому числі стосовно воєнних дій в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз динаміки кількості сонячних панелей в Україні, а також у світі загалом, відіграє ключову роль у розумінні потенціалу відновлюваних джерел енергії та асоційованих з ними викликів, зокрема, управління відходами [2]. В останні десятиліття, з огляду на глобальні зусилля зі зменшення залежності від викопних джерел енергії та боротьби зі зміною клімату, значення сонячної енергетики значно зросло. Україна, зі своїм потенціалом для розвитку сонячної енергетики, не є винятком, що спонукає до аналізу тенденцій розвитку цього сектора та проблем, пов'язаних із утилізацією відпрацьованих панелей [3].

Сучасні дослідження в галузі сонячної енергетики акцентують увагу на швидкому зростанні кількості сонячних панелей. Цей процес спричинено не тільки удосконаленням технологій та зниженням вартості сонячних фотоелектричних панелей, але й збільшенням усвідомлення необхідності переходу на відновлювані джерела енергії [4].

Проте, разом із збільшенням кількості сонячних панелей, з'являється проблема управління відходами. Враховуючи потенційно шкідливі матеріали, які можуть містити сонячні панелі, такі як свинець, кадмій та інші токсичні речовини, правильне управління цими відходами стає критично важливим для

запобігання забрудненню навколишнього середовища [5].

Деякі дослідження фокусуються на моделюванні кількості сонячних панелей та асоційованих з ними відходів, щоб зрозуміти масштаб проблеми та розробити стратегії її розв'язання. Ці моделі враховують не тільки поточний стан встановлених потужностей, але й прогнозують майбутнє зростання сектора, що дозволяє оцінити майбутні потреби в утилізації або переробці відходів [6, 7].

Ініціативи з утилізації та переробки сонячних панелей починають набирати обертів у багатьох країнах, зокрема через розробку новітніх технологій переробки, які дозволяють ефективно вилучати та повторно використовувати цінні матеріали. Це не тільки сприяє зменшенню впливу на довкілля, але й відкриває нові можливості для створення циклічної економіки в секторі відновлюваних джерел енергії [8].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Стаття зосереджується на невирішених раніше аспектах проблеми управління відходами сонячних панелей та враховує особливості воєнних дій в Україні. Вона вносить новизну, акцентуючи увагу як на запланованих, так і непередбачуваних подіях, пов'язаних з утворенням ВСФЕП, та надає можливість застосовувати теоретико-практичний алгоритм підходу до розрахунку обсягів утворених відходів.

Новизна. Новизна даного дослідження пов'язується з розробкою математичної моделі прогнозування утворення відходів сонячних фотоелектричних панелей, що базується на динаміці утворення ВСФЕП та потужності сонячної енергетики в Україні. Запропонована модель надає можливість практичного планування обсягів виходу з експлуатації відпрацьованих панелей на промислових СЕС та інших енергетичних об'єктах, а також прогнозування їх утворення у системі управління відходами.

Методологічне або загальнонаукове значення. Роботу виконано з використанням сучасних методів обробки інформації та теоретичних методів щодо її збору, а також мови програмування Python. Для прогнозування була застосована модель, розроблена на базі лінійної регресії з використанням програмної бібліотеки машинного навчання для мови програмування Python – Scikit-learn.

Викладення основного матеріалу. Динаміка зростання потужності сонячної енергетики в Україні демонструє значну активність і розширення, що відображає глобальний тренд збільшення інтересу до відновлюваних джерел енергії. Незважаючи на військові дії, які спричинили пошкодження деяких СЕС і втрату контролю над тими, що знаходяться у зоні тимчасової окупації, Україна продовжує розвивати сектор сонячної енергетики. На рисунку 1 показано динаміку зміни потужності сонячної енергетики в Україні.

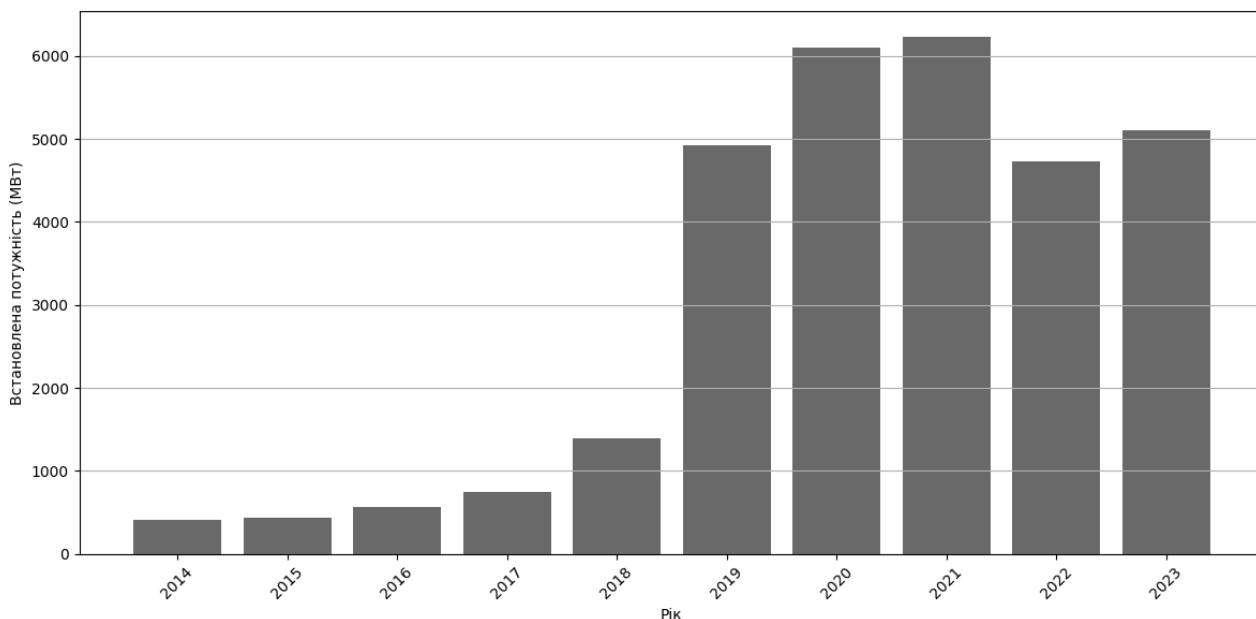


Рис. 1. Динаміка зміни потужності сонячної енергетики в Україні (2014–2023 рр.) (данні за 2022 та 2023 роки є орієнтовними) [3, 9]

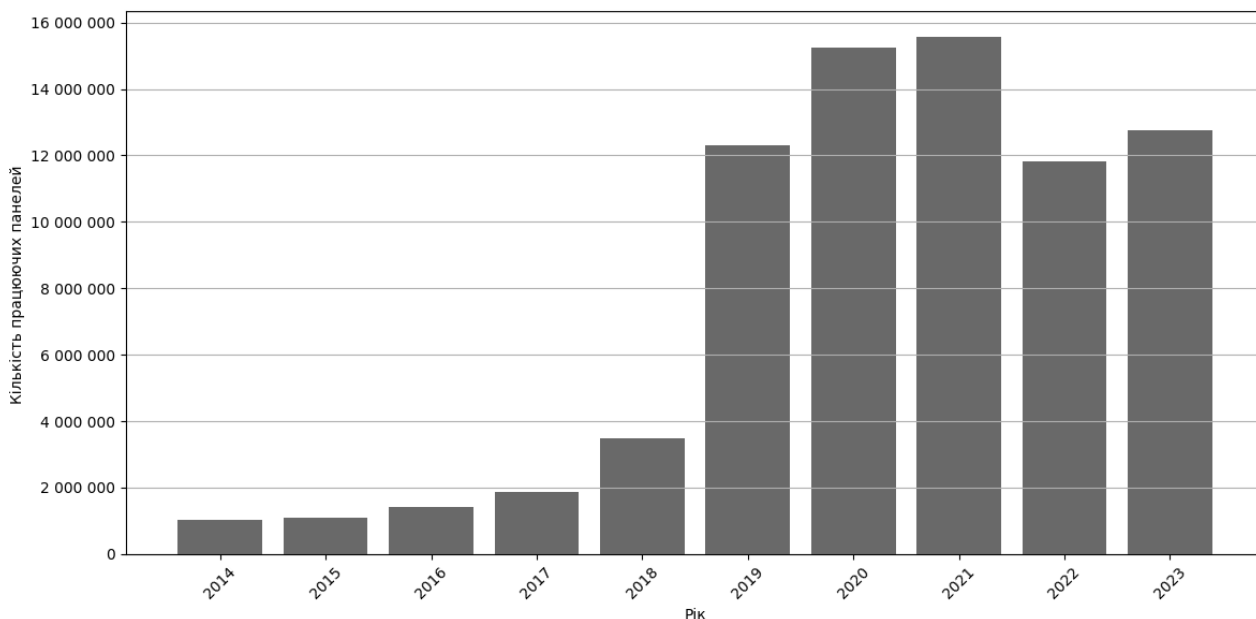


Рис. 2. Обсяги сонячних панелей, що експлуатувались в Україні у період з 2014 до 2023 рр.

Для побудови ефективної стратегії управління ВСФЕП важливо мати точні дані щодо обсягів панелей, які виходять з ладу або досягають кінця свого життєвого циклу. Аналіз ринку сонячних панелей дозволяє прийняти, що середня потужність однієї сонячної панелі може становити 400 Вт/год [10]. Тоді кількість працюючих сонячних панелей в Україні з певною долею припущення може бути визначена за формулою:

$$n = \frac{P_{заг}}{P_{пан}} \tag{1}$$

де n – кількість панелей;
 $P_{заг}$ – загальна потужність сонячної генерації;
 $P_{пан}$ – потужність однієї сонячної панелі.

Обсяги сонячних панелей, що експлуатувались в Україні з 2014 по 2023 рр., визначені за формулою (1), представлені на рисунку 2.

Ефективне управління відходами вимагає не лише знання поточної кількості сонячних панелей, а й розуміння майбутніх тенденцій їх обсягів. Прогнозування кількості сонячних панелей, які вий-

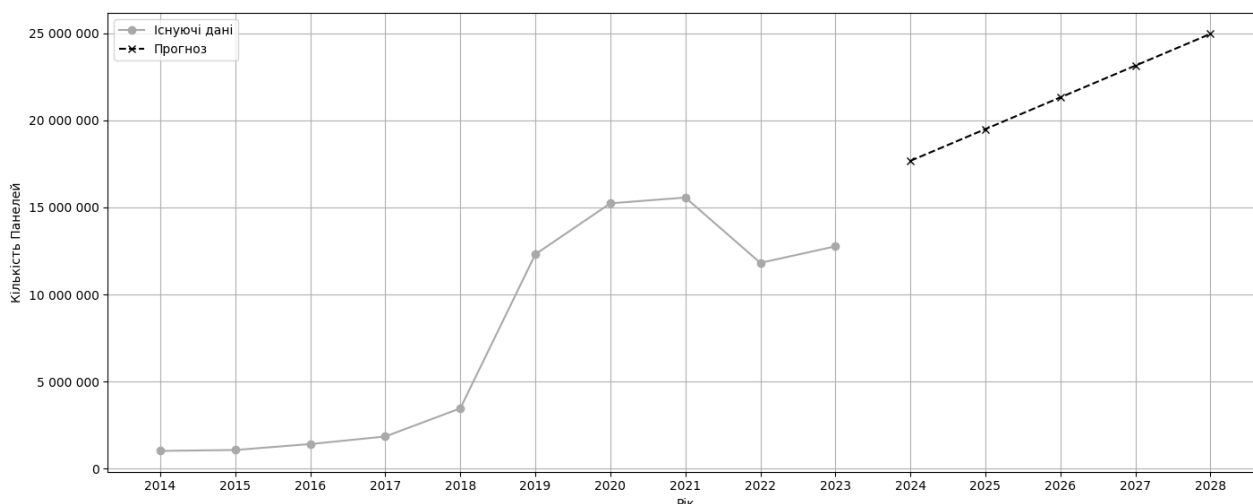


Рис. 3. Прогноз кількості сонячних панелей в Україні (2024–2028 рр.)

дуть з експлуатації протягом наступних 5 років, було здійснено за допомогою Python. Аналіз базується на даних про річні обсяги сонячних панелей з 2010 по 2023 рік. В основі моделі лежить лінійна регресія, де рік виступає як незалежна змінна, а кількість сонячних панелей – як залежна. Оптимальне лінійне співвідношення між цими змінними було встановлено на основі "навчання" моделі з використанням доступних даних. Прогнозні дані щодо обсягів сонячних панелей представлено на рисунку 3.

Зважаючи, на все більшу актуальність сонячної енергетики, можна бути впевненими у постійній тенденції збільшення кількості панелей. Водночас наведений прогноз не враховує зовнішні чинники, які можуть сформуватись у технологічних підходах виготовлення панелей, а також на ринку праці та вплинути на функціонування сонячної енергетики.

Приведені прогнозні дані повинні бути доповненими обсягами сонячних панелей, що перейшли у стан відходів в результаті військових дій. На сьогодні немає точних даних, щодо кількості пошкоджених сонячних панелей, але за різними прогнозами, можна припустити, що через військові дії у 2022–2023 роках було пошкоджено до 20% усіх сонячних панелей [9, 11].

Таким чином, приблизну кількість пошкоджених панелей можна підрахувати таким чином:

$$n_{п.л.} = n_{2021} * 0.2 = 15567500 * 0.2 = 3113500 \quad (2)$$

де $n_{п.л.}$ – кількість пошкоджених панелей;
 n_{2021} – кількість працюючих панелей у 2021 році.

Зважаючи на те, що середній строк експлуатації сонячних панелей становить 20–25 років, перші панелі за цим показником мають почати виводити з експлуатації тільки у 2030 році. Водночас такі чинники, як екстремальні погодні умови, неправильний монтаж і обслуговування, виробничі дефекти, погіршення

ефективності, корозія або пошкодження від вологи та технологічний прогрес (панелі замінюють раніше терміну через появу більш ефективних або дешевших альтернатив) можуть призвести до виведення панелей з експлуатації раніше, ніж через 20 років.

Враховуючи високу надійність сонячних панелей, можливо припустити, що імовірність їхнього дострокового виведення з експлуатації складає 0.5–2%.

Кількість панелей, що були достроково виведені з експлуатації через зазначені чинники становить:

$$n_{вивед} = n_{кумулят} \times R \quad (3)$$

де $n_{вивед}$ – кількість панелей, виведених з експлуатації у даному році;

$n_{кумулят}$ – кумулятивна кількість панелей до цього року;
 R – річний відсоток виведення панелей з експлуатації.

На рисунку 4 показана графічна залежність кількості виведених з експлуатації панелей в залежності від року.

Таким чином, до 2029 року (рисунок 5) прогнозна кількість панелей, що буде виведена з експлуатації через погодні та людські чинники може скласти 3 млн. Додавши панелі, що було виведено з експлуатації через військові дії (біля 3 млн), можливо стверджувати що до кінця цього десятиліття кількість сонячних панелей, що потребують утилізації в Україні, може перевищити 6 млн одиниць.

Головні висновки. З урахуванням передбачуваного значного збільшення обсягу відпрацьованих сонячних панелей Україна стоїть перед необхідністю розширення та модернізації своєї інфраструктури для ефективного управління відходами. Ефективні програми переробки, що мінімізують екологічний вплив та сприяють відновленню цінних матеріалів, стають ключовими для забезпечення сталого розвитку. Також необхідно підтримувати дослідження та розробку інноваційних

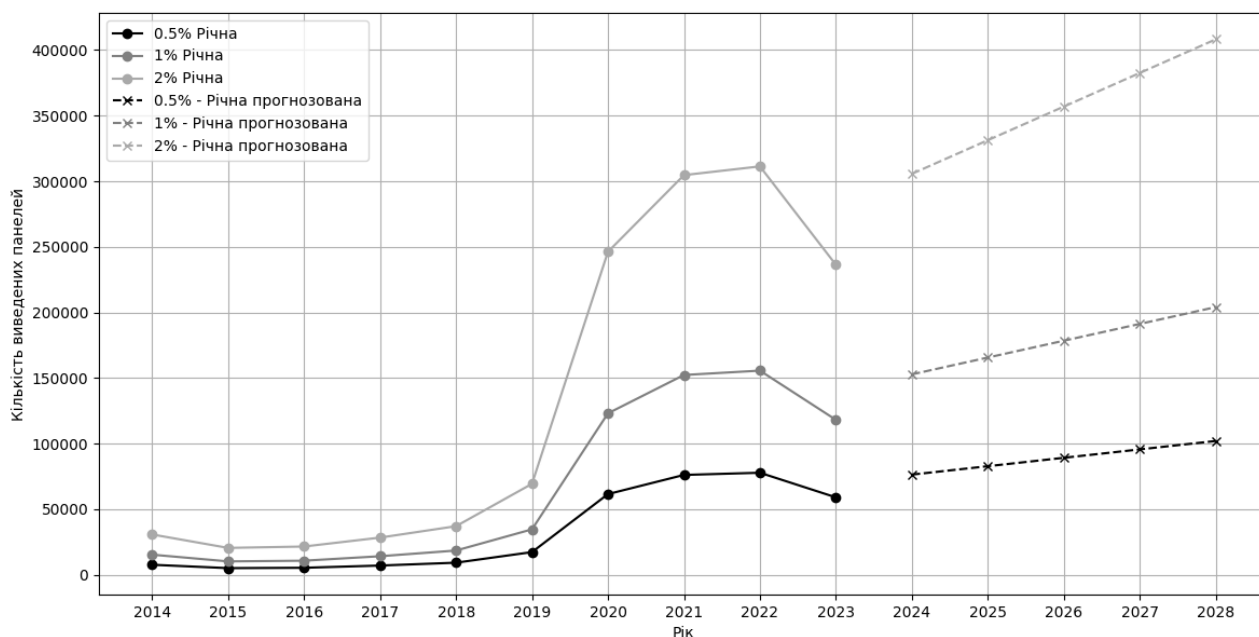


Рис. 4. Річна експлуатаційна та річна прогнозована кількість виведених з експлуатації панелей у відсотках від працюючих панелей (0,5%, 1% та 2%)

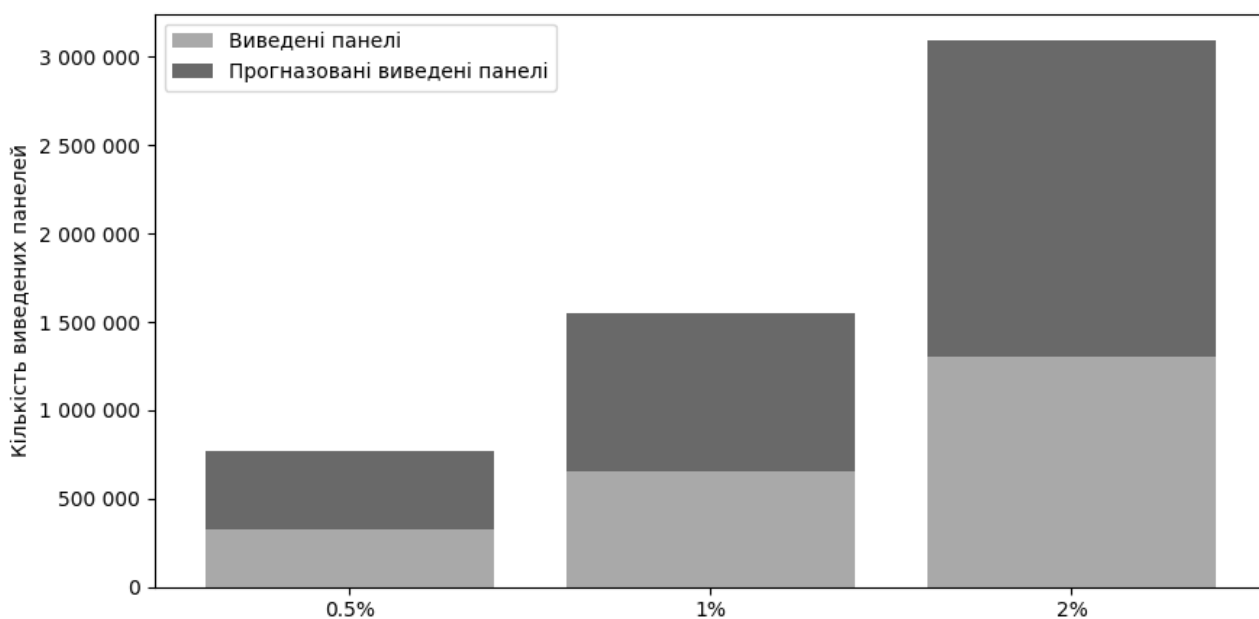


Рис. 5. Сумарна річна експлуатаційна та річна прогнозована кількість виведених з експлуатації панелей (2014–2028 рр.)

технологій, які відкриють нові можливості для більш стійкого управління відходами. Враховуючи масштаби викликів, перед Україною відкриваються широкі перспективи для інвестицій в інфраструктуру, інновації та міжсекторальну співпрацю, що спрямовані на ефективне вирішення завдань управління ВСФЕП.

Перспективи використання результатів дослідження. Проведені дослідження надають дані, що

можуть бути використані при розробці стратегій управління ВСФЕП та встановлення ефективних механізмів поводження з ними, включаючи утилізацію на промисловій основі.

Дослідження виконано у межах науково-дослідної теми НТУ «ХПІ» «Розробка наукових основ сталого управління та утилізації твердих відходів», ДР 0124U001841.

Література

1. Самойленко Н.М., Корогодська А.М., Катенін В.Д. Дослідження впливу відходів сонячних фотоелектричних панелей на ґрунт. Екологічні науки : науково-практичний журнал 2023. № 5(50). С. 25–29. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.есо.5-50.4>
2. International Energy Agency. Snapshot of Global PV Markets – 2022. URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/04/IEA_PVPS_Snapshot_2022-vF.pdf (дата звернення: 24.02.2024).
3. Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф (станом на 01.04.2020). URL: https://sace.gov.ua/sites/default/files/1_kv_2020_VDE.pdf (дата звернення: 18.02.2024).
4. Oteng D., Zuo J., Sharifi E. Environmental emissions influencing solar photovoltaic waste management in Australia: An optimised system network of waste collection facilities. *Journal of Environmental Management*, Volume 314, 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman. 2022.
5. Kumar N. M., Chopra S. S., Rajput P. Life cycle assessment and environmental impacts of solar PV systems. Academic Press, 2020, Pages 391-411. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819610-6.00012-0>.
6. Romel M., Kabir G., Ng, K.T.W. Prediction of photovoltaic waste generation in Canada using regression-based model. *Environ Sci Pollut Res* 31, Pages 8650–8665, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31628-9>
7. Acharya A., Verma A. R., Bolia N. B. Effective collection of end-of-life solar panels through an incentive-based model. *Solar Energy*, Volume 268, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112215>.
8. Chowdhury M.S., Rahman K.S., Chowdhury T., Nuthammachot N., Techato K., Akhtaruzzaman M., Tiong S.K., Sopian K., Amin N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, Volume 27, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>
9. Енергетична інфраструктура в Україні: чи помічниця їй зелена енергетика URL: <https://finance.ua/ua/goodtoknow/energetychna-infrastruktura-v-ukraini#:~:text=2020%2Dго%20-%20в%20першій%20п,електростанції%20та%20близько%20половини%20сонячних> (дата звернення: 18.02.2024)
10. Скільки енергії виробляє сонячна батарея? URL: <https://sun-energy.com.ua/articles/skilky-vyroblyaye-sonyachna-panel#:~:text=СЕРЕДНІ%20ПОТУЖНОСТІ%20ПАНЕЛЕЙ&text=Сонячні%20батареї%20з%2060%20комірками,сонячних%20батареїв%2С%20які%20виробляють%20електроенергію> (дата звернення: 18.02.2024)
11. Зруйнована війною галузь зеленої енергетики в Україні знаходиться на грані банкрутства. Що далі? URL: <https://ecolog-ua.com/news/zruynovana-viynouyu-galuz-zelenoyi-energetyky-v-ukrayini-znahodytsya-na-grani-bankrutstva-shcho> (дата звернення: 18.02.2024)