

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.311:621.355

С. В. ПЛАКСІН^{1*}, А. М. МУХА^{2*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{3*}, М. Я. ЖИТНИК^{4*},
Р. Ю. ЛЕВЧЕНКО^{5*}, Є. М. ЧУПРИНА^{6*}, О. О. ГОЛОТА^{7*}

^{1*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 370 21 82, ел. пошта svr@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 32 30 54, ел. пошта zhitnik@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-1761-678X

^{5*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 32 30 54, ел. пошта levchenko.ruslana@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-2327-009X

^{6*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (0562) 32 30 54, ел. пошта nesty.lords@gmail.com, ORCID 0000-0002-0986-1283

^{7*}Відділ систем керування транспортними засобами, Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (096) 356 23 94, ел. пошта sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

Метод оперативного контролю та управління електрохімічним накопичувачем енергії у складі систем електрозабезпечення транспортних засобів

Мета. Основною метою нашої статті є розробка методу раціонального управління динамічними режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії для підвищення ефективності їх експлуатації у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів. **Методика.** Автори провели огляд світової літератури з теми роботи. Систематизували та класифікували наявні методи управління електрохімічними накопичувачами енергії. Відзначили особливості та можливості їх застосування з урахуванням специфіки експлуатації на транспортних засобах, для яких характерні динамічні режими з непередбачуваними змінами енергетичного балансу, обумовленими неконтрольованими недозарядами та перезарядами. Проведений аналіз наявних методів управління показав, що їх загальним недоліком є використання як інформаційних параметрів для контролю та управління режимами роботи таких параметрів накопичувача, як напруга та робочий струм, значення яких не відповідають поточному енергетичному стану накопичувача у зв'язку зі швидкоплинністю перехідних електрохімічних процесів під час роботи в динамічних режимах. Зроблено висновок про необхідність урахування енергетичних параметрів накопичувачів у процесі управління динамічними режимами, які найбільш повно та об'єктивно відображають його працездатність. Показано перевагу імпульсних методів управління накопичувачами в динамічних режимах роботи перед постійнострумовими методами.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Результати. Автори обґрунтували та експериментально підтвердили багатофункціональність розробленого гальваностатичного методу, що дозволяє одночасно проводити контроль поточного енергетичного стану накопичувача та оперативне управління динамічними режимами його роботи із застосуванням спільного критерію контролю та управління – коефіцієнта використання активних матеріалів, інформаційним еквівалентом якого є величина площі під кривою деполяризації на сигналі відгуку накопичувача на тестовий імпульс. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано поєднати функції контролю поточного енергетичного стану накопичувача та оперативного управління динамічними режимами його роботи із застосуванням коефіцієнта використання активних матеріалів. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для забезпечення оптимального режиму експлуатації накопичувачів енергії у складі систем електропостачання транспортних засобів.

Ключові слова: електрохімічний накопичувач енергії; методи управління режимами роботи; імпульсний гальваностатичний метод; сигнал відгуку; коефіцієнт використання активних матеріалів; поєднання функцій контролю та управління; транспортний засіб

Вступ

У сучасних умовах важливою проблемою на транспорті є підвищення ефективності його використання за рахунок зниження витрат енергоресурсів. Перспективними напрямками підвищення енергетичної ефективності транспортних комплексів є розробка та впровадження нових технологій, зокрема інформаційно-комунікаційних технологій у галузі управління рухомим складом залізничного транспорту [13], зменшення витрат енергоресурсів за рахунок визначення енергоощадних режимів керування локомотивом [6], а також розробка та впровадження нових видів джерел енергії [4]. Одним із напрямів підвищення енергоефективності транспортних засобів, що розвивається в нашій країні та за кордоном, є використання накопичувачів енергії, які здатні надавати неавтономним транспортним засобам нові властивості, такі, наприклад, як автономний пробіг. У ряді випадків накопичувач енергії виконує функції основної електросилової установки, що забезпечує електропривод транспортного засобу. Огляд наукової літератури свідчить, що значні перспективи застосування накопичувачів енергії має тяговий залізничний транспорт із різко змінним навантаженням, до якого належать кар'єрні рудничні електровози, приміські електропоїзди, поїзди метрополітену, високошвидкісний магнітолевітуючий, а також електромобільний транспорт. Досвід експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії на транспортних засобах показав, що для підвищення експлуатаційних характеристик та ефективності використання накопичувачів енергії в динамічних режимах роботи необхідно керувати

розрядними процесами накопичувачів з урахуванням їх поточного енергетичного стану та особливостей умов експлуатації [1, 3].

Наявні методи управління електрохімічними накопичувачами в режимі заряджання досить повно відображені в численних роботах, наприклад, [9–12, 15]. За результатами аналізу джерел інформації виконано систематизацію та класифікацію методів управління зарядними процесами електрохімічних накопичувачів енергії, яка наведена на рис. 1, та відзначені особливості їх застосування.

За зазначеними на рис. 1 особливостями застосування наявних методів управління зарядними процесами електрохімічних накопичувачів енергії можна зробити висновки, що ряд методів перебувають на стадії досліджень і розробки або використовуються в лабораторних умовах і з різних причин не отримали практичного застосування. Поряд із цим зазначено, що в наш час практичне застосування знаходять переважно методи управління постійним струмом і постійною напругою та їх комбінації, або постійнострумові та імпульсні методи управління. У постійнострумових методах контрольованими та керованими режимами є зарядний струм і зарядна напруга, а критерієм закінчення зарядного процесу є мінімальне значення зарядного струму, постійне значення напруги накопичувача та постійне значення щільності електроліту в наливних акумуляторах.

Можливості застосування методів управління процесом зарядки накопичувачів у системах електропостачання транспортних засобів необхідно розглядати з урахуванням специфіки їх функціонування в цих системах. Раціональним способом ефективної експлуатації електрохімі-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

чного накопичувача енергії в системі електропостачання є його робота в номінальних режимах. Проте їх дотримання не завжди дозволяє повною мірою реалізувати робочі режими системи електропостачання в цілому. Наприклад, під час експлуатації накопичувача енергії з невідомим рівнем заряду на транспортному засобі існує небезпека зниження запасу енергії в системі електропостачання транспортного засобу нижче мінімально допустимого значення в момент, коли потрібна передача додаткової енергії тяговому приводу у форсованому режимі його роботи. Така ситуація означає, що транспортний засіб не здатний реалізувати задані динамічні характеристики. Це протиріччя може бути вирішено шляхом виконання раціональних умов експлуатації накопичувача, за яких буде відбуватися збереження його енергії в допустимих межах, чого можна досягти використанням відповідного методу контролю поточного енергетичного стану накопичувача й адекватному цьому стану методу оперативного управління режимами його роботи. Існують різні режими експлуатації хімічних джерел струму, що входять до складу накопичувачів, залежно від їх призначення. Основні з них представлені на рис. 2 [7].

Найбільш інтенсивний режим експлуатації, що полягає в чергуванні циклів «заряд–розряд», характерний для тягових акумуляторних батарей (ТАБ). Під час експлуатації накопичувача в системі електропостачання транспортного засобу переважають інтенсивні цикли, коли протягом денної експлуатації ТАБ піддається декільком повним циклам «заряд–розряд» (рис. 2, з). У зв'язку з тим, що чергування періодичності циклів є випадковим процесом, тобто робота транспортного засобу не регламентована та непередбачувана, накопичувач може перебувати в робочому стані невідомий час без поповнення витраченої енергії. У результаті систематичних недозарядів виникає непоправна втрата ємності, викликана утворенням щільної сульфатної плівки на поверхні активних мас електродів, перетворення якої в активну масу ускладнює процес подаль-

шої зарядки накопичувача, оскільки потребує для цього великої витрати як струму, так і часу. Окрім проблеми недозаряду, постає проблема перезаряду, коли, за досягнення стану повної зарядженості зарядку накопичувача слід припинити, однак у реальних умовах експлуатації накопичувача в динамічних режимах унаслідок відсутності об'єктивних критеріїв зарядженості зарядка триває. Систематичні перезаряди сприяють розпушенню та зсуву активної маси з пластин, що призводить до непоправної втрати ємності накопичувача. Звідси випливає, що під час експлуатації накопичувача в динамічних режимах він завжди перебуває в режимі або недозаряду, або перезаряду, відповідно, порушується його енергетичний баланс. Отже, для ефективної роботи накопичувача в динамічних режимах та продовження терміну служби необхідно підтримувати його енергетичний баланс. До того ж у реальному хімічному джерелі струму, окрім струмоутворювальних реакцій, завжди мають місце деякі побічні небажані процеси (зазвичай незворотні) електрохімічної та хімічної природи, які потребують певної кількості енергії. У результаті під час кожного циклу розрядна ємність виявляється меншою, ніж кількість енергії, поповненої на попередній стадії зарядки, і в міру циклування фактична ємність накопичувача знижується від циклу до циклу. Отже, за будь-якого варіанта експлуатації накопичувача необхідно раціонально використовувати його енергію шляхом контролю поточного енергетичного стану та оперативного управління режимами роботи відповідно до залишкової ємності. Крім того, динамічні режими роботи з короткочасними періодами «розряд–заряд» характеризуються швидкоплинними перехідними процесами в електрохімічній системі накопичувача, тому використання в таких режимах для контролю поточного стану накопичувача величини напруги та струму є недоцільним через непостійність їх значень. Із цієї ж причини їх неможливо використовувати як критерій закінчення зарядного процесу, що може призвести до перезаряду накопичувача або спричинити систематичний недозаряд.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

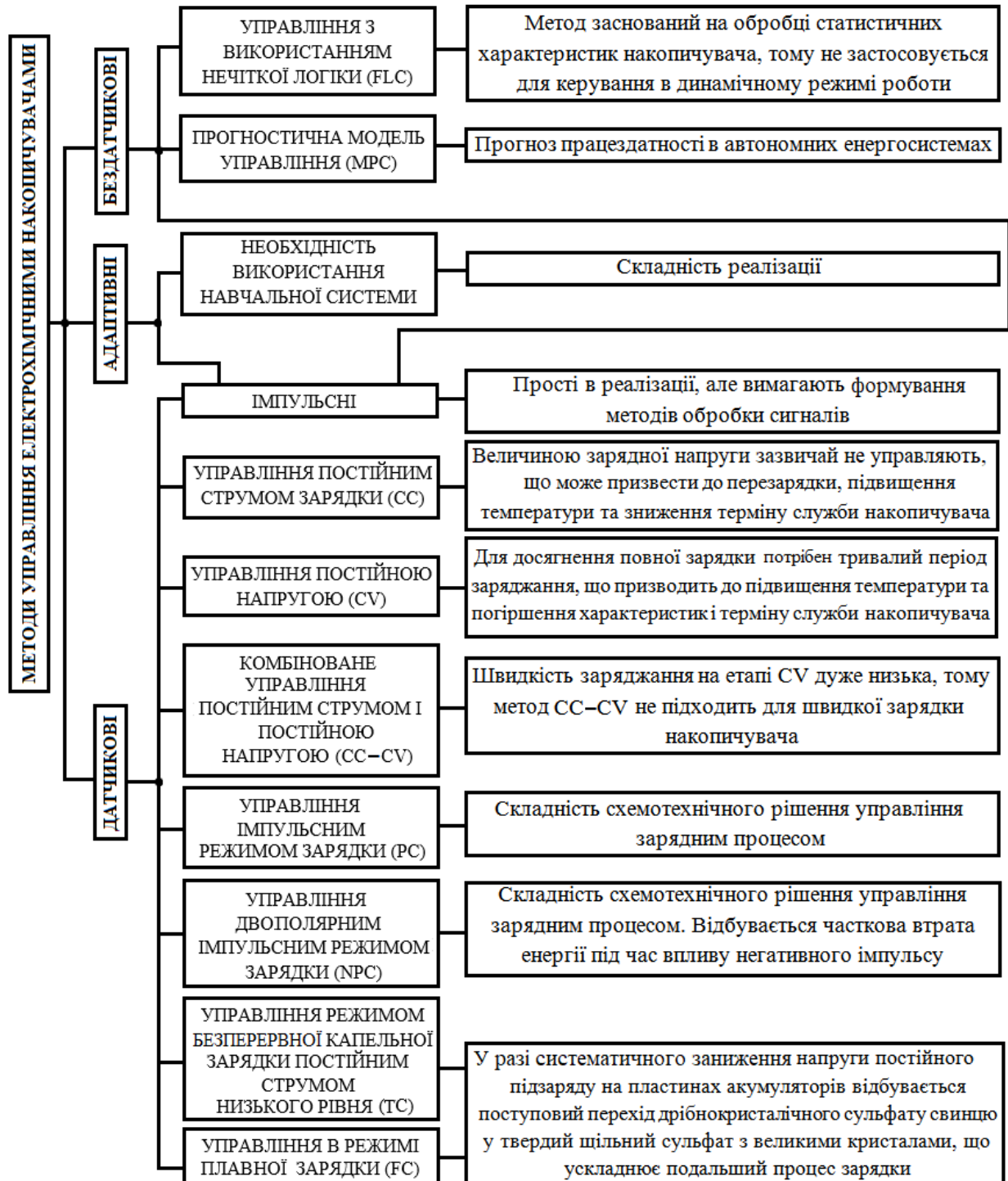


Рис. 1. Методи керування режимом зарядки електрохімічних накопичувачів енергії

Fig. 1. Charging mode control methods of electrochemical energy storage devices

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Порівняно новим додатком зарядних технологій, який швидко розвивається, є парк електромобілів, у яких динамічний режим роботи накопичувачів як основного джерела електроенергії найбільш виражений. Зазвичай ключовим завданням виробників електромобілів є збільшення дальності пробігу, що висуває нові вимоги як до накопичувачів, так і до методів управління режимами їх роботи. Одним зі шляхів вирішення цієї задачі на цьому етапі є розробка та впровадження технологій швидкої зарядки накопичувачів постійним струмом із використанням потужних силових зарядних пристроїв, обладнаних системою захисту для запобігання виходу їх із ладу в разі перевищення допустимих значень зарядних струмів і напруги. У той же час безпека накопичувача в режимі прискореної зарядки досягається лише надійною ізоляцією по ланцюгах живлення. При цьому основним критерієм закінчення зарядного процесу є розрахований для конкретного типу накопичувача час зарядки, тривалість якого залежить від режиму експлуатації електромобіля і може перебувати в межах від 24 годин до 15 хвилин. Слід зазначити, що вибір як критерію закінчення зарядки розрахункового часу проведення зарядного процесу не дозволяє об'єктивно оцінити поточний енергетичний стан накопичувача та не враховує залишкову ємність. Такий практично неконтрольований процес заряджання може негативно позначитися на терміні експлуатації накопичувача і призвести до передчасного виходу його з ладу.

За результатами аналізу наявних методів управління процесом зарядки накопичувачів та з урахуванням зазначеної специфіки їх функціонування в системах електропостачання транспортних засобів можна зробити висновок, що вдосконалення наявних та розробка нових методів оперативного управління динамічними режимами роботи накопичувача з метою раціонального використання його енергоресурсу є актуальною задачею.

Мета

Основною метою нашої статті є розробка методу раціонального управління режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії

для підвищення ефективності їх експлуатації у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів.

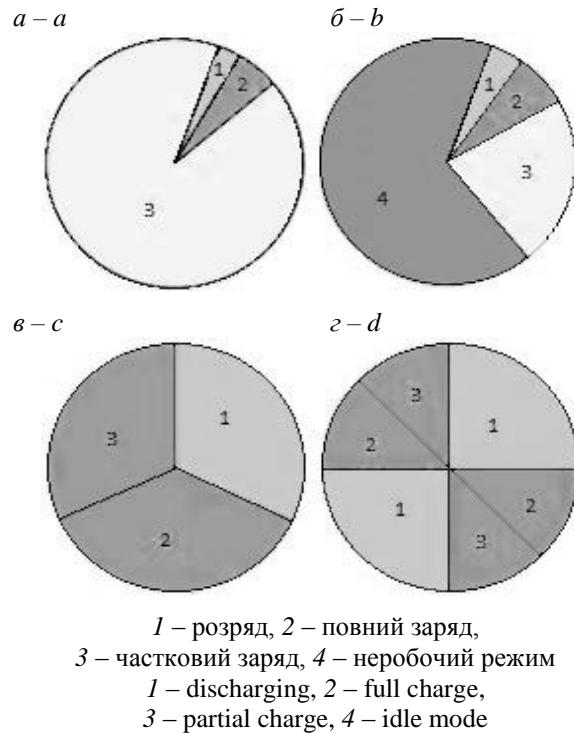


Рис. 2. Режими експлуатації акумуляторних батарей:
а – стаціонарні АБ; б – стартерні АБ;
в – тягові АБ (нормальний режим);
г – тягові АБ (інтенсивний режим)

Fig. 2. Modes of operation of rechargeable batteries:
a – stationary batteries; b – starter batteries;
c – traction batteries (normal mode);
d – traction batteries (intensive mode)

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких задач:

– визначити особливості функціонування накопичувачів у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів;

– визначити набір інформаційних параметрів, які характеризують поточний енергетичний стан накопичувачів у динамічних режимах їх роботи;

– розробити методику визначення інформаційного параметра із сигналу відгуку накопичувача на тестовий імпульс, який характеризує поточний енергетичний стан накопичувача та може бути використаний для поєднання функцій контролю поточного стану та оперативного керування режимами роботи накопичувача.

Методика

Однією з основних вимог ефективності експлуатації електрохімічних накопичувачів енергії є розробка методу оперативного управління режимами роботи накопичувача, який передбачає вибір параметрів контролю й управління та діапазон їх відхилення від заданих значень, у межах якого можна забезпечити збалансований енергетичний режим функціонування накопичувача. Як зазначалося вище, у постійнострумових методах контрольованими та керованими параметрами зарядного процесу є зарядний струм і зарядна напруга, значення яких не завжди відповідають поточному енергетичному стану накопичувача. Як видно із рис. 1, найбільш універсальними методами управління процесом зарядки накопичувачів енергії є імпульсні методи різної модифікації, які можуть бути реалізовані у вигляді датчикових, бездатчикових та адаптивних засрбів. В імпульсних методах як керовані використовують параметри зарядних імпульсів – частоту, тривалість, амплітуду й паузу між імпульсами, що дозволяє здійснювати багатопараметричне управління процесом зарядки. При цьому критерієм закінчення зарядного процесу в імпульсних методах, як і в постійнострумових, є мінімальне значення зарядного струму, усталене значення напруги накопичувача й постійне значення щільності електроліту в наливних акумуляторах, які із зазначених вище причин не можуть бути об'єктивними критеріями в динамічних режимах роботи накопичувача. Водночас відомо, що основним параметром накопичувача енергії, величина якого визначає його енергетичний стан та працездатність, є ємність. Із цього погляду перспективною є розробка методу оперативного управління динамічними режимами роботи накопичувача, заснованого на використанні енергетичного параметра як основного критерію працездатності. Очевидно, що контролювати та змінювати значення фактичної ємності накопичувача в процесі його роботи традиційними методами та приладовими засобами є важкоздійсненним завданням, тому для його вирішення необхідні нові підходи та методи. Одним із варіантів критерію, за допомогою якого можна охарактеризувати поточний енергетичний стан накопичувача, є коефіцієнт ви-

користання активних матеріалів хімічного джерела струму, який, відповідно до закону Фарадея, виражається відомим в електрохімії рівнянням [2]:

$$\theta = (C_p / C_0) \cdot 100 \% = \frac{C_p}{k \cdot m} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

де C_p – ємність хімічного джерела струму під час розряду; C_0 – теоретична ємність, розрахована за електрохімічними еквівалентами; k – електрохімічний еквівалент розрядних процесів; m – активна маса, що бере участь у струмоутворювальному процесі.

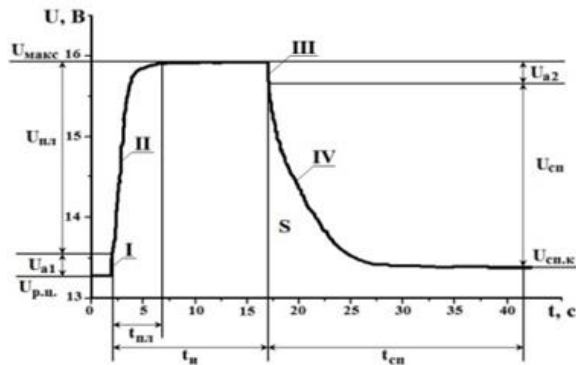
Із виразу (1) випливає, що фактична ємність накопичувача пропорційна величині активної маси електродів, що бере участь у струмоутворювальному процесі в поточний момент часу. У свою чергу величина активної маси пропорційна площі її поверхні, що бере участь в електрохімічному процесі в поточний момент часу. Таким чином, задача визначення поточного енергетичного стану накопичувача полягає у визначенні величини площі поверхні активної маси, що реагує, і тісно пов'язана з особливостями протікання електрохімічного процесу в об'ємі порового простору активних мас електродів у поточний момент часу. Достатньо інформативним методом контролю протікання електрохімічного процесу в хімічних джерелах струму є імпульсний гальваностатичний метод, який широко використовують в електрохімії [8]. Суть методу полягає в подачі на електрохімічну систему зарядного імпульсу струму заданої величини з подальшою реєстрацією сигналу відгуку, який відображає стадії процесу у формі функціональної залежності напруги системи від часу. Можливість застосування імпульсного гальваностатичного методу для управління процесом заряджання електрохімічного накопичувача енергії обґрунтована та експериментально підтверджена авторами роботи [5]. Типова форма сигналу відгуку накопичувача на зарядний імпульс наведена на рис. 3, а, вона відображає закономірну послідовність протікання стадій електрохімічного процесу в об'ємі порового простору активних мас електродів і містить необхідну інформацію про поточні значення параметрів процесу, у тому числі про величину площі S фігури під кривою деполари-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

зації після зняття зарядного імпульсу. Послідовність операцій із визначення значень параметрів накопичувача зі значень параметрів сигналу відгуку відображена в загальному вигляді на рис. 4.

На основі попередніх результатів досліджень з вивчення зв'язку параметрів сигналу відгуку, що відображають параметри процесу, із параметрами хімічного джерела струму зроблено висновок, що величина площі S пропорційна величині запасеної в накопичувачі енергії і може бути використана як інформаційний параметр, еквівалентний енергетичному параметру накопичувача.

a – a



б – б

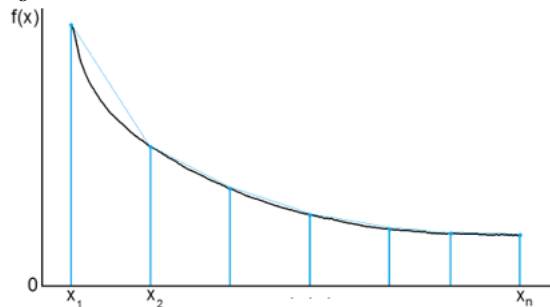


Рис. 3. Сигнал відгуку електрохімічного накопичувача енергії на тестовий імпульс струму:

a – форма сигналу відгуку;

б – приклад поділу кривої деполяризації на відрізки для визначення площі S

Fig. 3. The response signal of the electrochemical energy storage device to the test current pulse:

a – the shape of the response signal;

b – an example of dividing the depolarization curve into segments to determine the area S

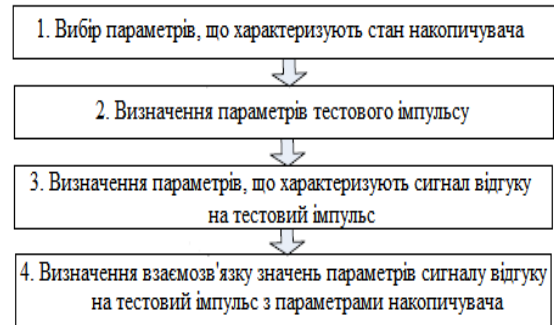


Рис. 4. Послідовність виконання операцій щодо визначення значень параметрів накопичувача за параметрами сигналу відгуку

Fig. 4. Operation sequence to determine the values of the storage device parameters by the response signal parameters

Із метою обґрунтування пропорційної залежності величини запасеної в накопичувачі енергії від значення величини площі S під кривою деполяризації коротко розглянемо стадії протікання електрохімічного процесу, за умови впливу на накопичувач зарядного імпульсу струму, та їх відображення на сигналі відгуку на рис. 3, *a*. У момент подачі на накопичувач зарядного імпульсу відбувається зарядка подвійного електричного шару на межі розділення активних мас та електроліту в об'ємі порового простору електродів та падіння напруги на їхньому активному опорі, що відповідає ділянці *I* на сигналі відгуку. Далі протікає стадія поляризації, що відповідає ділянці *II* на сигналі відгуку, до виходу на плато в разі досягнення величини напруги насичення. У момент зняття імпульсу відбувається падіння напруги на активному опорі (ділянка *III* на сигналі відгуку) з переходом у стадію деполяризації – ділянка *IV* сигналу відгуку. Як впливає з рис. 3, *a*, ділянки *II* і *IV* сигналу відгуку, що відображають відповідно стадії поляризації та деполяризації в разі подачі на накопичувач імпульсу струму і його зняття, мають експоненційну залежність від часу $U(t)$, викликану нерівномірним розподілом концентрації електроліту та зарядів в об'ємі порового простору активних мас. При цьому процес розподілу описують відомим в електрохімії рівнянням макрокінетики в порових середовищах:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \rho \cdot S \cdot C_{\text{ef}} \cdot \frac{\partial U}{\partial t}, \quad (2)$$

де U – поточна напруга поляризації (деполяризації); ρ – ефективний питомий опір електроліту в порах; S – питома поверхня одиниці об'єму активної маси порового простору, що реагує; C_{ef} – ефективна ємність активної маси, що реагує на одиницю об'єму.

У нашому випадку інтерес представляє аналіз процесу деполяризації, параметри якого безпосередньо визначають значення величини площі S . Автори роботи [14] описують протікання цього процесу за імпульсного впливу на свинцево-кислотну комірку таким чином. Коли зарядний струм переривається під час зняття імпульсу, тобто за нульового значення зовнішнього струму, подвійний електричний шар залишається зарядженим і відбувається розряд подвійного електричного шару на електрохімічну реакцію, який супроводжується протіканням локального струму обміну i_0 в порах електродів. Інерційний процес розряду подвійного шару відповідає стадії деполяризації та супроводжується перерозподілом зарядів в об'ємі порового простору активних мас до моменту досягнення рівноважного стану системи. Швидкість перерозподілу зарядів в об'ємі порового простору активних мас визначають постійною часу системи, величину якої можна оцінити, коли прирівняти зарядний струм подвійного електричного шару до струму фарадєвської реакції. За допомогою лінійної кінетики, цю залежність можна звести до вигляду:

$$\tau_{\text{Rct}} = \frac{RTC}{Fi_0}, \quad (3)$$

де R – універсальна газова постійна; T – температура, К; C – питома ємність подвійного електричного шару; F – постійна Фарадея; i_0 – струм обміну (для кінетики реакції діоксиду свинцю $i_0 \sim 10^{-7}$ А/см² [14]).

Із рівняння (3) випливає, що постійна часу процесу змінюється прямо пропорційно величині питомої ємності подвійного електричного шару C та обернено пропорційно щільності струму обміну i_0 . Ураховуючи, що ємність подвійного шару прямо пропорційна величині

його заряду та площі поверхні активної маси, що бере участь в електрохімічній реакції під час розряду подвійного шару, можемо зробити висновок, що тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості процесу розряду подвійного шару та прямо пропорційна величині площі поверхні активної маси, що реагує. Як зазначено вище, величина площі поверхні активної маси, що бере участь у електрохімічному процесі в поточний момент часу, пропорційна величині тієї частини активної маси, яка визначає коефіцієнт її використання відповідно до виразу (1).

Для зручності визначення та більшої наочності зв'язку енергетичного стану накопичувача з параметрами сигналу відгуку представимо постійну часу перехідного процесу τ виразом із використанням параметрів перехідного процесу, узятих із рівняння (2):

$$\tau = R_n \cdot C_n, \quad (4)$$

де $R_n = U_n / i_0$ – поляризаційний опір; C_n – ємність активної маси на одиницю об'єму.

Для випадку розряду об'ємно-пористого конденсатора вираз для постійної часу набуває вигляду:

$$\tau = C_{\text{ef}} \cdot \rho_{\text{ef}} \cdot S, \quad (5)$$

де $\rho_{\text{ef}} = R_n / S$ – ефективний питомий опір електроліту в порах; S – питома поверхня одиниці об'єму порового простору, що реагує; C_{ef} – ефективна ємність активної маси, що реагує, на одиницю об'єму.

Якщо, за загальноприйнятим уявленням, перехідний процес практично закінчується в разі досягнення стану рівноваги, який для накопичувача відповідає величині напруги розімкненого кола U_{pc} , за час $t = (4-5)\tau$, то постійна часу визначає тривалість перехідного процесу, тобто тривалість стадії деполяризації, та прямо пропорційна величині площі S на сигналі відгуку під кривою деполяризації $U_{\text{сп}}$. У свою чергу, тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості процесу розряду подвійного шару й прямо пропорційна величині площі поверхні активної маси, що реагує. Отже, величина площі реагуючої поверхні активної маси, що реагує, за якою визначають коефіцієнт її використання,

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

прямо пропорційна величині площі S на сигналі відгуку під кривою деполяризації $U_{сп}$.

Таким чином, за закономірностями протікання електрохімічного процесу та аналізом взаємозв'язку параметрів перехідного процесу на стадії деполяризації, що впливають із рівнянь (1–5), з параметрами сигналу відгуку встановлено прямо пропорційний зв'язок величини фактичної поточної ємності накопичувача з величиною площі S на сигналі відгуку під кривою деполяризації $U_{сп(t)}$. Установлена залежність підтверджує можливість використання інформаційного параметра сигналу відгуку – поточного значення величини площі S , а як еквівалента енергетичного параметра накопичувача – коефіцієнта використання активних матеріалів.

Використання запропонованого спільного для контролю та управління інформаційного параметра дозволяє одночасно здійснювати об'єктивний контроль поточного стану накопичувача енергії та ефективно керувати його енергетичним станом для забезпечення працездатності в динамічних режимах роботи, суміщаючи таким чином функції контролю та управління.

Методика визначення величини площі S під експонентною кривою спаду напруги $U_{сп(t)}$ заснована на її чисельному інтегруванні за правилом трапеції з використанням програми обробки математичних та статистичних функцій Origin. Програма здійснює інтегрування кривих за таким алгоритмом:

1. Розраховує певний інтеграл апроксимованої функції $\int_a^b f(x)dx$.

2. Криву спаду напруги деполяризації ділиться на відрізки (приклад наведено на рис. 3, б).

3. Для формування трапеції використовує пари сусідніх значень, після чого площі трапецій підсумовує та інтеграл розраховує за такою формулою:

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

де i – крок зміни часу; x – напруга деполяризації, що відповідає кожному значенню часу.

Критерієм закінчення зарядки, що відповідає досягненню ступеня зарядженості накопичувача у 100 %, є сталість значень величини площі S . Інтегрування проведено на відрізку часу спаду напруги деполяризації $U_{сп}$, максимальна тривалість якого дорівнює тривалості паузи і становить 15 секунд. Дискретність вибірки визначено відношенням часу спаду $U_{сп}$ до часу вибірки, що дорівнює $k \times 0.00035c$, і встановлено зміною коефіцієнта k . У наших експериментах дискретність вибірки становила 0,017 с, що дозволило визначати величину площі з досить високою точністю. У результаті інтегрування функцій $U_{(T)}$ отримано графіки зміни значень площі S , наведених в умовних одиницях, де значення номінальної фактичної ємності накопичувача відповідає значенню 10.0.

Результати

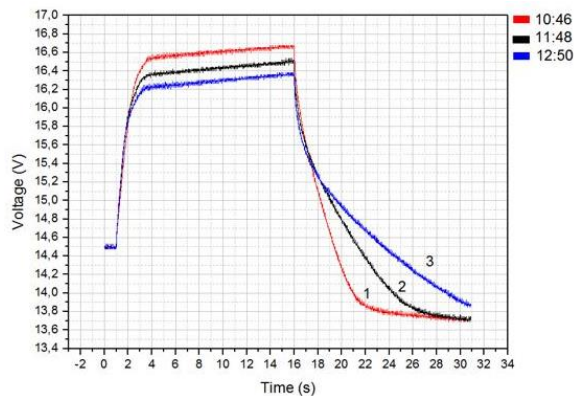
Пропонований метод управління апробовано на серії накопичувачів енергії на основі акумуляторних батарей 6СТ–60А3 із використанням експериментального стенда, описаного авторами роботи [9]. Як приклад на рис. 5 наведено порівняльні експериментальні дані, отримані під час керування процесом зарядки двох різних накопичувачів із використанням загального інформаційного параметра контролю та управління. На рис. 5, а наведено динаміку сигналу відгуку (1 – на початку, 2 – проміжний і 3 – в кінці зарядного процесу) накопичувача № 1, а на рис. 5, б – графік зміни величини площі S в процесі зарядки накопичувача № 1. Накопичувач новий стан. Його фактична ємність $C_{ф}$ на початку процесу зарядки становила $\sim 80\%$ від номінальної, тобто $C_{ф} \sim 0.8C_{н} \sim 48 \text{ А} \times \text{год}$, а в кінці зарядки стала номінальною – $C_{ф} = C_{н} = 60 \text{ А} \times \text{год}$, тобто 100 %, чому відповідають умовні значення ~ 8.0 та ~ 10.0 на графіку. Зарядний процес протікав плавно в міру збільшення ємності накопичувача до досягнення кінцевого постійного значення, якому відповідало постійне значення величини площі $S = 10$, після чого зарядний процес припинявся. Значення величини площі реєстрували з інтервалами 30 хвилин. Час зарядки становив чотири години.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Накопичувач № 2 до випробувань перебував в експлуатації та мав приблизно таку саму початкову фактичну ємність, як накопичувач № 1, тобто $C_{\text{ф}} \sim 0.8C_{\text{н}} \sim 48 \text{ А} \times \text{год}$. З урахуванням попередньої експлуатації накопичувача його зарядку проводили у двох режимах для порівняльної оцінки ефективності управління процесом зарядки, із використанням інформаційного енергетичного параметра. На рис. 5, в наведено графік зміни величини площі S у процесі зарядки накопичувача постійним зарядним струмом у стандартному режимі, що рекомендовано заводом-виробником. Час зарядки в цьому режі-

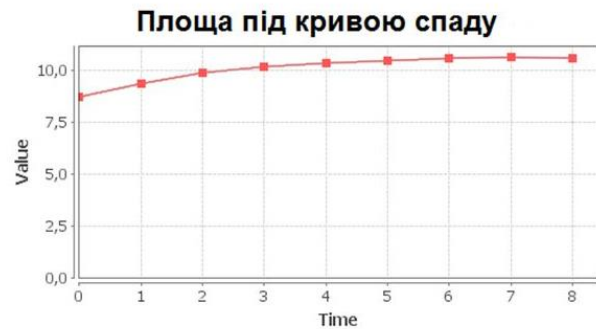
мі становить близько восьми годин. На рис. 5, з наведено графік зміни величини площі S у процесі зарядки накопичувача в прискореному режимі. Час зарядки становив близько чотирьох годин, при цьому перегріву накопичувача в процесі зарядки не спостерігалось. Фактична ємність накопичувача склала $\sim 0.9C_{\text{н}} = 54 \text{ А} \times \text{год}$. Результати експерименту підтвердили доцільність використання спільного інформаційного енергетичного параметра контролю поточного стану та управління режимами роботи накопичувача з метою підвищення ефективності його експлуатації.

а – а



Накопичувач №1

б – б



Накопичувач №1

в – в



Накопичувач №2

з – д



Накопичувач №2

Рис. 5. Результати експерименту:

а – динаміка сигналу відгуку накопичувача в процесі зарядання;
б – відповідний наведеній динаміці графік зміни площі S під кривою деполаризації у процесі зарядки накопичувача; в і з – графіки зміни площі S накопичувача за різних режимів зарядки

Fig. 5. Experimental results:

а – the dynamics of the response signal of the storage device during charging;
б – graph corresponding to the change dynamics in the area S under the depolarization curve during charging the storage device; c and d – graphs of changes in the area S of the storage device during different charging modes

Наукова новизна та практична значимість

1. Установлено, що основним параметром, який визначає поточну працездатність накопичувача в динамічних режимах роботи, є поточна фактична ємність.

2. Запропонований метод дозволяє визначити значення поточної фактичної ємності, використовуючи як узагальнений енергетичний параметр коефіцієнт використання активних матеріалів.

3. Наведене теоретичне обґрунтування пропорційної залежності величини параметра сигналу відгуку – площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку накопичувача на зарядний імпульс, від величини узагальненого енергетичного параметра накопичувача дає можливість використовувати величину площі S як інформаційний параметр, еквівалентний узагальненому енергетичному параметру.

4. Використання величини площі S як спільного інформаційного параметра дозволяє поєднувати функції контролю поточного енергетичного стану та оптимального керування режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів та спрощує виконання відповідних операцій.

Висновки

Проведені дослідження наявних методів управління режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії показали необхідність вибору критерію контролю поточного стану та

оперативного управління динамічними режимами роботи накопичувача, який об'єктивно оцінює його працездатність. Обґрунтовано та експериментально підтверджено, що для підвищення ефективності використання електрохімічних накопичувачів енергії в динамічних режимах роботи постає необхідність розробки методів, заснованих на застосуванні інформації про поточний енергетичний стан накопичувача. На базі класичної теорії електрохімічної кінетики запропоновано імпульсний адаптивний метод контролю поточного енергетичного стану накопичувача з використанням як поточного енергетичного параметра накопичувача узагальненого енергетичного параметра – коефіцієнта використання активних матеріалів. Інформаційним еквівалентом коефіцієнта використання активних матеріалів є величина площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку накопичувача на зарядний імпульс. Використання спільного інформаційного параметра дозволяє поєднувати функції контролю та управління зарядним процесом електрохімічних накопичувачів енергії, що спрощує виконання відповідних операцій. Результати експериментальної перевірки підтверджують багатофункціональність імпульсних методів контролю та управління електрохімічними накопичувачами енергії.

Робота має прикладний аспект, оскільки дає можливість удосконалити наявні імпульсні методи контролю та керування режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії у складі систем енергозабезпечення транспортних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасьев А. С., Болдырев М. А., Воронцов П. С., Сулов В. М., Котов Ю. Т., Вороницын В. К., А. А. Камусин. Система контроля и управления высокоомощных литий-ионных аккумуляторных батарей. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2019. № 1. С. 161–170. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.161>
2. Гинделис Я. Е. *Химические источники тока*. Саратов : Изд-во Саратовского университета, 1984. 174 с.
3. Дасоян М. А., Курзуков Н. И., Тютрюмов О. С., Ягнятинский В. М. *Стартерные аккумуляторные батареи : Устройство, эксплуатация и ремонт*. Москва : Транспорт, 1991. 255 с.
4. Дзензерский В. А., Гниленко А. Б., Плаксин С. В., Погорелая Л. М., Шкиль Ю. В. Перспективная транспортно-энергетическая система на основе интеграции магнитолевитационной технологии и распределенной фотоэлектрической электростанции. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 1 (73). С. 77–86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

5. Дзензерський В. А., Житник Н. Е., Плаксин С. В., Лисунова В. В. Управление процессом зарядки электрохимического накопителя энергии. *Електротехніка та електроенергетика*. 2018. № 1. С. 42–53.
DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-5>
6. Кислий Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983>
7. Оспанбеков Б. К. *Оптимизация ресурсопределяющих эксплуатационных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей* : дисс. ... канд. техн. наук. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. Москва, 2017. 160 с.
8. Феттер К. *Электрохимическая кинетика*. Москва : Химия, 1967. 857 с.
9. Banguero E., Correcher A., Perez-Navarro A., Morant F., Aristizabal A. A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*. 2018. Vol. 11. Iss. 1021. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11041021>
10. Bayati M., Abedi M., Farahmandrad M., Gharehpetian G. B., Tehrani K. Important Technical Considerations in Design of Battery Chargers of Electric Vehicles. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 18. P. 1–20.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185878>
11. Chen G.-J., Liu Y.-H., Cheng Y.-S., Pai H.-Y. A Novel Optimal Charging Algorithm for Lithium-Ion Batteries Based on Model Predictive Control. *Energies*. 2021. Vol. 14. Iss. 8. P. 1–18.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082238>
12. Huang X., Li Y., Acharya A. B., Sui X., Meng J., Teodorescu R., Stroe D.-I. A Review of Pulsed Current Technique for Lithium-ion Batteries. *Energies*. 2020. Vol. 13. Iss. 10. P. 1–18.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en13102458>
13. Pakhomova V. M., Skaballanovich T. I., Bondareva V. S. Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Science and Transport Progress*. 2019. № 2 (80). P. 77–90.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092>
14. Srinivasan V., Wang G. Q., Wang C. Y. Mathematical Modeling of Current-Interrupt and Pulse Operation of Valve-Regulated Lead Acid Cells. *Journal of The Electrochemical Society*. 2003. Vol. 150. Iss. 3. P. A316–A325. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1541005>
15. Yao L., Xu S., Tang A., Zhou F., Hou J., Xiao Y., Fu Z. A Review of Lithium-Ion Battery State of Health Estimation and Prediction Methods. *World Electric Vehicle Journal*. 2021. Vol. 12. Iss. 113. P. 1–23.
DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12030113>

S. V. PLAKSIN^{1*}, A. M. MUKHA^{2*}, D. V. USTYMENKO^{3*}, M. Y. ZHYTNYK^{4*},
R. Y. LEVCHENKO^{5*}, Y. M. CHUPRYNA^{6*}, O. O. HOLOTA^{7*}

^{1*}Dep. «Control Systems in Vehicles», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 370 21 82, e-mail svp@westa-inter.com, ORCID 0000-0001-8302-0186

^{2*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{3*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

^{4*}Dep. «Control Systems in Vehicles», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 32 30 54, e-mail zhitnik@westa-inter.com, ORCID 0000-0002-1761-678X

^{5*}Dep. «Control Systems in Vehicles», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 32 30 54, e-mail levchenko.ruslana@westa-inter.com, ORCID 0000-0003-2327-009X

^{6*}Dep. «Control Systems in Vehicles», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (0562) 32 30 54, e-mail nesty.lords@gmail.com, ORCID 0000-0002-0986-1283

^{7*}Dep. «Control Systems in Vehicles», Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Pysarzhevskoho St., 5, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (096) 356 23 94, e-mail sashagolota3012@gmail.com, ORCID 0000-0002-0282-2767

Method of Operational Control and Management of Electrochemical Energy Storage Device in the Systems of Electricity Supply of Vehicles

Purpose. The main purpose of our work is to develop a method of rational control of dynamic operation modes of electrochemical energy storage devices to increase the efficiency of their operation as part of the energy supply systems of vehicles. **Methodology.** The authors reviewed the world literature on the topic of the work. The existing control methods of electrochemical energy storage devices were systematized and classified. Peculiarities and possibilities of their application taking into account the specifics of operation on vehicles, which are characterized by dynamic modes with unpredictable changes in the energy balance due to uncontrolled undercharges and overcharges were taken into account. The analysis of existing control methods showed that their common disadvantage is the use as information parameters to control and manage the operation modes of storage device, such as voltage and operating current, the values of which do not correspond to the current energy state of the device due to the fleeting nature of transient electrochemical processes in the device during operation in dynamic modes. The conclusion is made about the need to take into account the energy parameters of storage devices in the process of managing dynamic modes, which most fully and objectively reflect their performance. The advantage of pulse control methods of storage devices in dynamic modes of operation over DC methods is shown. **Findings.** The authors substantiated and experimentally confirmed the versatility of the developed galvanostatic method, which allows simultaneous control of the current energy state of the storage device and operational management of dynamic modes of its operation using a common criterion of control and management – the utilization factor of active materials, the information equivalent of which is the value of the area under the depolarization curve on the response signal of the device to the test pulse. **Originality.** For the first time it is proposed to combine the functions of control of the current energy state of the storage device and operational management of the dynamic modes of its operation with the use of the utilization factor of active materials. **Practical value.** The obtained results can be used to ensure the optimal operation mode of energy storage in the power supply systems of vehicles.

Keywords: electrochemical energy storage device; operating mode control methods; pulsed galvanostatic method; response signal; active material utilization factor; combination of control and management functions; vehicle

REFERENCES

1. Afanasev, A. S., Boldyrev, M. A., Vorontsov, P. S., Suslov, V. M., Kotov, Yu. T., Voronitsyn, V. K., & Kamusin, A. A. (2019). The Control and Management System of High-Power Lithium-Ion Batteries. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 1, 161-170. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.161> (in Russian)
2. Gindelis, Ya. Ye. (1984). *Khimicheskie istochniki toka*. Saratov: Publisher Saratov University. (in Russian)
3. Dasoyan, M. A., Kurzakov, N. I., Tyutryumov, O. S., & Yagnyatinskiy, V. M. (1991). *Starternye akkumulyatornye batarei: Ustroystvo, ekspluatatsiya i remont*. Moscow: Transport. (in Russian)
4. Dzenzerskiy, V. A., Gnilenko, A. B., Plaksin, S. V., Pogorelaya, L. M., & Shkil, Yu. V. (2018). Perspective transport-power system based on the integration of maglev-technology and distributed photo-electric station. *Science and Transport Progress*, 1(73), 77-86. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/123116> (in Russian)
5. Dzenzerskiy, V. A., Zhitnik, N. Ye., Plaksin, S. V., & Lisunova, V. V. (2018). Controlling the electrochemical energy storage charging process. *Electrical engineering and Power engineering*, 1, 42-53. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-1-5> (in Russian)
6. Kyslyi, D. M. (2016). Energy saving modes definition of trains handling. *Science and Transport Progress*, 1(61), 71-84. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60983> (in Ukrainian)
7. Ospanbekov, B. K. (2017). *Optimizatsiya resursoopredelyayushchikh ekspluatatsionnykh rezhimov tyagovykh akkumulyatornykh batarey elektromobiley*. (PhD dissertation). Moskovskiy avtomobilno-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, Moscow, Russia. (in Russian)
8. Fetter, K. (1967). *Elektrokhimicheskaya kinetika*. Moscow: Chemistry. (in Russian)
9. Banguero, E., Correcher, A., Perez-Navarro, A., Morant, F., & Aristizabal, A. (2018). A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 11(1021), 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/en110410211> (in English)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

10. Bayati, M., Abedi, M., Farahmandrad, M., Gharehpetian, G. B., & Tehrani, K. (2021). Important Technical Considerations in Design of Battery Chargers of Electric Vehicles. *Energies*, 14(18), 1-20.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14185878> (in English)
11. Chen, G.-J., Liu, Y.-H., Cheng, Y.-S., & Pai, H.-Y. (2021). A Novel Optimal Charging Algorithm for Lithium-Ion Batteries Based on Model Predictive Control. *Energies*, 14(8), 1-18.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082238> (in English)
12. Huang, X., Li, Y., Acharya, A. B., Sui, X., Meng, J., Teodorescu, R., & Stroe, D.-I. (2020). A Review of Pulsed Current Technique for Lithium-ion Batteries. *Energies*, 13(10), 1-18.
DOI: <https://doi.org/10.3390/en13102458> (in English)
13. Pakhomova, V. M., Skaballanovich, T. I., & Bondareva, V. S. (2019). Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Science and Transport Progress*, 2(80), 77-90. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092> (in English)
14. Srinivasan, V., Wang, G. Q., & Wang, C. Y. (2003). Mathematical Modeling of Current-Interrupt and Pulse Operation of Valve-Regulated Lead Acid Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(3), A316-A325. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.1541005> (in English)
15. Yao, L., Xu, S., Tang, A., Zhou, F., Hou, J., Xiao, Y., & Fu, Z. (2021). A Review of Lithium-Ion Battery State of Health Estimation and Prediction Methods. *World Electric Vehicle Journal*, 12(113), 1-23.
DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj12030113> (in English)

Надійшла до редколегії: 09.08.2021

Прийнята до друку: 10.12.2021