

Сорочинський Я. З., аспірант, ORCID 0009-0008-8056-520X,
наук. керівниця: канд. техн. наук, доцентка А. В. Босак,
ORCID 0000-0003-0545-9980,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ СУЧАСНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF FAULTS IN MODERN RECHARGEABLE BATTERIES

Анотація. Ефективна робота систем накопичення енергії критично залежить від стану акумуляторних батарей (АКБ). У даній роботі представлено результати аналізу та систематизації основних типів несправностей АКБ. Проведено класифікацію дефектів за трьома основними групами: внутрішні, зовнішні та електричні. Розглянуто механізми деградації, такі як утворення SEI-шару та літієве покриття. Отримані результати можуть бути використані для розробки інтелектуальних систем моніторингу та діагностики (BMS).
Ключові слова: акумуляторна батарея, класифікація несправностей, деградація електродів, літієве покриття, внутрішній опір, терморозгін, BMS.

Abstract. The effective operation of energy storage systems critically depends on the condition of rechargeable batteries (ACBs). This paper presents the results of the analysis and systematization of the main types of ACB faults. Defects are classified into three main groups: internal, external and electrical. Degradation mechanisms, such as the formation of the SEI layer and lithium coating, are considered. The results obtained can be used to develop intelligent monitoring and diagnostic systems (BMS).

Keywords: rechargeable battery, fault classification, electrode degradation, lithium coating, internal resistance, thermal runaway, BMS.

Теоретичне підґрунтя для адаптивного керування. Розроблена класифікація та аналіз механізмів виходу з ладу (включаючи терморозгін та дисбаланс комірок) створюють базу для розробки інтелектуальних систем моніторингу (BMS) та адаптивних алгоритмів керування зарядом, що враховують індивідуальну деградацію кожної комірки.

Матеріал і результати досліджень. Для розробки ефективної стратегії обслуговування запропоновано розділити всі потенційні дефекти на три ієрархічні групи.

Внутрішні несправності (Електрохімічні).

Внутрішні несправності є результатом деградаційних процесів, що відбуваються безпосередньо в структурі комірки та на межі розподілу фаз.

Solid Electrolyte Interphase (SEI), це пасивуючий шар, що утворюється на поверхні анода під час перших циклів зарядки внаслідок розкладу електроліту. Хоча SEI необхідний для стабілізації електрода, його надмірне розростання під впливом високих температур або природного старіння призводить

до постійного споживання активного літію. Товщина цього шару (1) зростає за дифузійним законом:

$$L_{\text{sei}}(t) = k_{\text{sei}} \sqrt{t}, \quad (1)$$

Збільшення товщини шару SEI є основною причиною зростання внутрішнього опору (R_{int}) та поступової втрати енергоємності батареї.

Літійове покриття (Lithium Plating): Дана несправність виникає, коли іони літію не встигають впроваджуватися (інтеркалювати) в структуру анода і осідають на його поверхні у вигляді металевого шару. Це явище найчастіше спостерігається під час швидкої зарядки високими струмами або при експлуатації в умовах низьких температур, коли дифузія літію сповільнюється. Наявність металевого літію на поверхні анода провокує ріст дендритів – голчастих кристалів, які здатні пробити сепаратор, спричиняючи внутрішнє коротке замикання (ВКЗ).

Деградація електродів: Цей процес включає механічне розтріскування та руйнування часток активного матеріалу через значні напруження, що виникають при зміні об'єму електродів [1]. Наглядні причини деградації наведено на рис. 1. Під час циклів заряд/розряд іони літію постійно входять у решітку та виходять із неї, змушуючи електрод розширюватися та стискатися. З часом це призводить до появи мікротріщин, відшарування активної маси від струмоприймача та втрати електричного контакту. Математично втрата доступної ємності (2) через деградацію електродів може бути описана як функція від кількості циклів (N):

$$Q_{\text{loss}} = \alpha * N^n, \quad (2)$$

де α та n – емпіричні коефіцієнти, що залежать від глибини розряду та типу матеріалу.

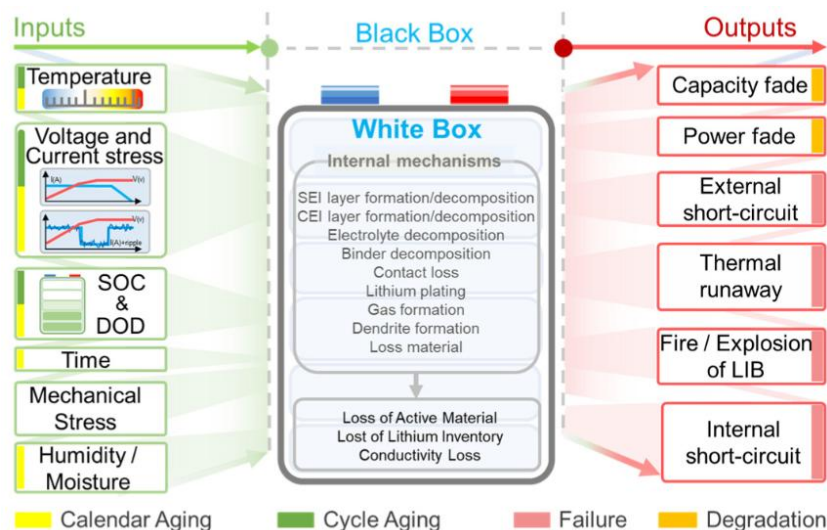


Рисунок 1. Причини деградації та механізмів виходу з ладу акумулятора

Зовнішні несправності (експлуатаційні).

Перегрів. Зовнішні несправності, зумовлені порушенням умов експлуатації, є критичними чинниками, що безпосередньо загрожують безпеці системи. Найбільш небезпечним явищем у цій групі є перегрів, який прискорює деструктивні хімічні реакції розпаду електроліту. При перевищенні критичної межі температур (зазвичай понад 70–90 °C) виникає так званий «терморозгін» – ланцюгова екзотермічна реакція. Математично цей стан описується через рівняння теплового балансу, де зміна температури dT/dt залежить від різниці між генерованим теплом Q_{gen} та теплом, що відводиться в довкілля Q_{diss} . Генероване тепло (3) визначається як сума джоулевих втрат та ентропійного тепла:

$$Q_{\text{gen}} = I^2 R_{\text{int}} + IT (dU_{\text{ocv}}/dT). \quad (3)$$

Якщо швидкість генерації тепла перевищує можливості системи охолодження, температура зростає експоненціально, що призводить до руйнування сепаратора, виділення горючих газів та подальшого займання комірки.

Механічні пошкодження. Паралельно з термічними впливами, значну загрозу становлять механічні пошкодження, такі як удари, вібрації або проколи корпусу. Такі впливи порушують геометричну цілісність внутрішніх шарів акумулятора, що призводить до деформації сепаратора – тонкого ізоляційного шару між анодом і катодом. У разі його розриву виникає негайне внутрішнє коротке замикання. В точці контакту виникає надвисока щільність струму, що спричиняє локальний стрибок температури, який миттєво ініціює згаданий вище процес терморозгону. Таким чином, механічний прокол часто є першопричиною електричної аварії, яка завершується термічним руйнуванням всієї акумуляторної збірки.

Електричні несправності.

Зростання внутрішнього опору. Внутрішній опір є ключовим показником продуктивності акумулятора, який безпосередньо корелює з його станом заряду та загальною справністю [2]. Оскільки цей параметр вимірюється в міліомах, він стає критичним інструментом для моніторингу якості та непрямой оцінки поточної ємності в системах, де прямі вимірювання є непрактичними. Фізична природа внутрішнього опору полягає у втратах енергії, коли частина електрохімічного потенціалу замість перетворення на електричний струм розсіюється у вигляді тепла.

Ці втрати зумовлені трьома основними складовими. По-перше, це омичний опір, викликаний природним супротивом внутрішніх матеріалів, таких як електроди, електроліт та електричні з'єднання. По-друге, значний внесок робить опір перенесення заряду, що виникає при проходженні іонів через межу розділу електрод/електроліт, зокрема через пасивуючий шар SEI. Третьою складовою є опір дифузії або масопереносу, який залежить від швидкості руху іонів в електроліті та їх впровадження в активний матеріал електродів. Зростання будь-якої з цих складових призводить до зниження ефективності віддачі енергії та прискореного термічного старіння всієї системи.

Характер зміни напруги при прикладанні струмового навантаження, що дозволяє математично розрахувати ці втрати, наведено на рис. 2.

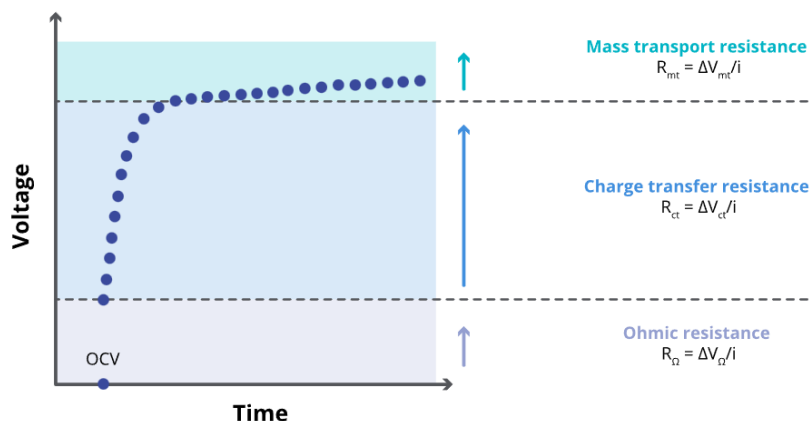


Рисунок 2. Відгук напруги батареї на поданий струм у часі

Дисбаланс комірок. Акумуляторні блоки електромобілів складаються з великої кількості елементів, з'єднаних у модулі для забезпечення необхідної потужності [3]. В ідеальних умовах усі комірки мають заряджатися та розряджатися синхронно, проте через неминучі виробничі дефекти, коливання температури всередині корпусу та нерівномірне старіння виникає явище клітинного дисбалансу. Це стан, при якому окремі елементи накопичують або віддають енергію швидше за інші. Система керування батареєю (BMS) безперервно контролює напругу кожної комірки і втручається, коли одна з них досягає критичної межі раніше за решту збірки. Для захисту від перезаряду BMS застосовує пасивне балансування, використовуючи спеціальні резистори для розсіювання надлишкової енергії у вигляді тепла, що дозволяє іншим елементам дещо наздогнати лідера в безпечних межах.

Якщо дисбаланс стає критичним, BMS змушена сповільнити або повністю зупинити процес заряджання, щоб запобігти пошкодженню найбільш дефектної комірки. Це призводить до того, що повна ємність акумулятора залишається недоступною для використання, оскільки «слабка» ланка змушує захисні системи спрацьовувати передчасно.

Висновки. В результаті проведеного аналізу встановлено, що несправності АКБ мають комплексний характер. Встановлено, що внутрішні хімічні зміни є першопричиною електричних аномалій. Запропонована класифікація є основою для розробки адаптивних алгоритмів керування зарядом, які здатні враховувати поточний стан деградації кожної комірки.

Список використаних джерел

1. Marcis, Jana, et al. (2024) Mechanisms of degradation in liquid electrolyte Li-ion batteries. *Applied Energy* 305: 117854. URL: <https://doi.org/10.3390/en18020342> (дата звернення 21.04.2026).
2. Ossila Ltd (2023) Internal Resistance of a Battery: Impact on Performance and Measurement. *Ossila Technical Library*. URL: <https://www.ossila.com/pages/internal-resistance-of-a-battery> (дата звернення 21.04.2026).

3. Rotronics BMS (2024) How do unbalanced battery cells impact electric vehicle range and performance?" *Rotronics Technical Insights*. URL: <https://www.rotronicsbms.com/battery-tips/how-do-unbalanced-battery-cells-impact-electric-vehicle-range> (дата звернення 21.04.2026).

References

1. Marcis, Jana, et al. (2024) Mechanisms of degradation in liquid electrolyte Li-ion batteries." *Applied Energy* 305: 117854. URL: <https://doi.org/10.3390/en18020342>. (accessed 21.04.2026)

2. Ossila Ltd (2023) Internal Resistance of a Battery: Impact on Performance and Measurement." *Ossila Technical Library*. URL: <https://www.ossila.com/pages/internal-resistance-of-a-battery> (accessed 21.04.2026).

3. Rotronics BMS. (2024) How do unbalanced battery cells impact electric vehicle range and performance? *Rotronics Technical Insights*. URL: <https://www.rotronicsbms.com/battery-tips/how-do-unbalanced-battery-cells-impact-electric-vehicle-range> (accessed 21.04.2026).

УДК 697.3:621.577:621.564

Пастушенко Е. П., аспірант, ORCID 0009-0006-3148-9277,
наук. керівник: д-р техн. наук, проф. **С. В. Дубовський**,
ORCID 0000-0001-9418-2092,
«Інститут технічної теплофізики НАН України»

ОПАЛЕННЯ БУДІВЛІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ ДВОСТУПЕНЕВИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ «ПОВІТРЯ-ВОДА» НА R744 (CO₂)

HEATING OF THE BUILDING WITH A HIGH-TEMPERATURE TWO-STAGE AIR-TO-WATER HEAT PUMP USING R744 (CO₂)

Анотація. Розглянуто варіант високотемпературного повітряного теплового насосу з робочим тілом CO₂ – R513a для опалення, охолодження та приготування гарячої води в будівлі з системою опалення у вигляді чавунних радіаторів. Бібл. 10.

Ключові слова: енергоефективність, теплові насоси з джерелом тепла у вигляді повітря, високотемпературні теплові насоси, двоконтурні теплові насоси, комп'ютерне моделювання, Flownex SE; коефіцієнт перетворення енергії.

Abstract. A variant of a high-temperature air heat pump with a working fluid of CO₂ – R513a for heating, cooling and hot water preparation in a building with a heating system in the form of cast iron radiators is considered. Ref. 10.

Keywords. energy efficiency, air source heat pumps, high temperature heat pumps, double-circuit heat pumps, computer simulation, Flownex SE; energy conversion coefficient.

Вступ. Загальні засади застосування високотемпературного теплового насосу «повітря-вода» з робочим тілом CO₂ та R513a.

Теплові насоси (ТН) широко визнані як ключова технологія чистої енергії в енергетичному переході до вуглецевої нейтральної енергетики. ТН, які працюють від електроенергії з низьким рівнем викидів, є центральною технологією глобального переходу до безпечного та стійкого опалення. ТН, особливо т. зв. «зелені» ТН – це установки і технології отримання теплоти з низьким вмістом