

Сергій ПЛАКСІН, Микола ЖИТНИК, Руслана ЛЕВЧЕНКО,
Світлана ОСТАПОВСЬКА, Ірина ТИМЧЕНКО

Україна, Дніпро, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України

ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОГО РІВНЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

Розроблено та експериментально обґрунтовано доцільність практичного використання одноімпульсного гальваностатичного методу визначення поточного рівня працездатності електрохімічного накопичувача енергії за кінетичними параметрами електрохімічного процесу. Метод базується на застосуванні вейвлет-перетворення Хаара для аналізу кривої напруги деполяризації у сигналі відгуку.

Ключові слова: електрохімічний накопичувач енергії, рівень працездатності, імпульсний гальваностатичний метод, сигнал відгуку, кінетичні параметри, вейвлет-перетворення Хаара.

Системи накопичення та зберігання енергії на основі електрохімічних джерел струму є важливою технологією як для енергетичної, так і для транспортної галузей економіки. Проте серйозною проблемою під час їхньої експлуатації залишається деградація характеристик накопичувачів унаслідок старіння та впливу різноманітних чинників, що суттєво знижує їхню працездатність. Втрата ємності відбувається незалежно від того, перебуває накопичувач у режимі експлуатації чи зберігання, що є суттєвим недоліком сучасних електрохімічних систем. Як зазначено в [1], швидкість зменшення ємності накопичувача залежить від умов його експлуатації та зберігання, при цьому термін експлуатації вважають вичерпаним після втрати 20–30% початкової ємності. Тому точна оцінка ємності батареї є критично важливою для забезпечення продуктивності всієї системи енергозабезпечення відповідно до очікуваного терміну служби. Оскільки роль накопичувачів енергії в енергосистемах є ключовою, точна оцінка їхнього поточного рівня працездатності (*state of health*, **SOH**) є вирішальною для забезпечення надійної експлуатації та оптимізації процесів їх обслуговування.

Визначення рівня працездатності накопичувача енергії має на меті відобразити його загальний енергетичний стан і здатність забезпечувати задану продуктивність у конкретних умовах експлуатації порівняно з початковим (новим) станом. Через складну нелінійну природу електрохімічних процесів діагностика SOH потребує спеціальних підходів, що зумовило появу широкого спектра методів, які враховують особливості роботи накопичувача в конкретних умовах експлуатації.

Сучасні методи визначення рівня працездатності електрохімічних накопичувачів енергії всебічно розкриті в літературі, наприклад у роботах [2]–[7].

Автори [2] надають огляд методів оцінки SOH накопичувачів у складі електромобілів (EV) та гібридних електромобілів (HEV), висвітлюючи їхні основні переваги та вказуючи на обмеження з погляду на практичну реалізацію в режимі реального часу. У загальному вигляді класифікацію методів оцінки рівня працездатності за оглядом [2] представлено на **рис. 1, а**.

У роботі [2] зазначається, що наявні методи оцінки SOH складно реалізувати практично, оскільки вони використовують місткі моделі акумуляторів, і це призводить до надмірної складності параметризації та значного обсягу обчислювальних операцій, а також зумовлює їхню низьку прозорість та відтворюваність. Алгоритми, які лежать в основі цих методів, використовують інформацію, яку складно отримати в реальних умовах. Тому в прикладних інженерних задачах надають перевагу більш об'єктивним методам з одностакійною параметризацією для забезпечення стабільності та точності визначення енергетичних станів накопичувача. За оцінкою авторів [8] таким вимогам відповідають методи швидкої оцінки SOH накопичувачів, які стали актуальною темою досліджень при їх практичному застосуванні. Загальну класифікацію сучасних методів швидкої оцінки SOH накопичувачів енергії наведено на **рис. 1, б** [8]. Серед зазначених методів найбільше уваги приділяють методам оцінки стану працездатності накопичувачів енергії на основі електричних параметрів, зокрема методам тестування імпульсами через зручність їх прямих вимірювань [9], [10]. Такими параметрами є напруга та струм, а також температура. Проте під час роботи накопичувача в динамічних режимах їхні значення змінюються в часі та в більшості випадків є зворотними, через що не відображають адекватно рівень його працездатності. Тому, попри зазначені переваги, значення зовнішніх параметрів є малоприслужними.

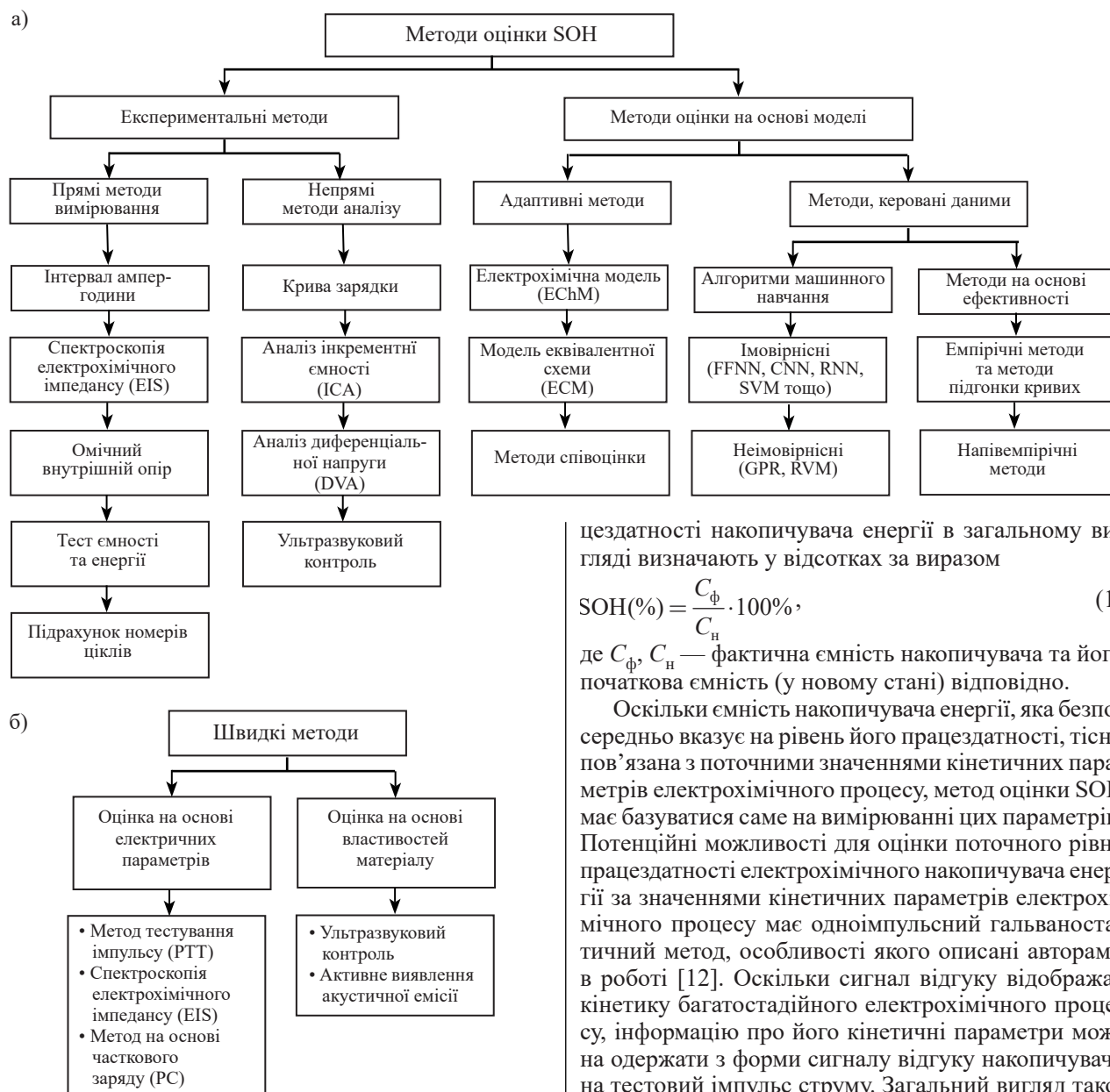


Рис.1. Класифікація сучасних методів оцінювання SOH за оглядами [2] (а) та [8] (б)

ми для визначення поточного рівня працездатності накопичувача енергії в динамічних режимах роботи.

Метою цієї роботи є розробка методу визначення поточного рівня працездатності електрохімічних накопичувачів енергії, що базується на використанні кривої напруги деполяризації як кінетичного параметра та обробленої за допомогою вейвлет-перетворення на базі вейвлету Хаара.

Методика дослідження

За твердженням авторів [11], абсолютного значення величини SOH немає. Це суб'єктивна міра, оскільки вона може бути отримана відповідно до обраних параметрів для її визначення. Зазвичай рівень пра-

цездатності накопичувача енергії в загальному вигляді визначають у відсотках за виразом

$$\text{SOH}(\%) = \frac{C_{\text{ф}}}{C_{\text{н}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $C_{\text{ф}}$, $C_{\text{н}}$ — фактична ємність накопичувача та його початкова ємність (у новому стані) відповідно.

Оскільки ємність накопичувача енергії, яка безпосередньо вказує на рівень його працездатності, тісно пов'язана з поточними значеннями кінетичних параметрів електрохімічного процесу, метод оцінки SOH має базуватися саме на вимірюванні цих параметрів. Потенційні можливості для оцінки поточного рівня працездатності електрохімічного накопичувача енергії за значеннями кінетичних параметрів електрохімічного процесу має одноімпульсний гальваностатичний метод, особливості якого описані авторами в роботі [12]. Оскільки сигнал відгуку відображає кінетику багатостадійного електрохімічного процесу, інформацію про його кінетичні параметри можна одержати з форми сигналу відгуку накопичувача на тестовий імпульс струму. Загальний вигляд такої кривої із зазначеними стадіями та параметрами електрохімічного процесу наведено на **рис. 2**.

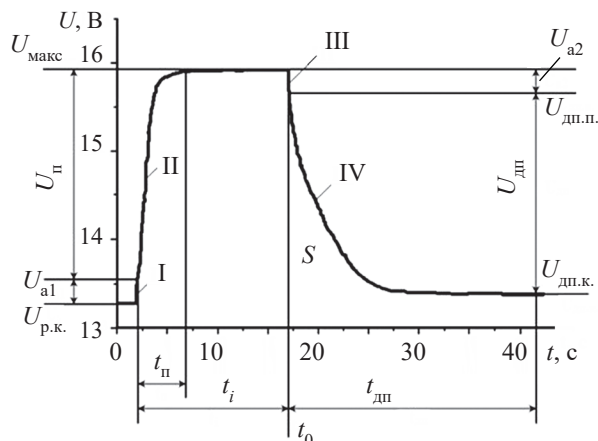


Рис. 2. Форма сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії на тестовий імпульс струму [12]

Встановлено, що значну частку кінетичних параметрів, необхідних для визначення поточного рівня працездатності накопичувача, містить стадія IV. Вона настає після зняття тестового імпульсу та відображає процес деполяризації електрохімічної системи. Процес деполяризації після припинення дії тестового імпульсу змінюється у часі за законом, близьким до еквіпотенціального, асимптотично наближаючись до рівноважного значення $U_{p.k.}$. На сигналі відгуку процес деполяризації відображається кривою деполяризації у формі повільно змінюваної функції $U_{дп}$, яка в загальному виді описується рівнянням

$$U_{дп}(t) = U_{дп}(t_0) - \frac{i_0(t - t_0)}{C_{п.ш.}}, \quad (2)$$

де $U_{дп}(t)$ — напруга спаду в момент часу t ;

$U_{дп}(t_0)$ — напруга спаду в момент вимкнення струму t_0 ;

i_0 — густина струму обміну;

$C_{п.ш.}$ — ємність подвійного електричного шару.

Швидкість протікання процесу деполяризації та, відповідно, початковий кут нахилу кривої спаду потенціалу одразу після вимкнення струму визначаються густиною струму обміну i_0 та ємністю подвійного електричного шару:

$$\left(\frac{dU_{дп}}{dt} \right)_{t=t_0} = \frac{C_{п.ш.}}{i_0}. \quad (3)$$

Поведінка електрохімічної системи після зняття тестового імпульсу, представлена виразами (2) та (3), пояснюється припущенням, що одразу після завершення дії імпульсу як чинника перенапруги заряд подвійного електричного шару витрачається на реакцію відновлення рівноважного стану відновлення рівноважного стану, після чого потенціал повертається до рівноважного значення $U_{p.k.}$ завдяки фарадєвському процесу.

Оскільки ємність подвійного електричного шару прямо пропорційна його заряду та активній площі поверхні частки активної маси, що бере участь в електрохімічній реакції, тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості розряду цього шару й прямо пропорційна площі поверхні реагуючої частки активної маси. Згідно з відомим в електрохімії законом Фарадея коефіцієнт використання активної маси відображає відсоткову частку активної маси, залученої до електрохімічного процесу, і є прямо пропорційним ємності накопичувача. Отже, ємність подвійного шару на стадії деполяризації прямо пропорційна коефіцієнту використання активної маси та, відповідно, ємності накопичувача.

Оскільки відомі методи прямого визначення коефіцієнта використання мало придатні для практичного застосування, у роботі [12] було обґрунтовано теоретично та підтверджено експериментально пропорційну залежність площі S фігури, обмеженої кривою напруги деполяризації $U_{дп}(t)$ на сигналі відгуку після вимкнення тестового імпульсу та прямою на рівні напруги розімкненого кола $U_{p.k.}$, від коефіцієнта використання активної маси. Ця залежність дозволяє опосередковано визначати ємність накопичувача за площею S . Для визначення площі S у [12] використано методику, що базується на чисельному інтегруванні відрізків за правилом трапецій (рис. 3, а) за виразом

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x) dx \approx \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i) \frac{1}{2} [f(x_{i+1}) + f(x_i)].$$

Варто зазначити, що визначення поточного рівня працездатності накопичувача енергії в геометричній площині за площею, отриманою згідно з цією методикою, не повною мірою відповідає вимогам щодо швидкодії через велику кількість та тривалість математичних операцій.

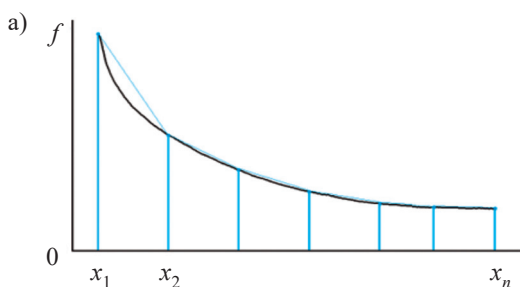
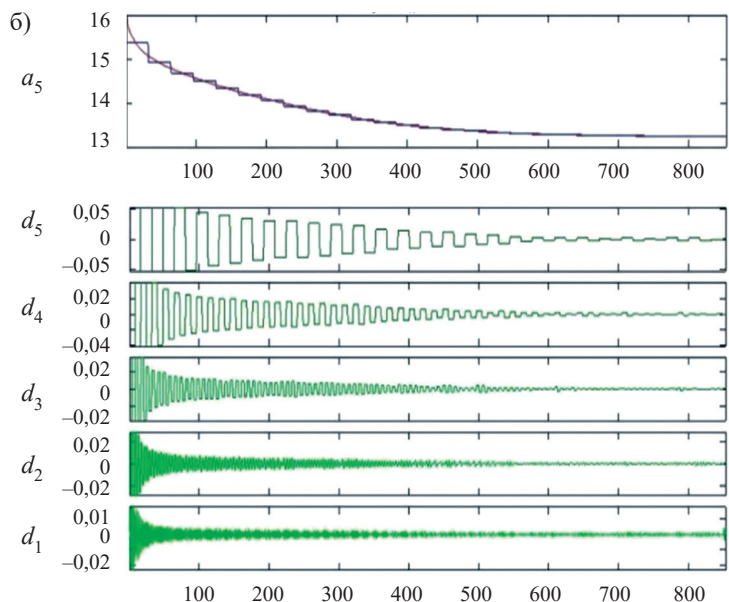


Рис. 3. Приклади обробки сигналу відгуку для визначення рівня працездатності електрохімічного накопичувача енергії:

а — визначення площі фігури, обмеженої кривою напруги деполяризації; б — вейвлет-перетворення кривої напруги деполяризації на основі вейвлет-а Хаара

(a_5 — апроксимований сигнал; $d_1, \dots, d_5$ — рівні деталізації вейвлетів Хаара з відповідними коефіцієнтами розкладу по координаті часу та кількості початкових дискретних точок)



Необхідну швидкодію забезпечують математичні методи обробки сигналу відгуку накопичувача енергії у часовій області. З урахуванням особливостей форми кривої напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ на сигналі відгуку, яку описує вираз (2) і яка відображає швидкість розрядного процесу згідно з виразом (3), для обробки сигналу відгуку було обрано вейвлет-аналіз. Його застосовують для обробки сигналів нестационарних процесів, що описуються повільнозмінними функціями. За материнський обрано вейвлет Хаара, який має такі переваги порівняно з іншими вейвлетами: просту форму (добре апроксимує експоненційні сигнали на малих інтервалах), високу швидкодію, що важливо для оперативного визначення рівня працездатності, та високу точність апроксимації, яка дає змогу отримувати часово-частотне уявлення процесу деполяризації в реальному часі [13]. Застосування вейвлет-перетворення кривої напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ на основі вейвлета Хаара забезпечує можливість отримати часово-частотне зображення розрядного процесу в реальному часі та зберегти локальні особливості сигналу для його аналізу на необхідному рівні деталізації.

Попередні результати щодо застосування вейвлет-перетворення кривої напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ на основі вейвлета Хаара для контролю енергетичного стану електрохімічного накопичувача енергії наведено в роботі [14]. Підтверджені в ній властивості вейвлет-перетворень дають змогу застосувати обробку кривої напруги деполяризації, яка описує розрядний процес в часовій області, для визначення поточного рівня працездатності накопичувача енергії.

Приклад застосування вейвлет-перетворення з розтягуванням кривої напруги деполяризації відносно осі часу на основі вейвлета Хаара наведено на рис. 3, б. Показані тут рівні деталізації вейвлета Хаара можна використовувати для визначення рівня працездатності, однак із різною похибкою, що залежить від кількості початкових дискретних точок на відповідному рівні деталізації: чим менший рівень деталізації, тим більше дискретних точок розкладу і, відповідно, менша похибка. Інформаційним параметром для визначення поточного рівня працездатності обрано кількість дискретних точок розкладу на кривій напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ в часовій області її знаходження в межах від початкового значення $U_{\text{дп.п}}$ у момент вимкнення тестового імпульсу t_0 до кінцевого значення $U_{\text{дп.к}} = 0,37U_{\text{дп.п}}$.

Обмеження кривої напруги деполяризації значенням $0,37U_{\text{дп.п}}$ передбачено для забезпечення однакових умов відліку кількості дискретних точок розкладу на цьому часовому інтервалі за одного рівня деталізації, а також для неявного використання сталої часу процесу деполяризації, оскільки наближене значення експоненційного сигналу (2) за $\tau = 1$ становить $0,368X(t)$, або $\approx 0,37U_{\text{дп.п}}$. Поточний рівень пра-

цездатності накопичувача (у відсотках) визначали за зміною відношення поточної кількості дискретних точок до її початкового значення. Накопичувач вважають працездатним, якщо цей рівень становить не менше ніж 60%.

Для визначення поточного рівня працездатності накопичувача енергії обрано рівень деталізації d_2 , який є найбільш придатним з міркувань прискорення підрахунку кількості дискретних точок зі збереженням необхідної для практичного застосування точності.

Результати дослідження

Досліджували рівень працездатності накопичувача енергії на основі свинцево-кислотної акумуляторної батареї ємністю 45 А·год протягом п'яти років — від початку експлуатації в новому стані до її завершення.

Рівень працездатності визначали на накопичувачі, що працював у штатному режимі, з використанням вбудованого обладнання. Його розроблено на основі схемотехнічного рішення експериментального стенда для контролю стану хімічних джерел струму, описаного у [15], та доповнено відповідним програмним забезпеченням.

На початку експлуатації накопичувача енергії з початковою номінальною ємністю C_n із сигналу відгуку повністю зарядженого накопичувача виділяли криву напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ у часовій області її знаходження в межах від початкового значення $U_{\text{дп.п}}$ у момент вимкнення тестового імпульсу t_0 до кінцевого значення $U_{\text{дп.к}} = 0,37U_{\text{дп.п}}$. Після цього обчислювали кількість дискретних точок розкладу N_n на кривій $U_{\text{дп}}(t)$ у зазначених межах, яку приймають за 100%-й рівень працездатності накопичувача ($\text{SOH}_n = 100\%$), та заносили одержане значення N_n до пам'яті вимірювального пристрою.

Упродовж періоду експлуатації накопичувача поточний рівень працездатності визначали відповідно до графіка проведення планових регламентних робіт у системі енергозабезпечення та здійснювали в такій (у спрощеному вигляді) послідовності.

На накопичувач подавали тестовий імпульс, виділяли із сигналу відгуку криву напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ у зазначених межах, обчислювали кількість дискретних точок розкладу N_n на цій кривій та за рівнянням, еквівалентним виразу (1), визначали поточний рівень працездатності накопичувача у відсотках від початкового значення:

$$\text{SOH}_n(\%) = \frac{N_n}{N_n} \cdot 100\%$$

де N_n , N_n — кількість дискретних точок розкладу на кривій напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ у сигналі відгуку накопичувача на початку його експлуатації за номінальної ємності та на час визначення поточного рівня працездатності SOH_n відповідно.

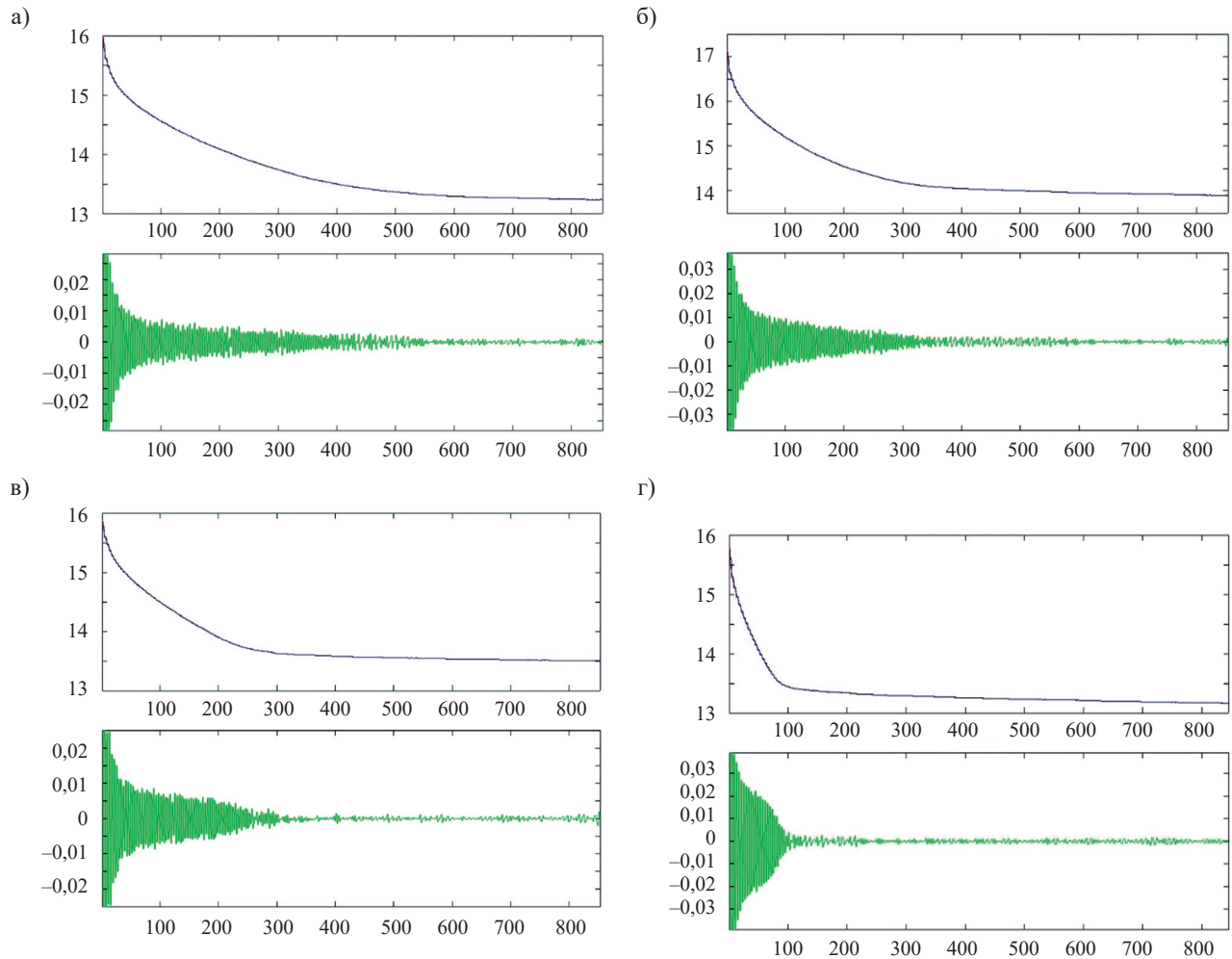


Рис. 4. Вейвлет-перетворення Хаара кривої напруги деполяризації на сигналі відгуку накопичувача енергії під час його експлуатації упродовж п'яти років:

а — в початковому стані; б — 2 роки; в — 4 роки; г — 5 років

Підрахунок кількості дискретних точок розкладу за вейвлетом Хаара виконували за допомогою блоку Counter у середовищі MATLAB/Simulink. Результати вейвлет-перетворення кривої напруги деполяризації $U_{\text{дп}}(t)$ на основі вейвлету Хаара на сигналі відгуку накопичувача енергії під час його експлуатації упродовж п'яти років відображено на **рис. 4**.

Результати підрахунку кількості дискретних точок розкладу за вейвлетом Хаара та відповідні значення поточного рівня працездатності накопичувача енергії наведено в **таблиці**. З плином часу під впливом чинників деградації, зокрема старіння, зменшується площа поверхні активної маси, що бере участь у струмоутворювальних процесах під час роботи накопичувача на навантаження. Це призводить до зменшення ємності подвійного електричного шару та швидкості деполяризації. У результаті скорочується часовий інтервал вейвлет-перетворення кривої напруги деполяризації від моменту вимкнення тестового імпульсу до кінцевого значення $U_{\text{дп.к}} = 0,37U_{\text{дп.п}}$ (рис. 4), що супроводжується зменшенням кількості дискрет-

них точок розкладу як інформативного параметра для оцінювання поточного рівня працездатності.

За результатами спостережень за роботою накопичувача під час визначення рівня працездатності встановлено, що подавання короткочасного зарядного тестового імпульсу для реєстрації сигналу відгуку практично не впливало на його роботу на навантаження. Після вимкнення тестового імпульсу накопичувач продовжував працювати в штатному режимі, а подальше оброблення сигналу відгуку для оцінювання поточного рівня працездатності здійсню-

Залежність кількості точок вейвлет-розкладу та поточного рівня працездатності SOH_n від терміну експлуатації накопичувача

Термін експлуатації	Кількість точок розкладу	SOH_n , %
Початковий стан (новий)	152	100
2 роки	127	84
4 роки	106	69
5 років	47	31

вали незалежно від навантаження. Отже, розроблений метод забезпечує можливість визначати поточний рівень працездатності накопичувача у потрібний для споживача час безпосередньо у штатному режимі роботи та без відключення його від мережі.

Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано та експериментально обґрунтовано новий імпульсний метод визначення поточного рівня працездатності електрохімічних накопичувачів енергії, в основу якого покладено аналіз кривої деполаризації за допомогою дискретного вейвлет-перетворення із застосуванням базису Хаара. Такий підхід дає змогу виділяти кількість дискретних точок розкладу як інформативний параметр деградації. Дані п'ятирічних експериментальних випробувань свинцево-кислотної акумуляторної батареї ємністю 45 А·год підтвердили високу точність оцінювання стану накопичувача та практичну застосовність методу. Показано, що за допомогою короткочасного тестового імпульсу можна визначати поточний рівень працездатності безпосередньо в штатному режимі роботи накопичувача без його відключення від мережі споживача та без порушення технологічного процесу.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- [1] J. Tian, R. Xiong, W. Shen, and J. Lu, "Data-driven battery degradation prediction: Forecasting voltage-capacity curves using one-cycle data," *EcoMat*, vol. 4, no. 5, art. e12213, 2022. doi: 10.1002/eom2.12213.
- [2] N. Noura, L. Boulon, and S. Jemeï, "A review of battery state of health estimation methods: Hybrid electric vehicle challenges," *World Electr. Veh. J.*, vol. 11, no. 4, art. 66, 2020. doi: 10.3390/wevj11040066.
- [3] L. Yao, S. Xu, A. Tang, F. Zhou, and Y. Kou, "A review of lithium-ion battery state of health estimation and prediction methods," *World Electr. Veh. J.*, vol. 12, no. 3, art. 113, 2021. doi: 10.3390/wevj12030113.
- [4] M. Elmahallawy, T. Elfouly, A. Alouani, and A. M. Massoud, "A comprehensive review of lithium-ion batteries modeling, and state of health and remaining useful lifetime prediction," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 119040–119070, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3221137.
- [5] Z. Wang, G. Feng, D. Zhen, F. Gu, and A. Ball, "A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 5141–5161, 2021. doi: 10.1016/j.egy.2021.08.113.
- [6] E. Meissner and G. Richter, "Battery monitoring and electrical energy management: Precondition for future vehicle electric power systems," *J. Power Sources*, vol. 116, no. 1–2, pp. 79–98, 2003. doi: 10.1016/S0378-7753(02)00713-9.
- [7] M. Ye, M. Wei, Q. Wang, G. Ye, and J. Wu, "State of health estimation for lithium-ion batteries based on incremental capacity analysis under slight overcharge voltage," *Front. Energy Res.*, vol. 10, art. 1001505, 2022. doi: 10.3389/fenrg.2022.1001505.
- [8] Z. Wang et al., "A review on rapid state of health estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 60, art. 103457, 2023. doi: 10.1016/j.seta.2023.103457.
- [9] A. Nickol et al., "GITT analysis of lithium insertion cathodes for determining the lithium diffusion coefficient at low temperature: Challenges and pitfalls," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 9, art. 090546, 2020. doi: 10.1149/1945-7111/ab9404.
- [10] Y.-C. Chien, H. Liu, A. S. Menon, and M. A. Lacey, "A fast alternative to the galvanostatic intermittent titration technique," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, art. 7300, 2023. doi: 10.1038/s41467-023-43110-6.
- [11] F. von Bülow, F. Heinrich, and W. A. Paxton, "The future of battery data and the state of health of lithium-ion batteries in automotive applications," *Commun. Eng.*, vol. 3, no. 1, art. 173, 2024. doi: 10.1038/s44172-024-00299-w.
- [12] С. В. Плаксін, М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко, та С. Я. Остаповська, "Імпульсний метод оперативного контролю та управління зарядним процесом накопичувача енергії," *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, № 1–3, с. 22–30, 2022. doi: 10.15222/ТКЕА2022.1-3.22.
- [13] Ю. С. Ямненко, В. В. Телега, та К. С. Немчінова, "Використання вейвлет-перетворень Хаара та ОБ при аналізі сигналів," *Електроніка та зв'язок*, т. 22, № 4(99), с. 51–58, 2017. doi: 10.20535/2312-1807.2017.22.4.105272.
- [14] С. В. Плаксін, М. Я. Житник, Р. Ю. Левченко, та ін., "Методика обробки сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії для оперативного контролю його енергетичного стану," *Труди XXIV МНПК «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, Одеса, Україна, 2023, с. 41–42.
- [15] С. В. Плаксін, Н. Е. Житник, та О. И. Ширман, "Экспериментальный стенд для автоматизированного контроля состояния химических источников тока импульсным методом," *Гірничі електромеханіка та автоматика*, вип. 89, с. 58–63, 2012.

Надійшла до редакції 16.03.2026
Прийнято до друку 14.06.2026

PULSE METHOD FOR DETERMINING THE CURRENT STATE OF HEALTH
OF AN ELECTROCHEMICAL ENERGY STORAGE DEVICE

A single-pulse galvanostatic method for rapid determination of the current State of Health (SOH) of electrochemical energy storage devices in dynamic operating modes has been developed and experimentally validated. The proposed method enables SOH assessment without interrupting normal load operation. It relies on the Haar wavelet transform to process the response signal of the energy storage device to a short-term test pulse. Considering the specific profile of the response signal, which reflects multi-stage electrochemical kinetics and is described by slowly changing functions, applying the Haar wavelet transform yields a real-time time-frequency representation of the electrochemical process. Processing the depolarization curve of the response signal following the test pulse via the Haar wavelet transform restricts the area under the voltage curve, which correlates directly with the utilization factor of active materials. Thus, the derived wavelet parameters serve as informative indicators for evaluating the current SOH within a specified time window of the depolarization voltage curve. Experimental results reveal an irreversible, gradual decline in SOH over operational time driven by degradation processes, with the degradation rate accelerating in the later stages of service life. This behavior highlights the complex, dynamic, and non-linear nature of degradation in electrochemical energy storage systems. Unlike existing diagnostic techniques, the developed single-pulse galvanostatic method eliminates the need to disconnect the energy storage unit from the load, allowing real-time SOH monitoring under actual operating conditions.

Keywords: electrochemical energy storage, state of health (SOH), single-pulse galvanostatic method, response signal, kinetic parameters, Haar wavelet transform.

REFERENCES

- [1] J. Tian, R. Xiong, W. Shen, and J. Lu, "Data-driven battery degradation prediction: Forecasting voltage-capacity curves using one-cycle data," *EcoMat*, vol. 4, no. 5, art. e12213, 2022. doi: 10.1002/eom2.12213.
- [2] N. Noura, L. Boulon, and S. Jemeï, "A review of battery state of health estimation methods: Hybrid electric vehicle challenges," *World Electr. Veh. J.*, vol. 11, no. 4, art. 66, 2020. doi: 10.3390/wevj11040066.
- [3] L. Yao, S. Xu, A. Tang, F. Zhou, and Y. Kou, "A review of lithium-ion battery state of health estimation and prediction methods," *World Electr. Veh. J.*, vol. 12, no. 3, art. 113, 2021. doi: 10.3390/wevj12030113.
- [4] M. Elmahallawy, T. Elfouly, A. Alouani, and A. M. Massoud, "A comprehensive review of lithium-ion batteries modeling, and state of health and remaining useful lifetime prediction," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 119040–119070, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3221137.
- [5] Z. Wang, G. Feng, D. Zhen, F. Gu, and A. Ball, "A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 5141–5161, 2021. doi: 10.1016/j.egy.2021.08.113.
- [6] E. Meissner and G. Richter, "Battery monitoring and electrical energy management: Precondition for future vehicle electric power systems," *J. Power Sources*, vol. 116, no. 1–2, pp. 79–98, 2003. doi: 10.1016/S0378-7753(02)00713-9.
- [7] M. Ye, M. Wei, Q. Wang, G. Ye, and J. Wu, "State of health estimation for lithium-ion batteries based on incremental capacity analysis under slight overcharge voltage," *Front. Energy Res.*, vol. 10, art. 1001505, 2022. doi: 10.3389/fenrg.2022.1001505.
- [8] Z. Wang et al., "A review on rapid state of health estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 60, art. 103457, 2023. doi: 10.1016/j.seta.2023.103457.
- [9] A. Nickol et al., "GITT analysis of lithium insertion cathodes for determining the lithium diffusion coefficient at low temperature: Challenges and pitfalls," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 167, no. 9, art. 090546, 2020. doi: 10.1149/1945-7111/ab9404.
- [10] Y.-C. Chien, H. Liu, A. S. Menon, and M. A. Lacey, "A fast alternative to the galvanostatic intermittent titration technique," *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, art. 7300, 2023. doi: 10.1038/s41467-023-43110-6.
- [11] F. von Bülow, F. Heinrich, and W. A. Paxton, "The future of battery data and the state of health of lithium-ion batteries in automotive applications," *Commun. Eng.*, vol. 3, no. 1, art. 173, 2024. doi: 10.1038/s44172-024-00299-w.
- [12] S. Plaksin, M. Zhitnik, R. Levchenko, and S. Ostapovska, "Pulse technique of in-operation control and management of energy storage charging process (in Ukrainian)," *Technology and design in electronic equipment*, no. 1–3, pp. 22–30, 2022. doi: 10.15222/TKEA2022.1-3.22.
- [13] Yu. Yamnenko, V. Tielieha, and K. Niemchinova, "The use of Haar and OB wavelets in the signals analysis (in Ukrainian)," *Electron. Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 51–58, 2017. doi: 10.20535/2312-1807.2017.22.4.105272.
- [14] S. Plaksin, M. Zhitnik, R. Levchenko et al., "Method of processing the electrochemical energy storage response signal for operational control of its energy state (in Ukrainian)," in *Proc. 24th Int. Sci.-Pract. Conf. "Modern Information and Electronic Technologies"*, Odesa, Ukraine, 2023, pp. 41–42.
- [15] S. V. Plaksin, N. Ye. Zhitnik, and O. I. Shyrman, "Experimental stand for automated monitoring of chemical power sources status by pulse method (in Russian)," *Min. Electromech. Autom.*, no. 89, pp. 58–63, 2012.

Відомості про авторів

Сергій Плаксин, докт. фіз.-мат. наук, зав. відділу, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
e-mail: svp@westa-inter.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

Микола Житник, наук. співроб., Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
e-mail: zhitnik0710@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-678X>

Руслана Левченко, молод. наук. співроб., Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
e-mail: R.Y.Levchenko@nas.gov.ua;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2327-009X>

Світлана Остаповська, провідний інженер, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
e-mail: Svetlana.ost@westa-inter.com;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6044-9082>

Ірина Тимченко, провід. інженер, Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна;
e-mail: stroiteley@ukr.net;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8144-221X>

About the authors

Serhii Plaksin, Dr. Sc., Head of Department, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine ("TRANSMAG"), Dnipro, Ukraine;
e-mail: svp@westa-inter.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

Mykola Zhitnik, Scientific Collaboration, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine ("TRANSMAG"), Dnipro, Ukraine;
e-mail: zhitnik0710@gmail.com;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1761-678X>

Ruslana Levchenko, Junior Researcher, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine ("TRANSMAG"), Dnipro, Ukraine;
e-mail: R.Y.Levchenko@nas.gov.ua;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2327-009X>

Svitlana Ostapovska, Leading Engineer, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine ("TRANSMAG"), Dnipro, Ukraine;
e-mail: Svetlana.ost@westa-inter.com;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6044-9082>

Iryna Tymchenko, Leading Engineer, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine ("TRANSMAG"), Dnipro, Ukraine;
e-mail: stroiteley@ukr.net;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8144-221X>



Copyright: © 2026, The author(s). Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).