

ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Отримано 22 лип. 2022; рекомендовано до публікації 27 вер. 2022
Доступно онлайн 30 вер. 2022

В.А. Хілько¹, **М. Бенменні**²

Автор для кореспонденції: Мухуб Бенменні,
e-mail: mbenmenni@gmail.com

¹ науковий співробітник.

<http://orcid.org/0000-0001-6348-2578>

² завідувач відділом.

<http://orcid.org/0000-0001-6548-2205>

^{1,2}, Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна.

Стаття присвячена проблемам, що спричинені прискореним використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та відповідним накопиченням відходів. Розглянуто перспективи найближчих років, пов'язані з потребами енергетичного переходу до чистих технологій та сталого розвитку. Основна увага приділена питанням утилізації обладнання відновлюваної енергетики, особливо вітрової та фотоелектричної, після завершення термінів експлуатації. Проаналізовано стан справ у світі з переробкою та продовженням життєвого циклу матеріалів ВДЕ. Підкреслено важливість впровадження економіки замкнутого циклу у сфері відновлюваної енергетики і наголошено на її ролі у боротьбі за скорочення викидів парникових газів. Проведено аналіз проблем, пов'язаних з утилізацією відходів у технологіях сонячної і вітроенергетики. Наведено приклади інноваційних розробок лопатей вітроелектричних турбін провідними компаніями для забезпечення утилізації відходів матеріалів та компонентів турбін, які сприяють вирішенню проблеми. Щодо відходів фотоелектричних панелей виконано аналіз поточного стану з їх утилізацією, дано рекомендації на найближчу перспективу. Надано узагальнені рекомендації на підставі досліджень, виконаних провідними фахівцями, для впровадження заходів з використання відходів ВДЕ.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, воднева енергетика, утилізація відходів, вторинна переробка, економіка замкнутого циклу, лопаті, фотопанелі.

RE-USE OF RENEWABLE ENERGY'S WASTE - STATUS AND PROSPECTS

Received 22 Jul. 2022; accepted 27 Sept. 2022.
Available online 30 Sept. 2022

V. Khilko¹, **M. Benmenni**²

Author for correspondence: Mouhoub Benmenni,
e-mail: mbenmenni@gmail.com

¹ research officer.

<http://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² Head of Department.

<http://orcid.org/0000-0002-7628-6880>

^{1,2} Institute of renewable energy, NAS Ukraine,
Kyiv, Ukraine.

The article is devoted to the problems caused by the accelerated use of renewable energy sources (RES) and related accumulation of waste. The prospects of the coming years related to the needs of the energy transition to clean technologies and sustainable development are considered. The main attention is paid to the issue of renewable energy equipment disposal, especially wind and photovoltaic, after the end of their service life. The state of art in the world with recycling and extending the life cycle of RES materials is analyzed. The importance of implementing a closed cycle economy in the field of renewable energy and its role in the fight to reduce greenhouse gas emissions is emphasized. An analysis of the problems associated with waste disposal in solar and wind energy technologies was carried out. Given examples of innovative developments of wind turbine blades by leading companies to ensure disposal of waste materials and turbine components shows possible solutions. Regarding the waste of photovoltaic panels, an analysis of the current state with their disposal is

given, as well as recommendations for the near future. Generalized recommendations have been provided on the basis of research carried out by leading experts for the implementation of measures on the use of RES waste.

Keywords: renewable energy sources, hydrogen energy, waste disposal, recycling, closed cycle economy, wind blades, PV panels.

Перелік використаних позначень та скорочень

АБ – акумуляторна батарея
ВДЕ – відновлювані джерела енергії
ВЕУ – вітроенергетична установка
ФЕС – фотоелектрична станція
ФЕМ – фотоелектричні модулі

IRENA – International Renewable Energy Agency (IRENA) and the
IEA-PVPS – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems

Вступ. Масштабне впровадження економічно доцільних джерел енергії, де пріоритетне місце посідають відновлювані джерела енергії (ВДЕ), має на меті диверсифікацію енергетичних ресурсів та повне забезпечення потреб країн в енергії власного виробництва. В енергетичному секторі Європейського Союзу за одне десятиліття відновлювана електроенергетика має стати основним енергоносієм. Це вимагатиме майже повної перебудови енергетичного сектора з урахуванням технологій, що швидко розвиваються. Сектор підтримується широким розповсюдженням технологій накопичення енергії, особливо за допомогою водневих технологій. Нова інфраструктура також потребуватиме обслуговування протягом терміну служби та заміни обладнання в міру вдосконалення технологій.

Нині для сфери відновлюваної енергетики характерне нове явище – реконструкція об'єктів ВДЕ з заміною основного обладнання. Сьогодні об'єкти на базі ВДЕ завдяки розвитку технологій можуть виробляти більше електроенергії, ніж декілька років тому. Отже, економічно вигідно встановлювати нове обладнання з більшою одиничною потужністю та енергетичною ефективністю, використовуючи переваги сучасних технологій.

З метою боротьби з поточною енергетичною кризою впроваджуються різні політики, зокрема пов'язані зі швидким розвитком ВДЕ. Основними секторами відновлюваної електроенергетики, що потребують реконструкції у великих масштабах, є вітроенергетика, сонячна енергетика і системи накопичення електроенергії. Один із шляхів прискореного впровадження потужностей ВДЕ – заміна енергетичного обладнання сонячних і вітряних станцій в результаті підвищення ефективності обладнання. Така робота іде повним ходом у багатьох країнах, особливо це стосується заміни старих вітряних турбін на більш потужні. В ЄС підтверджено рішучість позбутися брудних джерел енергії й залежності від їх імпорту, на виконання цього наміру в травні 2022 року Єврокомісією (ЄК) ухвалено план, спрямований на швидке зменшення залежності від російського викопного палива шляхом швидкого переходу до чистої енергетики та об'єднання зусиль для досягнення стійкої енергетичної системи та справжнього Енергетичного союзу (REPowerEU Plan) [1]. Цей амбітний План передбачає:

- диверсифікацію поставок природного газу, зокрема механізм спільних закупівель та спільну роботу з країнами-постачальниками;
- посилення заходів енергоефективності, що передбачатимуть запровадження фіскальних стимулів на системи енергозбереження в опаленні, модернізацію житлових будинків;
- прискорення впровадження відновлюваних джерел енергії в промисловості, транспорті, виробленні енергії.

За підрахунками ЄК, реалізація плану REPowerEU коштуватиме 210 млрд євро до 2027 року. Така масштабна перебудова енергетичного сектора потребує детального вивчення можливих наслідків на всіх етапах життєвого циклу, включаючи технічну реконструкцію обладнання та його утилізацію по завершенню експлуатації.

Закінчення термінів експлуатації обладнання ВДЕ і пов'язані проблеми

Термін експлуатації проєктів відновлюваної електроенергетики становить від 20 до 30 років, залежно від розміру та використовуваної технології. В міру старіння проєкту його експлуатація та технічне обслуговування стають неекономічними через величезний прогрес у технологіях використання ВДЕ. Планування виведення з експлуатації та реконструкції включає етапи оцінки, планування та відновлення проєкту. Виконується демонтаж вузлів, вивезення й транспортування демонтованих частин та іншого обладнання. Придатні для подальшого використання вузли переробляються, а інше обладнання утилізується. Отже, всі цінні вузли електростанції наприкінці терміну експлуатації мають зберігатися [2]. На місці реконструйованого об'єкту ВДЕ створюється переобладнана електростанція, в якій використовується частина існуючої інфраструктури (наприклад, дороги, мережеві підстанції тощо).

Одним з основних секторів відновлюваної електроенергетики, які потребують реконструкції у великих масштабах, є вітроенергетика. У світі прагнуть встановити вітряні електростанції, щоб відмовитися від використання вуглецевої або так званої брудної енергії. Заразом операторам систем і самій галузі вітроенергетики ще належить

повністю визначити шляхи уникнення довгострокових наслідків утилізації складових цих систем, що мають негативний вплив на довкілля, зокрема таких як токсичні метали, мастила, скловолокно та інші матеріали.

Вітроелектричні установки (ВЕУ) вже мають рівень вторинної переробки від 85 до 90 %. Більшість компонентів вітряних турбін – фундамент, башта, компоненти редуктора й генератора – підлягають вторинній переробці й обробляються відповідним чином. Однак матеріали, які не підлягають переробці або повторному використанню, самі з себе створюють екологічні проблеми. Зокрема, терморезистивні композити, які містять більшість звичайних лопатей ВЕУ, не підлягають переробці. Лопаті вітряних турбін (рис. 1) створюють особливу проблему, пов'язану з обмеженим терміном служби та складністю переробки матеріалів, які використовуються для їх виготовлення.



Рис. 1. Фрагменти лопатей вітряних турбін на звалищі

Джерело: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/>

Fig. 1. Fragments of wind turbine blades at the landfill
Source: <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/>

У рамках зусиль з метою досягнення високого рівня переробки для вторинного використання матеріалів лопатей і з метою сприяння подальшому розвитку вітроенергетики у світі, провідні компанії – виробники вітряних електричних установок впроваджують нові технологічні процеси для максимального зменшення впливу на довкілля завдяки екологічно безпечній утилізації відходів лопатей вітряних турбін.

Принцип економіки замкнутого циклу у сфері ВДЕ

Економіка замкнутого циклу (циркулярна економіка) – це економічна модель, в якій не утворюються відходи; все розділяється на складові, ремонтується та повторно використовується або переробляється. Те, що традиційно вважалося б «відходами», перетворюється на цінний ресурс для створення нового продукту.

Принцип замкнутого циклу – це бачення світової економіки, що функціонує в природних межах і дотримується трьох основних положень:

- відходи та забруднення створюються за межами технологій ВДЕ;
- продукти та матеріали залишаються у використанні;
- природні системи регенеруються та покращуються.

Впровадження економіки замкнутого циклу має вирішальне значення для зниження викидів парникових газів та матеріаломісткості вітряних установок (ВЕУ) та сонячних фотоелектричних модулів, зведення до мінімуму втрат матеріалів протягом їх життєвого циклу, відновлення вартості відходів матеріалів із закінченням терміном служби та істотного скорочення обсягу відходів, що відправляються на звалища. Різні компоненти цих технологій повторно використовують або максимально переробляють відходи матеріалів по завершенні термінів їх експлуатації.

Пропоновані підходи можуть включати заходи, які покладають відповідальність за переробку та утилізацію після закінчення терміну служби на імпортерів та продавців продукції (це вже застосовується до іншої електроніки в деяких країнах), а також нові бізнес-моделі, які передбачають оренду, а не продаж матеріалів чи технологій.

Наприклад, у цей час у Канаді відсутні правила, спеціально спрямовані на відновлення матеріалів із сонячних фотоелектричних модулів та ВЕУ в кінці їхнього терміну служби, як не існує жодних спеціалізованих підприємств з переробки. Проте є ознаки змін: пілотна програма в Альберті почала приймати фотоелектричні сонячні модулі в рамках переробки електроніки, а Британська Колумбія (провінція Канади) недавно оголосила про плани включити фотоелектричні сонячні модулі у сферу правил утилізації.

Залізо та інші метали, що використовуються у ВЕУ та іншому обладнанні ВДЕ, можуть бути перероблені за існуючими технологіями. Складніша ситуація з іншими складовими. Так, в Північній Америці засновано добровільні програми здачі на переробку (переважно в США) тонкоплівкових сонячних фотоелектричних модулів, інші виведені з експлуатації матеріали або відправляються на звалища, або зберігаються в очікуванні майбутніх технологій утилізації.

Потрібні нові інвестиції та заходи для впровадження підходів економіки замкнутого циклу в секторі відновлюваних джерел енергії. До них належать стратегічні інвестиції у спеціалізовану інфраструктуру переробки, створення рентабельних каналів транспортування відходів, заходи, що стимулюють проектування для спрощення розбирання та переробки, а також усунення технологічних, нормативних та фінансових бар'єрів на шляху до цього переходу.

Необхідна подальша робота для кількісної оцінки обсягу та характеристик матеріалів із закінченням в майбутньому терміном служби в секторі ВДЕ, оцінки варіантів та можливостей переробки, визначення того, як різні варіанти заходів можуть створити рівні умови з

конкурентними джерелами енергії, та сприяння розробці загальних підходів для безлічі учасників ланцюжка створення вартості сонячної та вітряної енергії.

Цілком доречно, що політична мета щодо технологій відновлюваної енергії досі була зосереджена на майбутнє з нульовим рівнем викидів. Застосовуючи підходи економіки замкнутого циклу до керування потоком матеріалів протягом всього життєвого циклу, сектор відновлюваної енергетики може стати лідером безвідходного і навіть чистого майбутнього з нульовим викидом вуглецю. Водночас досягається кращий контроль за запасами критично важливих матеріалів, які необхідні для майбутнього.

Наведемо окремі приклади, що ілюструють запропоновану концепцію розвитку ВДЕ.

Інноваційна розробка компанії «General Electric» [3]

Відновлювані джерела енергії є критичним компонентом декарбонізації. Це дає можливість виробляти електроенергію без викидів парникових газів, а також забезпечувати електроліз для виробництва «зеленого» водню. Однак обладнання, яке використовується для його виробництва, має обмежений термін служби, а матеріали, які не підлягають переробці або використанню, самі з себе створюють екологічні проблеми. Термореактивні композити, що містяться у більшості звичайних лопатей ВЕУ, не підлягають переробці. Дослідження, опубліковане Кембриджським університетом, показало, що до 2050 року в усьому світі буде близько 43 млн тонн відходів від лопатей.

Компанія «General Electric» (GE) нещодавно представила найбільшу у світі лопать ВЕУ, що підлягає переробці, забезпечивши додатковий потенціал для зменшення впливу енергетики на довкілля. Це нове відкриття може розширити перелік матеріалів, які використовуються у виробництві лопатей. Консорціум на чолі з GE, який вже є одним з лідерів у виробництві потужних ВЕУ морського базування, представив нову лопать з термопластичних матеріалів, що дає можливість використання повністю перероблених лопатей для виробництва відновлюваної

енергії з меншим впливом на довкілля. У березні 2022 року консорціум, який в рамках проекту «Zero Waste Blade Research» (ZEBRA) працює над розробкою більш стійких термопластичних композитних матеріалів, оголосив про розробку першого прототипу лопаті вітряної турбіни, яка на 100 % придатна для переробки (рис. 2).

Прототип лопаті має довжину 203 фути (62 м) і виготовлений зі смоли Elium, виробленої компанією Arkema. Смола Elium – це тип термопласту, армованого скловолокном. У результаті вся лопать на 100 % підлягає вторинній переробці, а властивості порівняні з показниками термореактивних смол, які зазвичай використовуються за їх малу вагу та довговічність.

Використовуючи метод хімічної переробки, весь матеріал з лопатей ВЕУ можна деполімеризувати й перетворити на свіжу смолу, яку можна використовувати повторно. Пропонований прототип покликаний функціонувати як підтвердження концепції економіки замкнутого циклу для ВДЕ. Це має перспективи як для чистої електроенергетики, так і потенційно більш екологічного виробництва водню в майбутньому.

Розробка компанії Siemens Gamesa [4]

Компанія Siemens Gamesa Renewable Energy в 2021 виготовила свої перші перероблювані лопаті для офшорних ВЕУ в Ольборзі, Данія. Компанія планує використовувати ці лопаті у вітряних електростанціях морського базування, які планується побудувати найближчими роками.

У лопатях використовується новий тип смоли, який дає змогу ефективно відокремити його від інших компонентів у кінці терміну служби, що було основною перешкодою для повної переробки. Після виведення з експлуатації лопать буде занурена у слабкий кислотний розчин, нагрітий за допомогою відновлюваних джерел енергії, що відокремить смолу від скловолокна, пластику, дерева та металів. Це дозволить переробляти матеріали для нових застосувань, зокрема в автомобільній промисловості або виробництві споживчих товарів.

Компанія Siemens Gamesa зобов'язалася зробити всі свої лопаті цілком придатними для вторинної переробки до



Рис. 2. Фото прототипу лопаті, яка підлягає вторинній переробці на 100 %

Джерело: <https://www.ge.com/news/press-releases/>

Fig. 2. Photo of a 100% recyclable blade prototype

Source: <https://www.ge.com/news/press-releases/>

2030 року, а свої ВЕУ – цілком придатними до утилізації до 2040 року. Для досягнення цих цілей компанії необхідно буде наростити виробництво лопатей, придатних для вторинної переробки, у промислових масштабах. Компанія може використовувати ті самі прес-форми, які вона в цей час застосовує для виробництва своїх лопатей офшорних ВЕУ, оскільки розміри лопатей і більшість їх матеріалів будуть такими ж, як і раніше. Це означає, що початкові додаткові витрати – для покриття інвестицій у дослідження та розробки за останні кілька років, розвитку ланцюжка поставок та витрат на полімери – будуть обмеженими.

За заявою компанії, матеріали, відновлені після 25 років експлуатації, можуть бути не зовсім такими, як раніше. Наприклад, скловолокно може втратити деяку міцність після тривалого терміну експлуатації, але все ще може використовуватися для інших виробів з низьким навантаженням. Це, безумовно, краще, ніж просто спалювати їх або кидати на звалище.

Виробник нещодавно випустив перші 81-метрові лопаті, придатні для вторинної переробки, і планує використовувати їх у морських вітроенергетичних проєктах наступного року. Було дуже важливо отримати простий процес, який міг би бути виконаний у великих масштабах іншими компаніями в ланцюжку поставок, який не був би шкідливим і не залишав проблемних залишків.

Технологія повної переробки лопатей ВЕУ від Vestas [5]

Данська компанія Vestas у травні 2021 року повідомила, що група організацій за її участю розробила нову технологію, яка забезпечує переробку та повторне використання термореактивних композитів – матеріалів, що використовуються для виготовлення лопатей ВЕУ. Нова технологія є останнім технологічним кроком на шляху до повністю безвідходного ланцюжка створення вартості в галузі. Для впровадження цієї нової технології та просування економіки замкнутого циклу у вітроенергетиці, було створено нову ініціативу під назвою CETEC – Circular Economy for Thermosets Epoxy Composites (Економіка замкнутого циклу для термореактивних епоксидних композитів). Протягом трьох років CETEC має намір представити готове до промислового впровадження рішення, що ґрунтується на комерціалізації нової технології замкнутого циклу (рис. 3). Частково фінансований Інноваційним фондом Данії,

проєкт CETEC очолює компанія Vestas. У ньому також беруть участь Olin, провідний світовий виробник епоксидної смоли, Данський технологічний інститут та Орхуський університет.

Нова технологія передбачає процес переробки, що складається з двох етапів. Перший – термореактивні композити розбираються на волокно та епоксидну смолу. Другий – завдяки новому хімічному процесу епоксидна смола додатково розділяється на основні компоненти, аналогічні до вихідних матеріалів. Ці матеріали можуть бути повторно використані при виробництві нових лопатей.

Виведення з експлуатації об'єктів фотоенергетики

Високі темпи розвитку використання сонячної енергії та зростання попиту на фотоелектричні установки призвели до виникнення екологічних проблем у всьому світі. У США імпорт сировини для сонячних модулів став проблемою [6], яка вимагає пошуку шляхів виходу з такої ситуації, факторів, що впливають на процеси переробки фотоелектричних модулів та сприяють відновленню фотоелектричних ресурсів у країні.

Сонячні модулі фотоелектричних станцій (ФЕС) мають технічний термін служби 25–30 років і більше. Термін служби панелей залежить від кількох факторів, окрема

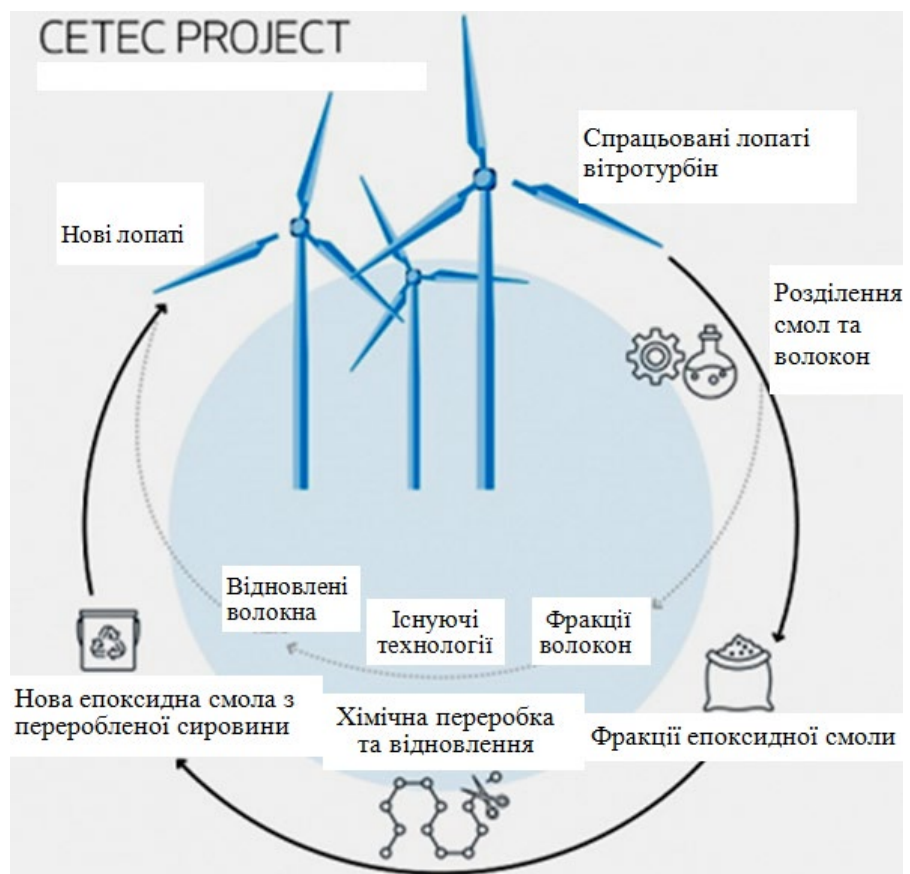


Рис. 3. Схема технології замкнутого циклу в рамках проєкту CETEC

Джерело: <https://www.offshorewind.biz/2021/05/17/>

Fig. 3. Scheme of closed-loop technology within the framework of the CETEC program

Source: <https://www.offshorewind.biz/2021/05/17/>

від клімату, типу модуля та використовуваної стележної системи. За даними Національної лабораторії відновлюваних джерел енергії США (NREL), втрата продуктивності з часом, звана деградацією, зазвичай становить близько 0,5 % на рік.

IRENA у звіті [7] про проведене разом із IEA-PVPS дослідження, опублікованому в червні 2016 року вперше у світі прогнозувала, що переробка або утилізація сонячних панелей у кінці терміну їх експлуатації може забезпечити запас сировини, цінних матеріалів та інших компонентів в обсязі 78 млн тонн і загальною вартістю понад 15 млрд доларів США до 2050-х років.

Поряд із заходами універсального регулювання, які класифікують відходи виведених з експлуатації фотоелектричних модулів як загальні або промислові, у багатьох країнах існують або розробляються свої нормативні документи для регулювання поводження із такими відходами.

Директивою 2012/19/EU про відходи електричного та електронного обладнання WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) [8] Європейський союз ввів правила регулювання утилізації відходів сонячних електростанцій. Додатково комітетом зі стандартизації електроніки (CENELEC) було розроблено відповідний нормативний документ, який регулює збирання та переробку фотоелектричних панелей (EN50625-2-4 та TS50625-3-5) [9, 10].

У 2017 році в рамках дорожньої карти підтримки збору відпрацьованого обладнання відновлюваної енергетики та належного поводження з ним японська Асоціація сонячної енергетики (Japan Photovoltaic Energy Association – JPEA) опублікувала відповідний посібник з поводження з сонячними модулями (документ має рекомендаційний характер) [11].

Є країни, які прийняли спеціальні закони для регулювання поводження з відходами сонячних модулів. Так, у Чехії Законом № 165/2012 [12] встановлюється відповідальність операторів ФЕС і зобов'язання щодо фінансування збирання, розділення, обробки, утилізації та повторного використання електричних відходів фотоелектричних модулів.

У США також було прийнято Закон «про збереження та відновлення ресурсів» (Resource Conservation and Recovery Act) [13], який регулює питання поводження з відходами, а у 2019 році було опубліковано новий стандарт управління стійким розвитком для фотоелектричних модулів – NSF/ANSI 457, за яким встановлюються критерії ефективності для фотоелектричних модулів та показників стійкого їхнього лідерства на ринку [14].

У контексті утилізації й переробки відходів сонячних модулів велике значення має політика, яку проводить Китай, що є найбільшим ринком фотоелектричної індустрії станом на 2018 рік [15].

Отже, в результаті прийнятих провідними країнами політик та заходів щодо утилізації та переробки відходів сонячної енергетики впроваджуються технології утилізації фотоелектричних модулів.

Для мінімізації впливу на здоров'я людей і на довкілля, особливе значення має черговість надходження модулів на утилізацію. В першу чергу поступають модулі, що являють загрозу життю людей, які працюють із ними, а також явну загрозу займання [16]. Наступними на утилізацію надходять модулі, в яких несправності виявляються та оцінюються під час візуального огляду [17, 18]. До цього списку можуть належати модулі, у яких несправності виникли під час транспортування [19, 20] та монтажу [21]. Ці обставини пов'язані з тим, що незважаючи на системи випробувань, наведених в [22] і з урахуванням особливості конструкції ФЕМ, виникнення проблем під час транспортування та монтажу є абсолютно реальним.

Модулі, несправності яких суттєво знижують їхню ефективність з вироблення електроенергії, що визначається за допомогою спеціального обладнання, наведеного в роботах з діагностики модулів [23–25], зокрема за допомогою методів термографії [24, 26–29] та електричної люмінесценції [29–33], надходять на утилізацію в останню чергу.

Висновки та рекомендації

Впровадження заходів щодо використання відходів відновлюваної енергетики є актуальною проблемою, яка обумовлює подальший розвиток галузі. Ці заходи потребують інноваційних технологій, а їх розроблення – серйозних фінансових вкладень із залученням провідних наукових і промислових центрів. Зокрема, це Інститут прикладної екології (Öko-Institut) з Німеччини, який є одним із провідних у Європі незалежних дослідницьких та консалтингових інститутів для сталого майбутнього. З моменту свого заснування у 1977 році Інститут розробляє принципи та стратегії того, як концепція сталого розвитку може бути реалізована на глобальному, національному та місцевому рівнях, надає консультації за різними напрямками: використання хімічних речовин та оцінка технологій; енергетика та захист клімату; стійкість у споживанні; мобільність, управління ресурсами та компаніями тощо. Серед рекомендацій, розроблених цією науковою установою з метою покращення стану переробки відходів ВДЕ, можна навести такі [34]:

- створення стандарту переробки, гармонізована класифікація відходів, визначення критеріїв залишкового стану відходів;
- встановлення цільових показників переробки для конкретних матеріалів з метою відновлення критично важливих матеріалів;
- стандартизація фотоелектричних панелей як варіант встановлення певного дизайну для полегшення переробки, повторного використання панелей після закінчення терміну їх служби;

- створення нових моделей фінансування для відшкодування витрат на збирання, обробку, відновлення, переробку й утилізацію відпрацьованих деталей та матеріалів;
- швидке створення інфраструктури логістики та переробки відходів;
- наявність законодавства на рівні ЄС і на національних рівнях, яке регулювало б повернення та обробку композитних відходів від лопатей ВЕУ;
- необхідність застосування схеми розширеної відповідальності виробника;
- законодавче визначення цілей з переробки (поки що прийняті лише у Франції) конкретних металів / критичної сировини або квоти на вміст вторинної сировини;
- фінансова підтримка або створення стимулів для швидкої побудови інфраструктури переробки ВЕУ з метою управління значним потоком відходів, який очікується найближчими роками;
- удосконалення існуючої системи моніторингу та звітності задля наявності кращої інформаційної бази, що полегшить визначення пріоритетів для впровадження подальших заходів з використання відходів.

Для ознайомлення із ситуацією щодо стану роботи з відходами від використання ВДЕ в Україні рекомендується ознайомитися із результатами вебінару, організованого Європейсько-українським енергетичним агентством (ЄУЕА) у березні 2021 року під назвою «Управління відходами сонячних фотоелектричних панелей в Україні», за посиланням: <https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/yeuea-provelo-vebinar-na-temu-upravlinnya-vidhodamy-sonyachnyh-fotoelektrychnykh-panelej-v-ukrayini>. Враховуючи, що Україна зробила великий крок у напрямі розвитку відновлюваної енергетики, слід очікувати й утворення значної кількості електричних відходів у майбутньому. Отже, треба якомога швидше розробляти відповідну законодавчу базу та налагоджувати економічний механізм з переробки електричних відходів в Україні. Це надасть державі додаткові економічні та екологічні вигоди, включаючи подальший сталий розвиток сектора відновлюваної енергетики. З огляду на наявні проблеми України не лише в енергетиці, але й у економіці в цілому, спричинені зовнішньою агресією, варто максимально опиратися на наявний світовий досвід та залучення провідних компаній разом з інноваційними технологіями.

ПОСИЛАННЯ:

1. Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. REPowerEU Plan. [Online]. Available:
2. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>. [Accessend: Oct. – Nov., 2022].
3. Хілько В. А. Заходи з питання виводу із експлуатації об'єктів на базі ВДЕ. Звіт про науково-дослідну роботу. ІБЕ НАН України, 2022 р. 35 с.
4. GE unveils the biggest recyclable wind turbine blade in the world. [Online]. Available: https://www.hydrogenfuelnews.com/wind-turbine-recyclable-ge/8551913/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=ibvUA3FMe85DIsU. [Accessend: Nov. 16, 2022].
5. How Siemens Gamesa plans to make wind turbine blades fully recyclable by 2030. [Online]. Available: <https://www.windpowermonthly.com/article/1723418/siemens-gamesa-plans-wind-turbine-blades-fully-recyclable-2030>. [Accessend: Nov. 16, 2022].
6. Vestas unveils new technology to recycle wind blades and stop dumping. [Online]. Available: <https://reneweconomy.com.au/vestas-unveils-new-technology-to-recycle-wind-blades-and-stop-dumping>. [Accessend: Nov. 16, 2022].
7. Taylor L. Curtis, Heather Buchanan, Garvin Heath, Ligia Smith, Stephanie Shaw, «Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiative». Technical Report NREL/TP-6A20-74124. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), Mar., 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74124.pdf>.
8. IRENA and IEA-PVPS. End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. [Accessend: Nov. 16, 2022].
9. The Waste Electrical and Electronic Equipment Directive – WEEE 2012/19/EU. [Online]. Available: <http://procr-tificate.ru/standard/directive-2012-19-eu.html>. [Accessend: Nov. 16, 2022].
10. EN 50625-2-4:2017 – Collection, logistics & treatment requirements for WEEE - Part 2–4: Treatment requirements for photovoltaic panels.
11. CENELEC - CLC/TS 50625-3-5 Collection, logistics & Treatment requirements for WEEE – Part 3–5: Technical specification for de-pollution – Photovoltaic panels.
12. Japan Photovoltaic Energy Association-JPEA. [Online]. Available: <https://isainfopedia.org/japan-photovoltaic-energy-association-jpea>. [Accessend: Nov. 16, 2022].
13. Lenka JM, Zemková, Jiří Louda, Ondřej Vojáček, «Readjusting environmental fees for products with a long lifetime: Case of PV module recycling fee in the Czech republic», The International Scientific Conference INPROFORUM České Budějovice, pp. 256–260, Nov. 2015.

14. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), «Resource conservation and recovery», *U.S. Environmental Protection Agency*. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-regulations>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
15. NSF/ANSI 457 – Sustainability Leadership of Photovoltaic Modules.
16. Yan Li, Ge Wang, Bo Shen, Qi Zhang, Boyu Liu, Ruoxi Xu, «Conception and policy implications of photovoltaic modules end-of-life management in China», *WIREs Energy and Environment*, Vol. 10, No. 1, Jul. 17, 2020. doi.org/10.1002/wene.387.
17. IEC61215 International Electrotechnical Commission (IEC) 61215: 2nd edn, 2005. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval.
18. IEC61646 International Electrotechnical Commission (IEC) 61646: 2nd edn, 2008. Thin-film terrestrial photovoltaic modules – Design qualification and type approval.
19. F. Reil, J. Althaus, W. Vaaßen, W. Herrmann, K. Strohkendl, «The Effect of Transportation Impacts and Dynamic Load Tests on the Mechanical and Electrical Behaviour of Crystalline PV Modules», *Proc. 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010)*, pp. 3989–3992.
20. M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Jahn, «Crack statistic of crystalline silicon photovoltaic modules», *Proc. 20th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 3290–3294.
21. C. Olschok, M. Pfeifer, M. Zech, M. Schmid, M. Zehner, G. Becker, «Untersuchung von Handhabungsfehlern bei der Montage und Installation von PV Modulen», *Proc. 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2012)*, p. 202.
22. IEC 61730-2 International Electrotechnical Commission (IEC) Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2.
23. M. Garaj, K. Y. Hong, H. S.-H. Chung, J. Zhou, and A. W. Lo, «Photovoltaic Panel Health Diagnostic System for Solar Power Plants», *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2019, pp. 1078–1083.
24. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., «Faults in photovoltaic modules and possibilities for their detection by thermographic studies», *11th Electrical Engineering Faculty Conference (BULEF)*, 2019, pp. 1- 5.
25. [25] Kongphet V., Migan-Dubois A., Delpha C., Diallo D., Lechenadec J., «Photovoltaic Fault Detection and Diagnosis: Which Level of Granularity for PV Modeling?», *Prognostics and Health Management Conference (PHM-Besançon)*, 2020, pp. 180–186.
26. J. Bachmann, C. Buerhop-Lutz, C. Deibel, I. Riedel, H. Hoppe, C. J. Brabec, V. Dyakonov, «Organic Solar Cells Characterized by Dark Lock-in Thermography», *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), pp. 642–647.
27. C. Buerhop, D. Schlegel, C. Vodermayr, M. Nieß, «Quality control of PV-modules in the field using infrared thermography», *26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 3894–3897.
28. O. Breitenstein, H. Straube, «Lock-in Thermography Investigation of Solar Modules», *Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 1451–1453.
29. U. Hoyer, A. Burkert, R. Auer, C. Buerhop-Lutz, «Analysis of PV Modules by Electroluminescence and IR Thermography», *Proc. 24th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2009)*, pp. 3262–3266.
30. G. Alves dos Reis Benatto and al., «Drone-Based Daylight Electroluminescence Imaging of PV Modules», *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, Vol. 10, No. 3, pp. 872–877.
31. [31] T. M. Tran, B. E. Pieters, M. Siegloch, A. Gerber, C. Ulbrich, T. Kirchartz, R. Schäffler, U. Rau, «Characterization of Shunts in Cu (in, Ga) Se₂ Solar Modules Via Combined Electroluminescence and Dark Lock-in Thermography Analysis», *Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 2981–2985.
32. Köntges M., Bothe K., «Elektrolumineszenzmessung an PV-Modulen, ep Photovoltaik aktuell», 7/8, 36–40, 2008.
33. M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, «Crack Statistic for Wafer-Based Silicon Solar Cell Modules in the Field Measured by UV Fluorescence», *IEEE Journal of Photovoltaics* 3(1) (2012) pp. 95–101, <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2208941>.
34. Öko-Institut, Germany. [Online]. Available: <https://www.oeko.de>.

REFERENCES:

1. Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. REPowerEU Plan. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>. [Accessed: Oct.–Nov., 2022].
2. V.A. Khilko. Zakhody z pyannia vyvodu iz ekspluatatsii obektiv na bazi VDE. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu [Measures regarding decommissioning of RES-based facilities. Report on research work]. Institute of Renewable Energy at the NAS of Ukraine, 2022, 35 p. (Ukr)

3. GE unveils the biggest recyclable wind turbine blade in the world. [Online]. Available: https://www.hydrogenfuelnews.com/wind-turbine-recyclable-ge/8551913/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=ibvUA3FMe85DIsU. [Accessed: Nov. 16, 2022].
4. How Siemens Gamesa plans to make wind turbine blades fully recyclable by 2030. [Online]. Available: <https://www.windpowermonthly.com/article/1723418/siemens-gamesa-plans-wind-turbine-blades-fully-recyclable-2030>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
5. Vestas unveils new technology to recycle wind blades and stop dumping. [Online]. Available: <https://reneweconomy.com.au/vestas-unveils-new-technology-to-recycle-wind-blades-and-stop-dumping>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
6. Taylor L. Curtis, Heather Buchanan, Garvin Heath, Ligia Smith, Stephanie Shaw, «Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiative». Technical Report NREL/TP-6A20-74124. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), Mar., 2021. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/74124.pdf>.
7. IRENA and IEA-PVPS. End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
8. The Waste Electrical and Electronic Equipment Directive – WEEE 2012/19/EU. [Online]. Available: <http://procertificate.ru/standard/directive-2012-19-eu.html>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
9. EN 50625-2-4:2017 – Collection, logistics & treatment requirements for WEEE – Part 2–4: Treatment requirements for photovoltaic panels.
10. CENELEC - CLC/TS 50625-3-5 Collection, logistics & Treatment requirements for WEEE – Part 3–5: Technical specification for de-pollution – Photovoltaic panels.
11. Japan Photovoltaic Energy Association-JPEA. [Online]. Available: <https://isainfopedia.org/japan-photovoltaic-energy-association-jpea>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
12. Lenka JM, Zemková, Jiří Louda, Ondřej Vojáček, «Readjusting environmental fees for products with a long lifetime: Case of PV module recycling fee in the Czech republic», The International Scientific Conference INPROFORUM České Budějovice, pp. 256–260, Nov. 2015.
13. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), «Resource conservation and recovery», U.S. Environmental Protection Agency. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/rcra/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-regulations>. [Accessed: Nov. 16, 2022].
14. NSF/ANSI 457 – Sustainability Leadership of Photovoltaic Modules.
15. Yan Li, Ge Wang, Bo Shen, Qi Zhang, Boyu Liu, Ruoxi Xu, «Conception and policy implications of photovoltaic modules end-of-life management in China», *WIREs Energy and Environment*, Vol. 10, No. 1, Jul 17, 2020. doi.org/10.1002/wene.387.
16. IEC61215 International Electrotechnical Commission (IEC) 61215: 2nd edn, 2005. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules – Design qualification and type approval.
17. IEC61646 International Electrotechnical Commission (IEC) 61646: 2nd edn, 2008. Thin-film terrestrial photovoltaic modules – Design qualification and type approval.
18. F. Reil, J. Althaus, W. Vaaßen, W. Herrmann, K. Strohkendl, «The Effect of Transportation Impacts and Dynamic Load Tests on the Mechanical and Electrical Behaviour of Crystalline PV Modules», Proc. 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), pp. 3989–3992.
19. M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Jahn, «Crack statistic of crystalline silicon photovoltaic modules», Proc. 20th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3290–3294.
20. C. Olschok, M. Pfeifer, M. Zech, M. Schmid, M. Zehner, G. Becker, «Untersuchung von Handhabungsfehlern bei der Montage und Installation von PV Modulen», Proc. 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2012), p. 202.
21. IEC 61730-2 International Electrotechnical Commission (IEC) Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2.
22. M. Garaj, K. Y. Hong, H. S.-H. Chung, J. Zhou, and A. W. Lo, «Photovoltaic Panel Health Diagnostic System for Solar Power Plants», 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2019, pp. 1078–1083.
23. Lozanov Y., Tzvetkova S., Petleshkov A., «Faults in photovoltaic modules and possibilities for their detection by thermographic studies», 11th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), 2019, pp. 1–5.
24. Kongphet V., Migan-Dubois A., Delpha C., Diallo D., Lechenadec J., «Photovoltaic Fault Detection and Diagnosis: Which Level of Granularity for PV Modeling?», *Prognostics and Health Management Conference (PHM-Besançon)*, 2020, pp. 180–186.
25. J. Bachmann, C. Buerhop-Lutz, C. Deibel, I. Riedel, H. Hoppe, C. J. Brabec, V. Dyakonov, «Organic Solar Cells Characterized by Dark Lock-in Thermography», *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), pp. 642–647.
26. C. Buerhop, D. Schlegel, C. Vodermayr, M. Nieß, «Quality control of PV-modules in the field using infrared-

-
- thermography», *26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 3894–3897.
27. O. Breitenstein, H. Straube, «Lock-in Thermography Investigation of Solar Modules», *Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 1451–1453.
 28. U. Hoyer, A. Burkert, R. Auer, C. Buerhop-Lutz, «Analysis of PV Modules by Electroluminescence and IR Thermography», *Proc. 24th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2009)*, pp. 3262–3266.
 29. G. Alves dos Reis Benatto and al., «Drone-Based Daylight Electroluminescence Imaging of PV Modules», *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2020, Vol. 10, No. 3, pp. 872–877.
 30. T. M. Tran, B. E. Pieters, M. Siegloch, A. Gerber, C. Ulbrich, T. Kirchartz, R. Schäffler, U. Rau, «Characterization of Shunts in Cu (in, Ga) Se₂ Solar Modules Via Combined Electroluminescence and Dark Lock-in Thermography Analysis», *Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011)*, pp. 2981–2985.
 31. Köntges M., Bothe K., «Elektrolumineszenzmessung an PV-Modulen, ep Photovoltaik aktuell», 7/8, 36-40, 2008.
 32. M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, «Crack Statistic for Wafer-Based Silicon Solar Cell Modules in the Field Measured by UV Fluorescence», *IEEE Journal of Photovoltaics* 3(1) (2012) pp. 95–101, <https://doi:10.1109/JPHOTOV.2012.2208941>.
 33. Öko-Institut, Germany. [Online]. Available: <https://www.oeko.de>.