

УДК 621.311:621.33

Ганна Костенко*, <https://orcid.org/0000-0002-8839-7633>Артур Запорожець, д-р техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: Kostenko_HP@nas.gov.ua

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК ДЕГРАДАЦІЇ ВТОРИННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ В СИСТЕМАХ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ: УРАХУВАННЯ КАЛЕНДАРНОГО ТА ЦИКЛІЧНОГО СТАРІННЯ

Ключові слова: вторинні літій-іонні батареї, системи зберігання енергії, календарне старіння, циклічне старіння, інтегральний показник деградації.

Мета роботи. Акумулятори другого життя представляють собою перспективну можливість для зберігання енергії, яка може суттєво вплинути на розвиток енергетичних систем у найближчі роки [1–2]. Вони мають потенціал знизити як витрати на зберігання енергії, так і вплив на навколишнє середовище. Забезпечення ефективного управління режимами роботи вторинних батарей електротранспорту є важливим завданням для досягнення стабільного і надійного функціонування систем зберігання енергії. Врахування факторів календарного та циклічного старіння, а також стохастичності поведінки вторинних батарей є необхідним для розробки високоточних моделей прогнозування та управління. У зв'язку з цим необхідно розробити інтегральний показник деградації систем зберігання енергії на базі вторинних літій-іонних батарей електромобілів з урахуванням водночас факторів календарного та циклічного старіння та стохастичних впливів.

Результати роботи. Старіння літій-іонних батарей можна розділити на два основні види: календарне та циклічне. *Календарне* старіння відбувається внаслідок хімічних реакцій всередині батареї навіть за відсутності циклів заряджання-розряджання [3–4]. Воно включає утворення твердого шару електроліту на аноді, що починається з першого ж циклу заряджання. Цей процес є важливим для запобігання подальшій реакції електроліту з анодом, але водночас сприяє споживанню літєвих іонів та електроліту, що знижує ємність батареї та збільшує її внутрішній опір. Високі температури прискорюють цей процес. *Циклічне* старіння, з іншого боку, виникає через механічне напруження та електрохімічні реакції під час кожного циклу заряджання та розряджання [4–5]. Високі швидкості заряджання або низькі температури можуть спричинити утворення літєвого покриття на аноді, коли літєві іони осаджуються на поверхні анода у вигляді металевого літію замість інтеграції в анодний матеріал. Це призводить до втрати активного літію та зменшення ємності батареї, а також може спричинити коротке замикання, що є потенційно небезпечним. Крім того, під час циклів заряджання-розряджання відбувається втрата активного матеріалу електродів через розтріскування частинок та втрату електричного контакту між ними, що додатково знижує ємність батареї та збільшує її внутрішній опір.

Календарне старіння залежить від часу та умов зберігання (температура, SOC). Модель календарного старіння можна описати наступним рівнянням:

$$Q_{calendar}(t) = k_{calendar} \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \cdot t \cdot f(SOC),$$

де: $Q_{calendar}(t)$ – втрати ємності через календарне старіння; $k_{calendar}$ – константа швидкості реакції; E_a – енергія активації; R – універсальна газова стала; T – температура; t – час; $f(SOC)$ – функція, що описує залежність від SOC.

Циклічне старіння залежить від кількості циклів заряджання / розряджання, глибини розряду (DOD), швидкості заряджання (C-rate) і температури. Модель циклічного старіння можна описати наступним рівнянням:

$$Q_{cycle}(t) = k_{cycle} \cdot (DOD)^\alpha \cdot (C_{rate})^\beta \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \cdot N_{cycle}(t),$$

де: $Q_{cycle}(t)$ – втрати ємності через циклічне старіння; k_{cycle} – константа швидкості реакції для циклічного старіння; DOD – глибина розряду; C_{rate} – швидкість заряджання / розряджання; α і β – параметри моделі; $N_{cycle}(t)$ – кількість циклів заряджання / розряджання.

Запропонований **інтегральний показник деградації батареї** враховує не тільки календарне та циклічне старіння, але також і випадкові змінні, які моделюють невизначеності в експлуатаційних умовах, таких як температура, глибина розряду та інші, і дозволяє отримати більш точну оцінку загальної деградації батареї з урахуванням різних експлуатаційних факторів. Це дозволяє більш ефективно планувати та оптимізувати режими експлуатації систем зберігання енергії на базі вторинних літій-іонних батарей електромобілів.

$$\begin{aligned} Q_{total}(t) &= Q_{calendar}(t) + Q_{cycle}(t) \pm \Delta Q(t) \\ &= k_{calendar} \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \cdot t \cdot f(SOC) + k_{cycle} \cdot (DOD)^\alpha \cdot (C_{rate})^\beta \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \cdot N_{cycle}(t) \\ &\pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial SOC} \Delta SOC\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial DOD} \Delta DOD\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial C_{rate}} \Delta C_{rate}\right)^2} \end{aligned}$$

$Q_{total}(t)$ – загальні втрати ємності батареї з урахуванням факторів календарного і циклічного старіння; $\Delta Q(t)$ – урахування невизначеності стану / поведінки вторинних батарей в умовах експлуатації; ΔT , ΔSOC , ΔDOD , ΔC_{rate} – випадкові змінні, відповідно, температури, стану заряду, глибини розряду, швидкості заряджання / розряджання з певним розподілом (наприклад, нормальним); похідні $\frac{\partial Q}{\partial T}$, $\frac{\partial Q}{\partial SOC}$, $\frac{\partial Q}{\partial DOD}$, $\frac{\partial Q}{\partial C_{rate}}$ – представляють чутливість ємності батареї до змін кожного з цих параметрів.

Інтегральний показник деградації дозволяє об'єднати всі аспекти старіння батареї, такі як календарне та циклічне старіння, в один узагальнений параметр. Це спрощує аналіз стану батареї та дає змогу адекватно оцінити її залишковий термін служби. Завдяки цьому користувачі та оператори систем зберігання енергії можуть отримувати цілісну картину про стан батареї без необхідності аналізувати безліч окремих параметрів. Врахування стохастичних факторів у моделях деградації дозволить більш точно моделювати реальні умови експлуатації батарей та оцінювати вплив випадкових змін на їх стан.

Цей показник може бути використаний для розробки та налаштування оптимальних режимів заряджання та розряджання батарей, мінімізуючи вплив несприятливих факторів та подовжити життєвий цикл батареї.

Висновки. Оцінювання стану здоров'я та прогнозування терміну служби батарей є критично важливим для забезпечення надійності та ефективності їх експлуатації. Якщо у первинному застосуванні в електротранспорті це важливо для гарантування безпеки та довговічності використання батарей, то у вторинному застосуванні для зберігання енергії, здатність точно оцінювати та прогнозувати термін служби батарей дозволяє ефективно управляти їх експлуатаційними ресурсами, забезпечуючи стабільність енергопостачання та оптимізуючи економічність систем. Завдяки введеному інтегральному показнику деградації можна більш ефективно планувати використання вторинних батарей, визначати оптимальні строки їх заміни та планувати витрати на обслуговування. Це дозволяє знизити загальні експлуатаційні витрати та підвищити економічну ефективність систем зберігання енергії.

Посилання

1. Trends and projections in Europe 2023. EEA, European Environment Agency, 83 p. <https://doi.org/10.2800/595102>
2. Kostenko G., Zaporozhets A. World experience of legislative regulation for lithium-ion electric vehicle batteries considering their second-life application in the power sector. *System Research in Energy*. 2024. No. 2(77). P. 97—114. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.097>
3. Li R., Hassan A., Gupte N., Su W., Zhou X. Degradation Prediction and Cost Optimization of Second-Life Battery Used for Energy Arbitrage and Peak-Shaving in an Electric Grid. *Energies*. 2023. Vol. 16. Iss. 17. 6200. <https://doi.org/10.3390/en16176200>
4. Kostenko G., Zaporozhets A. (2023). Enhancing of the Power System Resilience Through the Application of Micro Power Systems (microgrid) with Renewable Distributed Generation. *System Research in Energy*. No. 3(74). P. 25—38. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.025>
5. Rallo H., Canals Casals L., De La Torre D., Reinhardt R., Marchante C., Amante B. Lithium-ion battery 2nd life used as a stationary energy storage system: Ageing and economic analysis in two real cases. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122584>

INTEGRAL DEGRADATION INDEX OF SECOND-LIFE EV BATTERIES APPLICATION IN ENERGY STORAGE SYSTEMS: ACCOUNTING FOR CALENDAR AND CYCLIC AGING

Ganna Kostenko*, <https://orcid.org/0000-0002-8839-7633>

Artur Zaporozhets, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0704-4116>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., 03150, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: Kostenko_HP@nas.gov.ua

Abstract. *The study aims to develop an integral degradation index for energy storage systems based on secondary lithium-ion batteries from electric vehicles, considering calendar and cyclic aging factors. It also examines the impact of the stochastic behavior of secondary batteries and renewable energy generation. The proposed model simulates various operational scenarios, providing critical insights into battery degradation and optimization for prolonged lifespan and enhanced efficiency. This approach promotes sustainable resource management and integration of renewable energy sources.*

Keywords: second-life batteries, energy storage systems, calendar aging, cyclic aging, integral degradation index.