

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-21>

УДК 631.364:621.311.243

С. В. Коробка¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4717-509X

Б. В. Болтянський², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2072-4025

Р. В. Скляр², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-1547-5100

І. Г. Стукалець¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-7107-4865

Р. Б. Шеремета¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7331-3118

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького²Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: korobkasv@ukr.net

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО АНАЛІЗУ СИСТЕМИ «ФОТОМОДУЛЬ – АКУМУЛЯТОР»

Анотація. У роботі здійснено аналіз впливу параметрів зарядно-розрядного процесу на енергетичну ефективність акумуляторів. Порівнюючи навантажувальні характеристики типового фотомодуля із зарядними характеристиками акумулятора, визначено основні причини втрат ефективності у фотоелектричних установках. Отримані закономірності необхідно враховувати під час проєктування структури фотоелектричних установок і розроблення алгоритмів їх функціонування для максимально ефективного використання сонячної енергії.

Ключові слова: фотомодуль, фотоелектрична установка, акумулятор, зарядний струм, зарядна напруга, ефективність, коефіцієнт віддачі, коефіцієнт корисної дії.

Постановка проблеми. Фотомодуль – це компонент фотоелектричної установки, який перетворює сонячну енергію на електричну за допомогою напівпровідникових матеріалів. Фотоелектрична установка складається з одного або кількох фотомодулів та інших компонентів для генерації і накопичення електроенергії. Акумулятор використовується для зберігання електроенергії, отриманої від фотомодулів, і забезпечує живлення у періоди недостатньої сонячної активності.

Зарядний струм – це струм, який подається на акумулятор під час зарядки, а зарядна напруга – це напруга, що підтримується на акумуляторі у цей час.

Ефективність системи визначається як здатність акумулятора зберігати та віддавати електроенергію з мінімальними втратами. Коефіцієнт віддачі показує відсоток енергії, яку акумулятор здатен повернути під час розрядки порівняно з отриманою під час зарядки. Коефіцієнт корисної дії (ККД) визначає загальну ефективність системи, включаючи втрати під час перетворення та зберігання енергії.

Світовий рівень прийняття фотоелектричних установок зріс на 43% у 2020 р., коли було продано понад 3 млн одиниць. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, до 2030 р. близько 30% усіх фотоелектричних установок будуть приватні домогосподарства автономними. Однак сьогодні фотоелектричні установки становлять лише від 1% до 3% загальної кількості фотомодулів [1; 16]. Досягнення високих показників продажів можливе лише за умови конкурентоспроможності відновлюваних джерел енергії над традиційними джерелами, які нині мають перевагу серед споживачів. Щоб фотоелектричні установки стали привабливими для покупців, необхідно вирішити низку ключових проблем, зокрема щодо їхніх ефективності та інфраструктури.



Фотоелектричні установки можуть стати важливою альтернативою у боротьбі з глобальним потеплінням, забрудненням повітря та виснаженням паливних ресурсів, оскільки вони є екологічно чистими та використовують відновлювані джерела енергії. Акумулятор є основним елементом фотоелектричних установок і його ємність безпосередньо впливає на тривалість автономної і безперебійної роботи об'єкта. Додатковою перевагою фотоелектричних установок є можливість заряджання вночі за допомогою електромережі. Останнім часом такі країни, як США, Індія, Китай та держави Європейського Союзу, активно просувають фотоелектричні установки, запроваджуючи різні програми та стимули, зокрема екологічні й економічні.

Однак через обмежену кількість зарядних станцій багато споживачів бояться короткотривалої безперебійної роботи об'єкта без можливості підзарядки, що створює затримки та викликає занепокоєння. Це явище називають занепокоєнням безперебійної роботи об'єкта – страхом, що батареї фотоелектричних установок не вистачить для довготривалої роботи. Виробники оригінального обладнання активно працюють над збільшенням ємності батареї, що впливає на її розмір, хімічний склад та систему керування. Для споживача, який планує використовувати фотоелектричні установки, важливими критеріями є коротший час заряджання, менше обслуговування та нижча вартість експлуатації [2].

Відбір енергії з фотомодуля та її передача до акумулятора зазвичай здійснюються за допомогою зарядного пристрою. Сучасні зарядні пристрої забезпечують оптимальну генерацію електроенергії шляхом постійного відстеження точки максимальної потужності (P_{mpp}) на вольт-амперній характеристиці (ВАХ) фотомодуля. У складі фотоелектричних установок (ФЕУ) такі пристрої також виконують додаткові функції керування потужністю відповідно до схеми комутації силових елементів. Проте щоб знизити вартість ФЕУ, часто прагнуть заряджати акумулятори до максимальної ємності, не приділяючи належної уваги ефективності проміжних етапів перетворення електроенергії. У результаті без правильного обґрунтування алгоритму зарядно-розрядного процесу непродуктивні втрати можуть нівелювати переваги навіть найсучасніших і високотехнологічних зарядних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень. Сучасне суспільство дедалі більше залежить від електронних пристроїв, і акумулятори відіграють ключову роль у нашому повсякденному житті [1]. Системи накопичення енергії, особливо акумулятори, є важливим інструментом для боротьби з наслідками кліматичних змін, викликаних використанням викопних видів палива, і стають невід'ємною частиною енергетичного балансу [2]. Літій-іонні акумулятори (LiBs) сьогодні є основним вибором для багатьох сфер – від портативної електроніки до стаціонарних енергосховищ та електромобілів (EV) [3]. За прогнозами [4], глобальна потужність LiBs зросте з 242 ГВт-год. у 2020 р. до 2731 ГВт-год. до 2030 р., що демонструє 11-кратне збільшення за десятиліття. Приватний сектор є головним споживачем LiBs, на що вказує різке зростання світових продажів для фотоелектричних систем: із 500 тис у 2016 р. до 14 млн у 2023 р. [5]. Прогнозується, що ця тенденція триватиме: до 2040 р. кількість продажів акумуляторів досягне 66 млн [6].

Однією з важливих проблем безперебійних систем фотоелектричних установок є поступове зниження ємності акумулятора, що впливає на його ефективність і тривалість роботи. Акумулятори проєктуються з урахуванням прийнятного терміну служби, і виробники активно працюють над зменшенням швидкості їх деградації. Проте погіршення характеристик акумуляторів залишається неминучим, що вимагає їх заміни для сталого користування [7]. Акумулятори безперебійних систем фотоелектричних установок зазвичай замінюються, коли їхня ємність зменшується на 20–30% від початкової [8; 9; 16–21].

На стійкість безперебійних систем фотоелектричних установок у контексті завершення терміну служби акумулятора впливають кілька чинників. По-перше, вирішення питання тер-



міну служби акумулятора є важливим свідченням екологічної відповідальності виробників. По-друге, процес переробки включає етапи збору, транспортування та відновлення таких основних матеріалів, як літій, кобальт і нікель, свинець. Потреба в заміні старих акумуляторів може стати серйозним викликом для розвитку ринку EV [10]. За прогнозами, між 2011 і 2040 рр. для перепрофілювання буде доступно близько 16,8 млн акумуляторів [11]. Тому ефективне управління акумуляторами, що вийшли з експлуатації, та їх повторне використання можуть бути життєздатними рішеннями для продовження їхнього терміну служби.

У роботі [12] підкреслюють необхідність поєднання зростання продажів безперебійних систем фотоелектричних установок зі сталими практиками, зокрема щодо визначення терміну служби акумулятора. Їхні дослідження наголошують на ризику недостатнього використання акумуляторів, особливо в умовах збільшення їхньої ємності, що може негативно вплинути на загальну стійкість. Раніші дослідження охоплювали технічні характеристики, економічну доцільність та практичне застосування акумуляторів [13]. Автори [14] провели критичну оцінку перспектив і викликів, пов'язаних із цією технологією.

У роботі [17] провели огляд повторного використання акумуляторів для стаціонарного зберігання енергії, підкреслюючи важливість розроблення методологій сортування та моделювання старіння батарей. Незважаючи на дослідження можливостей повторного використання акумуляторів, питання економічної доцільності, відповідності параметрів, безпеки та політики залишаються невирішеними. Цей огляд зосереджується на технічних та соціально-економічних аспектах повторного використання акумуляторів, досліджуючи виклики та потенційні рішення для продовження терміну їх служби в інших застосуваннях.

Тому для більшості користувачів акумулятори асоціюються, головним чином, із запуском двигунів внутрішнього згоряння, де ключовими параметрами є розрядна потужність і кількість можливих повторних запусків без утрати ємності. Це ж стосується й традиційних застосувань, таких як резервні та охоронні системи живлення. Ефективність акумулятора як перетворювача енергії зазвичай не є пріоритетом. За даними довідника [1], середній коефіцієнт корисної дії (ККД) акумуляторів є відносно низьким: свинцево-кислотні мають ККД близько 80%, нікель-кадмієві – 70%, нікель-металогідридні – 65%, а літій-іонні – 75%. Проте ці показники базуються на середніх умовах експлуатації з використанням оптимальних зарядних пристроїв, що працюють від мережі. У випадку фотоелектричних установок (ФЕУ) підтримання рекомендованих умов заряджання можливе лише протягом коротких періодів за стабільного рівня освітленості фотомодуля, що на практиці відбувається рідко.

Пряме вимірювання енергії, накопиченої акумуляторами під час заряджання за складними імпульсними алгоритмами, є технічно складним завданням, а методи його реалізації лише починають розроблятися [2]. Водночас результати таких вимірювань мають переважно теоретичну цінність, оскільки вирішують лише окремі аспекти проблеми.

Ефективність зарядно-розрядного циклу зазвичай оцінюється через коефіцієнти віддачі за ємністю (η_Q) або за енергією (η_W) [3–6]. Необхідні кількісні показники для цих оцінок можна отримати за допомогою простого аналізу режимів зарядно-розрядного процесу, який поки що не отримав достатньої уваги. У разі заряджання від фотомодуля параметри процесу заряджання повністю залежать від характеристик генерації фотоелектричної енергії, для яких потрібно розробити відповідний енергоефективний алгоритм заряджання та оптимальну структуру зарядного пристрою. Важливим етапом цього є уточнення існуючих термінів та методик вимірювання, що становить необхідну частину даного дослідження.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є розроблення схем пристроїв фотоелектричних систем для заряджання акумуляторних батарей асиметричним струмом із підвищеним коефіцієнтом корисної дії (ККД), проведення аналізу характеристик моделей цих схем,

а також розроблення алгоритмів для ефективного управління процесом заряджання акумуляторних батарей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити характеристики акумуляторних батарей та методів їх заряджання;
- розробити схеми пристроїв для заряджання акумуляторних батарей асиметричним струмом із підвищеним коефіцієнтом корисної дії (ККД);
- змодельовати та проаналізувати електромагнітні процеси у роботі запропонованих схем;
- розробити алгоритми для ефективного управління процесом заряджання акумуляторних батарей.

Основна частина. Досягнення в технології акумуляторів (рис. 1):

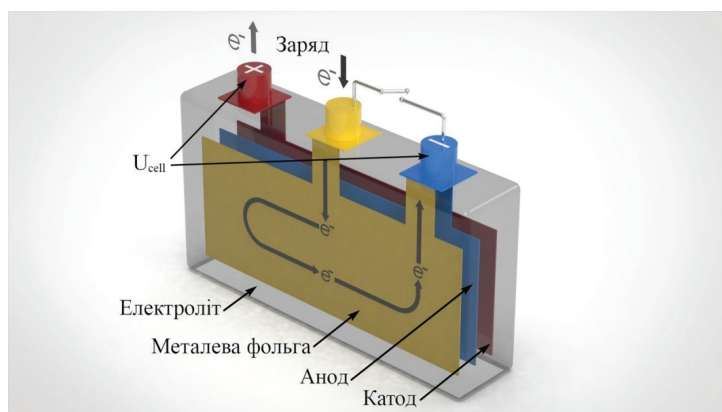


Рис. 1. Загальний вигляд будови акумуляторної батареї

Алюмінієво-іонні акумулятори. Літій-іонні батареї використовуються в електромобілях протягом тривалого часу. Алюмінієво-іонні акумулятори хороші для накопичення енергії, що пов'язано з їхньою гравіметричною та об'ємною ємністю. Алюміній більше, ніж літій. Al-іонні батареї забезпечують у чотири рази більше енергії, ніж літій-іонні батареї за низького рівня вартості. В алюмінієвих іонних акумуляторах алюміній використовується як негативний електрод, а графіт – як позитивний електрод. Іонними прийнято $AlCl_3$ і 1-етил-3-метилімідазолій хлорид рідина. Ця іонна рідина має напівоборотну реакцію для обох електродів:

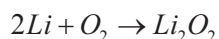
Негативний електрод: $Al + 7 AlCl_4^- = 4 Al_2Cl_7^- + 3e^-$

Позитивний електрод: $C_n(AlCl_4^-) + e^- = C_n + AlCl_4^-$

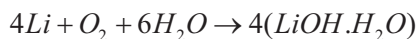
Таким чином, алюмінієво-іонні батареї можуть використовуватися в майбутньому для систем зберігання енергії у фотоелектричних установках [6; 7; 21].

Складні батареї. Компанія Jenax [8] розробила інноваційний літій-іонний акумулятор, який можна скласти до 200 тис разів без утрати його продуктивності. Ці батареї підтримують швидку зарядку та можуть жити невеликі компоненти фотоелектричних установок. Вони вирізняються високою стійкістю до втоми на згин і мають високу щільність енергії. Робочий температурний діапазон складних батарей становить від -20°C до 60°C , що робить їх придатними для використання в будь-яких кліматичних умовах. Ємність акумулятора дорівнює 30 мАг, і він успішно пройшов тести на безпеку, включаючи водонепроникність [9].

Літій-повітряна батарея. Літій-повітряна батарея (LiO_2V) – це ще одна літєва батарея, яку необхідно детальніше вивчити через її високу здатність виробляти енергію. В осередку анод – металевий літій, катод – пористий вуглець, а використовуваний електроліт є неводним [2]. Теоретично він може виробляти високу питому щільність 3505 Вт·год./кг. Реакція комірки така:

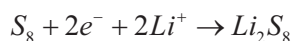


Теоретична щільність енергії неводних літій-повітряних батарей вища, ніж у звичайних свинцево-кислотних акумуляторів. Реакція, що обґрунтовує теоретичну щільність енергії води літій-повітряного акумулятора:



Щільність енергії водних літій-повітряних батарей нижча, ніж у неводних звичайних свинцево-кислотних акумуляторів [5].

Літій-сірчаний акумулятор. Сірка є природним елементом, який широко поширений та недорогий. Вона екологічно безпечна, тому літій-сірчані батареї не становлять загрози для довкілля. Металевий літій використовується як анод, сірчаний композит – як катод, а органічна рідина служить електролітом. Теоретична ємність сірки становить 1675 мАг/г, тоді як для металевого літію вона дорівнює 3860 мАг/г. Літій-сірчані батареї мають питому енергію 2567 Вт·год./кг [2], а процес їх розрядки проходить у два етапи [3].



Вибір матеріалів електродів для швидкої зарядки. Ефективність батареї значною мірою залежить від вибору матеріалів електродів. Літій-іонні акумулятори мають потенціал для швидкої зарядки. У таких батареях графіт використовується як один з електродів, проте для скорочення часу заряджання необхідно підбирати відповідні матеріали. Для досягнення швидкої зарядки та високої щільності енергії у літій-іонних батареях можна використовувати червоний фосфор. Літій біс(фторсульфоніл)імід змішують із розчинниками, такими, як триетилфосфат і фторетиленкарбонат, що мають вогнезахисні властивості, для створення інтерфейсу твердого електроліту. Це підвищує електрохімічні характеристики анода з червоного фосфору [2; 4].

Сонячні панелі. Дослідники запропонували використовувати сонячні панелі для генерування електроенергії для безперебійного джерела живлення об'єкта [5]. Наприклад, модулі сонячних панелей можуть автоматично заряджати акумуляторні блоки, що зменшує занепокоєння користувачів щодо частих зупинок і збільшує запас ходу електромобілів. Використання відновлюваних джерел енергії для виробництва батарей допомагає знизити кількість токсичних відходів, що утворюються через транспортні засоби, роблячи цей підхід екологічно безпечним. Сонячні панелі встановлюються на даху електромобілів, а їх ефективність залежить від кількості сонячного світла, яке вони поглинають. Максимальну потужність панелі забезпечують за температури 25°C. Електроенергія генерується, коли сонячне світло потрапляє на панелі. Інженери продовжують удосконалювати технологію сонячних панелей, щоб підвищити їх ефективність [6].

Інтерфейси твердотільних батарей. Твердотільна батарея (SSB) складається з твердих компонентів, які відіграють ключову роль у передачі електронів і транспорту іонів. Порівняно з літій-іонними батареями, що використовують рідкий електроліт, SSB забезпечує вищу енергетичну щільність. Вони також є безпечнішими за сучасні акумуляторні системи завдяки своїй твердотільній структурі, що робить їх менш ризикованими, негорючими та безпечними від можливого витоку електроліту. У SSB використовується вогнестійкий електроліт. Твердотільні батареї сприяють удосконаленню інших типів акумуляторів, збільшуючи щільність енергії на одиницю площі завдяки меншій кількості необхідних елементів. Вони ідеально підходять для акумуляторних систем електромобілів, і виробники автомобілів активно працюють над удосконаленням цих батарей для підвищення ефективності електротранспорту і використання їх у фотоелектричних установках [7].

Суперконденсатори. Суперконденсатори, також відомі як електричні двошарові конденсатори, є інноваційною технологією для зберігання енергії, яка відрізняється від звичайних аку-

муляторів. Останнім часом вони набули популярності завдяки використанню у фотоелектричних установках і електромобілях. Суперконденсатори мають життєвий цикл, що перевищує пів мільйона циклів, зберігаючи енергію в електростатичному полі [2]. На відміну від акумуляторів їхній життєвий цикл значно довший. Акумулятори також можуть працювати в ширшому температурному діапазоні, від -40°C до 70°C , тоді як акумулятори можуть мати проблеми за низьких температур. Вони також мають нижчий внутрішній опір, що зменшує втрати тепла та підвищує енергоефективність. Завдяки суперконденсаторам можна досягти високої потужності (до 10 кВт/кг) за лічені секунди [8].

Таким чином, у роботі будемо розглядати основні проблеми, з якими стикаються акумулятори, зокрема недостатня інфраструктура для зарядки та питання теплового управління батареями. Також обговорюються можливі рішення для подолання цих викликів. Приділяється увага вдосконаленню технологій акумуляторів із метою підвищення ефективності роботи фотоелектричних установок. Окрім того, розглядаються кілька концепцій, які поки що можуть бути недоступними, але здатні сприяти розвитку майбутніх технологій.

Будь-який енергетичний перетворювач має певний коефіцієнт корисної дії (ККД), який обчислюється як відношення корисної роботи до спожитої енергії. У випадку акумулятора енергія зовнішнього джерела накопичується в електролітичній комірці завдяки зміщенню рівноваги окисно-відновних реакцій і переміщенню реагуючих речовин. Процес зарядки прискорюється за рахунок підвищеної зарядної напруги, що сприяє перемішуванню іонів, але водночас збільшує непродуктивні втрати через підвищення опору електроліту та поляризацію електродів, що проявляється у підвищенні температури. Під час розрядки відбувається зворотний процес із подібними втратами, які посилюються зі збільшенням розрядного струму. Як наслідок, кількість енергії, що виділяється на корисне навантаження, значно менша від вхідної енергії. Тому ККД зарядно-розрядного циклу η_w , або коефіцієнт віддачі енергії, визначають через відношення енергії, що виділяється під час розрядки W_p , до енергії, витраченої на повну зарядку акумулятора W_z .

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_z}. \quad (1)$$

Падіння напруги на обох типах опорів залежить від величини розрядного струму I_p або зарядного струму I_z , які для зручності на рис. 2 вважаються однаковими.

На рис. 3 представлено спрощену схему процесу зарядки та розрядки акумулятора, на якій показано падіння напруги на внутрішній частині кола. Опори цієї ділянки можна умовно звести до суми активного опору електроліту для проходження струму R_a та опору поляризації електродів R_n .

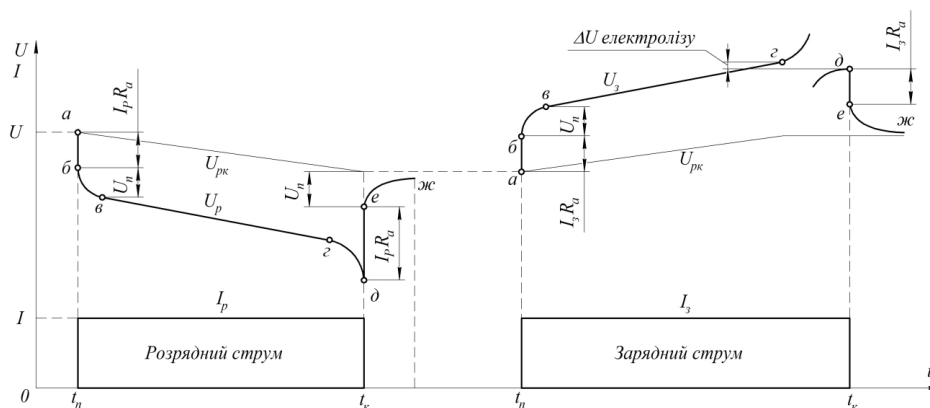


Рис. 2. Схема зарядно-розрядного циклу акумулятора

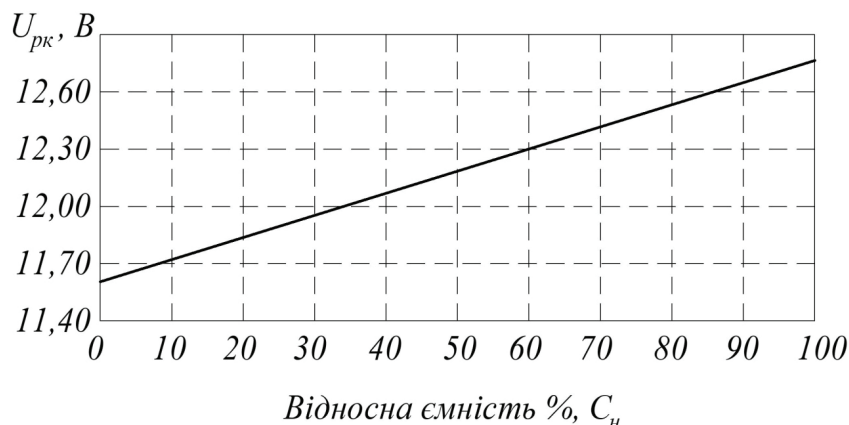


Рис. 3. Залежність напруги розімкненого кола акумулятора від стану зарядженості

Коефіцієнт віддачі по енергії η_w урахує повні втрати енергії зарядно-розрядного циклу, які у загалом розраховують інтегруванням:

$$W_z = \int_0^{\tau_z} I_z(\tau) \cdot U_z(\tau) d\tau; \quad (2)$$

$$W_p = \int_0^{\tau_p} I_p(\tau) \cdot U_p(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Значення енергетичного ККД можна оцінити також геометрично за співвідношенням площ під кривими $U_p(t)$ і $U_z(t)$ на початку t_0 і у кінці t_k процесу.

Як показано на схемі (рис. 2), спади напруги на обох типах внутрішніх опор залежать від величини струму. Зменшення струмів дає змогу зменшити різницю між окресленими площами, що, своєю чергою, підвищує ККД зарядно-розрядного циклу. Проте чисельний розрахунок ККД можливий лише за наявності чітких критеріїв для оцінки початкового та кінцевого енергетичного стану акумулятора, який, як і конденсатори, визначається через поняття ємності. Хоча у конденсаторах накопичуються вільні заряди, в акумуляторах – хімічно зв'язані. Додатково, електрохімічні процеси накопичення та вивільнення енергії в акумуляторах відбуваються відносно повільно через дифузійний механізм переміщення іонів. Таким чином, незважаючи на формальну схожість одиниць вимірювання, терміни «ємність» і «заряд» для акумулятора мають дещо інший або умовний фізичний зміст.

Здатність електрохімічної комірки зберігати електрику кількісно характеризується ємністю, яку через повільні процеси прийнято вимірювати в ампер-годинах (А·год.). Фактична (абсолютна) ємність акумулятора залежить від його електрохімічної природи, масогабаритних характеристик конструкції, концентрації електроліту, температури та інших чинників, тому не може мати чіткого метрологічного визначення. У зв'язку із цим у практиці використовується поняття номінальної ємності (C_n) – умовного «заряду» в А·год., який акумулятор може багаторазово вивільняти після повного заряджання. Номінальна ємність акумулятора завжди менша за фактичну, і її значення визначається від мінімально допустимого рівня розряджання (C_{min}), що не загрожує його передчасному виходу з ладу. Зазвичай номінальну ємність установлює виробник на основі результатів 20-годинної розрядки повністю зарядженого акумулятора сталим струмом до мінімально допустимого рівня C_{min} .

Зарядний стан акумулятора зручно виражати у відносних величинах як частку або відсоток номінальної розрядної ємності, що називається ступенем (рівнем) заряду. Існують два напрями відліку: один – за ступенем заряду, інший – за ступенем розрядки. Нульовий ступінь зарядки



(0% C_n) відповідає мінімально допустимій ємності акумулятора, а одиниця (100% C_n) – номінальний ємності. Відлік за ступенем розрядки проводиться в протилежному напрямі. Із часом акумулятор утрачає здатність зберігати енергію, тому його виводять з експлуатації, коли відносна ємність зменшується до 80% C_n .

Розрядні та зарядні струми акумуляторів різних типів і ємностей зручно вимірювати у «природних» одиницях, які чисельно відповідають тривалості розрядки номінальної ємності. Наприклад, акумулятор із номінальною ємністю 60 А·год., розряджаючись 6-амперним струмом протягом 10 годин, позначається як $I_{10} = C/10$ або 0,1С. Якщо ж акумулятор розряджається 3-амперним струмом протягом 20 годин, його позначають, як $I_{20} = C/20$ або 0,05С.

Досвід експлуатації акумуляторів свідчить, що ступінь їх заряду практично пропорційний загальній електрорушійній силі (є. р. с.) усіх електрохімічних комірок. У практичних умовах є. р. с. акумулятора часто прирівнюють до напруги розімкнутого зовнішнього кола (U_{pk}). У довідниковій та спеціалізованій літературі [5; 6] можна знайти графічні або табличні залежності ступеня заряду основних типів акумуляторів від цієї напруги (рис. 2). Однак цю залежність доцільно вважати напівкількісною, ураховуючи певну невизначеність у визначенні номінальної ємності.

Визначити зміну зарядного стану акумуляторів можна відносно легко, провівши пряме вимірювання напруги розімкнутого кола (U_{pk}). Проте через залишкові поляризаційні явища напруга розімкнутого кола наближається до електрорушійної сили (є. р. с.) лише після тривалого переходу електрохімічних комірок від збудженого до рівноважного стану. Тому для негерметичних акумуляторів напругу розімкнутого кола у вольтах можна розрахувати, використовуючи густину електроліту (d) в г/см³ за відповідним співвідношенням:

$$U_{pk} = 0,84 + d \cdot (4)$$

Кінетика зарядно-розрядних процесів і алгоритми зарядки акумулятора. Наведені поряд значення стандартних потенціалів на електродах відносяться до випадку мольної концентрації електроліту. Своїх максимальних значень ($\phi_{PbO_2} = 1,72$ В, $\phi_{Pb} = -0,4$ В) потенціали досягають за 37% концентрації сірчаної кислоти. Відповідно, максимальна є. р. с. стандартного акумулятора не може перевищувати значення:

$$E_{max} = [1,72 - (-0,4)] \cdot 6 = 12,72 \text{ В.}$$

За великих розрядних струмів виникає безліч центрів кристалізації, що призводить до так званої гетерофазної кристалізації та утворення рівномірного і щільного шару сульфату на електродах. Подібне явище спостерігається також за надмірної розрядки: окремі кристали сульфату на поверхні електродів зростаються, а проміжки між ними заповнюються. В обох випадках може статися повна ізоляція електродів, що ускладнює їх відновлення без зовнішнього втручання. У результаті подальшої розрядки в такому режимі зростає внутрішній опір, і напруга падає до мінімально допустимого значення 7,8 В.

На відміну від цього за малих розрядних струмів, коли нові центри кристалізації утворюються рідко, триває ріст уже сформованих кристалів. У цьому разі шар сульфату складається з великих хаотично зрощених кристалів зі значними порожнинами між їхніми гранями. Доступ до електродів зберігається, що дає змогу більш повно використовувати активні реагуючі маси та ємність акумулятора. Проте такий режим розряджання слід зупиняти за зменшення напруги до 10,5–10,8 В [7; 8].

Швидкість заряджання акумуляторів зростає зі збільшенням напруги на їхніх клеммах, однак ефективність цього процесу обмежується поляризаційними явищами. Із підвищенням ступеня зарядки зростає напруга розімкнутого кола (U_{pk}), і для продовження зарядного процесу необхідно підвищувати зарядну напругу. За наближення до номінального зарядного стану до резистивних та поляризаційних утрат додаються ще втрати на газовиділення внаслідок посиленого

електролізу. Як наслідок, зменшується ефективність зарядно-розрядного циклу. Тому виробники акумуляторів зазвичай рекомендують режим заряджання для типових умов експлуатації: циклічного, буферного та аварійного.

Акумулятори фотоенергетичних установок АПК зазвичай функціонують у циклічному режимі, заряджаючись удень і розряджаючись уночі. Однак умови заряджання від фотомодуля рідко відповідають рекомендаціям виробників, які були розроблені для пристроїв, що живляться від електромережі. Енергетичні параметри фотомодуля є випадковими величинами, які не залежать від користувача, і будь-яке відхилення від оптимальної точки навантаження призводить до зниження потенційної продуктивності. Таким чином, зарядні режими акумуляторів фотоелектричних установок слід адаптувати до специфіки генерації фотоелектрики, а не навпаки, як рекомендується за заряджання від електромережі [16–21].

Енергетичною характеристикою глибини зарядно-розрядного циклу є зміна зарядної ΔC (*charge*) та розрядної ΔD (*discharge*) ємності, вимірюваної в А·год. [3; 10]. Відношення розрядної ємності до зарядної називають коефіцієнтом віддачі за ємністю, або ефективністю заряду η_q .

$$\eta_q = \frac{\Delta D}{\Delta C} . \quad (5)$$

Коефіцієнт віддачі за ємністю, передусім, визначається співвідношеннями обох струмів, а також утратами, пов'язаними з електролізом води та саморозрядом. Це вказує на необхідність уникати форсованих режимів і не намагатися заряджати акумулятор до 100% C_n для досягнення енергоощадності. Цей висновок підтверджується графічними залежностями, представленими на рис. 4 і 5, які можна знайти в довідникових та рекламних матеріалах деяких виробників [5; 6].

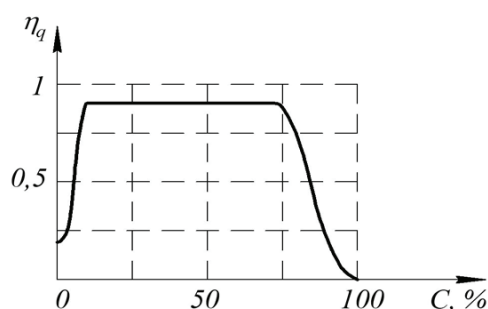


Рис. 4. Схематична залежність зарядної ефективності від стану зарядженості акумулятора

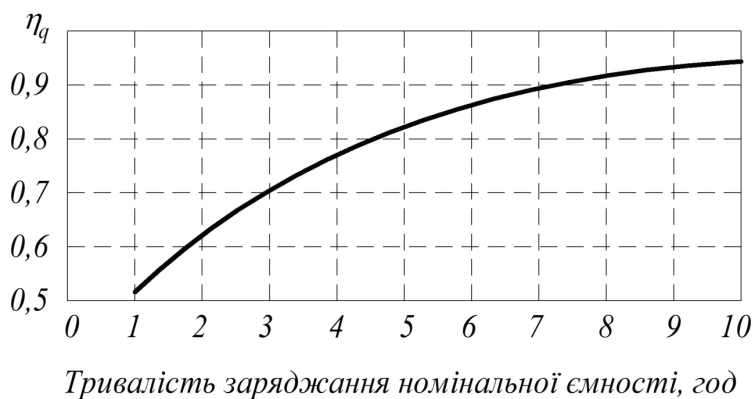


Рис. 5. Залежність ефективності заряд від зарядного струму, вираженого в годинах заряджання номінальної ємності

Використання простого двоступеневого зарядного пристрою дає змогу зменшити втрати на електроліз води шляхом обмеження зарядного струму на рівні 50–60% C_n . Однак це призводить до втрат енергії фотомодуля, які виникають на обмежувальному резисторі. Зарядні пристрої з широтно-імпульсною модуляцією зарядного струму можуть забезпечити коефіцієнт заряду 0,95, навіть за високого ступеня зарядженості. Проте частина потужності фотомодуля, пропорційна шпаруватості зарядних імпульсів, залишається невикористаною. Отже, для мінімізації втрат фотоелектричної енергії під час накопичення рекомендується вибирати акумулятор великої ємності, за якої номінальний струм фотомодуля (I_ϕ) не перевищує 0,1C розрядного струму акумулятора:

$$I_\phi \leq 0,1C. \quad (6)$$

За менших зарядно-розрядних струмів ефективність заряду практично залишається сталою на рівні 0,95.

Із метою продовження терміну служби акумуляторів не рекомендується їх розряджати нижче 30% від номінальної ємності (C_n). Для мінімізації втрат акумулятор варто використовувати в межах 30–80% C_n , що фактично означає використання лише 50% його номінальної ємності. У цьому діапазоні за постійних струмів зарядно-розрядні характеристики змінюються лінійно з часом (рис. 4), тому енергія кожного процесу визначається як добуток середньої напруги на ємність:

$$W_z = \bar{U}_z \cdot I_z \cdot t = \bar{U}_z \cdot C; \quad (7)$$

$$W_p = \bar{U}_p \cdot I_p \cdot t = \bar{U} \cdot D. \quad (8)$$

Поділивши перше рівняння на друге та використавши співвідношення (5), отримуємо вираз для розрахунку енергетичного ККД зарядно-розрядного циклу як добуток коефіцієнта зниження напруги на коефіцієнт заряду:

$$\eta_w = \frac{W_p}{W_z} = \frac{\bar{U}_p}{\bar{U}_z} \cdot \frac{D}{C} = \eta_U \cdot \eta_q, \quad (9)$$

де $\eta_U = U_p/U_z$ – коефіцієнт зменшення напруги.

Ємність акумулятора у складі ФЕУ зазвичай рекомендується вибирати такою, щоб протягом перших чотирьох годин (до полудня) він заряджався до рівня 75–80% від номінальної ємності, а решту світлового дня поступово до заряджався до максимального можливого рівня. Відповідний алгоритм процесу зарядки наведено на рис. ба.

Згідно із цією вимогою, вважається, що розрядна ємність акумулятора повинна приблизно відповідати добовій продуктивності фотомодуля. Однак, як було показано раніше, будь-які методи заряджання понад 80% призводять до втрат продуктивності фотомодуля або зниження ККД циклу. На практиці зазвичай вибирають акумулятор приблизно вдвічі більшої ємності, щоб забезпечити енергетичний запас на два дні. Проте такий вибір не мінімізує втрати, оскільки заряджання слід виконувати в межах від мінімального рівня $C_{min}=30\%$ до максимального рівня 80% від номінальної ємності, використовуючи лише половину номінальної ємності для досягнення ефективності заряду $\eta_q \rightarrow 1$. Тому необхідно або відмовитися від двох добового запасу енергії, або вибрати акумулятор у четверо більшої ємності відносно добової продуктивності фотомодуля.

Поза рамками цього аналізу залишається питання узгодження зарядної напруги акумулятора з напругою фотомодуля в режимі, наближеному до оптимальної потужності, що графічно показано на рис. 5б. Остання майже завжди перевищує номінальну зарядну напругу акумулятора, що призводить до додаткових утрат потенційної ефективності фотомодуля [9; 11]. Для

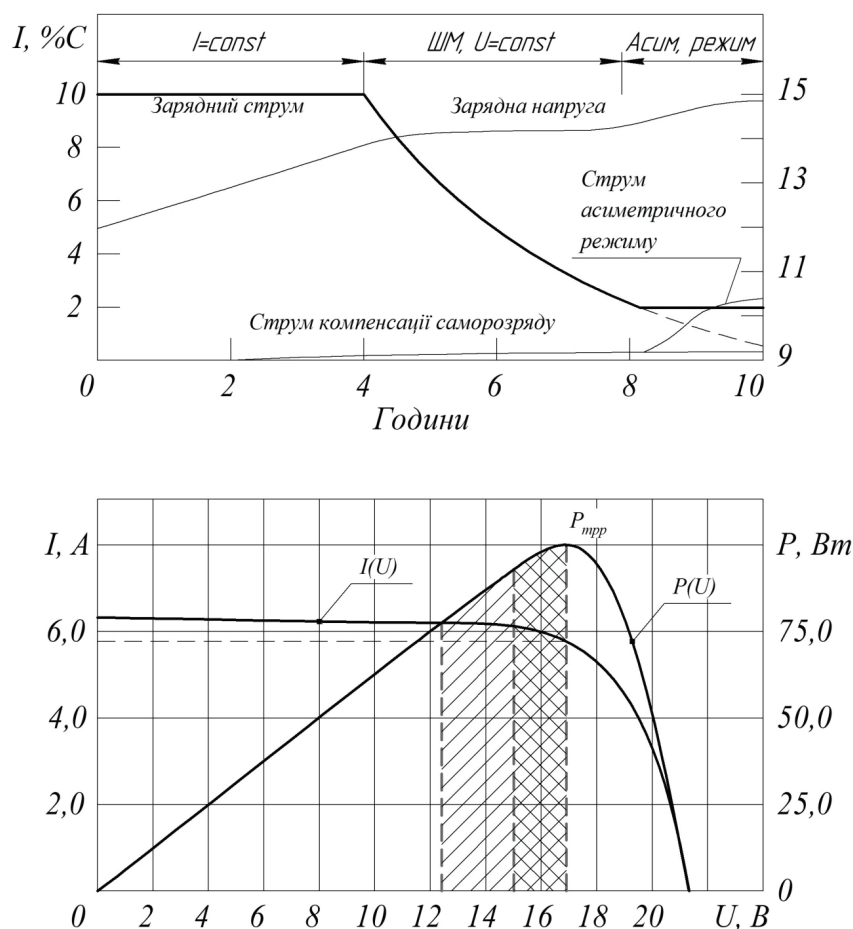


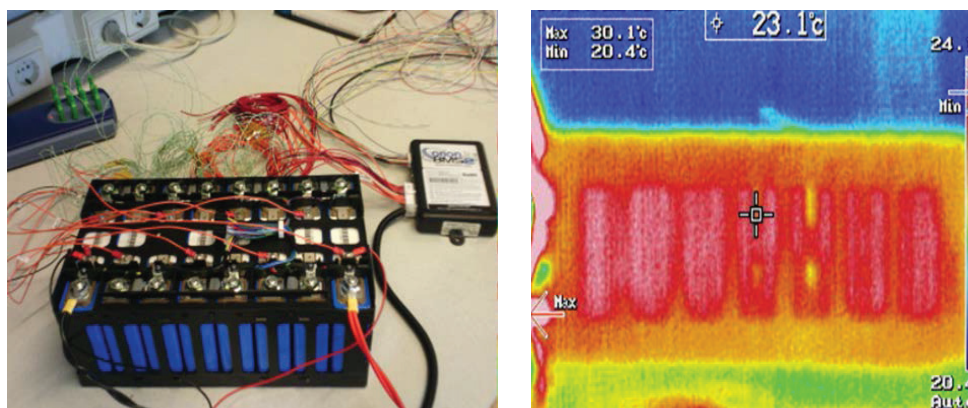
Рис. 6. Типовий алгоритм зарядки у складі ФЕУ (а) та сумісність зарядної напруги з VAX та BPX фотомодуля типу KV100 (б)

вирішення цієї проблеми використовують підбір кількості сонячних елементів у фотомодулі [9] або впровадження проміжного акумулятора (суперконденсатора) із формуванням зарядних імпульсів із необхідними параметрами [12] та інші методи.

Температура в комірках під час розряду змінюється більш істотно, ніж під час заряджання. Процес заряджання для літій-іонних батарей (LiB) відбувається у режимі постійного струму – постійної напруги (CC–CV). Це означає, що коли напруга досягає межі відсічення, постійний струм у першій частині заряджання зменшується, і заряджання триває у режимі постійної напруги.

Згідно з нашими попередніми дослідженнями та інфрачервоним на рис. 7, для моніторингу температури поверхні було вибрано місце посередині клітини. Виявлено, що різниця температури між коміркою 2 і коміркою 6 у цьому старому модулі становить майже 2°C , що підкреслює необхідність належної системи управління температурою в твердотільних батареях. Слід зазначити, що деградовані комірки можуть впливати на сусідні, підвищуючи їхню робочу температуру і, отже, прискорюючи процес старіння.

Інфрачервоне зображення модуля демонструє розподіл температури на поверхні комірок усередині модуля під час розряду з током $1\text{ C}_{\text{н}}$. Модуль використовувався протягом восьми років і пройшов значну кількість циклів заряджання та розряджання, досягнувши 70% від початкової потужності. Для більш детальних вимірювань температури була використана 8-канальна термопарна система типу К для моніторингу температури поверхні (на фото а).



а)
б)
Рис. 7. Модуль (а) та інфрачервоне зображення (б)

Інфрачервона камера застосовувалася для відстеження температурного розподілу на поверхні комірок у модулі.

Отже, для зменшення непродуктивних утрат енергії у фотоелектричних установках слід дотримуватися таких рекомендацій:

- Зарядно-розрядні струми не повинні перевищувати $0,1 C_n$.
- Зарядно-розрядний цикл акумулятора слід обмежити інтервалом від 0,25–0,30 до 0,75–0,80 від номінальної ємності.
- Ємність проєктованої фотоелектричної установки повинна бути розрахована на 2–2,5 рази більше за добову продуктивність фотомодуля.
- Оскільки точка оптимальної потужності фотомодуля зазвичай перевищує діапазон зарядних напруг акумулятора, для повнішого використання потенціалу фотоелектричних систем доцільно використовувати додаткове пікове навантаження.

Висновки. Вирішення термінової потреби в стійких рішеннях для пом'якшення екологічних наслідків акумуляторів підкреслює критичну важливість розроблення механізму управління великою кількістю батарей, які досягають кінця свого першого життєвого циклу. Хоча акумулятори на основі вторинного використання мають явні переваги, повторне використання акумуляторів для вторинного використання катіонів створює певні складнощі. Різноманітні виклики потребують нашої уваги та креативного підходу, але подолання цих труднощів часто веде до інновацій і прогресу в цій галузі. Це дослідження детально розглядає пов'язані складнощі та виклики, щоб зрозуміти реальність і потенційні бар'єри.

Основна мета полягає у підвищенні ефективності використання цих акумуляторів у програмах відновлення, пропонуючи передове бачення щодо різноманітних методів, які можуть підвищити життєздатність батареї і подолати вузькі місця. Значну частину цього огляду присвячено викликам, пов'язаним зі скринінгом усередині акумуляторної батареї. Існує багато різних вимірювальних методів і аналізів акумуляторних модулів, кожен з яких відрізняється за сферою застосування, складністю, витратами часу та точністю. Досліджувані методи включають вимірювання ємності акумулятора, аналіз додаткової ємності, аналіз диференціальної напруги, диференціальну термовольтамперометрію та електрохімічну імпедансну спектроскопію. Точність різних методик оцінки стану батареї та їх складність змінюються залежно від програми відновлення та її чутливості до точних вимірювань. Часто компроміс між різними показниками ефективності є вирішальним для забезпечення достатньої застосовності.

Комбінування окремих методів або використання гібридних підходів для оптимізації ефективності процесу оцінювання можна розглядати як перспективну стратегію. Дослідження акумуляторів усе ще знаходяться на початковій стадії, з очікуванням подальших розробок у наступні роки для усунення існуючих прогалин. Ключовим аспектом подолання цих прогалин є отримання глибшого розуміння процесів деградації батарей у різних хімічних середовищах, що є критично важливим для вирішення проблем, які впливають на довгострокову продуктивність, надійність і стабільність тривалої роботи батарей. Оскільки на деградацію батарей значно впливає її попередня історія використання, доступ до даних із початкового життєвого циклу є важливим для стимулювання зростання ринку джерел безперебійного живлення за допомогою фотоелектричних установок. Майбутнє використання акумуляторів, безсумнівно, залежить від технологій досягнення та спільних зусиль між зацікавленими сторонами для встановлення прозорих протоколів збору, аналізу та обміну даними між дослідниками, учасниками галузі та політиками.

Отже, повторне використання акумуляторів стало нагальною проблемою, що підвищує важливість вирішення пов'язаних із цим питань у сфері безперебійного живлення приватного сектору. Окрім того, новітні тенденції та конструкції акумуляторних батарей, а саме аноди на основі кремнію та катоди з низьким вмістом кобальту в поєднанні з літій-металевими анодами, які виходять за межі традиційної літій-іонної хімії (натрієві батареї), обіцяють зменшити витрати, покращити безпеку, продуктивність і ефективність щільності енергії. Ці досягнення, безумовно, вплинуть на продуктивність та екологічні аспекти, а також на потенційні переваги вторинного використання, що вимагатиме подальших досліджень, включаючи оцінку впливу та життєвого циклу акумуляторної батареї.

Список використаних джерел

1. Ferreira B. Batteries the New Kids on the Block. *IEEE Power Electron. Mag.* 2019, 6, 32–34. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2019.2947980>
2. Vermeer W. Bauer P. A Comprehensive Review on the Characteristics and Modeling of Lithium-Ion Battery Aging. *IEEE Trans. Transp. Electr.* 2022, 8, 2205–2232. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3138357>
3. Krishan O., Suhag S. An updated review of energy storage systems: Classification and applications in distributed generation power systems incorporating renewable energy resources. *Int. J. Energy Res.* 2019, 43, 6171–6210. <https://doi.org/10.1002/er.4285>
4. Estimated Capacity of Lithium-Ion Batteries Placed on the Global Market in 2020 with Forecast for 2021 through 2030 (in Gigawatt Hours). Available online: <https://www.statista.com/statistics/1246914/capacity-of-lithium-ion-batteries-placed-on-the-global-market>
5. IEA. Electric Car Sales, 2016–2023. 2023. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-car-sales-2016-2023>
6. At Least Two Thirds of Global Car Sales Will Be Electric by 2040–Bloomberg. Available online: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-08-09/at-least-two-thirds-of-global-car-sales-will-be-electric-by-2040>
7. Jinlei S., Lei P., Ruihang L., Qian, M., Chuanyu T., Tianru W. Economic operation optimization for 2nd use batteries in battery energy storage systems. *IEEE Access* 2019, 7, 41852–41859.
8. Nováková K., Pražanová, A., Stroe D.I., Knap V. Second-Life of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles: Concept, Aging, Testing, and Applications. *Energies* 2023, 16, 2345.
9. Yang Y., Qiu J., Zhang C., Zhao J., Wang G. Flexible Integrated Network Planning Considering Echelon Utilization of Second-Life of Used Electric Vehicle Batteries. *IEEE Trans. Transp. Electr.* 2021, 8, 263–276. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3068121>
10. Millions of Electric Car Batteries Will Retire in the Next Decade. What Happens to Them?|Environment|The Guardian. Available online: <https://www.theguardian.com/environment/2021/aug/20/electric-car-batteries-what-happens-to-them>



11. Abdelbaky M., Peeters J.R., Dewulf W. On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe. *Waste Manag.* 2021, 125, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J. WASMAN.2021.02.032>
12. Ettxandi-Santolaya M., Casals L.C., Montes T., Corchero C. Are electric vehicle batteries being underused? A review of current practices and sources of circularity. *J. Environ. Manag.* 2023, 338, 117814.
13. Li J., He S., Yang Q., Wei Z., Li Y., He H. A Comprehensive Review of Second Life Batteries Towards Sustainable Mechanisms: Potential, Challenges, and Future Prospects. *IEEE Trans. Transp. Electrification.* 2022, 9, 4824–4845. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3220411>
14. Martinez-Laserna E., Gandiaga I., Sarasketa-Zabala E., Badedo J., Stroe D.I., Swierczynski M., Goikoetxea A. Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 93, 701–718. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.035>
15. Illa Font C.H., Siqueira H.V., Machado Neto J.E., Santos, J.L.F.d., Stevan Jr S.L., Converti A., Corrêa F.C. Second Life of Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles: A Short Review and Perspectives. *Energies* 2023, 16, 953.
16. Korobka, S., Syrotyuk, S., Zhuravel, D., Boltianskyi, B., Boltianska, L. Solar dryer with integrated energy Unit. *Problems of the Regional Energetics*, 2021, (2). 60–75.
17. Syrotyuk S., Boyarchuk V., Syrotyuk V., Korobka S., Syrotyuk H., Boltianskyi B. Peculiarities of modeling heat pumps in the labview environment. *Інформаційні технології в енергетиці та агропромисловому комплексі : матеріали XI Міжнар. наук. конференції, м. Львів, 04–06 жовтня 2022 р. / за заг. ред. В.В. Снітинського. Львів : ЛНУП, 2022. С. 16–18.*
18. Болтянська Л.О., Болтянський Б.В. Альтернативні напрями енергозбереження в домогосподарствах населення. *XII Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Ефективність функціонування сільськогосподарських підприємств». Проблематика 2023: «Функціонування сільськогосподарських підприємств на засадах циркулярної економіки» : матеріали Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, м. Дубляни, 6–7 червня 2023 р. / за ред. проф. Г.В. Черевка. Львів : Галицька видавнича спілка, 2023. С. 26–30.*
19. Енерго- та ресурсозбереження в тваринництві : підручник / Б. В. Болтянський та ін. Київ : Кондор, 2020. 410 с.
20. Упровадження геліосушарок для виробництва висушених сільськогосподарських продуктів / С.В. Коробка та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2024. Вип. 14. Т. 2. DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-7.
21. Serhiy Syrotyuk, Volodymyr Halchak, Vasyl Lopushniak, Serhii Korobka, Hanna Syrotyuk, Taras Stanytskyi, Kateryna Yankovska, Tomasz Jakubowski, Jan Gielżecski, Boris Boltyanskyi. The application of fuzzy logic algorithms in controllers for controlling the use of renewable energy sources. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 101 NR 2/2025. P. 125–132. DOI:10.15199/48.2025.02.30.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2025

S. Korobka¹, B. Boltianskyi², R. Skliar², I. Stukalets¹, R. Sheremeta¹

¹ Lviv National Stepan Gzhytsky University of Veterinary Medicine and Biotechnology

² Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

JUSTIFICATION OF THE ENERGY ANALYSIS OF THE PHOTOMODULE-BATTERY SYSTEM

Summary

The paper analyzes the influence of the parameters of the charge-discharge process on the energy efficiency of batteries. By comparing the loading characteristics of a typical photomodule with the charging characteristics of a battery, the main reasons for efficiency losses in photovoltaic installations have been determined. The obtained regularities must be taken into account when designing the structure of photovoltaic installations and developing algorithms for their operation for the most efficient use of solar energy.



Addressing the urgent need for sustainable solutions to mitigate the environmental impacts of batteries highlights the critical importance of developing a mechanism to manage the large number of batteries reaching the end of their first life cycle. While secondary-use batteries have clear advantages, the reuse of cation-based secondary-use batteries poses certain challenges. A variety of challenges require our attention and creative approach, but overcoming these challenges often leads to innovation and progress in the field. This study examines the associated complexities and challenges in detail to understand the reality and potential barriers.

Combining individual methods or using hybrid approaches to optimize the efficiency of the evaluation process can be considered as a promising strategy. Battery research is still in its infancy, with further developments expected in the coming years to address existing gaps. A key aspect of addressing these gaps is gaining a deeper understanding of battery degradation processes in different chemical environments, which is critical to addressing issues that affect long-term battery performance, reliability, and stability over extended periods of operation.

These advances will certainly impact performance and environmental aspects, as well as potential benefits of secondary use, which will require further research, including impact and battery life cycle assessments.

Keywords: photomodule, photovoltaic installation, battery, charging current, charging voltage, efficiency.