



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-39

УДК 631.171.075.3

В. М. Боярчук, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-2192-0143

С. В. Коробка, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-4717-509X

І. Г. Стукалець, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-7107-4865

М. І. Бабич, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-1295-4162

С. В. Сиротюк, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-9966-6299

*Львівський національний університет природокористування*

e-mail: vim2@ukr.net, тел.: 050-370-71-01

e-mail: korobkasv@ukr.net, тел.: 098-969-95-34

e-mail: m.babych@ukr.net, тел.: 097-763-58-32

e-mail: stukaletsig@lnup.edu.ua, тел.: 097-493-64-24

e-mail: ssyr@ukr.net, тел.: 067-939-62-46

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*Анотація.* В статті розроблено модель процесів заряду-розряду акумулюючої батареї, що використовується для дослідження роботи гібридної системи електропостачання і формування рекомендацій для оператора. Модель розроблена з врахуванням особливостей режиму заряду  $CC/CV$  і обмежень на потужність заряду-розряду. Модель дозволяє досягнути задовільної коректності за меншої обчислювальної складності. Для перевірки коректності розробленої моделі використано еквівалентну схему акумулюючої батареї. Результати комп'ютерного моделювання показали, що середнє відхилення між обмеженнями на потужність заряду-розряду для розробленої моделі і еквівалентної схеми акумулюючої батареї складає 1% при заряді і 6% про розряді.

*Ключові слова:* акумуляторна батарея, електрохімічні процеси, електроліт, зарядна ємність.

*Постановка проблеми.* Сьогодні існує багато способів задач для виробництва, енергозбереження та використання надлишкової електричної енергії. Зокрема одна з таких задач є акумулювання надмірної електричної енергії в фотоелектричних установках протягом доби. Проблема полягає в тому, що цю надлишкову електричну енергію складно акумулювати. Наприклад в фотоелектричних акумулювати надлишкову електричної енергію в денний час і використовувати для електропостачання в нічний період приватного будинку, що дасть змогу продовжити енергозабезпечення у нічний період і стабілізувати



режими роботи енергосистеми наприклад під час роботи газового котла.

На підставі аналізу існуючих способів і засобів використання сонячної енергії наприклад для енергозабезпечення приватного будинку встановлено, що найперспективнішим для особистих селянських і фермерських господарств є використання фотомодульних установок з акумулятором електричної енергії на основі свинцевого акумулятора, а застосування сонячної енергії для автономного електропостачання сільськогосподарського об'єкта є прийнятним, зокрема для широти розташування Рівненської області, яка має середньорічну потужність сонячного випромінювання порядку 3,41 кВт·год/м<sup>2</sup> за світловий день. Це дозволяє з 1 м<sup>2</sup> площі фотомодуля отримати від 0,3 до 1,3 кВт·год електричної енергії за добу.

Однак, на сьогоднішній день не існує зручних методик для розрахунку електрохімічних процесів в акумуляторах електроенергії.

Таким чином, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності роботи акумуляторів електроенергії в фотомодульних установках, є актуальними і відповідають сучасним тенденціям розвитку електроенергетики.

*Аналіз останніх досліджень і публікацій.* Енергозабезпечення фотомодульної установки складається з джерела первинної енергії, підсистеми перетворення енергії та споживачів перетвореної енергії. В системі можуть виникати невідповідності - як в часі, так і в просторі – між подачею енергії та потребами. Подолання цих невідповідностей є основною метою акумуляування електричної енергії [1, 2, 3, 4].

На сьогодні існує велике різноманіття електричних акумуляюючих матеріалів, видів і конструкцій акумуляторних батарей, зумовлене широким спектром сфер їх застосування [5]:

- Гелеві акумулятори.
- AGM акумулятори.
- Мультигелеві акумулятори.
- Тягові акумулятори.

Переважній більшості основними недоліками вище наведених систем та видів акумуляторів є великі габарити, складність конструкції, експлуатації, дороге виготовлення, що перешкоджають їхньому поширенню.

Тому, перспективною та прогресивною ідеєю є створення нових систем акумуляування. Зокрема в геліотехніці – це створення акумуляюючих систем на основі свинцевих акумуляторів. Запропонований вид енергозберігаючої акумуляції дає змогу миттєво запасати в акумуляюючій речовині велику кількість електричної енергії у денний період, а у нічний час з великою швидкістю і



електропровідністю віддати акумульовану електроенергію об'єкту. Тому така простота виготовлення і принципу роботи повинна бути покладено в основу методики розрахунку та проектування свинцевих акумулюючих батарей для фотомодульних установок.

Однак складність експериментальних досліджень із визначення оптимальних параметрів розподіл зарядів і потенціалів між електродами потребує залучення методів математичного моделювання для розв'язання задачі. Більшість математичних моделей, зокрема наведених у працях [6, 7], описують електрохімічні процеси акумуляторів електричної енергії, а саме зростання маси електродів, концентрації електроліту, а також окисно-відновні потенціали, приріст яких пропорційний акумульованому заряду. При цьому вони мають загальний характер та є складними для інженерних застосувань.

*Формулювання мети статті.* Підвищити ефективність роботи акумуляторів електричної енергії на основі свинцевих акумуляторів для фотомодульних установок. Такі розв'язки є зручними для аналізу електрохімічних режимів, оскільки явно відображають вплив на розподіл зарядів і потенціалів між електродами визначальних чинників, що дозволяють оцінити їх значення і виділити головні з них. Вони також можуть слугувати критерієм оцінки достовірності числових розв'язків.

*Основна частина.* Методи дослідження процесів електрохімічного акумулювання електроенергії

Напруги електрохімічних процесів. На межі металу з ненасиченим водним розчином його солі (електролітом), відбувається хаотичний процес обміну іонами між розчином і кристалічною ґраткою. У момент відриву кожен іон переносить у розчин позитивний заряд, а електрони, залишені у ґратці, заряджають її негативно [8, 9].

Зворотній процес нейтралізації зарядів відбувається значно повільніше, бо потребує певного часу на попереднє впорядкування координат іонів розчину перед приєднанням їх до вузлів кристалічної ґратки. За цей час відірвані від металу іони встигають мігрувати на значну віддаль вглиб розчину, а на їх місце з поверхні металу приходять нові, збільшуючи різницю потенціалів між електролітом і металом. У результаті між металом і електролітом виникають просторово розподілені об'ємні заряди з електронів у металі та додатних іонів у електроліті.

Динамічна рівновага між процесами обміну іонами встановлюється за певного потенціалу між металом і розчином електроліту, який називають *електродним потенціалом*. Знак і абсолютна величина електродного потенціалу кожного металу, залежить від хімічного складу, ефективної концентрації (активності) іонів і температури електроліту. Наприклад у насичених розчинах



електроди заряджаються позитивно, бо їх іони легше мігрують у зворотному з розчину до металу.

Стандартні потенціали електродів прийнято визначати для власних електролітів певної концентрації. *Нормальним електродним потенціалом* називається потенціал у розчині *нормальної концентрації*, що містить 1 моль розчиненої речовини у 1 літрі розчину. Значення нормальних електродних потенціалів металів  $\varphi_0$  відносно розчинів власних електролітів наводяться у довідниковій літературі у вигляді ряду, розташованого в порядку зростання їх електродних потенціалів: від найбільш негативного до нульового (водень) і далі – до найбільш позитивного, показано нижче. Усі метали з від'ємними електродними потенціалами, які у таблиці розташовані зліва від водню, заміщають водень у розбавлених кислотах і розчиняються у них. Швидкість реакції може гальмуватися поверхневими утвореннями. Наприклад свинець практично не розчиняється у розбавлених розчинах сірчаної кислоти через утворення захисного шару малорозчинної солі  $PbSO_4$  і реакція припиняється: такий стан системи називають рівноважним. Нейтральними вважаються електроди, виготовлені з практично нерозчинних матеріалів: платини, водню, іридію, графіту тощо.

Таблиця 1

Процентний склад елементів акумуляторної батареї MERCURY SPECIAL 6СТ-140Ah 800А АЗ

Li <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> +	Al <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup> +	Zn <sup>2+</sup> +	Fe <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup> +	Ni <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup> +	Cu <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup>	Ag <sup>2+</sup>
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+3	+0,7	+0,7
3,0	2,9	2,9	1,6	1,1	0,7	0,4	0,4	0,2	0,1	37	88	99
45	25	23	62	79	63	40	03	50	26			

Пара металевих електродів з різними електродними потенціалами, занурені у розчин електроліту, утворюють *гальванічний елемент*. В оборотних елементах електроди занурені в однойменні електроліти. Наприклад мідь знаходиться у насиченому розчині  $CuSO_4$ , а цинк – у розбавленому  $ZnSO_4$ . На рис. 1 розчини розділені пористою перегородкою, яка пропускає іони, але запобігає швидкому змішуванню різних електролітів.

Цинковий електрод заряджається негативно, до потенціалу  $\varphi_{Zn} = -0,76$  В, а мідний – позитивно, до  $\varphi_{Cu} = +0,34$  В. У стані динамічної рівноваги електрорушійна сила такого елемента рівна.

$$E = 0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ В}$$

При замиканні електродів їх потенціали змінюються до рівня, який визначається спадом напруги на опорі навантаження. Тоді система

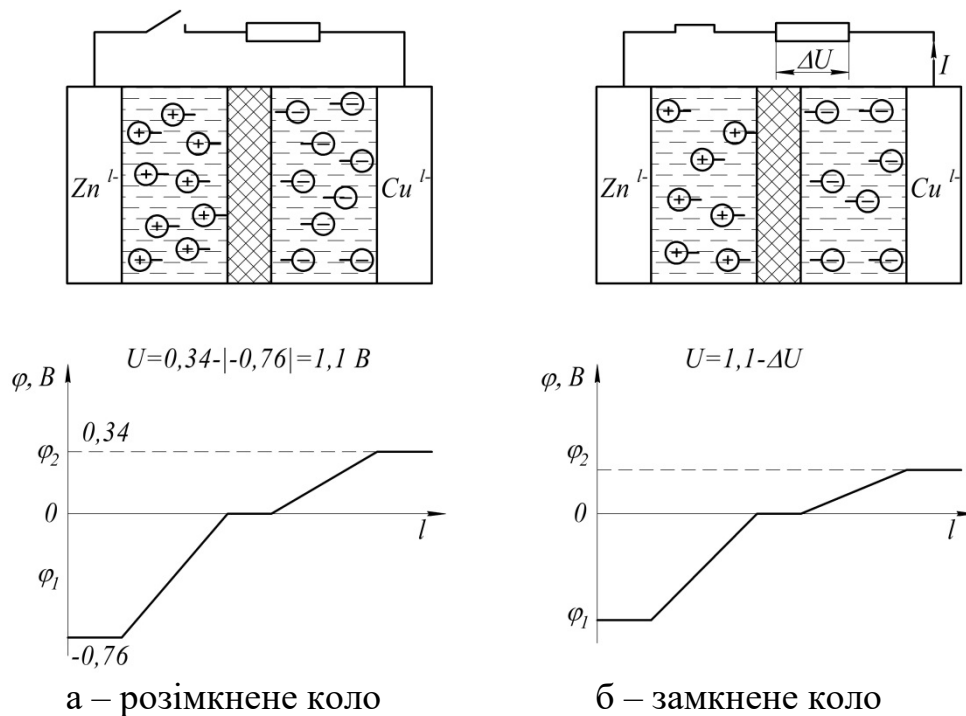


Рисунок 1. Зміщення потенціалів електродів при контакті з електролітом:

зарядів виходить з рівноваги: за штучно зміщеного потенціалу цинкового електроду відновиться процес його окислення аж до повного розчинення. Аналогічно, за зменшеного потенціалу мідного електроду, на додатному електроді продовжиться відновлення іонів міді. Реакція закінчується після встановлення нової рівноваги, коли у розчині відбудеться повне заміщення іонів міді цинком.

За наявності надлишкового електродного цинку в такому елементі можна забезпечити обернений процес відновлення електродів, який називають зарядкою або *електрохімічним акумулюванням*. При подачі на електроди вищої за модулем зовнішньої напруги такої ж, полярності, на негативному електроді будуть відновлюватися іони цинку з виділенням окиснювача (наприклад кисню), а на позитивному відбудеться процес окислення міді і переходу іонів у електроліт. Натомість на поверхні мідного електроду накопичуються молекули водню (відновника) у вигляді бульбашок і перетворюють її поверхню на водневий електрод. Потенціал такого електроду близький до нульового потенціалу водневого електроду, тому е.р.с. елемента падає з початкового 1,1 В до рівня 0,8 В. З електричної точки зору мідний електрод покривається шаром поляризованого діелектрика, з протилежно направленим електричним полем, тому це явище називається *водневою поляризацією*. Для продовження оборотної реакції необхідно подолати додаткову напругу поляризації, відповідно напруга зовнішнього джерела повинна перевищувати напругу

неполяризованого елемента на величину напруги поляризації (рис. 2).

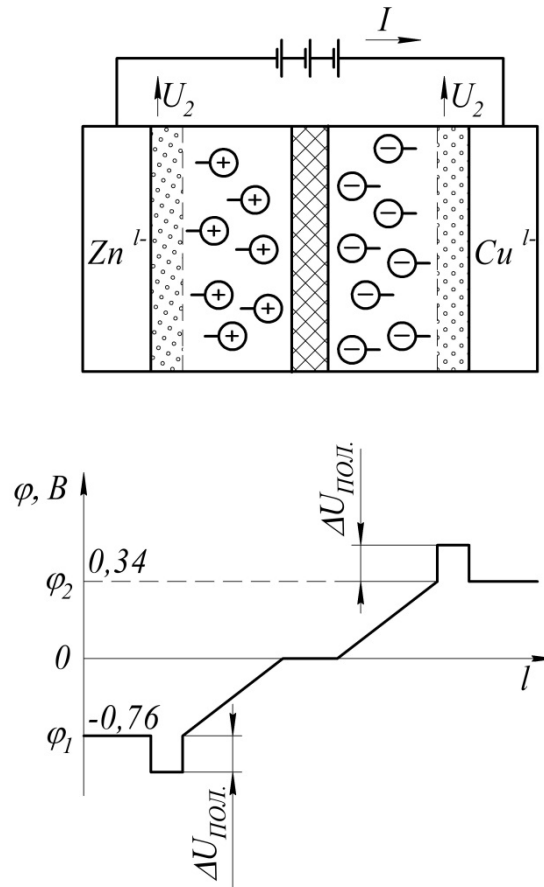
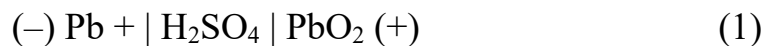


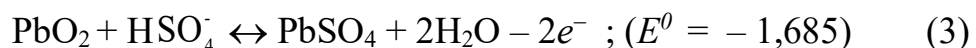
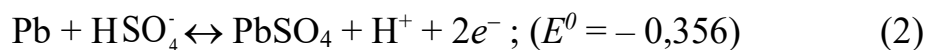
Рисунок 2. Розподіл потенціалів при заряджанні оборотного елемента

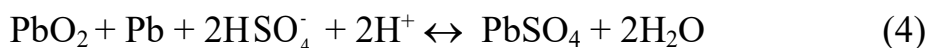
Електрохімічні процеси у свинцевому акумуляторі. Найпоширеніший свинцево-кислотний акумулятор складається з двох перфорованих пластин, одна з яких після зарядки заповнена губчастим свинцем, а друга – оксидом свинцю. Електродам надають розвинену поверхню для збільшення зони контакту з електролітом – 27...39% розчином сірчаної кислоти. Анод акумулятора при розрядці перетворюється на катод при зарядці і навпаки.

Схема роботи акумулятора описується рівнянням [10, 11]:



За відсутності струму в зовнішньому колі електрорушійну силу такого елемента визначають алгебраїчною сумою рівноважних окисно-відновних потенціалів катодної та анодної реакцій:





Але електрорушійна сила акумуляторної чарунки залежить ще й від активностей компонентів розчину електроліту – сірчаної кислоти і води тому розраховується за формулою:

$$E = \varphi_{\text{PbO}_2} - \varphi_{\text{Pb}} = 2,041 + 0,059 \frac{a_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (5)$$

За однакової активності компонентів розчину мольної концентрації напруга зарядженого електрохімічної чарунки становить 2,041В, а стандартного 6-чарункового акумулятора відповідно 12,246 В. Максимального значення  $E_{\text{max}} = 2,12 \text{ В}$  електрорушійна сила чарунки набуває за 37% концентрації сірчаної кислоти, коли рівноважні електродні потенціали рівні:  $\varphi_{\text{PbO}_2} = 1,72 \text{ В}$ ,  $\varphi_{\text{Pb}} = -0,4 \text{ В}$ . Відтак максимальна е.р.с. стандартного нового шестичарункового свинцевого акумулятора у момент заливки електроліту не перевищує 14,7В.

Відразу після заливки електроліту, відбувається розчинення свинцю (окислення до двозарядного іону  $\text{Pb}^{2+}$ ). Одночасно розчиняється й анод шляхом відновлення свинцю з чотиризарядного іону в оксиді  $\text{PbO}_2$  до двозарядного у сульфаті  $\text{PbSO}_4$  та наступним переходом у розчин.

Внаслідок невеликої розчинності сульфату, майже відразу починається пасивація обох електродів тонким (товщиною 70...90 нм) шаром сульфату. Надалі на поверхні цього шару утворюються центри кристалізації, з яких ростуть макроскопічні кристали. Цей процес продовжується аж до розімкнення зовнішнього кола або повної розрядки акумулятора.

Відкладення сульфату зменшують ефективну поверхню електродів, тому процес дифузії іонів свинцю у розчин та водню до електродів гальмується. Це рівнозначно збільшенню внутрішнього опору акумулятора. А за одночасного зменшення концентрації електроліту зменшується ще й рівноважні окисно-відновні потенціали електродів. Тому у процесі розрядки е.р.с. та напруга на затискачах акумулятора поступово зменшується.

Негативну дію відкладень зменшують конструктивним виконанням пластин з розвиненою поверхнею, а також технологічно – зменшенням струму розрядки. Останній прийом дозволяє зменшити утворення нових центрів кристалізації, натомість інтенсифікувати ріст уже існуючих кристалів. У результаті сульфатні відкладення формуються у вигляді відносно крупних кристалів з проміжками між ними для проходження іонів до поверхні електродів.

При великих розрядних струмах відбувається так звана



гетерофазна кристалізація з утворенням багатьох центрів кристалізації і покриттям електродів рівномірним щільним шаром сульфату. Аналогічне явище відбувається і за надмірної розрядки: тоді окремі кристали сульфату на поверхні електродів зростаються, а проміжки між ними «заліковуються». В обох випадках можлива повна ізоляція електродів та неможливість їх відновлення без зовнішнього втручання. Тому для забезпечення оборотності розрядку обмежують, орієнтуючись на певний рівень залишкової е.р.с., у межах 1,3...1,75 вольт на одну електрохімічну чарунку або 7,8...10,5 на 6-чарунковий акумулятор [12].

Заряджений акумулятор термодинамічної точки зору є нерівноважною системою з просторово нерівномірним розподілом взаємодіючих компонентів, а тому поступово самочинно розряджається. Саморозряд відбувається внаслідок випадкових відхилень (флуктуацій) кінетичної енергії іонів від своїх середніх значень. Окремі іони свинцю отримують кінетичну енергію, достатню для подолання бар'єру електродного потенціалу і переходять у розчин. Аналогічно окремі високоенергетичні іони водню розряджаються на негативному електроді, а іони кисню – на позитивному з наступним виходом назовні. Саморозряд на позитивному електроді набагато повільніший. Швидкість саморозряду збільшується з температурою.

У частково розрядженому акумуляторі обидва електроди покриті шаром пористого сульфату свинцю, розчин електроліту має мінімальну концентрацію сірчаної кислоти, відтак мінімальними є й потенціали електродів. Його зарядка відбувається штучним зміщенням рівноважних електродних потенціалів за допомогою зовнішнього джерела: негативного в сторону від'ємніших значень а позитивного – додатніших. У результаті додатні іони розчину електроліту  $H^+$  мігрують до негативного свинцевого електроду (катода), а від'ємні  $OH^-$  і  $HSO_4^-$  – до позитивного аноду з оксиду свинцю – свинцевого глету.

Виникає концентраційна поляризація електроліту, динамічна рівновага між іонами електродних матеріалів, їх сульфатного покриття та прилеглому шару електроліту порушується. Молекули сульфату легше дисоціюють, на іони  $Pb^{2+}$  та  $SO_4^{2-}$ : перші розряджаються на негативному свинцевому катоді і осідають на ньому, а другі – об'єднуються з іонами водню і дифундують у розчин у вигляді аніонів сірчаної кислоти  $HSO_4^-$ . Натомість надлишкові іони водню відновлюють гідроксил  $OH^-$  до води.

На позитивному електроді (аноді) двозарядні іони  $Pb^{2+}$  втрачають валентні електрони і окислюються до чотирьохзарядних у складі молекул оксиду свинцю і осідають на аноді. Звільнені двозарядні іони  $SO_4^{2-}$





дифундують у електроліт, де також об'єднуються з іонами водню утворюючи аніони сірчаної кислоти  $HSO_4^-$ .

В результаті електродних процесів зростають маса електродів, концентрація електроліту, а також окисно-відновні потенціали. Відтак рівновага встановлюється уже при вищій напрузі на електродах, приріст якої пропорційний акумуляованому заряду. Зокрема близька до е.р.с. напруга розімкнутого кола (НРК) збільшується з ростом концентрації електроліту і розраховується [6] через його густину  $d$  за співвідношенням:

$$U_{pk} = 0.84 + d$$

Разом із НРК посилюється концентраційна поляризація електродів, що вимагає випереджуючого зростання напруги зарядки. Відтак потенціали електродів досягають значень, при яких починається помітне виділення газів. А на завершальній стадії зарядки практично весь зарядний струм витрачається на електроліз води, тому НРК практично не зростає.

На електроді з негативним потенціалом з розчину виділяється тверда фаза свинцю (відбувається відновлення позитивних іонів до нейтральних атомів). Натомість на позитивному електроді відкладаються молекули оксиду свинцю (двозарядний іон свинцю доокислюється до чотиризарядного).

Електродний потенціал свинцю у розчині сірчаної кислоти від'ємніший за водневий, а потенціал електроду з  $PbO_2$  позитивніший за теоретичний потенціал виділення кисню. Тому при зарядці акумулятора мали б відбуватися не процеси утворення оксиду  $PbO_2$  та свинцевої губки на електродах, а виділення кисню й водню. Цього насправді не відбувається, бо виділення цих газів потребує значної перенапруги, а тому на електроліз води витрачається лише незначна частина енергії зарядного струму.

Розклад води починається лише за перевищення напруги на чарунці  $2,3\text{ В}$  або  $13,8\text{ В}$  на клеммах стандартного акумулятора. Тому за вимоги економного використання енергії, наприклад сонячного модуля, бажано не перевищувати цього значення напруги зарядки.

*Технічні параметри акумуляторів.* Специфічними характеристиками акумуляторів є такі [7, 8]:

- напруга заряд-розрядного процесів (charge-discharge voltage)  $V_c$ - $V_d$ ;
- ефективність відновлення початкового рівня заряду (charge-discharge ratio)  $C/D$ ;
- енергетичний ККД  $\eta_E$ ;
- (зарядна, ємнісна) ефективність;
- внутрішній опір (імпенданс)  $r$ ;



- температурна поправка;
- число заряд-розрядних циклів.

У процесі розрядки напруга спочатку швидко зменшується, потім практично стабілізується (переходить у плато – лінійну залежність з незначним від’ємним кутовим коефіцієнтом), відтак знову зменшується, подібно до експоненційної залежності. Процес зарядки характеризується такою ж, але дзеркально-симетричною залежністю з невеликим перевищенням рівня плато. Рівень плато залежать від режимів циклу зарядки-розрядки.

Електричний заряд або ємність акумулятора характеризують кількістю електрики в кулонах або ампер-годинах. Ємність можна кількісно оцінити лише шляхом повної розрядки акумулятора, що не має практичної користі, бо величина сприйнятого і повернутого заряду залежить від умов проведення заряд-розрядного циклу. Тому за точку відліку зручно прийняти *мінімальну ємність*  $C_0$ , до якої можна розрядити акумулятор, щоб зберегти можливість його повторної повної зарядки. Розрізняють наступні оцінки ємності акумулятора.

*Зарядна ємність* [7] оцінюється кількістю ампер-годин, наданої акумулятору в процесі зарядки від мінімально допустимого рівня  $C_0$  до поточного значення  $C_{зар}$ . Натомість *розрядна або доступна ємність* вимірюється кількістю вилученої електрики від поточного значення до мінімального  $C_{роз}$ . Внаслідок втрат розрядна ємність завжди менша за зарядну.

З ростом кількості заряд-розрядних циклів розрядна ємність спочатку збільшується, а потім зменшується. Максимальне значення розрядної ємності поточного циклу прийнято називати *доступною ємністю*. Натомість *номінальною* називається початкова розрядна ємність вказана заводом виготовлювачем.

Ступінь зарядки акумулятора  $Q$  визначається відношенням поточного значення розрядної ємності  $C_{роз}$  до номінальної. Інакше кажучи ступінь зарядки означає відсоток номінальної ємності. В англійських виданнях ступінь зарядки позначається аббревіатурою SOC (State of Charge) і визначається відношенням:

$$Q = \frac{C_{роз}}{C_n} \equiv \text{SOC} \quad (6)$$

За рівності розрядної та номінальної ємності ступінь зарядки рівна одиниці, а за рівності з мінімальною – нулю. У початковий період експлуатації, коли розрядна ємність може перевищувати номінальну, ступінь зарядки може перевищувати одиницю, тобто номінальну ємність.

Заряд-розрядне відношення  $C/D$  (charge-discharge ratio) характеризує ефективність циклу. При розрядці акумулятора на



зовнішнє навантаження його ємність у ампер-годинах зменшується на величину  $C$ , але на його відновлення заряду до попереднього рівня необхідна інша кількість ампер-годин  $D$ . Зазвичай при температурі  $20^\circ\text{C}$  відношення  $C/D = 1,1$ , тобто складає 10 % перевищує розрядну ємність. При підвищенні температури це відношення зростає подібно до квадратичної залежності.

*Енергетична ефективність* циклу заряд-розряд визначається через відношення виділеної енергії на корисному навантаженні (корисної роботи  $A$ ) повністю зарядженого акумулятора до енергії затраченої на його відновлення  $W$ . Наприклад для акумулятора ємністю  $C$  з середньою напругою розрядки 12 вольт зарядки 14 вольт  $A = 12 \cdot C$ , а  $W = (C/D) \times 13 \cdot C$ . Відтак за температури  $25^\circ\text{C}$ , коли  $C/D = 1,1$  [9], енергетичний ККД  $\eta$  визначається з відношення:

$$\eta = \frac{12 \cdot C}{1,1 \cdot 13 \cdot C} = 0,84 \text{ або } 84\% \quad (7)$$

Згідно з законом Ома для повного кола внутрішній опір джерела струму  $r$  розраховується через електрорушійну силу  $E$ , струм  $I$  та опір навантаження  $R$  за співвідношенням:

$$r = E - IR \quad (8)$$

Поточні значення електрорушійної сили  $E_i$  та внутрішнього опору  $r_i$ , у свою чергу, залежать від поточних значень ємності, температури і ступеня розряду  $Q_d$  і розраховуються за співвідношеннями:

$$E_i = E_0 - k_1 Q_d; \quad (9)$$

$$R_i = R_0 - k_2 Q_d, \quad (10)$$

де  $E_0$  і  $R_0$  – значення  $E$  та  $r$  при розімкненому колі;

$k_1$  та  $k_2$  – сталі коефіцієнти пропорційності.

Таким чином внутрішній опір також є змінною величиною залежною як від умов навантаження, так і електрохімічних параметрів генерації струму.

*Зарядна ефективність* визначається за відношенням засвоєного акумулятором заряду до відданого через зовнішні клеми. За нульовий рівень оцінки зарядної ефективності вибирається стан мінімально допустимого рівня розряду, коли ємність рівна нулю. Так, починаючи з нульової ємності практично вся енергія зарядного струму засвоюється і перетворюються в електрохімічну енергію: ефективність зарядки близька до 100%. І навпаки, якщо ступінь заряду близька до одиниці, енергія струму зарядки витрачається переважно на нагрівання і ефективність процесу зарядки наближається до нуля.

Ефективність зарядки (швидкість процесу) оцінюється у



процентах і на практиці визначається з номограми, де спів вставляються зарядний струм і ступінь зарядки акумулятора. Наприклад, при струмі  $C/2$  процес зарядки (засвоєння енергії зарядного струму) відбувається з майже зі 100% ефективністю аж до 75% ступеня зарядки. Тоді як при меншому зарядному струмі, наприклад  $C/40$ , ефективність зарядки майже лінійно спадає і складає 60% при 50% ступені номінальної ємності [10, 11].

*Режими зарядки акумуляторів.* Під час зарядки необхідно здійснювати постійний контроль за струмом, напругою і температурою процесу. Процес може бути призупинено (але не припинено) при виявленні перевищенні якогось критерію. Нормальний процес зарядки складається з трьох етапів:

- Основний етап, протягом якого ємність заповнюється до рівня 80...90% номінальної;

- струмкова зарядка до повної ємності з поступовим зменшенням зарядного струму.

- крапельна зарядка для компенсації саморозряду зарядженого акумулятора.

Режими навантаження в основному і струмковому етапах визначаються попередньо вивчення рекомендації для даної електрохімічної системи та паспортних параметрів.

Основною вимогою до кожного регулятора зарядки, з огляду на безпеку експлуатації, є запобігання ситуації надмірної зарядки (перезарядці).

У свинцевих акумуляторах перезарядка стимулює втрату води через газовиділення і передчасне старіння. Регулятор протягом усього процесу підтримує максимальний режим зарядки перед газовиділенням. Надалі зарядний струм зводить до струминного та крапельного режимів з м'яким підведенням до стану повного заряду.

*Нерегульований режим* зарядки, який не потребує спеціального пристрою, використовується у фото енергетичних системах, де акумулятор заряджається безпосередньо від сонячного модуля. Напруга зарядки від сонячного модуля практично ніколи не перевищує 15 вольт, що унеможливорює перезарядку свинцевого акумулятора. За досягнення повної зарядки, відбувається автоматичне шунтування фотомодуля польовим транзистором. Транзистор знову відкривається, як тільки напруга на акумуляторі зменшиться. Натомість нічний розряд акумулятора через фотомодуль, за відсутності на ньому напруги, блокується діодом.

Для *одноступеневої зарядки* достатньо одного регулятора, який працює у режимі вмикання-розмикання. Коли напруга на клеммах відповідає стану повністю зарядженого акумулятора, напруга вимикається або зменшується. Зарядний пристрій знову вмикається



якщо напруга на клеммах впала нижче заданого рівня. У такому режимі неможливо досягнути стану насичення або підтримування саморозряду.

*Багатоступінчастий режим* (Multiple Charge Rates) реалізує так звану *м'яку зарядку*: великим струмом заряджають до 80...90% рівня, з поступовим його зменшенням аж до рівня повної зарядки. Надалі допускається режим зарядки з поступовим зменшенням зарядного струму аж до надходження запиту на вмикання навантаження. Такий метод потребує принаймні три режимного регулятора зарядки.

Іншою версією цього зарядного методу є *зарядка пульсуючим струмом*. Тоді зарядка неперервним струмом продовжується аж до наперед визначеної напруги газовиділення. Відтак живлення припиняється до повного вирівнювання концентраційної поляризації. Коли ж напруга зменшиться раніше за газовиділення, пристрій відновить живлення зарядки.

Зменшення зарядного струму вище 75...80% ступеня зарядки замість реостатного послаблення енергетично вигідніше виконати методом широтно-імпульсної модуляції зарядного струму (PWM). Внаслідок повільного них дифузійних процесів поляризації-деполяризації можна, зберегти сталу напругу джерела, а натомість поступово зменшувати ширину імпульсів або їх шпаруватість. Таким чином вдається досягти вищого ступеня зарядки, за енергозатратний багатоступінчастий режим з поступовим зменшенням зарядного струму шунтуванням акумулятора реостатом.

Стан високого ступеня зарядки підтримується постійною компенсацією його саморозряду. Оскільки ефективність зарядки у цьому стані дуже низька, то процес виконується пропусканням імпульсного струму, який отримав назву *крапельної зарядки*. Бо за короткочасного імпульсу не розвивають повільні дифузійні процеси кристалізації сульфату на електродах. Технічно його виконують короткочасним імпульсами вищої напруги, протягом яких концентраційна і хімічна поляризації не встигають розвинути. Крапельний метод дозволяє максимально підвищити ємність акумулятора і стабілізувати її на високому рівні.

Сучасні методи інтенсифікації зарядних процесів використовують широтно-імпульсну модуляцію з короткочасним пропусканням струму в протилежному напрямку. Завдяки цьому вдається штучно змінювати напрямки дифузійних процесів і уникнути розвитку концентраційної поляризації.

Принцип роботи електрохімічного акумулятора ґрунтується на оборотних електрохімічних окисно-відновних реакціях. Електрохімічною коміркою називають систему з двох різних електродів занурених в електроліт – переважно розчин кислоти або

лугу. На межі електроліту з металевим електродом виникає так званий подвійний електричний шар з просторово розділених електричних зарядів протилежних знаків і відповідною різницею потенціалів (рис. 3).

Знак і абсолютна величина електродного потенціалу, залежить від хімічного складу металу та електроліту, ефективної концентрації (активності) іонів і температури розчину. У довідниках прийнято наводити значення *стандартних або нормальних електродних потенціалів*  $\varphi^0$  в електролітах нормальної концентрації, який містить 1 моль розчиненої речовини у 1 літрі розчину. Причому заміна одного електроліту іншим нормальної концентрації на значення стандартного електродного потенціалу не впливає.

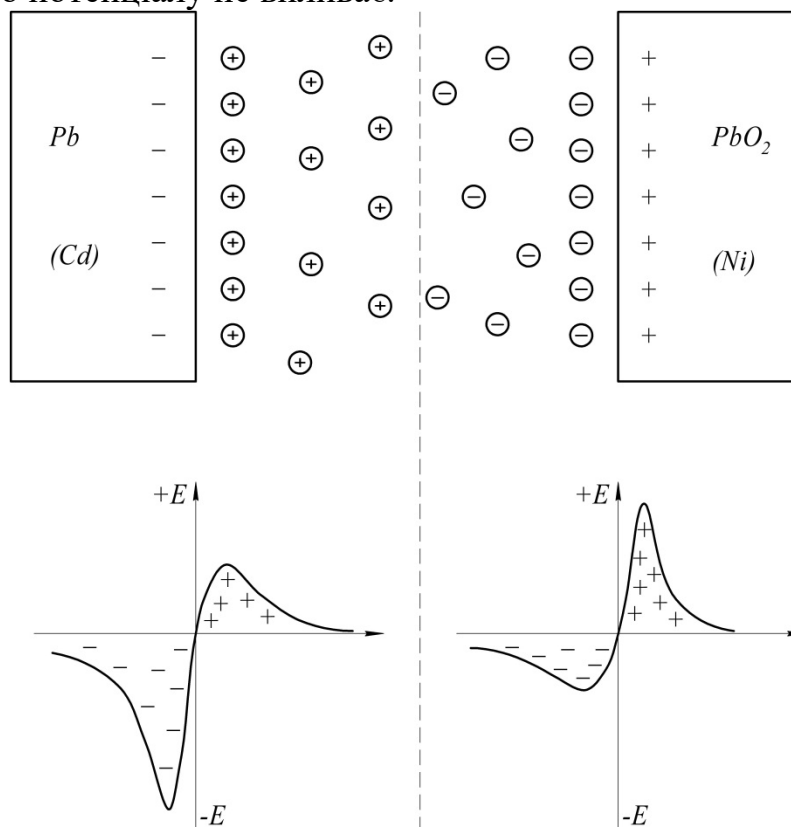
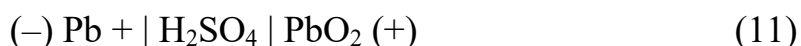


Рисунок 3. Схематичний розподіл зарядів і потенціалів між електродами.

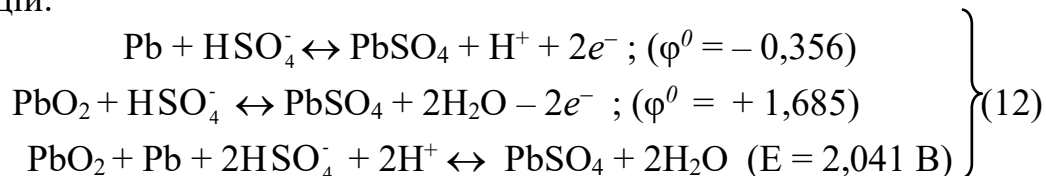
Електрохімічні комірки свинцево-кислотних акумуляторів складаються з двох пористих електродів – губчастого свинцю (Pb) і його діоксиду (PbO<sub>2</sub>) (свинцевий глет), занурених у водний розчин сірчаної кислоти H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Електродам надають розвинену поверхню для збільшення зони контакту з електролітом – 27...39% розчином сірчаної кислоти. Схема гальванічної пари акумулятора, де негативним електродом є свинець, а додатнім його діоксид, описується таким



рядом:



Електрорушійну силу такого елемента визначають алгебраїчною сумою рівноважних окисно-відновних потенціалів катодної та анодної реакцій:



Максимального значення  $E_{max} = 2,12 \text{ В}$  електрорушійна сила чарунки набуває за 37% концентрації сірчаної кислоти, коли рівноважні електродні потенціали рівні:  $\varphi_{\text{PbO}_2} = 1,72 \text{ В}$ ,  $\varphi_{\text{Pb}} = -0,4 \text{ В}$ . У перерахунку на 6-чарунковий акумулятор максимальна напруга не перевищує значення 12,72 В.

Відразу після заливки електроліту починається взаємодія обох електродів і розчину сірчаної кислоти з утворенням малорозчинного сульфату  $\text{PbSO}_4$ . Він випадає в осад і покриває поверхню обох електродів тонкими (товщиною 70...90 нм) точковими острівцями діелектричного шару. При збільшенні розрядного струму реакція прискорюється, острівці стають центрами кристалізації великих. При малих розрядних струмах кристали ростуть рівномірно в усіх напрямках (гомофазна кристалізація) і поступово перекривають доступ електроліту до вільної поверхні електродів. Натомість при великих струмах площа контакту зменшується не так стрімко, бо кристали ростуть хаотично з утворенням великих проміжків між ними (гетерофазна кристалізація). Відтак обмін іонами відбувається через міжкристалічні канали, вздовж яких виникає перепад концентрації електроліту. Це явище називають *концентраційною поляризацією* електрохімічної комірки. Завдяки їй зменшується напруга на електродах, а її значення залежить від величини розрядного струму. Мінімальна розрядна напруга на клемі акумулятора залежить від розрядного струму і задається виробником у вигляді графічних залежностей (рис. 4).

З припиненням розрядки напруга відновлюється до значення е.р.с., якій відповідає рівномірна концентрація електроліту. Вирівнювання напруги відбувається від кількох годин до кількох діб за експоненційною залежністю, а її поточне значення називають напругою розімкненого кола  $U_p$ .

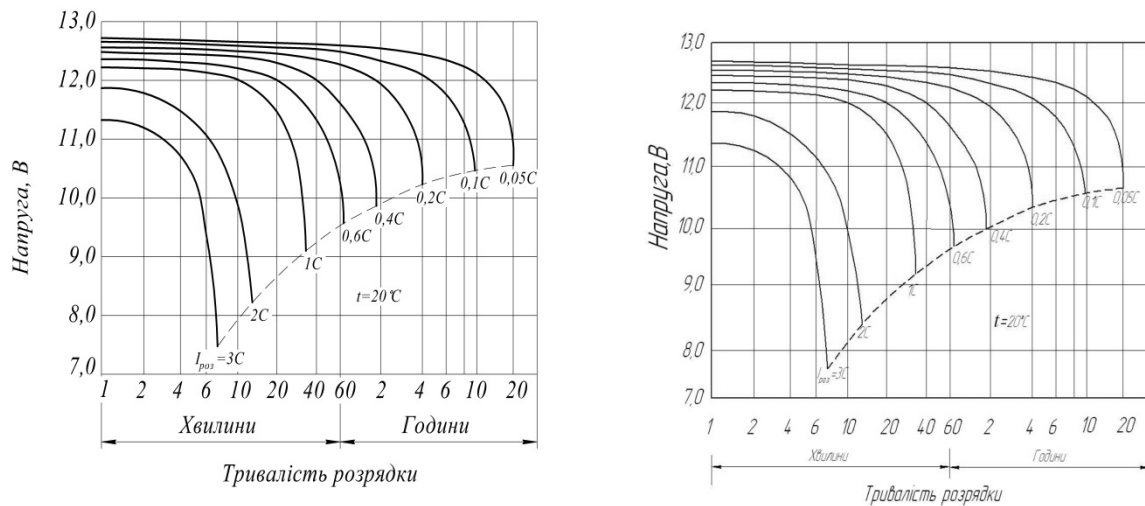


Рисунок 4. Рекомендовані мінімально-допустимі напруги у залежності від розрядного струму, вираженого в одиницях номінальної ємності.

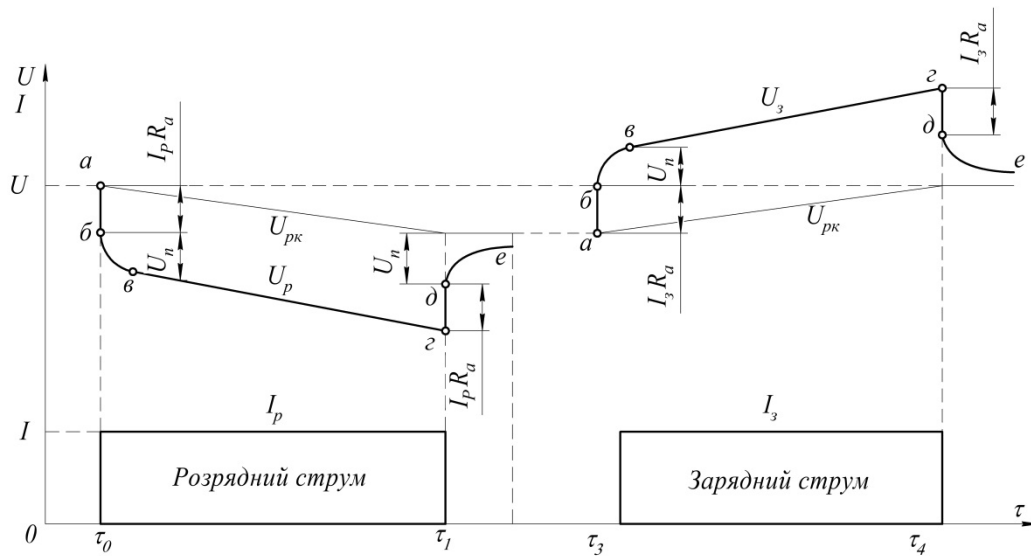
Ємність акумулятора  $C$  прирівнюють до кількості електрики в  $A \cdot год$ , яку акумулятор віддає при заданому режимі розряджання до досягнення мінімально допустимої залишкової напруги  $U_{min}$ . Номінальну ємність  $C_n$  визначають при розряджанні сталим струмом протягом 20 годин. Відтак розрядні та зарядні струми вимірюють через тривалість розряджання номінальної ємності. Наприклад, при 10-годинному розряджанні розрядний струм чисельно рівний  $1/10$  номінальної ємності акумулятора:  $I_{20} = 0,1C_n$ .

Режими розрядки прийнято поділяти на наступні:

- саморозряд, при  $I_p \approx 10^{-4} C_n$ ;
- тривалий, при  $I_p < 0,1 C_n$ ;
- середній, при  $0,1 C_n \leq I_p < 1 C_n$ ;
- форсований, при  $I_p \geq 3 C_n$ .

Саморозряд відбувається внаслідок електролізу води, який починається з напруги 1,23 В з виділенням кисню на додатному електроді і водню – на від'ємному. Але у електроліті швидкість розкладу води значно менша за швидкість оберненої реакції утворення молекул. При сталому розрядному струмі напруга на клеммах акумулятора змінюється за схемою, наведеною на рис. 5.





$U_{pk}$  – напруга розімкненого кола;  $U_p$ ,  $U_3$  – напруга розрядження і зарядження відповідно;  $I_p$ ,  $I_3$  розрядний і зарядний струми відповідно; ділянки  $ab$ ,  $gd$  – спад напруги на активному опорі;  $бв$ ,  $де$  – напруги поляризації.

Рисунок 5. Схема зарядно-розрядного циклу акумулятора у межах 15...65% $C_H$ .

При заряджанні напруга на акумуляторі змінюється у зворотному порядку. Але при цьому поряд з концентраційною поляризацією електроліту посилюється хімічна, внаслідок підвищеної концентрації продуктів електролізу води та розчину сульфату  $PbSO_4$ . Зокрема атоми кисню і водню сполучаються у молекули  $H_2$  і  $O_2$  і осідають бульбашками на поверхні електродів.

На практиці зарядку акумуляторів здійснюють при різних режимах: сталого струму або сталої напруги, з модульованим струмом чи напругою, переривистому, імпульсному, крапельному, підтримуючому, плаваючому а також з короткочасним імпульсом протилежної полярності, тощо. У нових акумуляторах зарядна ємність зазвичай може перевищувати номінальну  $C_H$ , якщо застосовувати спеціальні режими зарядки. Але завжди, завдяки різниці зарядної і розрядної напруг при заряджанні завжди витрачається більша кількість електрики, ніж звільняється у процесі розрядки, тому за відношенням цих величин розраховується ККД акумулятора.

ККД зарядно-розрядного циклу або коефіцієнт віддачі по енергії  $\eta_W$  розраховують через відношення енергії розряду, виділеної на корисному навантаженні до енергії, затраченої на зарядку акумулятора до початкового стану:

$$\eta_W = \frac{W_p}{W_3} \quad (13)$$



У загальному випадку зарядну і розрядну енергії розраховують інтегруванням:

$$W_p = \int_0^{\tau_p} I_p(\tau)U_p(\tau)d\tau; W_z = \int_0^{\tau_z} I_z(\tau)U_z(\tau)d\tau \quad (14)$$

Порівняння обох енергій слід проводити в одному і тому ж інтервалі зміни ємності, межі якого визначають за напругою розімкненого кола  $U_{pk}$ . Але її поточне значення вимірюється тільки після деполяризації електрохімічної комірки, тому момент повернення у початковий зарядний можна оцінити лише приблизно. Тому відношення абсолютних значень обох енергій потрібно замінити їх значеннями, нормованими на відповідні інтервали зміни напруги розімкненого кола кожного процесу:

$$W'_p = \frac{W_p}{\Delta U_p} \quad \text{і} \quad W'_z = \frac{W_z}{\Delta U_z} \quad (15)$$

$$C'_p = \frac{C_p}{\Delta U_p} \quad \text{і} \quad C'_z = \frac{C_z}{\Delta U_z} \quad (16)$$

Напруга розімкненого кола акумулятора після заряджання чи розряджання є сумою двох складових: сталої е.р.с. та змінної за величиною напруги поляризації:

$$U_{p \text{ зар}} = E_{зар} + U_{n \text{ зар}} \quad (17)$$

$$U_{p \text{ роз}} = E_{роз} + U_{n \text{ роз}} \quad (18)$$

Процес деполяризації не описується аналітичною залежністю, тому її вимірюють як правило через 24 год. після закінчення. Проте за добу е.р.с. також зменшиться на величину  $\Delta E_c$  за рахунок процесу саморозряду. Значення  $\Delta E_c$  попередньо встановлюється експериментально.

Розроблення моделі процесів заряду розряду акумуляторних батарей. Під час розроблення математичної моделі акумуляуючої батареї виникає проблема описати залежність між ККД заряду-розряду і батареї тому, що ККД залежить відпоточної енергетичної ємності акумуляуючої батареї, температури, навантаження, тобто від струму, що проходить у колі, і інших факторів [6; 7]. Тому, для спрощення моделі акумуляуючої батареї, можна припустити, що ККД заряду-розряду не залежить від струму заряду і рівня заряду акумуляуючої батареї [7] та визначається як:

$$\eta_{зар} = \eta_{роз} = \sqrt{\eta_{ак}}, \quad \text{‘} \quad \text{‘} \quad \text{‘} \quad (19)$$

де  $\eta_{зар}$  – ККД заряду акумуляуючої батареї,

$\eta_{роз}$  – ККД розряду акумуляуючої батареї,

$\eta_{ак}$  – узагальнений ККД акумулятора. ККД сучасних акумуляторів

85-95% залежно від типу [7; 8].

Під час зарядки акумуляторної батареї режимом заряду є заряд постійний струм із постійною напругою (CC/CV). Режим полягає в розбитті процесу заряду акумулятора на два етапи. На першому етапі відбувається заряд акумулятора постійним струмом (CC). Величина сили струму, якою відбувається заряд, є максимально допустимою силою струму заряду-розряду ( $I_{\text{макс}}$ ), це значення можна отримати з технічного паспорта, зазвичай, максимальний струм заряду і розряду знаходиться в межах  $0,2C - 2C$  [7; 9],

В такому випадку, сила струму зменшується експоненціально з часом [8], цей процес описується залежністю:

$$I_{(t)} = I_{\text{макс}} \exp\left(-\frac{t - t_{\text{пор}}}{\tau}\right),$$

$$\tau = \frac{C_{\text{ном}}}{I_{\text{макс}}} - t_{\text{пор}},$$

де  $t$  – поточний момент часу;

$I_{\text{макс}}$  – максимально допустима сила струму заряду-розряду;

$t_{\text{пор}}$  – момент часу, коли відбувся перехід в режим сталої напруги;

$C_{\text{ном}}$  – номінальна енергетична ємність акумуляуючої батареї.

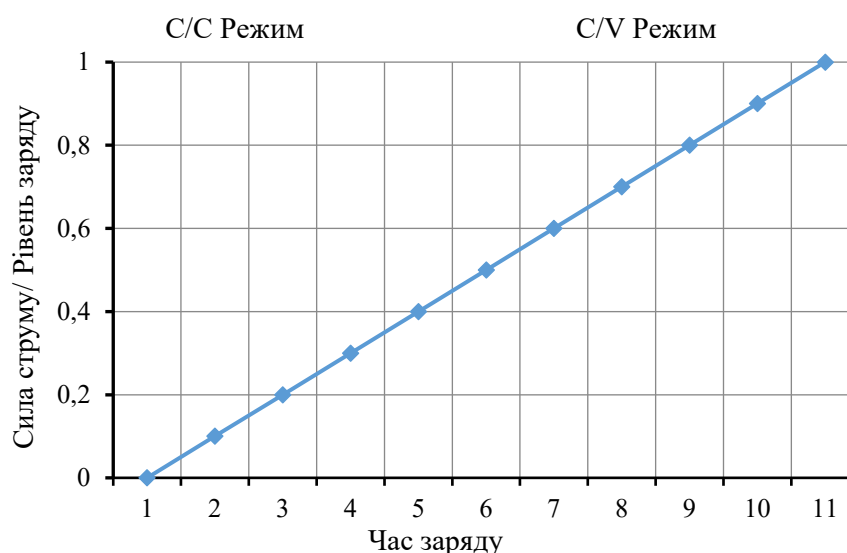


Рисунок 6. Схематичне зображення роботи методу CC/CV

Заряд закінчується коли напруга на клеммах акумулятора складає 97-99% від номінального рівня, або не змінюється протягом певного періоду часу [1, 8]. Заряд акумуляуючої батареї в режимі CC/CV подано схематично на рис. 4.

З врахуванням наведених результатів, кількість енергії



( $P_{\text{макс.роз.}}$ ), яку може віддати за одиницю часу, не може бути більша ніж:

$$P_{\text{макс.роз.}} = U_{\text{ак}} \cdot I_{\text{макс}} \cdot \eta_{\text{роз}} = E_{\text{ак}} \cdot \eta_{\text{роз}} \cdot t^{-1} \quad (20)$$

де  $U_{\text{ак}}$  – напруга на клеммах акумулюючої батареї.

Для спрощення моделі акумулюючої батареї, можна припустити, що напруга на акумулюючої батареї не залежить від режиму роботи і завжди дорівнює номінальній напрузі ( $U_{\text{ак}}$ ) [7]. Беручи до уваги, що  $I_{\text{макс}} = C \cdot t^{-1}$  тоді:

$$U_{\text{ак}} \cdot I_{\text{макс}} = U_{\text{ак}} \cdot C \cdot t^{-1} = E_{\text{ак}} \cdot t^{-1}, \quad (21)$$

де  $E_{\text{ак}}$  – енергія акумулюючої батареї.

Обмеження, що накладає метод заряду CC/CV можна записати як:

$$P_{\text{макс.зар}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{ак}} \cdot I_{\text{макс}} \cdot \eta_{\text{зар}} \cdot C(t) \leq C_{\text{пор}}}{U_{\text{ак}} \cdot I_{\text{макс}} \cdot k \cdot \eta_{\text{зар}} \cdot C(t) \geq C_{\text{пор}}}, & (22) \\ k = \exp\left(-\frac{(t-t_{\text{пор}})}{\tau}\right), \end{cases}$$

де  $C(t)$  – поточна енергетична ємність акумулюючої батареї,

$C_{\text{пор}}$  – енергетична ємність при якій відбувається перехід в режим заряду постійною напругою, відповідає 60-80% від номінальної енергетичної ємності акумулюючої батареї.

Підставивши вираз  $U_{\text{ак}}$  замість  $E_{\text{ак}}$ , отримаємо:

$$P_{\text{макс.зар}} = \begin{cases} \frac{E_{\text{ак}} \cdot I_{\text{макс}} \cdot \eta_{\text{зар}} \cdot t_n^{-1} \cdot C(t) \leq C_{\text{пор}}}{E_{\text{ак}} \cdot I_{\text{макс}} \cdot k \cdot \eta_{\text{зар}} \cdot t_n^{-1} \cdot C(t) \geq C_{\text{пор}}}, & (23) \end{cases}$$

Промодельовавши для випадку коли  $C(t) > C_{\text{пор}}$  отримаємо:

$$C(t) = C_{\text{пор}} + I_{\text{макс}} \int_0^{t-t_{\text{пор}}} \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right) dt,$$

$$C(t) = C_{\text{пор}} + I_{\text{макс}} \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right)\right),$$

$$C(t) = C_{\text{пор}} + C_{\text{ном}} \cdot t_n^{-1} \cdot \tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t-t_{\text{пор}}}{\tau}\right)\right),$$

$$C(t) = C_{\text{пор}} + C_{\text{ном}} \cdot t_n^{-1} \cdot \tau (1 - k),$$

Після моделювання отримуємо коефіцієнт трансформації акумуляторної батареї

$$k = 1 - \frac{C(t) - C_{\text{пор}}}{t_n^{-1} \cdot C_{\text{пор}} \cdot \tau}$$

Максимальна потужність розряду акумулюючої батареї залежить



від:

Напруга акумуляуючої батареї

$$V_{ae} = V_{нрз} - (I_{bat} \cdot R_{зар}),$$

ККД розряду:

$$\eta = \begin{cases} \eta_{зар} = \frac{V_{нрз}}{V_{нрз} - (I_{bat} \cdot R_{зар})} \\ \eta_{роз} = \frac{V_{нрз} - (I_{bat} \cdot R_{зар})}{V_{нрз}} \end{cases},$$

де  $V_{нрз}$  – напруга розімкненого кола,

$I_{bat}$  – сила струму, що проходить через однаакумуляуюча батарея,

$R_{зар}$  – опір акумуляуючої батареї.

При заряду акумуляуючої батареї сила струму береться зі знаком «-», а при розряді з «+». Напруга розімкненого кола і опір акумуляуючої батареї – це величини, що залежать від багатьох факторів: типу акумуляуючої батареї; рівня заряду елемента; температура експлуатації; ступінь деградації елемента; тощо. У зв'язку, з чим зазвичай ці параметри встановлюються експериментальним шляхом.

На основі отриманих результатів рис. 7, 8, 9 було розраховано, що ємність 1 кВт·год складає 120 А·год. Якщо  $t_n^{-1}=0,2$  тоді максимально допустима сила струму ( $I_{макс}$ ) буде 24 А.

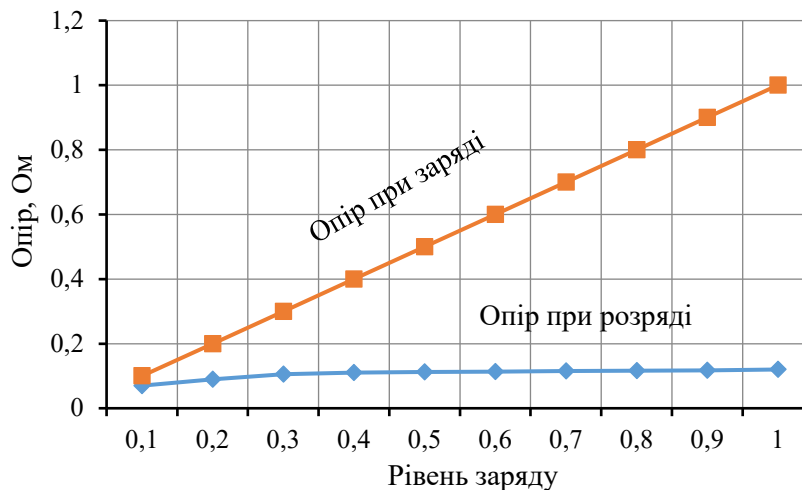


Рисунок 7. Залежність між опором одиничного елемента батареї і рівнем заряду(SOC)

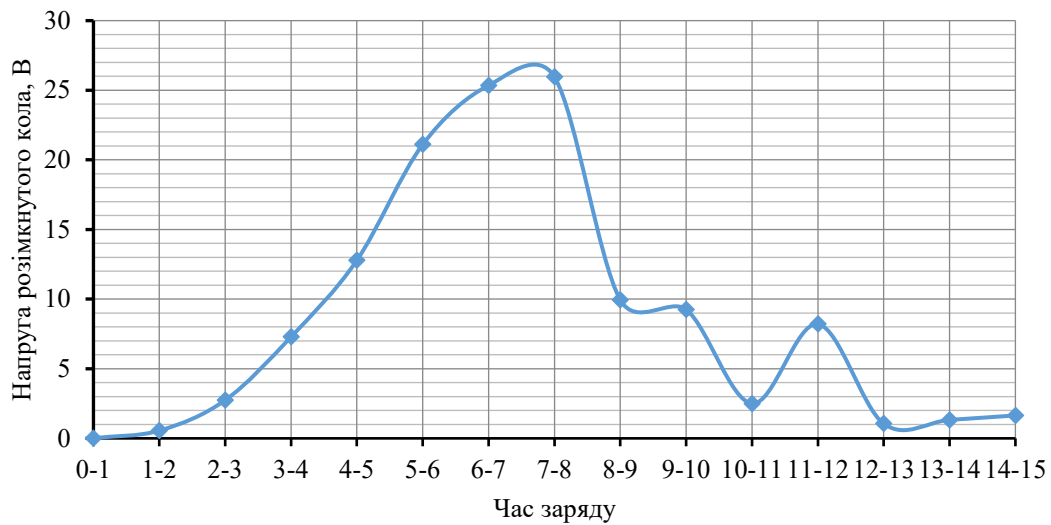


Рисунок 8. Залежність між напругою розімкнутого кола і часом заряду (SOC)



Рисунок 9. Графік максимальної потужності заряду і розряду акумуляторної батареї

На основі отриманих результатів, можна стверджувати, що максимальне відхилення при заряді між розробленою моделлю і еквівалентною схемою акумуляуючої батареї складає 4%, а в середньому розроблена модель завищує максимальну потужність заряду на 1%. При розряді максимальне відхилення становить 10% у випадку, коли рівень заряду акумуляуючої батареї близький до нуля, в середньому розроблена модель завищує максимальну потужність розряду на 6%.

Порівнюючи розроблену модель і еквівалентну схему акумуляуючої батареї, можна зробити висновок, різниця між



максимальною потужністю заряду-розряду для описаних моделей не перевищує 10%, а в середньому становить 3,5%. За відсутності детальної технічної документація акумулюючої батареї, розроблена модель може бути використана замість інших моделей.

*Висновки.* Удосконалено модель процесів заряду-розряду акумулюючої батареї з врахуванням режиму роботи, що дозволяє визначити моменти зміни енергодинамічних режимів джерел генерації зарядного пристрою відповідно до максимальної потужності заряду і розряду акумуляторної батареї

Розроблена модель заряду-розряду акумуляторної батареї з врахуванням режиму заряду CC/CV. З метою дослідження коректності моделі, проведено порівняльний аналіз її з моделлю на основі еквівалентної схеми. На основі аналізу отриманих результатів, можна зробити висновок, що різниця між максимальною потужністю заряду-розряду для описаних моделей не перевищує 10%, а в середньому становить 3,5%.

#### Список використаних джерел

1. Medykovskyy M., Melnyk R. Processing of data on the intensity of solar radiation for solar power plant management systems. *Econtechmod. An international quarterly journal*, Т. 7, № 3, 2018. Р. 33–38.
2. Кармазін О. Балансова надійність електроенергетичних систем в умовах зростання частки відновлюваної енергетики. Автореферат, Київ: Національної академії наук України, 2019. С. 38.
3. Кузнєцов М., Лисенко О. та Мельник О. Особливості стохастичної. Оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. *Відновлювана енергетика*, № 2, 2018. С. 6–15.
4. Buch R., Carton J., Harasis Y., Sudipta L., Zedler M., Lin J. Energy Storage Monitor Latest trends in energy storage, *World energy council*, 2019. Р. 1–8.
5. Bloomberg N E F. Battery Pack Prices Cited Below 100 kW/h for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kW/h,» [Онлайнвий]. Available: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kw/h>.
6. Rancilio G., Lucas A., Kotsakis E., Fulli G., Merlo M., Delfanti M. Masera M. Modeling a Large-Scale Battery Energy Storage System for Power Grid Application Analysis, *MDPI Energies*, Т. 12, № 3312, 2019. Р. 8–13.
7. Casperson D. Towards a Better Presentation of Dynamic Programming, *WCCCE 14: Proceedings of the Western Canadian Conference on Computing Education*. 2014. Р. 1–5.
8. Kim B. K., Park S. M. Park S. J. A Study on Single-Mode Charger Using DC modeling Equivalent Estimation of the Battery. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Р. 201–205.



9. Contreras M. C., Go Design Patterns, Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd. 2017. P. 1–5.

10. González I., Calderón A. J., Figueiredo J. and C. Sousa J. M. A Literature Survey on Open Platform Communications (OPC) Applied to Advanced Industrial Environments» *MDPI: Electronics*, Т. 8, № 510, 2019. P. 11–15.

11. Jianli F., Shengnan L. Performance Analysis of Various Activation Functions in Artificial Neural Networks. *Journal of Physics Conference Series: Conf. Series*. 2019. P. 1237. P. 21–25.

12. Silveira L. R., Tanscheit R. Vellasco M. Quantum-inspired genetic algorithms applied to ordering combinatorial optimization problems. *IEEE World Congress on Computational Intelligence June, 2012*. P. 10–15.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2023 р.

**V. Boyarchuk, S. Korobka, I. Stukalets, M. Babych, S. Syrotyuk**  
Lviv National University Environmental University

#### **METHOD OF RESEARCH THE EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL ELECTRICITY ACCUMULATION**

In the article, a model of the charge-discharge processes of the storage battery is developed, which is used to study the operation of the hybrid power supply system and form recommendations for the operator. The model was developed taking into account the features of the CC/CV charge mode and limitations on the charge-discharge capacity. In order to study the influence of the capacity of the storage battery on the average value of the power imbalance, that is, on the difference between the total electricity generation and the load schedule, computer simulation of the charge-discharge modes was carried out for two models of the storage battery (developed model, equivalent circuit of the storage battery) and for three methods of determining the active composition (modified method of dynamic programming). The obtained results make it possible to substantiate the energy capacity of the storage battery necessary to ensure the permissible power imbalance.

The model allows achieving satisfactory correctness with lower computational complexity. To check the correctness of the developed model, an equivalent circuit of a storage battery was used. The results of computer modeling showed that the average deviation between the limitations on charge-discharge capacity for the developed model and the equivalent circuit of the storage battery is 1% during charge and 6% during discharge.

A charge-discharge model of the storage battery was developed, taking into account the CC/CV charge mode. In order to investigate the correctness of the model, a comparative analysis of it with the model based on the equivalent circuit was carried out. Based on the analysis of the obtained results, it can be concluded that the difference between the maximum charge-discharge capacity for the described models does not exceed 10%, and on average is 3.5%.

**Key words:** rechargeable battery, electrochemical processes, electrolyte, charging capacity.