

Д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСІН, М. Я. ЖИТНИК, Р. Ю. ЛЕВЧЕНКО, С. Я. ОСТАПОВСЬКА

Україна, м. Дніпро, Інститут транспортних систем та технологій НАН України

E-mail: levchenko.ruslana@westa-inter.com

ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ЗАРЯДНИМ ПРОЦЕСОМ НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

Обґрунтовано та експериментально підтверджено багатофункціональність розробленого авторами одноімпульсного гальваностатичного методу, який дозволяє поєднувати функції контролю поточного стану та оперативного управління процесом зарядки накопичувача при його роботі в динамічному режимі. Критерієм контролю та управління обрано узагальнений енергетичний показник — коефіцієнт використання активних матеріалів, інформаційним еквівалентом якого є величина площі під кривою деполяризації на сигналі відгуку накопичувача після зняття зарядного імпульсу.

Ключові слова: накопичувач енергії, імпульсний гальваностатичний метод, сигнал відгуку, коефіцієнт використання матеріалів, узагальнений енергетичний показник.

Останніми роками активно проводяться дослідження щодо застосування накопичувачів енергії у різних галузях електроенергетики [1, 2]. Накопичувачі енергії є найважливішим невіддільним елементом автономних енергосистем, особливо енергосистем на базі відновлюваних джерел енергії, а також на транспортних засобах різного призначення, де вони є основним джерелом енергії. Оскільки їх роль у цих енергосистемах є ключовою, питання управління режимами роботи накопичувачів має важливе значення, а вибір методів управління є актуальною задачею.

Накопичувач енергії — це багатофункціональний електротехнічний комплекс, до складу якого входять електрохімічна система накопичення й зберігання енергії та система управління, яка визначає функціонал накопичувача залежно від розв'язуваних завдань. Основними режимами роботи накопичувача енергії, якими необхідно керувати, є робочий, коли витрачається запасена енергія, та режим заряджання з метою поповнення витраченої енергії. Методи управління електротехнічними комплексами, до яких належать і накопичувачі енергії, розробляються за такими основними напрямками [1]:

— датчикові методи управління, засновані на прямому вимірі значень керованих параметрів;

— бездатчикові методи управління, засновані на створенні моделей управління та визначенні величини керованих параметрів у рамках відповідних моделей;

— адаптивні методи управління, засновані на пошуку оптимального результату за спеціально розробленим алгоритмом шляхом підстроювання потоку даних, що надходять від засобів виміру, під набір відповідних аналізованих параметрів.

Нашою метою було розроблення методу оперативного контролю та управління зарядним процесом електрохімічного накопичувача енергії в динамічних режимах його роботи.

Існуючі методи управління процесами велелектрохімічних накопичувачів енергії та їх класифікація

Методи управління електрохімічними накопичувачами в автономних системах достатньо різноманітні та досить повно відображені у численних роботах, наприклад [3—9]. Традиційними є методи управління зарядним процесом з використанням постійного струму та постійної напруги, а також їх комбінацій [3, 4]. У роботі [5] автори наводять оглядові відомості про імпульсні методи управління процесом зарядки та вплив імпульсної зарядки на параметри літій-іонних акумуляторів. Низка робіт, наприклад [6], присвячені дослідженням методів прогностичного управління, які дозволяють передбачати працездатність накопичувача залежно від умов його експлуатації в мікромережах на основі відновлюваних джерел енергії. Подальший розвиток отримують адаптивні методи управління [7], в основі яких лежить пошук оптимального результату шляхом підстроювання під потік даних, що надходять від засобів виміру (адаптивний алгоритм).

За результатами аналізу літературних джерел інформації виконано систематизацію та класифікацію методів управління режимом зарядки електрохімічних накопичувачів енергії та відзначено особливості їх застосування. Виходячи з інформації на **рис. 1**, можна зробити висновки, що низка методів знаходяться на стадії досліджень і розроблення або використовуються в лабораторних умовах і з різних при-

СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

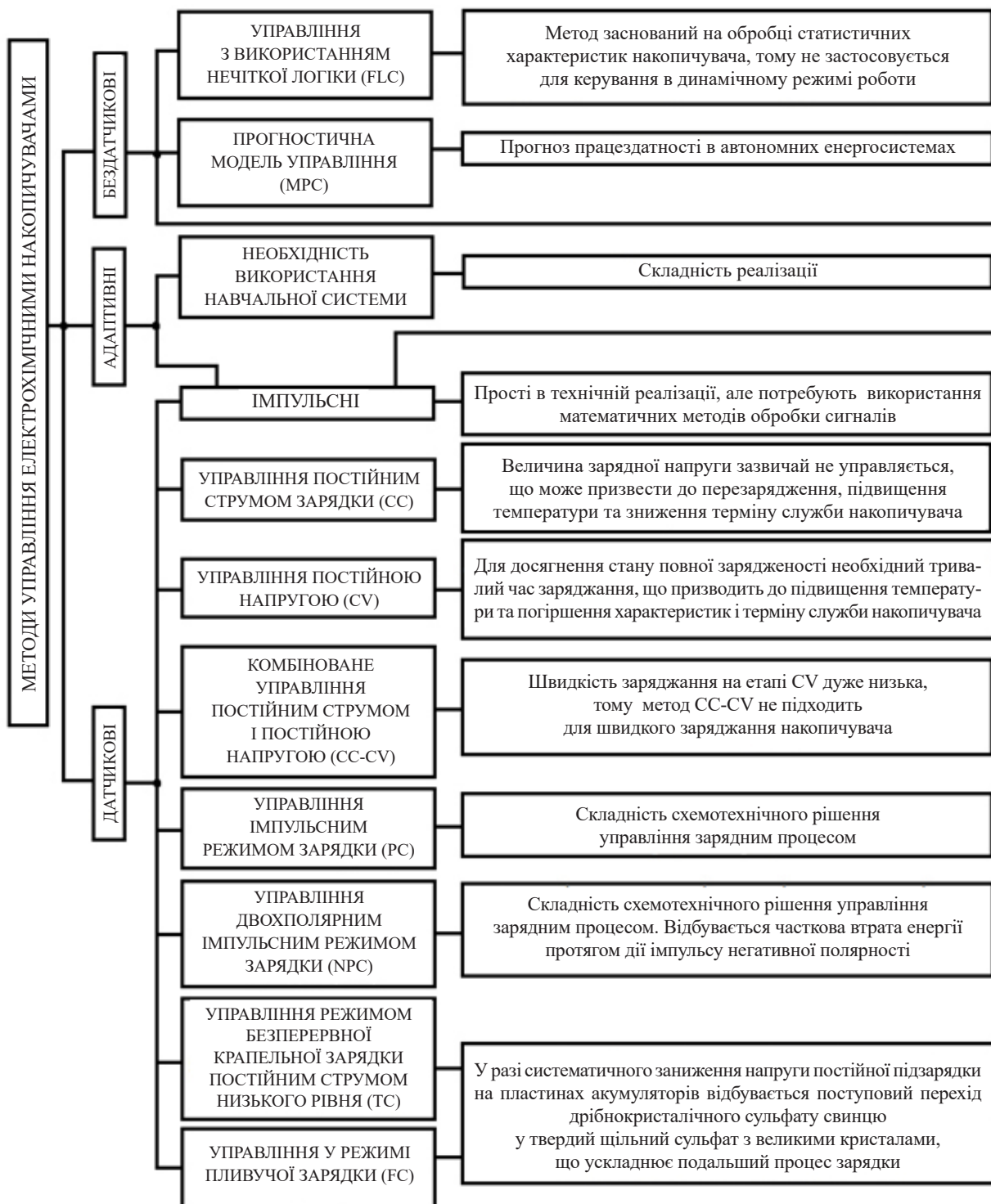


Рис. 1. Методи управління режимом зарядки електрохімічних накопичувачів енергії

чин не отримали практичного застосування. Поряд із цим зазначимо, що на сьогодні практичне застосування знаходять переважно методи управління зарядним процесом постійним струмом і постійною напругою та їх комбінації, або постійнострумові методи, та імпульсні методи управління. У постійнострумових методах контрольованими та керованими параметра-

ми є зарядний струм та 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 автономно-

го електропостачання необхідно розглядати з урахуванням специфіки їх функціонування у цих системах. У загальному випадку раціональним способом ефективної експлуатації електрохімічного накопичувача енергії у системі автономного електропостачання є його робота у номінальних режимах. Проте дотримання номінальних режимів роботи накопичувача не завжди дозволяє повною мірою реалізувати робочі режими власне системи електропостачання. Наприклад, у випадку експлуатації акумуляторних батарей з невідомим рівнем заряду на транспортному засобі (ТЗ) існує небезпека зниження запасу енергії в системі електропостачання нижче мінімально допустимого рівня у момент, коли потрібна передача додаткової енергії тяговому приводу в форсованому режимі його роботи. Така ситуація означає, що ТЗ не здатен реалізувати задані динамічні характеристики. Протиріччя може бути вирішено шляхом виконання раціональних умов експлуатації накопичувача, за яких відбуватиметься збереження його енергії в допустимих межах. Це може бути досягнуто використанням відповідного методу контролю поточного енергетичного стану накопичувача й адекватного цьому стану методу оперативного управління режимами його роботи. Існують різні режими експлуатації накопичувачів хімічних джерел струму, що входять до складу систем енергозабезпечення залежно від їх призначення. Основні з них представлені на **рис. 2** [1, с. 10].

Найбільш інтенсивний режим експлуатації — чергування циклів «заряд-розряд» — характерний для тягових акумуляторних батарей. Під час функціонування накопичувача у системі електропостачання транспортного засобу переважають інтенсивні цикли, коли протягом денної експлуатації тягова акумуляторна батарея піддається декільком повним циклам «заряд-розряд» (рис. 2, *г*). У зв'язку з тим, що чергування періодичності циклів є випадковим процесом, тобто робота ТЗ нерегламентована та непередбачувана, накопичувач може знаходитись у робочому стані невизначений час без заряджання. В результаті систематичних недозаряджень виникає непоправна втрата ємності, викликана утворенням

цільної сульфатної плівки на поверхні активних мас електродів. Перетворення цієї плівки в активну масу ускладнює процес подальшої зарядки накопичувача, оскільки потребує для цього додаткової витрати як енергії, так і часу.

Поряд із проблемою недозарядження стоїть проблема перезарядження — якщо досягнуто стан повної зарядженості, заряджання накопичувача слід припинити. Однак в реальних умовах експлуатації накопичувача в динамічних режимах воно триває через відсутність об'єктивних критеріїв зарядженості. Систематичне перезаряджання сприяє розпушенню та зсуву активної маси з пластин електродів, що також призводить до непоправної втрати ємності накопичувача. Звідси випливає, що при експлуатації накопичувача в динамічних режимах він завжди перебуває або у режимі недозарядження, або перезарядження, внаслідок чого порушується його енергетичний баланс.

До глибокого розрядження та надмірного перезарядження, перевищення критичних рівнів струмів і температури дуже чутливі літій-іонні акумулятори. Такі явища можуть призвести до незворотних процесів у структурі самої батареї, до її пошкодження і, як наслідок, до зниження продуктивності накопичувача енергії на їх основі. Отже, для ефективної роботи накопичувача в динамічному режимі та подовження терміну служби необхідно підтримувати його енергетичний баланс. Крім того, в реальному хімічному джерелі струму крім струмоутворюючих реакцій завжди мають місце небажані побічні процеси (звичай незворотні) електрохімічної та хімічної природи, на які витрачається певна кількість енергії. В результаті розрядна ємність кожного циклу виявляється меншою за кількість енергії, витраченої на попередній стадії зарядки, тобто фактична ємність накопичувача знижується від циклу до циклу. У зв'язку з цим у будь-якому варіанті експлуатації накопичувача необхідно раціонально використовувати його енергію шляхом контролю поточного енергетичного стану та оперативного управління режимами роботи відповідно до фактичної залишкової ємності. Крім того, функціонування накопичувача в динамічних режимах з короткочасними періодами «розряд-заряд» су-

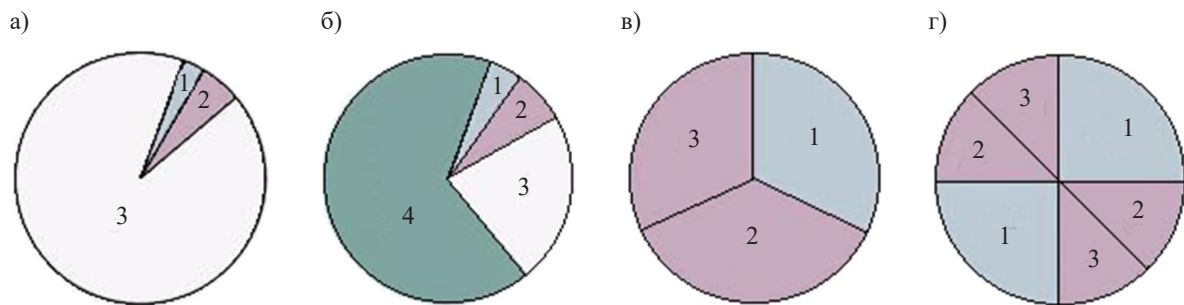


Рис. 2. Режими експлуатації стаціонарних (*а*), стартерних (*б*), тягових (*в* — в нормальному режимі, *г* — в інтенсивному) акумуляторних батарей:

1 — розряд; 2 — повний заряд; 3 — частковий заряд; 4 — неробочий режим

проводжується швидкоплинними перехідними процесами в електрохімічній системі накопичувача. Використовувати в цих режимах такі контрольовані параметри, як величини напруги та струму, недоцільно через непостійність їх величини. З цієї ж причини ці параметри не можна використовувати як критерій закінчення зарядного процесу, оскільки це може призвести до перезарядження або до систематичного недозарядження накопичувача.

Порівняно новим застосуванням зарядних технологій, що швидко розвивається, є парк електромобілів, в них динамічний режим роботи накопичувачів — 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 розв'язання такої задачі на цьому етапі є розроблення та впровадження технологій швидкої зарядки накопичувачів постійним струмом з використанням потужних силових зарядних пристроїв. При цьому системою захисту обладнано лише зарядні пристрої для запобігання виходу їх з ладу у разі перевищення допустимих значень зарядних струмів і напруги, в той час як безпека накопичувача в режимі прискореної зарядки забезпечується лише надійною ізоляцією по ланцюгах живлення [8]. При цьому основним критерієм визначення закінчення зарядного процесу є розрахований для конкретного типу накопичувача час заряджання, тривалість якого залежить від режиму експлуатації електромобіля і може становити, як зазначають автори [8], від 24 годин до 15 хвилин. Але слід зазначити, що без урахування залишкової ємності такий критерій не дозволяє об'єктивно оцінити поточний енергетичний стан накопичувача, що може негативно позначитися на терміні його експлуатації та призвести до передчасного виходу з ладу.

Аналіз існуючих методів управління процесом заряджання накопичувачів та урахування зазначеної специфіки їх функціонування в системах автономного електропостачання вказує на те, що для оперативного управління динамічними режимами роботи накопичувача з метою раціонального використання його енергоресурсу необхідно удосконалити існуючі та розробляти нові методи.

Імпульсний гальваностатичний метод управління зарядним процесом електрохімічних накопичувачів енергії

Для ефективної експлуатації електрохімічного накопичувача енергії потрібен метод оперативного управління режимами його роботи, який передбачає вибір параметрів контролю й управління та діапазон їх відхилення від заданих значень, у межах якого забезпечується збалансований енергетичний режим функціонування накопичувача. Як зазначалося вище, в постійнострумових методах управління

контрольованими та керованими параметрами зарядного процесу є зарядний струм і зарядна напруга, значення яких не завжди відповідають поточному енергетичному стану накопичувача. Як видно з рис. 1, найбільш універсальними методами управління процесом зарядки накопичувачів енергії є імпульсні методи різної модифікації, які можуть бути реалізовані у вигляді датчикових, бездатчикових або адаптивних методів. В імпульсних методах керованими є параметри зарядних імпульсів — частота, тривалість, амплітуда та пауза між імпульсами, що дозволяють здійснювати багатопараметричне управління процесом зарядки. Критеріями закінчення зарядного процесу в імпульсних методах управління, як і в постійнострумових, є мінімальне значення зарядного струму, значення постійної напруги накопичувача та постійне значення щільності електроліту в наливних акумуляторах, які з 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. З цього погляду перспективною представляється 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 розв'язання необхідні нові підходи та методи. Одним з варіантів вибору критерію, за допомогою якого можна охарактеризувати поточний енергетичний стан накопичувача, є коефіцієнт використання активних матеріалів хімічного джерела струму, який відповідно до закону Фарадея виражається відомим в електрохімії рівнянням

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

де C_p — ємність хімічного джерела струму в процесі розряджання;

C_0 — теоретична ємність, розрахована за електрохімічними еквівалентами;

k — електрохімічний еквівалент розрядних процесів;

m — активна маса, що бере участь у процесі струмоутворення.

З виразу (1) випливає, що фактична ємність накопичувача є пропорційною активній масі електродів, яка бере участь у процесі струмоутворення в поточний момент часу. Своєю чергою активна маса пропорційна площі поверхні, що бере участь в електрохімічному процесі в поточний момент часу. Таким чином, задача визначення поточного енерге-

тичного стану накопичувача зводиться до визначення площі реагуючої поверхні активної маси ϵ і є тісно пов'язаною з особливостями протікання електрохімічного процесу в об'ємі порового простору активних мас електродів в поточний момент.

Інформативним методом контролю протікання електрохімічного процесу є імпульсний гальваностатичний метод, який широко використовується в електрохімії. Суть методу полягає у подачі на електрохімічну систему зарядного імпульсу струму заданої величини з подальшою реєстрацією сигналу відгуку, що відображає стадії процесу у формі функціональної залежності напруги системи від часу. Можливість застосування імпульсного гальваностатичного методу для контролю енергетичного стану хімічного джерела струму обґрунтована та експериментально підтверджена у роботі [9].

Наведена на **рис. 3** типова форма сигналу відгуку накопичувача на зарядний імпульс відображає закономірну послідовність протікання стадій електрохімічного процесу в об'ємі пористого простору активних мас електродів і містить необхідну інформацію про поточні значення параметрів процесу, в тому числі про величину площі S фігури під кривою деполяризації $U_{сп}$ після зняття зарядного імпульсу. На основі попередніх результатів досліджень з вивчення зв'язку параметрів сигналу відгуку, що відображають параметри процесу, з параметрами хімічного джерела струму зроблено висновок, що площа S пропорційна величині запасеної в накопичувачі енергії та може бути використана як інформаційний параметр, еквівалентний енергетичному параметру.

З метою обґрунтування пропорційності залежності величини запасеної в накопичувачі енергії від площі S під кривою деполяризації $U_{сп}$ коротко розглянемо стадії протікання електрохімічного процесу в умовах впливу на накопичувач зарядного імпульсу струму, використовуючи рис. 3.

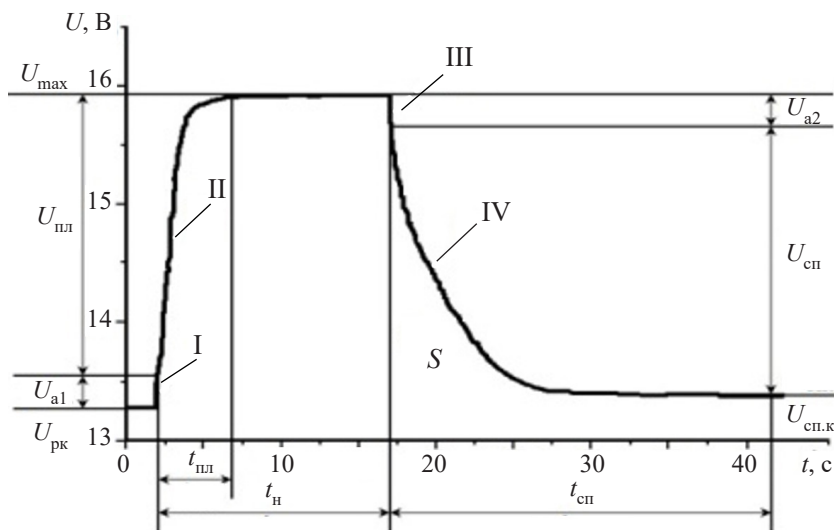


Рис. 3. Форма сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії

До подачі на накопичувач зарядного імпульсу напруга на ньому дорівнює величині напруги розімкненого кола $U_{рк}$. У момент подачі на накопичувач зарядного імпульсу відбувається стрибок напруги, який супроводжується зарядженням подвійного електричного шару на межі розділу активних мас та електроліту в об'ємі порового простору електродів та падінням напруги U_{a1} на їхньому активному опорі, що відповідає ділянці I на сигналі відгуку. Далі протікає стадія поляризації $U_{пл}$ (ділянка II) до виходу на плато при досягненні величини напруги насичення U_{max} . У момент зняття імпульсу відбувається падіння напруги на активному опорі U_{a2} (ділянка III) з переходом у стадію деполяризації $U_{сп}$ (ділянка IV). Як впливає з рис. 3, ділянки II та IV сигналу відгуку, що відображають, відповідно, стадії поляризації та деполяризації при подачі на накопичувач імпульсу струму та при його знятті, є експоненційними кривими, що викликані нерівномірним розподілом концентрації електроліту та зарядів в об'ємі порового простору активних мас. При цьому процес розподілу описується відомим в електрохімії рівнянням макрокінетики в пористих середовищах

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

- де U — поточна напруга поляризації (деполяризації);
 ρ — ефективний питомий опір електроліту в порах;
 S — площа поверхні одиниці об'єму реагуючої частини активної маси пористого простору;
 $C_{эф}$ — ефективна ємність реагуючої частини активної маси на одиницю об'єму.

У нашому випадку інтерес представляє аналіз процесу деполяризації, параметри якого безпосередньо визначаються величиною площі S . Автори роботи [10] описують протікання цього процесу при імпульсному впливі на свинцево-кислотну комірку таким чином. Коли зарядний струм переривається після зняття імпульсу, тобто при нульовому значенні зовнішнього струму, подвійний електричний шар залишається зарядженим. Внаслідок цього відбувається розряд подвійного електричного шару на електрохімічну реакцію з протіканням локального струму обміну i_0 в порах електродів. Інерційний процес розряду подвійного шару відповідає стадії деполяризації і супроводжується перерозподілом зарядів в об'ємі пористого простору до моменту досягнення рівноважного стану системи. Швидкість перерозподілу зарядів в об'ємі пористого простору активних мас визначається постійною часу системи τ_c , величину якої можна оцінити, при-

пущено, тобто при нульовому значенні зовнішнього струму, подвійний електричний шар залишається зарядженим. Внаслідок цього відбувається розряд подвійного електричного шару на електрохімічну реакцію з протіканням локального струму обміну i_0 в порах електродів. Інерційний процес розряду подвійного шару відповідає стадії деполяризації і супроводжується перерозподілом зарядів в об'ємі пористого простору до моменту досягнення рівноважного стану системи. Швидкість перерозподілу зарядів в об'ємі пористого простору активних мас визначається постійною часу системи τ_c , величину якої можна оцінити, при-

рівнявши зарядний струм подвійного електричного шару до струму фарадеївської реакції. Користуючись лінійною кінетикою, постійну часу системи можна привести до вигляду

$$\tau_c = \frac{RTC}{Fi_0}, \quad (3)$$

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 $i_0 \approx 10^{-7}$ А/см² [10]).

З рівняння (3) випливає, що постійна часу процесу змінюється прямо пропорційно питомій ємності подвійного електричного шару C і обернено пропорційно щільності струму обміну i_0 . Враховуючи, що ємність подвійного шару прямо пропорційна величині його заряду та площі поверхні тієї частини активної маси, що бере участь у електрохімічній реакції в процесі розрядження подвійного шару, можна зробити висновок, що тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості процесу розрядження подвійного шару та прямо пропорційна площі поверхні реагуючої частини активної маси. Як зазначалося вище, величина площі поверхні активної маси, що бере участь у електрохімічному процесі в поточний час, пропорційна величині тієї частини активної маси, яка і 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 з використанням параметрів перехідного процесу, взятих з рівняння (2):

$$\tau = R_{\Pi} C_{\Pi}, \quad (4)$$

де R_{Π} — поляризаційний опір, $R_{\Pi} = U_{\Pi} / i_0$;

C_{Π} — ємність активної маси, що припадає на одиницю об'єму.

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

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

де $\rho_{\text{еф}}$ — ефективний питомий опір електроліту в порах, $\rho_{\text{еф}} = R_{\Pi} / S$;

$C_{\text{еф}}$ — ефективна ємність реагуючої активної маси на одиницю об'єму.

Вважається, що перехідний процес закінчується за час $t \approx (4 \dots 5)\tau$, коли практично досягається стан рівноваги, який для накопичувача відповідає величині напруги розімкненого кола. З урахуванням цього можна вважати, що постійна часу τ визначає тривалість перехідного процесу, тобто тривалість стадії деполяризації, та є прямо пропорційною площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку. Своєю чер-

гою тривалість стадії деполяризації дорівнює тривалості процесу розрядження подвійного шару і є прямо пропорційною площі реагуючої поверхні активної маси. Отже, площа реагуючої поверхні активної маси, яка визначає коефіцієнт її використання, прямо пропорційна площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку.

Таким чином, ґрунтуючись на закономірностях протікання електрохімічного процесу в об'ємі пористого простору активних мас та на аналізі взаємозв'язку параметрів перехідного процесу на стадії деполяризації з параметрами сигналу відгуку, встановлено прямо пропорційний зв'язок величини фактичної ємності накопичувача з величиною площі S під кривою деполяризації на сигналі відгуку. Така залежність підтверджує можливість застосування поточного значення площі S як еквівалента енергетичного параметра накопичувача — коефіцієнта використання активних матеріалів. Тобто, інформаційний параметр S , спільний для контролю та управління, дозволяє одночасно здійснювати об'єктивний контроль поточного стану накопичувача енергії та ефективно управляти його енергетичним станом для забезпечення працездатності у динамічних режимах роботи.

Методика та результати досліджень

Пропонований метод контролю та управління був апробований на серії накопичувачів енергії на основі акумуляторних батарей 6СТ-60А3 на експериментальному стенді, описаному авторами у роботі [9]. Методика визначення величини площі S під експонентною кривою спаду напруги $U_{\text{сп}}(t)$ заснована на її чисельному інтегруванні за правилом трапеції за допомогою програми обробки математичних та статистичних функцій Origin. Програма здійснює інтегрування кривих за таким алгоритмом:

— розраховується певний інтеграл апроксимованої функції;

— крива спаду напруги деполяризації розподіляється на відрізки (рис. 4);

— для формування трапеції використовуються пари сусідніх значень, після чого площі трапецій підсумовуються, а інтеграл розраховується за формулою

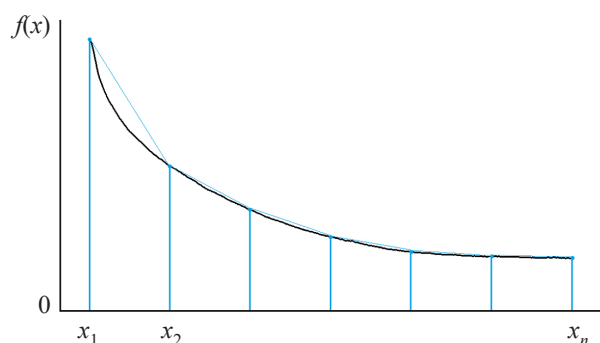


Рис. 4. Приклад розподілення кривої деполяризації сигналу відгуку електрохімічного накопичувача енергії на відрізки для визначення площі під кривою

$$\int_{x_1}^{x_n} f(x) dx \approx \sum_{i=1}^{n-1} 0,5[x_{i+1} - x_i][f(x_{i+1}) + f(x_i)], \quad (6)$$

де x — напруга деполяризації, що відповідає кожному значенню часу;

i — крок зміни часу.

Критерієм закінчення процесу заряджання, тобто досягнення 100% заряду накопичувача, є сталість величини площі S . Інтегрування проводилося на відрізок часу спадання напруги деполяризації $U_{сп}$, максимальна тривалість якого дорівнює тривалості паузи й становить 15 с. Дискретність вибірки визначалася відношенням часу спаду $U_{сп}$ до часу вибірки, що дорівнює 0,00035к с, і встановлювалася зміною коефіцієнта k . У наших експериментах дискретність вибірки становила 0,017 с, що дозволило визначати величину площі із досить високою точністю. В результаті інтегрування функцій $U(t)$ були отримані графіки зміни площі S (в умовних одиницях), де номінальній фактичній ємності накопичувача відповідає значення 10,0.

Для оцінки ефективності використання пропонуваного інформаційного параметра були проведені експериментальні дослідження процесу зарядки двох різних накопичувачів: № 1 знаходився у новому стані, № 2 до випробувань перебував в експлуатації.

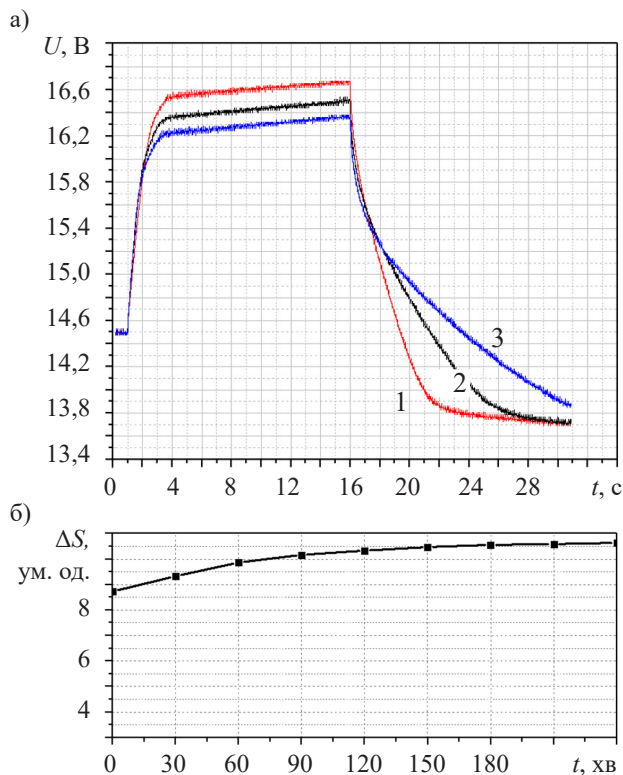


Рис. 5. Результати дослідження процесу заряджання накопичувача № 1:

a — сигнал відгуку на початку зарядного процесу (1), на проміжній стадії (2) та наприкінці (3); b — графік зміни площі S під кривою деполяризації

На рис. 5, a наведено динаміку сигналу відгуку накопичувача № 1 на початку зарядного процесу, на проміжній стадії та наприкінці, а на рис. 5, b — відповідний цій динаміці графік зміни площі S . Фактична ємність C_{ϕ} накопичувача на початку процесу зарядки становила приблизно 80% від номінальної: $C_{\phi} \approx 0,8C_n \approx 48$ А·ч, а наприкінці досягла номінального значення: $C_{\phi} = C_n = 60$ А·ч, тобто 100% (на графіку цим значенням відповідають 8,0 та 10,0). Зарядний процес протікав плавно в міру збільшення ємності накопичувача до досягнення її кінцевого постійного значення, якому відповідало постійне значення величини площі $S = 10$, після чого зарядний процес припинявся. Величина площі реєструвалася з інтервалами 30 хв, час зарядки становив 4 год.

Початкова фактична ємність накопичувача № 2 була приблизно такою ж, як і накопичувача № 1. Враховуючи його стан (попередню експлуатацію), заряджання проводили у двох режимах з метою порівняння. На рис. 6 наведено графіки зміни площі S у процесі зарядки накопичувача № 2 постійним струмом у рекомендованому заводом-виробником стандартному режимі та у прискореному. Час заряджання в стандартному режимі становить близько 8 год, у прискореному — близько 4 год, при цьому перегріву накопичувача не спостерігалось. Фактична ємність накопичувача склала приблизно $0,9C_n \approx 54$ А·ч.

Як видно з результатів експерименту, для контролю поточного стану та управління режимами роботи накопичувача доцільно використовувати запропонований інформаційний параметр.

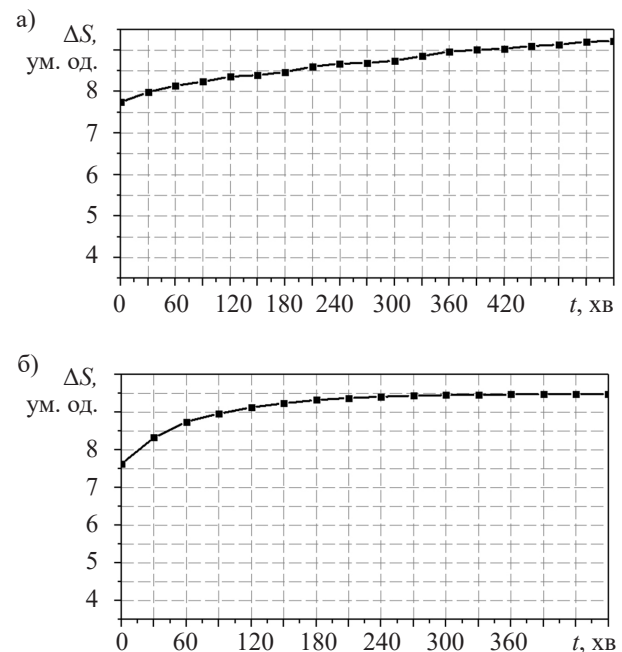


Рис. 6. Графіки зміни площі S під кривою деполяризації сигналу відгуку в стандартному (а) та прискореному (б) режимах заряджання накопичувача № 2

Висновки

Таким чином, для підвищення ефективності використання електрохімічних накопичувачів енергії в динамічних режимах роботи необхідно враховувати коефіцієнт використання активних матеріалів. Проведені дослідження показали, що інформаційним еквівалентом цього коефіцієнта є площа під кривою депляризації на сигналі відгуку накопичувача на зарядний імпульс. Запропонований імпульсний адаптивний бездатчиковий метод із використанням узагальненого енергетичного параметра, що поєднує функції контролю та управління зарядним процесом електрохімічних накопичувачів енергії, є надійним і підтверджує багатофункціональність імпульсних методів контролю та управління режимами роботи електрохімічних накопичувачів енергії.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Смоленцев Н. И. *Разработка устройств накопления электрической энергии с применением эффекта сверхпроводимости, способов управления и методов оптимизации энергетических потоков в системах электроснабжения*. Дисс. ... докт. техн. наук. Челябинск, 2019, 358 с.
2. Оспанбеков Б. К. *Оптимизация ресурсопределяющих эксплуатационных режимов тяговых аккумуляторных батарей электромобилей*. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2017, 160 с.
3. Banguero E., Correcher A., Perez-Navarro A. et al. A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 4, 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>
4. Huang X., Li Y., Acharya A. B. et al. A review of pulsed current technique for lithium-ion batteries. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 10, 2458. <https://doi.org/10.3390/en13102458>
5. Bayati M., Abedi M., Farahmandrad M. et al. Important technical considerations in design of battery chargers of electric vehicles. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 18, 5878. <https://doi.org/10.3390/en14185878>
6. 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, 2238. <https://doi.org/10.3390/en14082238>
7. Velho R., Beirao M., Calado M. D. R. et al. Management system for large Li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 5, 605. <https://doi.org/10.3390/en10050605>
8. Chatterjee P., Hermwille M. Electric vehicle fast charging challenges. *Power Electronics Europe*, 2019, iss. 1, p. 30 – 32.
9. Dzenzerskiy V. A., Plaksin S. V., Zhitnik N. E., Shirman O. I. Control of the energy state of chemical current source by impulse method. *Electrotechnic and computer systems*, 2014, no 14(90), p. 131 – 139. (Rus)
10. 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, no. 3, A316–A325. <https://doi.org/10.1149/1.1541005>

Дата надходження рукопису
до редакції 4.02 2022 р.

PULSE TECHNIQUE OF IN-OPERATION CONTROL AND MANAGEMENT OF ENERGY STORAGE CHARGING PROCESS

Energy storages are the most important integral elements of both autonomous energy system based on renewable energy sources and vehicles of various purposes, where they are the main power source. Therefore, the issue of controlling their operation modes is an important one, and choosing the control methods is a relevant problem.

The main operation modes of energy storages which require controlling are the work mode when the stored energy is consumed and the charging mode when the used energy is replenished. The example of on-vehicle energy storage is used to analyze basic operation modes and their particular aspects. Dynamic modes with unpredictable energy consumption caused by uncontrollable undercharging and overcharging are typical.

The analysis allowed drawing the conclusion that, when controlling operation modes, it is necessary to consider the energy modes of accumulators, which reflect its efficiency most fully and objectively. The analysis of existing control methods showed that their common disadvantage is that they use such parameters as voltage and operating current to control and manage the storage modes. The fact is that due to the transient nature of electrochemical processes during the operation of the storage in dynamic modes, the values of these parameters do not correspond to the current energy state of the storage.

This study aims to increase the performance of electrochemical energy storages by efficiently choosing a method for controlling their operation modes. The authors prove and experimentally confirm that when working with electrochemical energy storage devices in dynamic modes, it is necessary to choose the methods based on the application of the active material utilization ratio, information equivalent of which is the value of the area under the depolarization curve on the storage's response signal to the charging impulse. The use of the proposed mode allows combining the functions of controlling and managing the storage.

Keywords: energy storage, pulsed galvanostatic method, response signal, material utilization ratio, generalized energy index.

REFERENCES

1. Smolentsev N. I. *Razrabotka ustroystv nakopleniya elektricheskoy energii s primeneniye effekta sverkhprovodimosti...* [Development of accumulation methods, research of energy using the effect of superconductivity, expert management and search for analytical flows in power supply banks]. Dr. tech. sci. diss. Chelyabinsk, 2019, 358 p. (Rus)
2. Ospanbekov B. K. *Optimizatsiya resursoopredelyayushchikh ekspluatatsionnykh rezhimov...* [Optimization of resource-determining operating modes of traction batteries of electric vehicles]. PhD tech. sci. diss. Moscow, 2017, 160 p. (Rus)
3. Banguero E., Correcher A., Perez-Navarro A. et al. A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 2018, vol. 11, iss. 4, 1021. <https://doi.org/10.3390/en11041021>
4. Huang X., Li Y., Acharya A. B. et al. A review of pulsed current technique for lithium-ion batteries. *Energies*, 2020, vol. 13, iss. 10, 2458. <https://doi.org/10.3390/en13102458>
5. Bayati M., Abedi M., Farahmandrad M. et al. Important technical considerations in design of battery chargers of electric vehicles. *Energies*, 2021, vol. 14, iss. 18, 5878. <https://doi.org/10.3390/en14185878>
6. 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, 2238. <https://doi.org/10.3390/en14082238>
7. Velho R., Beirao M., Calado M. D. R. et al. Management system for large Li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method. *Energies*, 2017, vol. 10, iss. 5, 605. <https://doi.org/10.3390/en10050605>
8. Chatterjee P., Hermwille M. Electric vehicle fast charging challenges. *Power Electronics Europe*, 2019, iss. 1, pp. 30 – 32.
9. Dzenzerskiy V. A., Plaksin S. V., Zhitnik N. E., Shirman O. I. Control of the energy state of chemical current source by impulse method. *Electrotechnic and computer systems*, 2014, no 14(90), pp. 131 – 139. (Rus)
10. 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, no. 3, A316–A325. <https://doi.org/10.1149/1.1541005>

Опис статті для цитування:

Плаксін С. В., Житник М. Я., Левченко Р. Ю., Остаповська С. Я. Імпульсний метод оперативного контролю та управління зарядним процесом накопичувача енергії. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2022, № 1–3, с. 22–30. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.22>

Cite the article as:

Plaksin S. V., Zhytnyk M. Ya., Levchenko R. Yu., Ostapovska S. Ya. Pulse technique of in-operation control and management of energy storage charging process. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2022, no. 1–3, pp. 22–30. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2022.1-3.22>