

# Інтегрована стратегія вибору безпечного сценарію поведження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями електричних транспортних засобів

Трунова І.<sup>1</sup>, Дзюбенко О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна  
Надійшла: 07.02.2026. Прийнято: 18.05.2026. Опубліковано: 20.05.2026. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

**Анотація.** Запропоновано інтегровану стратегію вибору безпечного сценарію поведження з відпрацьованими тяговими літій-іонними батареями електричних транспортних засобів з урахуванням їх технічного стану, умов експлуатації, потенціалу вторинного використання та перероблення. Обґрунтовано доцільність багатокритеріального підходу на основі інтегрального показника придатності, який враховує електричні, теплові та експлуатаційні параметри батарей. Показано, що батареї з достатнім технічним станом доцільно спрямовувати на вторинне застосування у стаціонарних системах накопичення енергії, мікромережах і зарядній інфраструктурі, а батареї з критичною деградацією – на перероблення з вилученням цінних матеріалів. Вторинне застосування та перероблення розглянуто як взаємодоповнювальні етапи життєвого циклу акумуляторної батареї.

**Ключові слова:** тягові акумуляторні батареї; електричні транспортні засоби; вторинне застосування; перероблення акумуляторів; життєвий цикл батарей.

## Вступ

Стрімке зростання частки електричних транспортних засобів у світовому автопарку зумовлює пропорційне збільшення обсягів виробництва та експлуатації тягових акумуляторних батарей, які є ключовим елементом енергетичної системи електромобіля. Саме їх параметри визначають запас ходу, енергетичну ефективність, динамічні характеристики та рівень безпеки транспортного засобу. У процесі експлуатації батареї зазнають електрохімічної деградації, що супроводжується зниженням ємності, зростанням внутрішнього опору та погіршенням експлуатаційних характеристик. Досягнення рівня залишкової ємності близько 70–80 % від номінального значення, як правило, обмежує доцільність їх подальшого використання у транспортних застосуваннях і призводить до формування значних обсягів відпрацьованих акумуляторних систем, що супроводжується зростанням витрат на їх оброблення та утилізацію.

За оцінками міжнародних аналітичних організацій [1], у найближчі десятиліття очікується експоненційне зростання кількості таких батарей, які формують окремий сегмент складних техногенних відходів із високим вмістом стратегічно важливих матеріалів. Неналежне поведження з ними пов'язане з підвищеними ризиками, зокрема термічного розгону, займання та утворення токсичних продуктів. Водночас навіть після завершення транспортного ресурсу батареї зберігають значний енергетичний потенціал, що обґрунтовує можливість їх використання у стаціонарних системах накопичення енергії, зокрема з метою підвищення ефективності використання ресурсів та зниження сукупних витрат життєвого циклу.

Ефективне поведження з відпрацьованими акумуляторними батареями потребує комплексного врахування технічного стану, залишкових характеристик, вимог безпеки під час транспортування, зберігання та демонтажу, а також технологічних і економічних аспектів їх перероблення та вторинного застосування.

Важливим є також урахування міжнародних нормативних вимог, які регламентують екологічно безпечні процедури поводження з такими системами.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері утилізації та вторинного застосування акумуляторних батарей, більшість існуючих підходів зосереджена на окремих аспектах проблеми, таких як технології перероблення, методи оцінювання технічного стану або напрями вторинного застосування. При цьому відсутній узагальнений підхід, який дозволяє на основі сукупності технічних, безпекових та економічних критеріїв обґрунтовано обирати оптимальний сценарій поводження з відпрацьованими батареями.

Особливою актуальності ця проблема набуває в Україні, де ринок електричного транспорту активно розвивається [2, 3], тоді як інфраструктура поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями перебуває на етапі становлення, що підтверджується впровадженням нової нормативно-правової бази, зокрема Закону України «Про управління відходами» (2023), спрямованого на гармонізацію з європейськими стандартами [4]. Недостатній розвиток систем збору, діагностики та перероблення, а також обмежена узгодженість нормативно-правової бази створюють додаткові ризики для екологічної безпеки та стримують розвиток галузі [5, 6].

У зв'язку з цим актуальним є розроблення концептуально-аналітичного інтегрованого підходу до вибору безпечного та ефективного сценарію поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями, який враховує їх технічний стан, потенціал вторинного застосування, можливості перероблення та вимоги сучасних стандартів безпеки. Запропонована стратегія розглядається як основа для формування системи підтримки прийняття рішень і потребує подальшої апробації на реальних діагностичних даних акумуляторних батарей різних електрохімічних типів. Її застосування сприятиме підвищенню ефективності використання ресурсів, оптимізації витрат на поводження з акумуляторними системами, зниженню екологічних ризиків та розвитку циркулярної економіки у сфері електротранспорту.

### **Аналіз публікацій**

Зростання рівня електрифікації транспорту формує новий комплекс науково-технічних завдань, пов'язаних передусім із завершаль-

ною стадією життєвого циклу тягових акумуляторних батарей. До таких завдань належать забезпечення сталого постачання критично важливих матеріалів, зниження екологічних і техногенних ризиків, а також розроблення ефективних підходів до поводження з відпрацьованими акумуляторними системами. У наукових публікаціях відзначається, що для довгострокової стабілізації матеріальних потоків у галузі електромобільності необхідне суттєве підвищення рівня збору та повернення відпрацьованих батарей у циркулярний обіг [7, 8].

Сучасні дослідження свідчать, що стрімке зростання кількості електромобілів супроводжується швидким накопиченням відпрацьованих літій-іонних акумуляторних батарей, які потребують ефективних стратегій перероблення та повторного застосування [1, 9, 10]. У наукових працях 2020–2025 рр. простежується інтенсивний розвиток технологій перероблення, матеріалознавчих підходів і концепцій циркулярного використання акумуляторних систем [11–19]. Показано, що удосконалення процесів вилучення літію, кобальту та нікелю є критично важливим для зменшення залежності від первинного видобутку та формування сталих ланцюгів постачання [13, 15, 19].

Одним із провідних напрямів досліджень є технології перероблення відпрацьованих літій-іонних акумуляторних батарей. Наукові публікації розглядають гідрометалургійні, пірометалургійні та прямі методи перероблення як основні технологічні підходи. Зокрема, у роботі [8] показано, що пряме відновлення катодних матеріалів розглядається як перспективний напрям, здатний підвищити економічну ефективність за рахунок збереження структури активних матеріалів. Водночас гідрометалургійні процеси характеризуються нижчими температурами обробки та потенційно меншими викидами, але потребують ретельного сортування і складної попередньої підготовки матеріалу. Пірометалургійні методи є більш універсальними щодо складу та конфігурації батарей, однак супроводжуються значною енергоємністю та частковими втратами цінних компонентів [15, 19, 20].

У роботах, присвячених переробленню акумуляторних систем, підкреслюється, що проблема не обмежується лише вилученням матеріалів. Вона включає безпечне збирання, транспортування, контрольовану розрядку, демонтаж, сортування та подальшу обробку батарейних компонентів. Автори наукової праці [19] акцентують увагу на екологічних,

санітарних і соціальних ризиках, пов'язаних із поведінням з відпрацьованими літій-іонними батареями, та наголошують на необхідності впровадження безпечних і екологічно прийнятних технологічних процедур. Додатково в роботі [15] зазначено, що суттєвими обмеженнями залишаються недостатній розвиток інфраструктури збору, слабка інтеграція процесів перероблення із замкнутими ланцюгами постачання та недостатня координація між основними учасниками ринку.

Поряд із переробленням важливим напрямом досліджень є вторинне застосування тягових акумуляторних батарей. У багатьох роботах показано, що після завершення транспортного етапу експлуатації батареї можуть зберігати достатній енергетичний потенціал для використання у стаціонарних системах накопичення енергії, резервному живленні та системах інтеграції відновлюваних джерел енергії [18]. Такий підхід дозволяє подовжити життєвий цикл акумуляторів, зменшити обсяг відходів і відтермінувати ресурсомістке перероблення.

Разом з тим ефективність вторинного застосування безпосередньо залежить від коректного оцінювання технічного стану батарей. У публікаціях з цієї тематики одним із базових критеріїв вважається показник ступеня збереження ресурсу акумулятора (state of health, SOH), який характеризує рівень збереження його залишкової ємності та працездатності [21]. Однак, як підкреслюється в роботі [22], саме по собі порогове значення SOH не може розглядатися як універсальний та достатній критерій придатності батареї до вторинного застосування. Для обґрунтованого прийняття рішення необхідно додатково враховувати внутрішній опір, теплові режими, неоднорідність деградації комірок, стабільність роботи модулів, вимоги до балансування та ризики безпеки.

У роботі [23] показано, що циркулярний ланцюг поведіння з акумуляторними системами повинен включати не лише технічну оцінку їх стану, а й організований збір, логістику, переконфігурацію або перепакунання модулів, інтеграцію в нові енергетичні застосування та подальше спрямування на перероблення тих елементів, які не підлягають безпечному вторинному застосуванню. Отже, вторинне застосування не є окремим ізольованим рішенням, а повинно розглядатися як один із можливих сценаріїв у межах загальної стратегії поведіння з батареями після завершення їх транспортного ресурсу.

Окремий блок наукових праць присвячено

бар'єрам і обмеженням впровадження стратегій перероблення та вторинного застосування. У науковій літературі системно виділяються технологічні, економічні, нормативно-правові та безпеково-екологічні бар'єри [15, 19, 24]. До технологічних належать різноманітність електрохімічних систем і конструктивних виконань батарей, складність їх монтажу та низький рівень автоматизації процесів сортування і перероблення. Економічні обмеження пов'язані з високими витратами на збирання, транспортування, діагностику, розрядку й переконфігурацію батарейних модулів, а також з нестабільністю рентабельності вилучення матеріалів. Регуляторні виклики полягають у нерівномірності національних політик, обмеженій інфраструктурі перероблення в окремих регіонах та відсутності уніфікованих підходів до сертифікації батарей для вторинного застосування. Безпекові ризики охоплюють можливість термічного розгону, займання, утворення токсичних побічних продуктів і потребу у спеціалізованих протоколах поведіння з пошкодженими або деградованими батареями.

Отже, аналіз сучасних публікацій показує, що наукові дослідження достатньо глибоко висвітлюють окремі аспекти проблеми, зокрема технології перероблення, напрями вторинного застосування, методи оцінювання технічного стану та регуляторні обмеження. Проте в наявних роботах недостатньо представлено інтегрований підхід, що забезпечує формалізований вибір сценарію поведіння на основі сукупності технічних, безпекових, економічних і нормативних критеріїв. Саме ця науково-практична прогалина визначає доцільність подальшого дослідження.

### Мета та постановка задачі

Метою роботи є розроблення інтегрованої стратегії вибору безпечного та ефективного сценарію поведіння з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями електричних транспортних засобів з урахуванням їх технічного стану, потенціалу вторинного застосування, можливостей перероблення, а також технологічних, економічних, екологічних, нормативних та безпекових вимог.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- систематизувати чинники, що визначають технічний стан відпрацьованих акумуляторних батарей та впливають на вибір сценарію подальшого поведіння;

- визначити критерії оцінювання технічної придатності акумуляторних батарей до вторинного застосування з урахуванням електричних, теплових та безпекових характеристик;
- порівняти технологічні рішення у сфері перероблення відпрацьованих акумуляторних батарей за показниками ефективності, екологічного впливу та економічної доцільності;
- узагальнити міжнародні нормативні вимоги щодо безпечного поводження з відпрацьованими акумуляторними батареями як обмежувальний чинник при виборі сценарію;
- розробити інтегровану стратегію поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями на основі сукупності технічних, безпекових та економічних критеріїв;
- оцінити ефективність запропонованої стратегії шляхом порівняння альтернативних сценаріїв поводження з відпрацьованими акумуляторними батареями.

### 1. Оцінювання технічного стану відпрацьованих тягових акумуляторних батарей

Оцінювання технічного стану відпрацьованих тягових акумуляторних батарей є визначальним етапом у формуванні стратегії їх подальшого поводження – вторинного застосування або перероблення. Ключовим інтегральним показником при цьому є ступінь збереження ресурсу акумулятора – SOH, який відображає рівень збереження його експлуатаційних характеристик порівняно з номінальними значеннями.

Згідно з підходами, викладеними в стандарті, розробленому International Electrotechnical Commission IEC 62620:2023 [25], технічний стан акумуляторної батареї визначається на основі сукупності параметрів, серед яких основними є залишкова ємність, внутрішній опір, стабільність напруги та поведінка в циклах заряду-розряду. Комплексний аналіз цих характеристик дозволяє об'єктивно оцінити придатність батареї до подальшої експлуатації або перероблення.

На основі показника ступеня збереження ресурсу акумулятора відпрацьовані акумуляторні батареї можуть бути класифіковані за рівнем технічного стану з відповідним визначенням доцільного сценарію їх подальшого використання. Узагальнено можна виділити такі діапазони: батареї з рівнем SOH понад 90% зберігають параметри, близькі до номінальних, і можуть продовжувати експлуатацію у транспортних засобах; у діапазоні 70–90 % вони втрачають частину енергетичних характеристик, проте залишаються придатними для стаціонарних режимів роботи; при зниженні SOH нижче 70 % необхідне додаткове багатокритеріальне оцінювання – батареї з SOH 60–70 % можуть бути придатними лише до обмеженого вторинного застосування, тоді як за SOH нижче 60 % доцільним є спрямування на перероблення.

Узагальнена класифікація тягових акумуляторних батарей за рівнем технічного стану та відповідними сценаріями поводження наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація тягових акумуляторних батарей за SOH та сценаріями поводження

Рівень технічного стану (SOH)	Характеристика технічного стану	Рекомендований сценарій поводження
SOH > 90 %	Параметри близькі до номінальних; мінімальна деградація; незначне зростання внутрішнього опору	Подальша експлуатація у складі транспортних засобів
SOH 70–90 %	Помірне зниження ємності; збільшення внутрішнього опору; стабільна робота у стаціонарних режимах	Вторинне застосування: системи накопичення енергії, мікромережі, резервне живлення
SOH 60–70 %	Обмежена ємність; підвищений внутрішній опір; допустима робота у низькоциклічних режимах	Обмежене вторинне застосування: допоміжні енергосистеми, буферні накопичувачі
SOH < 60 %	Значна деградація; нестабільна робота; підвищені ризики безпеки	Перероблення: вилучення Li, Ni, Co, Mn та утилізація

Наведена класифікація має узагальнений характер і базується переважно на показнику ступеня збереження ресурсу акумулятора SOH. Проте використання лише цього параметра не забезпечує достатньої точності при виборі сценарію поводження, оскільки не вра-

ховує змін потужнісних характеристик, теплових режимів та історії експлуатації акумуляторної батареї [13, 15, 18]. Це може призводити до неточностей у визначенні доцільності її вторинного застосування або спрямування на перероблення [18, 22]. У зв'язку з цим до-

цільним є застосування інтегрованого підходу, що базується на багатокритеріальній оцінці технічного стану акумуляторної батареї [13, 24].

З цією метою запропоновано інтегральний показник придатності  $K$ , який використовується як узагальнений безрозмірний показник для підтримки прийняття рішення щодо подальшого сценарію поведінки з батареєю. Для коректного застосування всі часткові показники попередньо нормуються:

$$K = w_1 \cdot k_{\text{SOH}} + w_2 \cdot k_{\text{OП}} + w_3 \cdot k_{\text{T}} + w_4 \cdot k_{\text{експ}},$$

де  $K$  – інтегральний показник придатності акумуляторної батареї;  $k_{\text{SOH}}$  – нормований показник ступеня збереження ресурсу акумулятора;  $k_{\text{OП}}$  – нормований показник збереження потужнісних характеристик, що враховує зміну внутрішнього опору акумуляторної батареї;  $k_{\text{T}}$  – нормований показник теплової стабільності акумуляторної батареї;  $k_{\text{експ}}$  – нормований показник умов експлуатації, що враховує історію циклування, температурні режими та глибину розряду;  $w_1, w_2, w_3, w_4$  – вагові коефіцієнти, які визначають відносну значущість відповідних чинників залежно від умов подальшого застосування та типу батареї. Нормування часткових показників здійснюється для приведення різнорідних за фізичною природою параметрів до єдиної безрозмірної шкали, наприклад, від 0 до 1. Значення, близьке до 1, відповідає сприятливішому технічному стану за відповідним критерієм, тоді як значення, близьке до 0, характеризує критичне погіршення параметра або неприйнятний рівень ризику. Зокрема,  $k_{\text{SOH}}$  може визначатися на основі відносного рівня збереження ємності,  $k_{\text{OП}}$  – з урахуванням відносної зміни внутрішнього опору та пов'язаного з нею зниження потужнісних характеристик,  $k_{\text{T}}$  – за результатами оцінювання теплової стабільності, а  $k_{\text{експ}}$  – на основі історії циклування, температурних режимів та глибини розряду.

Для вагових коефіцієнтів виконується умова:

$$w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1.$$

Вагові коефіцієнти  $w_1, w_2, w_3, w_4$  не є універсальними сталими величинами. Їх значення можуть визначатися експертно, зокрема методом парних порівнянь, або уточнюватися відповідно до цільового застосування батареї. Наприклад, для стаціонарних систем накопи-

чення енергії більшу вагу можуть мати залишкова ємність і стабільність роботи в помірних режимах навантаження, тоді як для буферизації зарядної інфраструктури суттєвішого значення набувають внутрішній опір, потужнісні характеристики та теплова стабільність.

У такому поданні показник  $K$  не є фізичною характеристикою акумуляторної батареї, а відображає узагальнений рівень її технічної придатності. Чим більшим є значення  $K$ , тим вищою є доцільність вторинного застосування батареї; чим нижчим є значення цього показника, тим більш обґрунтованим є спрямування батареї на перероблення.

На основі значення інтегрального показника формується правило вибору сценарію поведінки з акумуляторною батареєю:

$$\begin{cases} K \geq K_1 \rightarrow \text{вторинне застосування} \\ K_2 \leq K < K_1 \rightarrow \text{обмежене вторинне застосування} \\ K < K_2 \rightarrow \text{перероблення} \end{cases}$$

де  $K_1$  відповідає порогу доцільності повноцінного вторинного застосування;  $K_2$  – мінімально допустимому рівню для обмеженого вторинного застосування. У межах цієї роботи порогові значення  $K_1$  і  $K_2$  розглядаються як умовні межі прийняття рішень, що задають зони повноцінного вторинного застосування, обмеженого вторинного застосування та перероблення. Їх числові значення мають уточнюватися під час практичної реалізації стратегії з урахуванням типу акумуляторної батареї, електрохімічної системи, вимог безпеки, профілю навантаження та результатів діагностики. Запропонований критерій забезпечує формалізацію процесу прийняття рішень, який у більшості практичних випадків виконується експертно, та створює передумови для впровадження автоматизованих систем сортування акумуляторних батарей. Крім того, його використання узгоджується з концепцією цифрового паспорта батареї, що дозволяє інтегрувати історичні експлуатаційні дані у процедуру оцінювання та підвищити точність прогнозування залишкового ресурсу.

Експлуатаційна деградація літій-іонних акумуляторних батарей має комплексний характер і проявляється у зниженні залишкової ємності, зростанні внутрішнього опору та погіршенні енергетичних і потужнісних характеристик. Інтенсивність деградації визначається температурними режимами експлуата-

ції, глибиною розряду, швидкістю заряду, типом електрохімічної системи, а також кількістю циклів заряду-розряду. Експериментальні дослідження показують, що для значної частини сучасних літій-іонних батарей порогове значення SOH на рівні 70–80% досягається зазвичай у діапазоні 1500–2500 циклів (залежно від хімічного складу та умов експлуатації), що відповідає переходу від транспортного застосування до сценаріїв вторинного застосування [15, 18, 23].

Після завершення первинного життєвого циклу відпрацьовані тягові акумуляторні батареї характеризуються низкою специфічних технічних особливостей, які безпосередньо впливають на вибір сценарію поведінки. До них належать: зниження залишкової ємності внаслідок деградації активних матеріалів; зростання внутрішнього опору, що обмежує потужнісні характеристики; неоднорідність деградації між окремими комірками та модулями, що ускладнює їх вторинне застосування; а також підвищення ризиків теплової нестабільності внаслідок змін електрохімічних властивостей матеріалів. Особливо важливим є врахування теплових ризиків, оскільки деградовані батареї характеризуються підвищеною чутливістю до умов перевантаження, механічних пошкоджень і порушень режимів експлуатації.

Водночас, незважаючи на деградацію, відпрацьовані літій-іонні акумуляторні батареї зберігають значний матеріальний потенціал, оскільки містять стратегічно важливі елементи, такі як літій, нікель, кобальт, марганець, мідь та алюміній. Це визначає економічну доцільність їх перероблення та інтеграції у циркулярні виробничі ланцюги.

Таким чином, вибір сценарію поведінки з відпрацьованою акумуляторною батареєю має ґрунтуватися на узгодженій системі критеріїв, що поєднує показники технічного стану, рівень деградації, безпекові обмеження та умови попередньої експлуатації. Саме така багатокритеріальна логіка створює основу для формалізованого прийняття рішення щодо вторинного застосування, обмеженого вторинного застосування або перероблення батареї.

## 2. Критерії вибору сценарію поведінки з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями

Вибір сценарію поведінки з відпрацьованими тяговими літій-іонними акумуляторними батареями – вторинного застосування

або перероблення – ґрунтується на комплексному оцінюванні їх технічного стану, безпекових характеристик та прогнозованої ефективності подальшої експлуатації. На відміну від підходів, орієнтованих на окремі параметри, сучасна практика передбачає використання багатокритеріальної системи відбору, яка інтегрує електричні, теплові, експлуатаційні та аналітичні показники.

Ключовим базовим критерієм є ступінь збереження ресурсу акумулятора, який визначається відповідно до положень стандартів IEC 62620 та SAE J1798 [25]. У загальному випадку батареї з рівнем SOH понад 70% розглядаються як потенційно придатні до вторинного застосування, тоді як подальше зниження цього показника істотно обмежує можливість їх безпечного використання і зумовлює доцільність перероблення. Водночас використання лише показника SOH не забезпечує достатньої точності оцінювання, оскільки не враховує динамічні та деградаційні особливості роботи батареї.

Важливим доповнювальним критерієм є внутрішній опір акумуляторних осередків, який оцінюється, зокрема, із застосуванням методів електрохімічної імпедансної спектроскопії. Зростання імпедансу відображає погіршення кінетики електрохімічних процесів, підвищення поляризації та зниження потужнісних характеристик, що є критичним фактором при визначенні придатності батареї до повторного використання у режимах із змінними навантаженнями [13, 15].

Окрему групу критеріїв становлять теплові та безпекові характеристики, які визначають ризик виникнення небезпечних режимів роботи. Випробування відповідно до стандарту IEC 62660-2 [26] дозволяють оцінити теплову стабільність літій-іонних елементів, їх поведінку при перевантаженнях та схильність до термічного розгону. Результати таких випробувань є критичними при прийнятті рішення щодо можливості подальшої експлуатації батареї у складі стаціонарних енергетичних систем. Суттєве значення має також аналіз історії експлуатації батареї, що виконується на основі даних системи керування акумуляторною батареєю. До таких даних належать глибина та частота циклів заряду-розряду, температурні режими, режими навантаження та характер використання. Інтеграція цих параметрів дозволяє більш точно оцінити залишковий ресурс батареї та її поведінку в нових умовах експлуатації.

У сучасній промисловій практиці зазначені критерії реалізуються у вигляді автоматизованих систем діагностики та сортування батарей. Зокрема, впроваджуються роботизовані лінії демонтажу, автоматизовані стенди вимірювання параметрів та алгоритми штучного інтелекту для класифікації акумуляторних модулів, що дозволяє підвищити точність відбору та забезпечити відтворюваність результатів [27]. Практичні приклади таких підходів демонструють також промислові рішення провідних виробників електромобілів та енергетичних систем, зокрема Volkswagen Group, Renault Group та Nissan.

Таким чином, вибір сценарію поведінки з відпрацьованими акумуляторними батареями не може базуватися на окремому параметрі, а потребує використання інтегрованої системи критеріїв, яка враховує технічний стан, деградаційні характеристики, безпекові ризики та історію експлуатації батареї. Формування такої системи є необхідною передумовою для розроблення узагальненої стратегії прийняття рішень щодо подальшого використання або перероблення акумуляторних систем.

### **3. Аналіз сценаріїв подальшого поведінки з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями**

Після оцінювання технічного стану відпрацьованих тягових акумуляторних батарей ключовим етапом є вибір доцільного сценарію їх подальшого поведінки. У сучасній практиці виділяють два основних напрями: вторинне застосування та перероблення. Кожен із цих підходів має власні технічні, економічні та екологічні особливості, що визначають доцільність його застосування залежно від стану батареї.

#### *3.1. Вторинне застосування акумуляторних батарей*

Вторинне застосування тягових літій-іонних акумуляторних модулів передбачає їх використання у стаціонарних енергетичних системах після завершення транспортного етапу експлуатації. Завдяки збереженню значної частини залишкової ємності та стабільності характеристик за умов помірних навантажень такі батареї можуть ефективно застосовуватися у системах накопичення енергії, мікромережах та резервному живленні.

Найбільш поширеним напрямом є інтеграція у стаціонарні системи накопичення енергії, зокрема у фотоелектричних установках,

промислових мікромережах та системах регулювання навантаження. За даними окремих досліджень, такі підходи можуть забезпечувати додатковий період експлуатації батарей, який за сприятливих умов діагностики, сортування та помірних режимів навантаження оцінюється орієнтовно у 5–10 років [13, 16, 18]. Практичні реалізації цих рішень підтверджуються також промисловими проектами провідних виробників електромобілів та енергетичних систем, зокрема Renault Group, Nissan та Volkswagen Group. У таких застосуваннях можуть використовуватися батареї з рівнем ступеня збереження ресурсу орієнтовно в діапазоні 50–80 %, залежно від профілю навантаження та вимог безпеки.

Окремим перспективним напрямом є використання відпрацьованих батарей як буферних накопичувачів у швидкісних зарядних станціях. Застосування таких систем у низці конфігурацій може забезпечувати орієнтовне зниження пікового навантаження на електромережу до 30–60 %, залежно від ємності буферного накопичувача, потужності зарядної станції та режиму її використання [28].

Крім того, вторинне застосування активно розвивається у сегменті побутових та локальних енергетичних систем, де відпрацьовані акумуляторні модулі використовуються для балансування споживання електроенергії та підвищення енергонезалежності домогосподарств.

Водночас ефективність вторинного застосування суттєво залежить від однорідності технічного стану модулів, точності їх діагностики, а також забезпечення безпечних умов експлуатації. Значна варіативність деградаційних процесів ускладнює масштабування таких рішень і потребує впровадження стандартизованих процедур відбору та інтеграції батарей.

#### *3.2. Перероблення акумуляторних батарей*

У випадках, коли технічний стан акумуляторних батарей не дозволяє їх безпечно або економічно доцільне вторинне застосування, вони підлягають переробленню з метою вилучення цінних матеріалів і зменшення екологічного навантаження.

Сучасні технології перероблення літій-іонних батарей поділяються на три основні групи: пірометалургійні, гідрометалургійні та методи прямого відновлення матеріалів.

Пірометалургійні процеси базуються на

високотемпературній обробці та забезпечують ефективно вилучення металів, таких як нікель, кобальт і мідь, однак характеризуються значною енергоємністю та частковими втратами літію [13, 19].

Гідрометалургійні методи дозволяють досягти високих показників вилучення основних компонентів (до 80–95 % для Li, Co, Ni), характеризуються нижчим енергоспоживанням і меншими викидами, проте потребують складної попередньої підготовки матеріалу [6, 13, 15, 24]. Практична реалізація зазначених підходів підтверджується діяльністю провідних компаній, що працюють у сфері батарейних матеріалів і перероблення, зокрема Umicore, CATL, Redwood Materials та Glencore.

Методи прямого відновлення активних матеріалів спрямовані на збереження структури катодних матеріалів і зниження витрат на повторне виробництво. Попри значний потенціал, ці технології наразі перебувають на етапі дослідно-промислового впровадження [11, 13].

Таким чином, перероблення забезпечує повернення стратегічно важливих матеріалів у виробничий цикл і є ключовим елементом формування циркулярної економіки, однак вибір конкретної технології залежить від складу батареї, рівня її деградації та економічних факторів.

### *3.3. Порівняльний аналіз сценаріїв*

Аналіз показує, що вторинне застосування та перероблення не є взаємовиключними, а доповнюють один одного в межах життєвого циклу акумуляторних систем. Вторинне застосування доцільне для батарей із достатнім рівнем технічного стану, оскільки дозволяє максимально реалізувати залишковий енергетичний ресурс і відтермінувати перероблення. Натомість перероблення є обов'язковим етапом для батарей із критичним рівнем деградації або підвищеними ризиками безпеки.

Вибір між зазначеними сценаріями визначається сукупністю факторів, серед яких ключовими є: технічний стан батареї, рівень деградації, безпекові характеристики, економічна доцільність та відповідність нормативним вимогам. Відсутність формалізованого підходу до інтеграції цих факторів у єдину систему прийняття рішень зумовлює необхідність розроблення інтегрованої стратегії поводження з відпрацьованими акумуляторними батареями.

## **4. Інтегрована стратегія вибору сценарію поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями**

На основі проведеного аналізу технічного стану відпрацьованих акумуляторних батарей, критеріїв їх оцінювання, а також існуючих сценаріїв вторинного застосування та перероблення, запропоновано інтегровану стратегію поводження з тяговими літій-іонними батареями. Стратегія орієнтована на забезпечення ефективного використання залишкового ресурсу батарей, мінімізацію екологічного впливу та відповідність сучасним нормативним вимогам, зокрема Регламенту Європейського Союзу 2023/1542 щодо батарей [29].

Запропонована стратегія охоплює повний життєвий цикл батареї після завершення її транспортного застосування та базується на поєднанні технічних, організаційних і регуляторних компонентів. На технічному рівні прийняття рішень щодо вибору сценарію поводження може здійснюватися як на основі порогових значень ступеня збереження ресурсу акумулятора, так і з використанням інтегрального показника придатності, запропонованого в роботі.

### *4.1. Стандартизована процедура технічної діагностики та сортування*

Початковим етапом стратегії є впровадження уніфікованої процедури оцінювання технічного стану батарей, що забезпечує об'єктивність прийняття рішень щодо їх подальшого поводження. Така процедура передбачає:

- застосування комплексних методів діагностики відповідно до стандартів IEC 62620, IEC 62660-1/2 та SAE J1798 [30, 31];
- оцінювання ключових параметрів, зокрема залишкової ємності, внутрішнього опору, теплової стабільності та поведінки під навантаженням;
- використання автоматизованих систем сортування для формування однорідних груп батарей за показниками ступеня збереження ресурсу.

Стандартизація цього етапу дозволяє суттєво знизити похибку класифікації та підвищити безпечність наступних технологічних операцій.

### *4.2. Пріоритет вторинного застосування*

Ключовим принципом стратегії є максимізація частки вторинного застосування батарей перед їх переробленням. У межах цього підходу:

– батареї з рівнем SOH понад 70 % за умови відповідності безпековим і експлуатаційним критеріям можуть спрямовуватися до стаціонарних систем накопичення енергії, мікромереж та систем буферизації зарядної інфраструктури;

– модулі з SOH у діапазоні 60–70 % можуть використовуватися у низькоциклічних допоміжних системах.

Інтеграція акумуляторних батарей у нові системи здійснюється із застосуванням систем керування акумуляторною батареєю, що забезпечують балансування, тепловий контроль та захист.

Такий підхід дозволяє суттєво подовжити корисний період експлуатації батарей та зменшити навантаження на переробні потужності.

#### 4.3. Інтегрована система кооперації учасників ринку

Ефективна реалізація стратегії потребує координації між виробниками, сервісними центрами та підприємствами з перероблення. У цьому контексті передбачається:

– організація повернення батарей до сертифікованих підприємств відповідно до вимог транспортування літій-іонних батарей як небезпечних вантажів (UN 3480/3481) [32];

– створення регіональних логістичних центрів для збирання, діагностики та розподілу батарей;

– впровадження механізмів розширеної відповідальності виробника відповідно до європейських практик.

Це забезпечує формування замкненого циклу матеріалів і підвищує контроль за безпечністю операцій.

#### 4.4. Вибір базової технології перероблення

Для батарей, непридатних до вторинного застосування, пропонується використання гідрометалургійного підходу як базової технології перероблення. Такий вибір обґрунтований:

– високим рівнем вилучення металів (до 90–95 % для Ni та Co і до 80–90 % для Li) [13, 15, 19];

– нижчим енергоспоживанням порівняно з пірометалургією;

– відповідністю вимогам ЄС щодо використання вторинних матеріалів [29].

Це створює передумови для інтеграції у європейські ланцюги постачання критичних матеріалів.

#### 4.5. Цифрова простежуваність та паспорт батареї

Важливим елементом стратегії є впровадження цифрової системи моніторингу, яка базується на концепції «паспорта батареї». Така система передбачає:

– накопичення даних про режими експлуатації, цикли заряду-розряду, температурні профілі;

– використання аналітичних алгоритмів для прогнозування залишкового ресурсу;

– забезпечення відповідності вимогам до цифрового паспорта батареї, обов'язкове впровадження якого для відповідних категорій батарей у ЄС передбачене з 18 лютого 2027 року [29].

Цифрова простежуваність підвищує точність прийняття рішень і прозорість ланцюга постачання.

#### 4.6. Національна система управління акумуляторними батареями

З урахуванням сучасного стану інфраструктури пропонується створення централізованої платформи управління відпрацьованими батареями, яка забезпечує:

– координацію збору, транспортування та розподілу батарей;

– інтеграцію з нормативною базою ЄС;

– формування державного реєстру батарей із використанням цифрових паспортів.

Такий підхід є важливою передумовою масштабування електромобільності та розвитку переробної індустрії.

#### 4.7. Узагальнена послідовність вибору сценарію поводження

Запропонована інтегрована стратегія передбачає послідовне прийняття рішення щодо подальшого поводження з відпрацьованими тяговими літій-іонними акумуляторними батареями на основі результатів первинної технічної діагностики, оцінювання ступеня збереження ресурсу та супутніх діагностичних параметрів, нормування часткових показників і формування інтегрального показника придатності. На відміну від детального опису окремих компонентів стратегії, наведеного в підрозділах 4.1–4.6, рис. 1 відображає логіку переходу від діагностики та багатокритеріального оцінювання батареї до вибору одного з можливих сценаріїв поводження: вторинного застосування, обмеженого вторинного засто-

сування або перероблення. Окремо в структурі виділено наскрізні компоненти реалізації стратегії, зокрема цифрову простежуваність,

кооперацію учасників ринку та нормативно-інституційну інтеграцію.

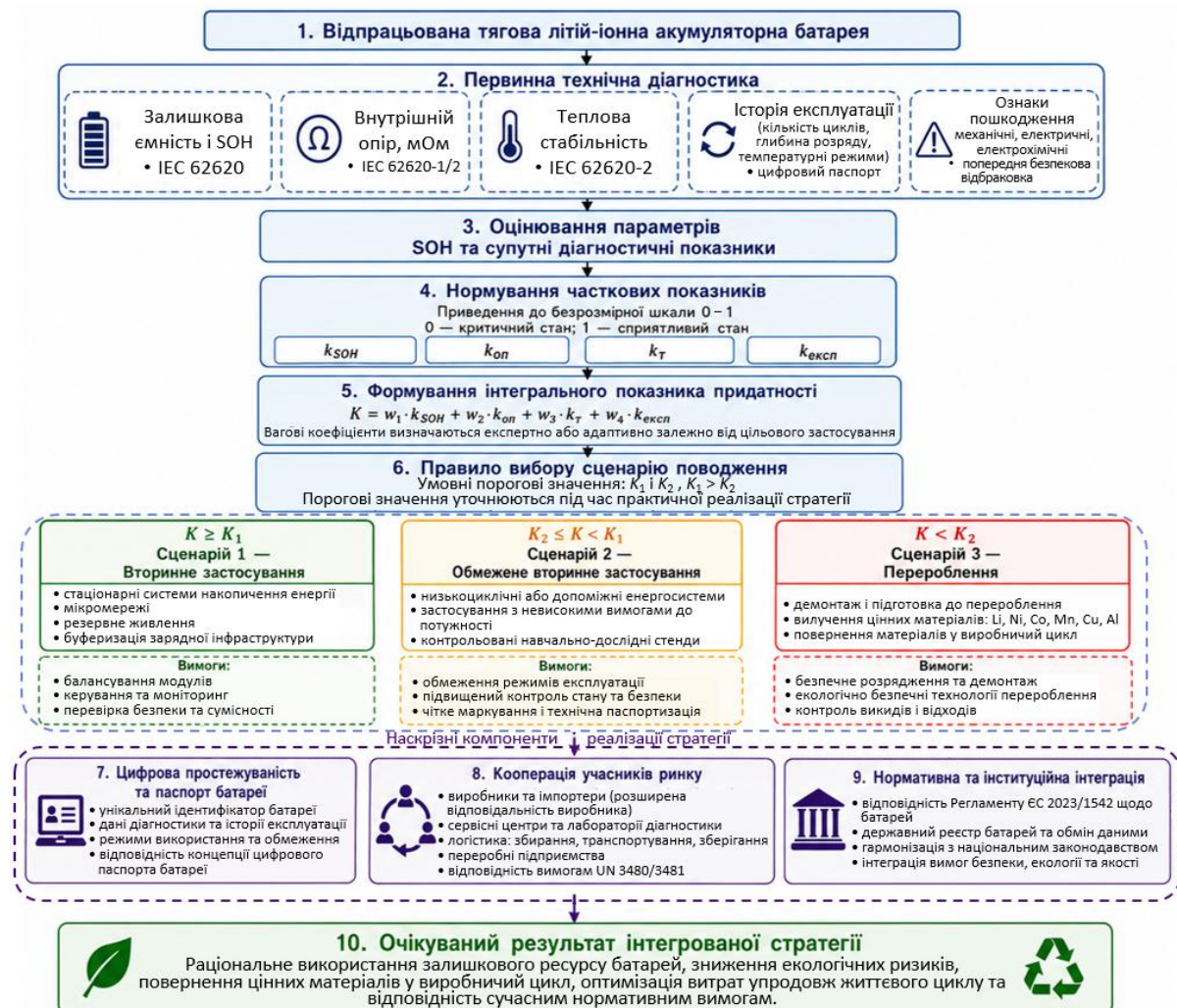


Рис. 1. Послідовність вибору сценарію поведінки з відпрацьованими тяговими літій-іонними акумуляторними батареями в межах інтегрованої стратегії

### 5. Оцінка ефективності інтегрованої стратегії поведінки з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями

Ефективність запропонованої інтегрованої стратегії визначається її здатністю забезпечувати раціональний вибір сценарію поведінки з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями з урахуванням технічних, безпекових, економічних та екологічних критеріїв. На відміну від фрагментарних підходів, що орієнтуються лише на перероблення або лише на вторинне застосування, інтегрована стратегія дозволяє поєднати обидва сценарії в межах єдиної системи прийняття рішень.

З технічної точки зору ефективність стра-

тегії проявляється у підвищенні точності класифікації батарей за їх технічним станом. Використання стандартизованих методів діагностики (IEC 62620, IEC 62660-1/2, SAE J1798) у поєднанні з аналізом даних системи керування акумуляторною батареєю дозволяє зменшити ймовірність помилкової оцінки придатності модулів до вторинного застосування. Це, у свою чергу, підвищує безпечність експлуатації систем вторинного застосування та знижує ризик відмов і аварійних ситуацій.

З економічної точки зору запропонований підхід забезпечує раціональне використання залишкового ресурсу батарей. Пріоритет вторинного застосування для модулів із рівнем ступеня збереження ресурсу понад 70 %, що відповідають вимогам безпеки, дозволяє від-

термінувати їх перероблення та зменшити загальні витрати на подальше поводження та перероблення. За рахунок цього може бути забезпечене суттєве подовження корисного періоду експлуатації акумуляторних систем. У літературі та практичних прикладах зазначається, що для окремих сценаріїв вторинного застосування таке подовження може сягати 2–3 разів залежно від технічного стану батарей, режимів навантаження та умов експлуатації [18, 21, 23]. Одночасно зменшується навантаження на переробні підприємства та знижуються капітальні витрати на розвиток відповідної інфраструктури.

У порівнянні з альтернативним підходом, при якому всі відпрацьовані батареї одразу спрямовуються на перероблення, інтегрована стратегія дозволяє підвищити сумарну економічну ефективність за рахунок:

- відтермінування витрат на перероблення придатних батарей;
- збільшення терміну експлуатації батарей;
- створення додаткової вартості у сегменті систем накопичення енергії.

З екологічної точки зору ефективність стратегії полягає у зменшенні обсягів відходів та зниженні вуглецевого сліду. Використання сценарію вторинного застосування дозволяє відтермінувати енергоємні процеси перероблення, зокрема пірометалургійні, що можуть супроводжуватися підвищеними енергетичними витратами та викидами. При цьому застосування гідрометалургійних методів для батарей, непридатних до вторинного застосування, забезпечує високий рівень вилучення цінних матеріалів, що відповідає принципам циркулярної економіки та вимогам Регламенту Європейського Союзу 2023/1542 щодо батарей.

Окремим фактором підвищення ефективності є впровадження цифрової простежуваності батарей. Використання концепції «паспорта батареї» дозволяє накопичувати експлуатаційні дані, підвищувати точність прогнозування залишкового ресурсу та оптимізувати процеси відбору батарей для вторинного застосування або перероблення. Це знижує невизначеність у прийнятті рішень і підвищує прозорість ланцюгів постачання.

Порівняльний аналіз показує, що найбільш ефективним є комбінований підхід, при якому:

- батареї з достатнім рівнем технічного стану та прийнятними безпековими параметрами спрямовуються на вторинне застосування;
- батареї з критичним рівнем деградації передаються на перероблення;
- рішення приймається на основі системи критеріїв, а не окремих показників.

Таким чином, запропонована інтегрована стратегія забезпечує збалансоване поєднання технічної доцільності, економічної ефективності та екологічної безпеки. Її впровадження створює передумови для формування замкненого циклу використання акумуляторних матеріалів із поверненням цінних компонентів у виробничий обіг та розвитку інфраструктури електромобільності на засадах циркулярної економіки.

Для наочного узагальнення відмінностей між можливими сценаріями поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями доцільно порівняти пряме перероблення, вторинне застосування та інтегровану стратегію за основними технічними, економічними, екологічними та безпековими критеріями.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика сценаріїв поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями

Критерій порівняння	Пряме перероблення	Вторинне застосування	Інтегрована стратегія
Використання залишкового ресурсу батареї	Низьке, оскільки батарея одразу спрямовується на матеріальне відновлення	Високе для батарей із достатнім технічним станом	Диференційоване: придатні батареї спрямовуються на вторинне застосування, деградовані – на перероблення
Безпекові ризики	Зосереджені переважно на етапах транспортування, розряджання, демонтажу та перероблення	Залежать від точності діагностики, однорідності модулів і системи керування батареєю	Знижуються за рахунок попередньої діагностики, сортування та вибору сценарію відповідно до технічного стану

Критерій порівняння	Пряме перероблення	Вторинне застосування	Інтегрована стратегія
Економічна доцільність	Залежить від вартості вилучених матеріалів і витрат на перероблення	Підвищується за рахунок продовження корисного періоду експлуатації	Підвищується за рахунок поєднання використання залишкового ресурсу та подальшого вилучення матеріалів
Екологічний ефект	Забезпечує повернення матеріалів у виробничий цикл, але потребує енерго- та ресурсомістких процесів	Дозволяє відтермінувати перероблення та зменшити обсяг відходів у коротко- і середньостроковій перспективі	Поєднує зменшення обсягів відходів, подовження життєвого циклу та повернення матеріалів у виробничий цикл
Складність впровадження	Висока через потребу у спеціалізованій інфраструктурі перероблення	Висока через потребу у діагностиці, переконфігурації та безпечній інтеграції модулів	Найвища, оскільки потребує координації діагностики, логістики, вторинного застосування, перероблення та цифрової простежуваності
Потреба у діагностиці	Необхідна для безпечного транспортування і підготовки до перероблення	Критично важлива для підтвердження придатності до подальшої експлуатації	Є базовим елементом стратегії та визначає вибір подальшого сценарію
Результат життєвого циклу	Матеріальне відновлення	Подовження корисного періоду експлуатації	Раціональне поєднання вторинного застосування та перероблення

Наведене порівняння показує, що інтегрована стратегія не замінює окремі сценарії поводження, а забезпечує їх раціональне поєднання залежно від технічного стану батареї, рівня безпекових ризиків, економічної доцільності та екологічного ефекту.

### Висновки

У роботі обґрунтовано доцільність застосування інтегрованого підходу до вибору сценарію поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями електричних транспортних засобів. Показано, що технічна придатність батареї визначається комплексом електричних, теплових, деградаційних, безпекових і експлуатаційних характеристик, тому вибір сценарію поводження потребує багатокритеріального підходу.

Систематизовано основні чинники, що впливають на вибір сценарію поводження з тяговими літій-іонними акумуляторними батареями після завершення транспортного етапу експлуатації. До визначальних параметрів віднесено залишкову ємність, внутрішній опір, неоднорідність деградації між комірками та модулями, теплову стабільність, історію циклування, температурні режими та наявність ознак механічного або електрохімічного пошкодження. Така систематизація дозволяє перейти від загальної оцінки стану батареї до формалізованого вибору сценарію її подальшого використання.

Запропоновано багатокритеріальну логіку

відбору акумуляторних батарей, що втратили придатність до транспортного застосування, для вторинного застосування або перероблення. Батареї з достатнім рівнем технічного стану та контрольованими безпековими параметрами доцільно спрямовувати на вторинне застосування у стаціонарних системах накопичення енергії, мікромережах, резервному живленні та в системі буферного накопичення для зарядної інфраструктури. Батареї з критичним рівнем деградації, підвищеним внутрішнім опором, нестабільною тепловою поведінкою або пошкодженнями мають спрямовуватися на перероблення з вилученням цінних матеріалів.

Порівняльний аналіз альтернативних сценаріїв поводження підтвердив доцільність їх послідовного застосування в межах життєвого циклу батареї. Вторинне застосування дозволяє подовжити корисний ресурс батарей, зменшити навантаження на переробну інфраструктуру та оптимізувати витрати на поводження з акумуляторними системами, тоді як перероблення забезпечує повернення стратегічно важливих матеріалів – літію, нікелю, кобальту, марганцю, міді та алюмінію у виробничий цикл.

Науковий результат роботи полягає у формуванні концептуально-аналітичної інтегрованої стратегії вибору сценарію поводження з відпрацьованими тяговими акумуляторними батареями, яка поєднує технічну діагностику,

класифікацію за рівнем технічного стану, багатокритеріальне оцінювання придатності, цифрову простежуваність, кооперацію учасників ринку та нормативну інтеграцію. Відмінність запропонованого підходу від фрагментарних рішень полягає у поєднанні показника SOH з електричними, тепловими, деградаційними, безпековими та експлуатаційними параметрами в межах єдиної логіки прийняття рішення щодо вторинного застосування, обмеженого вторинного застосування або перероблення.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання сервісними центрами, операторами систем накопичення енергії, підприємствами з перероблення акумуляторів та організаціями, що формують інфраструктуру поводження з відпрацьованими батареями. Застосування такої стратегії забезпечує підвищення безпеки робіт із високовольтними акумуляторними системами, зменшення екологічних ризиків, раціональне використання критично важливих матеріалів та оптимізацію витрат протягом життєвого циклу акумуляторних систем, сприяючи розвитку циркулярної економіки у сфері електричного транспорту.

Перспективним напрямом подальших досліджень є формалізація запропонованої стратегії у вигляді кількісної моделі алгоритму багатокритеріального прийняття рішень із ваговими коефіцієнтами для технічних, економічних, екологічних і безпекових параметрів, а також її апробація на реальних діагностичних даних тягових акумуляторних батарей різних електрохімічних типів.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють про наявність потенційного конфлікту інтересів, пов'язаного з тим, що автори О. Дзюбенко та І. Трунова є членами редакційної колегії журналу. З метою забезпечення об'єктивності та неупередженості розгляду рукопису вони не брали участі у редакційному опрацюванні, доборі рецензентів, прийнятті рішень щодо рецензування та остаточному рішенні про публікацію цієї статті.

### Література

1. International Energy Agency. (2025). *Global EV outlook 2025: Executive summary*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/executive-summary>
2. Укравтопром. (2026). *За рік український ринок електромобілів зріс удвічі*.

<https://ukrautoprom.com.ua/za-rik-ukrayinskyj-rynok-elektromobiliv-zris-udvichi>

Ukrautoprom. (2026). *Za rik ukrajinskyi rynek elektromobiliv zris udvichi* [The Ukrainian electric vehicle market doubled over the year].

<https://ukrautoprom.com.ua/za-rik-ukrayinskyj-rynok-elektromobiliv-zris-udvichi>

3. eAuto. (2026). *Ринок електромобілів: підсумки березня 2026*. <https://eauto.org.ua/news/1025-rynok-elektromobiliv-pidsumki-bereznia-2026>
4. eAuto. (2026). *Ринок електромобілів: підсумки березня 2026* [Electric vehicle market: results of March 2026]. <https://eauto.org.ua/news/1025-rynok-elektromobiliv-pidsumki-bereznia-2026>
4. Верховна Рада України. (2023). Про управління відходами (Закон України № 2320-IX від 20 червня 2022 року). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
- Verkhovna Rada Ukrainy. (2023). Pro upravlinnia vidkhodamy (Zakon Ukrainy No. 2320-IX vid 20 chervnia 2022 roku) [On Waste Management (Law of Ukraine No. 2320-IX of June 20, 2022)]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
5. Pražanová, A., Knap, V., & Stroe, D.-I. (2022). Literature Review, Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles, Part I: Recycling Technology. *Energies*, 15(3), 1086. <https://doi.org/10.3390/en15031086>
6. Zhang, M., Chang, I.-S., Guo, Y., Zhao, C., & Wu, J. (2026). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles – Towards sustainable business models. *Journal of Energy Storage*, 153(Part B), 120823. <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.120823>
7. Watari, T., Nansai, K., Nakajima, K., McLellan, B. C., Dominish, E., & Giurco, D. (2019). Integrating Circular Economy Strategies with Low-Carbon Scenarios: Lithium Use in Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 53(22), 13892–13902. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02872>
8. Zhang, B., Xin, Q., Chen, S. et al. Lithium-ion battery recycling relieves the threat to material scarcity amid China's electric vehicle ambitions. *Nat Commun* 16, 6661 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61481-y>
9. Han, G., & Li, Z. (2026). A Structured Review of Electric Vehicle Sales Research: Multi-Level Driving Factors and Forecasting Pathways over the Past Decade. *World Electric Vehicle Journal*, 17(3), 122. <https://doi.org/10.3390/wevj17030122>
10. Bukold, S. (2025, November 28). *Elektroautos: Globale Absatzzahlen (Update November 2025)*. EnergyComment. <https://www.energycomment.de/elektroautos-globale-absatzzahlen-update-november-2025/>
11. Xu, P., Dai, Q., Gao, H., Liu, H., Zhang, M., Li, M., Chen, Y., An, K., Meng, Y. S., Liu, P., Li, Y.,

- Spangenberg, J. S., Gaines, L., Lu, J., & Chen, Z. (2020). Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing. *Joule*, 4(12), 2609–2626. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.10.008>
12. D'Adamo, Idiano & Gastaldi, Massimo & Ozturk, Ilhan. (2022). The sustainable development of mobility in the green transition: Renewable energy, local industrial chain, and battery recycling. *Sustainable Development*. 31. 840–852. 10.1002/sd.2424.
13. Tian, G., Yuan, G., Aleksandrov, A., Zhang, T., Li, Z., Fathollahi-Fard, A. M., & Ivanov, M. (2022). Recycling of spent lithium-ion batteries: A comprehensive review for identification of main challenges and future research trends. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(Part A), Article 102447. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102447>
14. Sun, Y. (2023). Lithium-Ion Battery Recycling: Challenges and Opportunities. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 58, 365–370. <https://doi.org/10.54097/hset.v58i.10124>
15. Safarzadeh, H., & Di Maria, F. (2025). Progress, Challenges and Opportunities in Recycling Electric Vehicle Batteries: A Systematic Review Article. *Batteries*, 11(6), 230. <https://doi.org/10.3390/batteries11060230>
16. Zhu, J., Feng, T., Lu, Y., & Xue, R. (2024). Optimal government policies for carbon-neutral power battery recycling in electric vehicle industry. *Computers & Industrial Engineering*, 189, Article 109952. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.109952>
17. Lee, C.-H. (2024). Global Patent Analysis of Battery Recycling Technologies: A Comparative Study of Korea, China, and the United States. *World Electric Vehicle Journal*, 15(6), 260. <https://doi.org/10.3390/wevj15060260>
18. Akram, M. N., & Abdul-Kader, W. (2024). Repurposing Second-Life EV Batteries to Advance Sustainable Development: A Comprehensive Review. *Batteries*, 10(12), 452. <https://doi.org/10.3390/batteries10120452>
19. Amusa, H.K., Sadiq, M., Alam, G. et al. Electric vehicle batteries waste management and recycling challenges: a comprehensive review of green technologies and future prospects. *J Mater Cycles Waste Manag* 26, 1959–1978 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01982-y>
20. Phuoc-Anh, Le (2025). A review of construction and sustainable recycling strategies of lithium-ion batteries across electric vehicle platforms. *RSC Advances*, 15, 35687–35725. <https://doi.org/10.1039/D5RA04471E>
21. Kristiningrum, E., Nurcahyo, R., Madsuha, A. F., Ali, I., Sumaedi, S., & Setyoko, A. T. (2025). Second life business model for electric vehicle batteries: Patterns, structures and future challenges. *Sustainable Futures*, 10, Article 101437. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101437>
22. Tembo, P. M., Dyer, C., & Subramanian, V. (2024). Lithium-ion battery recycling—a review of the material supply and policy infrastructure. *NPG Asia Materials*, 16, Article 43. <https://doi.org/10.1038/s41427-024-00562-8>
23. Altuntas Vural, C., van Loon, P., Halldórsson, Á., Fransson, J., & Josefsson, F. (2024). Life after use: Circular supply chains for second-life of electric vehicle batteries. *Production Planning & Control*, 36(9), 1229–1246. <https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2353379>
24. Feng, J., Liu, W., & Chen, F. (2025). Moving towards a circular economy: A systematic review of barriers to electric vehicle battery recycling. *Sustainable Production and Consumption*, 54, 241–260. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.01.006>
25. International Electrotechnical Commission. (2023). *IEC 62620:2014+AMD1:2023 CSV. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes—Secondary lithium cells and batteries for use in industrial applications*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/85493>
26. International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 62660-2:2018. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles—Part 2: Reliability and abuse testing*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/27387>
27. Ai, Z., Nee, A. Y. C., & Ong, S. K. (2024). Artificial intelligence in electric vehicle battery disassembly: A systematic review. *Automation*, 5(4), 484–507. <https://doi.org/10.3390/automation5040028>
28. U.S. Department of Energy, & National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Grid-constrained electric vehicle fast charging sites: Battery-buffered options. Technical assistance case study*. <https://driveelectric.gov/files/battery-buffered-case-study.pdf>
29. European Parliament & Council of the European Union. (2023). *Regulation (EU) 2023/1542 of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC*. *Official Journal of the European Union*, L 191, 1–117. <https://data.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>
30. International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 62660-1:2018. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles—Part 1: Performance testing*. <https://webstore.iec.ch/en/publication/28965>
31. SAE International. (2019). *SAE J1798\_201911: Recommended practice for performance rating of electric vehicle battery modules*. [https://www.sae.org/standards/j1798\\_201911-recommended-practice-performance-rating-electric-vehicle-battery-modules](https://www.sae.org/standards/j1798_201911-recommended-practice-performance-rating-electric-vehicle-battery-modules)

32. United Nations. (2023). *Recommendations on the transport of dangerous goods: Model regulations* (23rd rev. ed.).

<https://unece.org/transport/dangerous-good>

**Трунова Ірина<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +380677240653, [trunova.irinaserg@gmail.com](mailto:trunova.irinaserg@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-4115>

**Дзюбенко Олександр<sup>1</sup>**, к.т.н., доц. каф. автомобільної електроніки, тел. +380667684116, [dzyubenko.alan@gmail.com](mailto:dzyubenko.alan@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-4956>

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

### An Integrated Strategy for Safe End-of-Life Management of Traction Batteries in Electric Vehicles

**Annotation. Problem.** The rapid growth of electric vehicle (EV) deployment leads to an increasing volume of end-of-life traction lithium-ion batteries, forming a complex category of industrial waste with significant environmental risks and a high content of critical raw materials. Existing approaches to battery end-of-life management are often fragmented and rely primarily on the state of health (SOH) indicator, which does not fully reflect the technical suitability of batteries for further use. **Goal.** This study aims to develop a conceptual and analytical integrated strategy for safe and efficient end-of-life management of traction batteries, taking into account their technical condition, operational history, second-life potential, recycling options, and regulatory requirements. **Methodology.** The research is based on system analysis of battery degradation processes, comparative assessment of second-life and recycling pathways, and analysis and synthesis of international standards and regulatory frameworks. This study proposes a multi-criteria evaluation approach, including a composite suitability indicator that combines electrical, thermal, and operational parameters such as residual capacity, internal resistance, thermal stability, and operational

history, as a decision-support tool requiring further validation using real diagnostic data. **Results.** The results show that decision-making based solely on SOH is insufficient. Batteries with an acceptable technical condition may be directed to second-life applications, including stationary energy storage systems, microgrids, and energy buffering for charging infrastructure, while degraded batteries should be considered for recycling to recover valuable materials. The results also show that second-life utilization and recycling should be considered complementary stages of the battery life cycle. The proposed integrated strategy conceptually combines standardized diagnostics, prioritization of second-life use, recycling technology selection, stakeholder cooperation, digital traceability, and centralized management systems. **Originality.** The originality of the work lies in the development of an integrated, multi-criteria conceptual framework for battery end-of-life decision-making, which formalizes the selection process and extends beyond simplified SOH-based assessments. **Practical value.** The proposed strategy can be applied by service centers, energy storage operators, battery recycling enterprises, and regulatory authorities to improve safety, optimize resource utilization, reduce environmental impact, and support the transition to a circular economy in the EV sector.

**Key words:** traction batteries; electric vehicles; second-life applications; battery recycling; state of health; multi-criteria evaluation; integrated strategy; battery life cycle.

**Trunova Iryna<sup>1</sup>**, associate professor, Ph.D., Vehicle Electronics Department, tel. +380677240653, [trunova.irinaserg@gmail.com](mailto:trunova.irinaserg@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0986-4115>

**Dzyubenko Oleksandr<sup>1</sup>**, associate professor, Ph.D., Vehicle Electronics Department, tel. +380667684116, [dzyubenko.alan@gmail.com](mailto:dzyubenko.alan@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-4956>

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.