

АДАПТИВНИЙ АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗАРЯДЖАННЯ ВЖИВАНИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Отримано 09 вер. 2025 р.; рекомендовано до публікації 09 груд. 2025 р.
Доступно онлайн 31 груд. 2025 р.

Гаврилюк С. І.¹, Зайченко О. А.², Маруня Ю. В.³,
Рижков О. М.⁴, Чопик В. В.⁵, Терешенко А. М.⁶

Автор для кореспонденції: Зайченко Олег,
e-mail: tems@ukr.net

¹ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-7345-8405>

² канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0001-9311-3378>

³ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0003-0071-1702>

⁴ д-р. філос. (електр. інж.)
<https://orcid.org/0000-0002-0011-9402>

⁵ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>

⁶ аспірант
<https://orcid.org/0009-0001-9489-1793>

^{1, 2, 3, 4, 5} Інститут електродинаміки НАН
України, м. Київ, Україна

⁶ Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна

Анотація. Ефективна інтеграція нестабільних відновлюваних джерел енергії в електромережі значною мірою залежить від систем накопичення, де вживані акумулятори відіграють дедалі важливішу роль. У статті розглянуто особливості керування процесами заряджання вживаних літій-іонних акумуляторів, для яких традиційні методи заряду з постійним струмом та постійною напругою (CC-CV) є неефективними та прискорюють їх деградацію. Представлено розробку та запропоновано адаптивний алгоритм заряджання на базі нечіткої логіки.

Такий підхід дозволяє оптимізувати процес заряджання шляхом урахування динамічних змін характеристик акумулятора, як-от напруга, струм, температура, стан заряду (SoC), стан здоров'я батареї (SoH) та стан функціонування (SoF). Показано, що запропонований алгоритм, порівняно з традиційними методами, підвищує ефективність, безпеку та значно збільшує термін служби акумуляторів адаптуючись до їхнього стану в реальному часі.

Ключові слова: літій-іонні акумулятори, заряджання акумуляторів, адаптивні алгоритми, нечіт-ка логіка, вживані акумулятори, деградація акумуляторів, системи керування.

Вступ. Відповідно до даних Міжнародного енергетичного агентства [1] за період з 2021 до 2023 року частка електромобілів на світовому автомобільному ринку зросла більш ніж у 2 рази (з 4 до 10 %). У першому кварталі 2024 року продажі електромобілів збільшилися приблизно на 25 % порівняно з першим кварталом 2023 року. Згідно зі звітом Bloomberg NEF, глобальні інвестиції в енергетичний сектор у 2024 році вперше перевищили 2 трлн доларів [2]. Значна частина цих інвестицій спрямована на розвиток акумуляторних систем накопичення енергії, які є ключовим елементом для стабілізації мережі та ефективної інтеграції відновлюваних джерел енергії. Паралельно значні кошти вкладаються в електрифікацію транспорту, що також є частиною глобальної трансформації енергетичного сектору. Ці дані свідчать про те, що попит на електротранспорт у світі постійно зростає, що призводить до зростання кількості використаних акумуляторів. Утилізація акумуляторів є високовартісним і складним технологічним процесом, що має значний вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу. По-перше, видобуток сировини (літію, кобальту, нікелю) пов'язаний із виснаженням природних ресурсів та забрудненням. По-друге, за неправильної утилізації відпрацьованих акумуляторів їхні компоненти утворюють токсичні сполуки, які мігрують у ґрунт та воду,

створюючи довготривалу загрозу для довкілля. Більшість світових виробників електромобілів рекомендують замінювати акумулятори, коли їхня ємність становить менше 80 %. При цьому акумуляторні батареї залишаються придатними до повторного використання в системах накопичення та зберігання енергії як у промисловості, так і в побуті. Повторне використання акумуляторів дозволяє знизити капітальні витрати на створення та оновлення систем накопичення електроенергії й водночас забезпечити необхідну потужність і тривалість автономної роботи.

Враховуючи постійне зростання попиту на електротранспорт та, як наслідок, збільшення кількості використаних акумуляторів, які придатні для повторного використання у системах зберігання енергії, важливою і актуальною є тема розробки методів, що дають змогу ефективно та безпечно їх заряджати. Традиційний протокол заряджання CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) не є оптимальним для вживаних акумуляторів і може прискорювати їх деградацію. Тому актуальним завданням є створення адаптивної системи керування процесом заряджання літій-іонних акумуляторів, яка враховує динамічні зміни їх характеристик та оптимізує параметри заряджання в режимі реального часу, щоб збільшити термін служби, підвищити безпеку експлу-

атації та покращити ефективність використання вживаних літій-іонних акумуляторів.

Метою роботи є обґрунтування та розробка адаптивного алгоритму керування системою заряджання вживаних літій-іонних акумуляторів з використанням нечіткої логіки.

Для повторного використання відпрацьовані акумуляторні батареї розбираються на окремі блоки або елементи. Після діагностики відбираються робочі елементи, близькі за своїми характеристиками, групуються та збираються у нові акумуляторні батареї. Зазвичай перевіряються такі ключові характеристики: ємність, внутрішній опір, напруга, саморозряд. При збиранні секцій з елементів вживаного акумулятора важливо згрупувати елементи, найближчі за ємністю та внутрішнім опором. Навіть незначна різниця величин цих параметрів призводить до того, що під час роботи напруга окремих елементів буде відрізнятися і система керування BMS (Battery Management System) відключить групу елементів або всю акумуляторну батарею.

Розглянемо характеристики акумуляторів, за якими можна оцінювати поточний стан та можливість їх повторного використання. Одним з таких показників є SoH (State of Health) акумулятора, який виражається у відсотках та відображає поточний стан акумулятора відносно його початкового стану. Наступним показником є SoC (State of Charge), який виражається у відсотках та показує, скільки енергії залишилося в акумуляторній батареї відносно її повної початкової ємності. Проте оцінювати SoH і SoC недостатньо для вживаних акумуляторів, оскільки потрібна комплексна оцінка стану функціонування SoF (State of Function), щоб переконатися, що акумулятор придатний для повторного використання і може виконувати свої функції безпечно та надійно. Показник SoF не є чітко визначеним поняттям, але здебільшого визначається як здатність батареї підтримувати свої функції для конкретного застосування. SoF може враховувати інші показники, такі як SoC та SoH, а також робочу температуру, історію заряду/розряду, наявність несправностей (перенапруга, перевантаження, різке збільшення температури), концентрацію горючих газів тощо [3].

Існує декілька методів оцінки показника SoF [4]. Оцінка стану функціонування (SoF) акумулятора може проводитися методом, що враховує споживану потужність (Power Demand Based). Цей метод аналізує здатність батареї працювати під поточним навантаженням. Для цього спочатку визначають напругу холостого ходу VoC (Voltage open Circuit), використовуючи залежність між напругою та рівнем заряду (крива VoC–SoC). Знаючи максимальну зміну напруги та поточну ємність батареї в заданий момент часу, можна розрахувати миттєву потужність батареї, яку вона здатна віддати. За результатом цього розрахунку батареї присвоюється статус працездатності: $SoF = 1$ (придатна) або $SoF = 0$ (непридатна).

У [3] SoF визначається на основі формули: $SoF = (P - P_{demands}) / (P_{max} - P_{demands})$, де P – потужність, яку

може забезпечити батарея, $P_{demands}$ – потужність навантаження, P_{max} – максимальна можлива потужність батареї.

Іншим методом є техніка оцінки на основі напруги (Terminal Voltage Based Technique). Оцінка SoF виконується на основі історичної інформації та вимірюваних поточних даних (напруга, SoH, максимальна напруга). Таким методом можна визначити здатність батареї забезпечувати роботу під необхідним навантаженням. SoH є важливим показником при використанні такого методу, оскільки він визначає швидкість спаду напруги батареї.

Стадії заряджання акумулятора. Заряджання літій-іонного акумулятора найчастіше відбувається у три стадії: початкова Pre-charge / Trickle Charge, основна CC (Constant Current) та фінальна CV (Constant Voltage). Таким чином, забезпечується ефективно та безпечно заряджання акумулятора в загальному випадку традиційного використання нових акумуляторів.

Стадія попереднього заряджання (Pre-charge) використовується для акумуляторів, що перебувають у стані глибокого розряду, коли напруга на їхніх клемах опускається нижче допустимого рівня. Ключовим завданням цієї фази є поступове відновлення напруги до рівня, що дозволяє безпечно перейти до основного етапу заряджання постійним струмом (CC). Для цього на акумулятор подається невеликий постійний струм (наприклад, що становить 1/10 частину від номінального струму стадії CC). Такий підхід є запобіжним заходом, що унеможливує пошкодження внутрішньої структури акумулятора, яке могло б статися в разі подачі значного струму на елементи з глибоким розрядом.

Стадія заряджання постійним струмом CC є основною й найтривалішою. Ця стадія дозволяє зарядити акумулятор приблизно до 80–90 % його номінальної ємності. Стадія CC завершується, коли напруга акумулятора досягає межі, встановленої виробником (наприклад, 4.2 В для більшості типів літій-іонних акумуляторів).

На фінальній стадії застосовується режим постійної напруги (CV), який дозволяє уникнути небезпечного перезаряду й водночас повністю зарядити акумулятор. На цій стадії напруга на батареї підтримується на максимально допустимому рівні, зазначеному виробником, тоді як струм заряджання поступово зменшується. Щойно струм спаде приблизно до 3–5 % того, що був на стадії CC, процес заряджання завершується автоматично.

Протокол заряджання CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) є ефективним для заряджання нових акумуляторів, однак для вживаних акумуляторів цей метод є неоптимальним і може прискорювати подальшу деградацію. Це пов'язано з кількома характерними змінами, що відбуваються в акумуляторі з часом:

1. Зростання внутрішнього опору. З часом внутрішній опір акумулятора збільшується, що є наслідком двох процесів: потовщення шару твердого електроліту на

аноді та деградаційних змін у структурі самих електродів.

2. Передчасний перехід до режиму CV. Через підвищений опір, напруга на клеммах батареї сягає верхньої межі значно раніше під час заряджання постійним струмом (CC). Це призводить до того, що основна фаза заряджання скорочується і система перемикається в режим постійної напруги (CV), коли акумулятор ще не досяг того рівня заряду (SoC), якого б досягнув новий.

3. Пролонгація стадії CV. Оскільки фаза постійного струму (CC) стає коротшою, більша частина заряду накопичується на етапі постійної напруги (CV), що значно збільшує його тривалість. Цей тривалий вплив максимальної напруги є серйозним стресовим фактором для акумулятора. Він не тільки прискорює руйнування катода, але й стимулює подальше зростання шару твердого електроліту на аноді, що особливо шкодить вживаним акумуляторам.

4. Підвищене тепловиділення. Вищі значення внутрішнього опору призводять до більшого виділення тепла під час проходження струму заряду, особливо в основній фазі CC. Як наслідок, відбувається підвищення температури, що є причиною початку багатьох процесів деградації [5].

Метод заряджання Constant Current-Constant Voltage з плином часу експлуатації акумулятора не здатний адаптуватися до динамічних змін характеристик акумулятора [6]. Тому для заряджання вживаних акумуляторів доцільно застосовувати адаптивні алгоритми, які враховують такі особливості та здатні оптимізувати використання акумулятора. Такі алгоритми заряджання можуть змінювати параметри заряджання в режимі реального часу на основі вимірювання поточних параметрів акумулятора та використання історичних даних, що допомагає збільшити термін служби акумулятора та підвищити безпеку його експлуатації [7].

Адаптивні алгоритми можна класифікувати за методами, які використовуються для прийняття рішень про адаптацію: алгоритми, що базуються на правилах та порогових значеннях (Rule-Based / Threshold-Based); аналізі профілів напруги / струму (Profile Analysis-Based); моделюванні (Model-Based Algorithms); даних / машинне навчання (Data-Driven / Machine Learning - ML); імпульсне адаптивне заряджання (Adaptive Pulsed Charging).

Алгоритми, що діють за принципом порогових значень (Threshold-Based), працюють на основі заздалегідь визначених правил. Їхня логіка полягає в тому, що система відстежує ключові параметри (напругу, струм, температуру тощо) і змінює умови заряджання, щойно один або група параметрів досягають певної межі. Типовим правилом є, наприклад, обмеження зарядного струму чи напруги в разі перегріву або повна зупинка процесу в разі досягнення небезпечної температури [8, 9]. Також алгоритм може бути адаптований до обмеження максимального струму заряджання залежно від ємності

акумулятора або його внутрішнього опору. Якщо ємність зменшилася або опір зріс, максимальний струм заряджання може бути зменшений для запобігання перегріву акумулятора [10]. До таких алгоритмів можна віднести системи на основі нечіткої логіки.

Алгоритми, які аналізують динаміку зміни значень напруги та струму, працюють, ідентифікуючи ключові особливості на графіках цих параметрів, з використанням заздалегідь відомих профілів. Ці характерні точки або ознаки пов'язані з поточним станом акумулятора в процесі заряджання. Відповідно до результатів такого аналізу система вносить корективи в параметри заряду, наприклад використання швидкості зміни напруги (dU/dt) або прискорення зміни напруги (d^2U/dt^2), для визначення точок переходу між стадіями заряджання [11]. Ці точки можуть змінюватися залежно від SoH. Також існують алгоритми, у яких застосовують вимірювання внутрішнього опору під час заряджання, і ця інформацію використовують для адаптації процесу заряджання.

Алгоритми, що базуються на моделюванні використовують математичну модель акумуляторної батареї, щоб передбачати поведінку акумулятора під час заряджання. Оцінка стану батареї (SoC, SoH, температура тощо) може виконуватися за допомогою фільтрів стану, таких як фільтр Калмана. Модель може адаптуватися до старіння батареї шляхом періодичної корекції параметрів.

Алгоритми, орієнтовані на дані (Data-driven алгоритми), включно з методами машинного навчання, використовують накопичену інформацію про цикли заряджання для динамічного коригування параметрів, наприклад, оптимізація параметрів заряджання проводиться за допомогою нейронних мереж або інших моделей на основі поточних вимірювань стану батареї [12].

Імпульсне адаптивне заряджання відбувається короткими імпульсами струму, параметри яких (амплітуда, тривалість, частота та пауза) змінюються відповідно до стану акумулятора. Цей метод спрямований на зниження поляризації – відхилення напруги на клеммах від напруги холостого ходу (VoC) під час проходження струму, що потенційно зменшує деградацію елементів. Таке відхилення напруги виникає через внутрішні процеси в акумуляторі, що уповільнюють протікання струму та перетворення енергії.

На практиці часто застосовують гібридні методи, які використовують елементи декількох алгоритмів. Метою такого поєднання є підвищення загальної продуктивності, надійності та робастності системи. Наприклад, можуть комбінувати лічильник кулонів з механізмами корекції за напругою та температурою. Інший поширений приклад – використання фільтра Калмана для точної оцінки стану батареї, доповненого алгоритмами, що приймають рішення на основі правил або оптимізаційних моделей.

Обґрунтування вибору адаптивного алгоритму заряджання акумулятора. Нечітка логіка (Fuzzy Logic) може

ефективно керувати нелінійними системами, не вимагаючи точної математичної моделі [13]. Для складних систем, таких як літій-іонні акумулятори, де точне моделювання може бути ускладненим, застосування нечіткої логіки має переваги. Вона дозволяє інтегрувати в автоматизовану систему керування лінгвістичні змінні та нечіткі множини, отримані експериментально [14]. Фазі-логічні контролери зазвичай стійкі до змін параметрів системи та умов експлуатації. Використання правил символічної нечіткої логіки дозволяє будувати структури нечіткого мікроконтролера з людиноподібним процесом прийняття рішень [15]. Натомість використання мікроконтролерів із логікою на основі чітких правил (мікроконтролерів із жорсткою логікою) [16], ця структура дає змогу не тільки легко адаптувати систему керування до специфічних вимог, але й успішно поєднувати її з традиційними методами керування [17, 18].

Основні переваги застосування нечіткої логіки для заряджання акумуляторів:

1. Підвищена ефективність та скорочення часу заряджання. Контролер на базі нечіткої логіки може оптимізувати профілі заряджання, потенційно скорочуючи час заряджання порівняно з традиційними методами, при цьому зберігаючи або покращуючи ефективність. Наприклад, у [19] зазначається, що керування на основі нечіткої логіки може скоротити час заряджання за вищої ефективності та меншого підвищенні температури.
2. Збільшення терміну служби акумулятора. Завдяки керуванню параметрами заряджання, такими як струм і температура, контролер на базі нечіткої логіки може мінімізувати навантаження на акумулятор, що приводить до збільшення циклічного ресурсу.
3. Підвищена безпека. Система керування на базі нечіткої логіки може містити правила, критичні для безпеки, для запобігання перезарядження, перегрівання та надмірного струму. Перезарядження може пошкодити фізичні елементи, а перезарядження навіть протягом однієї хвилини може вивести акумулятор з ладу.
4. Адаптивність. Системи на базі нечіткої логіки можуть бути розроблені для адаптації до змін у стані акумулятора та умов навколишнього середовища. У [20] згадується, що нечіткий контролер батареї успішно досягає своєї мети заряджання та балансування елементів з високою адаптивністю шляхом простого коригування функцій належності.

Всі ключові параметри акумулятора – напруга, струм, температура та SoC – є взаємозалежними. Протягом фази постійного струму, наприклад, напруга зростає разом із SoC. Крім того, ефективність поглинання заряду батареєю змінюється залежно від її температури та поточного рівня заряду. Тому для ефективного керування система на базі нечіткої логіки повинна оцінювати параметри не окремо, а в їх сукупності, враховуючи всі існуючі взаємозв'язки.

Таким чином, завдяки гнучкості та відносній простоті розуміння, що базується на звичайній мові спілкування,

нечітка логіка є одним з найефективніших методів керування процесом заряджання вживаних літій-іонних акумуляторів. Нечітка логіка, на відміну від відомих на сьогодні методів заряджання, допускає використання невизначених вхідних даних, може вирішувати та поєднувати суперечливі між собою завдання та цілі, при цьому враховує досвід експертних систем і базується на класичних законах регулювання.

Ключові фактори, що впливають на термін служби акумулятора під час заряджання. Термін служби літій-іонних акумуляторів значною мірою залежить від умов заряджання. Напруга, струм, температура та рівень заряду відіграють вирішальну роль у швидкості деградації.

Заряджання акумулятора до високої напруги (наприклад, 4.2 В на елемент) дозволяє максимально використати його ємність, але водночас створює значні навантаження на компоненти акумулятора. Особливо чутливим до високої напруги є матеріал катода, де прискорюються процеси деградації, такі як розчинення металів, структурні зміни та інші перетворення [21]. Висока напруга також сприяє окисненню електроліту на поверхні катода [22]. Саме максимальна напруга є одним з ключових факторів, що визначають швидкість деградації катода. Багато досліджень показують прямий зв'язок між максимальною напругою заряджання та циклічним ресурсом. Зниження напруги навіть на невелику величину може суттєво подовжити термін служби. Наприклад, зниження напруги з 4.2 до 4.1 В на елемент може подвоїти кількість циклів, а подальше зниження до 4.0 В – ще подвоїти [23]. Дослідження підтверджують прискорену деградацію при напругах вище 4.0 В для деяких типів хімії акумуляторів. Оптимальною з погляду мінімізації стресу вважається напруга близько 3.90–3.92 В на елемент, хоча це значно обмежує доступну ємність.

Для кожного типу акумулятора існують свої критичні пороги напруги, і саме їх перевищення є ключовим фактором нелінійного характеру деградації. Тільки-но напруга перетинає цю межу, руйнівні процеси, такі як інтенсивне розчинення металів катода або прискорене окиснення електроліту, значно посилюються. Це пов'язано з електрохімічними властивостями матеріалів. Коли прикладена напруга перевищує певне порогове значення, починають відбуватися незворотні зміни в акумуляторі. Тому утримання напруги нижче цих критичних значень може подовжити термін служби акумулятора.

Вплив зарядного струму. Хоча використання високих струмів значно скорочує час заряджання, такий підхід несе в собі ризики, що негативно позначаються на довговічності акумулятора. До основних особливостей належать:

1. Осадження літію. При високих струмах швидкість надходження іонів літію до анода може перевищувати швидкість їх вбудовування в структуру анода, особливо при низьких температурах, що призводить до осадження металічного літію [24].

2. Підвищення температури. Протікання великого струму через внутрішній опір акумулятора викликає значне виділення тепла, що може призвести до перегріву та прискорення інших механізмів деградації [25].

3. Механічні напруження. Через швидке проникнення літію в матеріал електродів виникає внутрішній тиск, який може їх пошкодити або зробити менш еластичними.

Для подовження терміну служби часто рекомендується використовувати нижчі струми заряду [26]. Дослідження визначають струм заряду як один із факторів стресу. Основна шкода від високих струмів заряду може бути пов'язана не стільки з самим потоком струму за ідеальних умов, скільки з його наслідками, а саме підвищенням температури. Тому підтримання безпечного діапазону температури та струму під час швидкого заряджання є важливим для мінімізації їх негативного впливу.

Заряджання при підвищених температурах (вище 30 °C, і особливо вище 60 °C) є одним з найшкідливіших факторів для літій-іонних акумуляторів. Висока температура різко прискорює практично всі небажані хімічні реакції всередині елемента: зростання SEI (Solid Electrolyte Interphase), розклад електроліту, деградацію катода (включно з розчиненням металів) [27].

Заряджання за низьких температур (нижче 0 °C) також є шкідливим. За низьких температур значно зростає внутрішній опір акумулятора, знижується ефективність заряджання і різко зростає ризик осадження металічного літію на аноді [28, 29].

Найкращі умови для заряджання – це температурний діапазон, близький до кімнатної температури (20–25 °C). Заряджання в межах приблизно від 5 до 35 °C зазвичай вважається прийнятним. Оскільки як високі, так і низькі температури під час заряджання прискорюють деградацію, ефективне керування температурою акумуляторної батареї є критично важливим [30].

Діапазон SoC. Спосіб використання ємності акумулятора – істотно впливає на його термін служби. Повторювані

цикли з повним розрядом (від 100 до 0 % SoC) є більш стресовими для акумулятора, ніж часткові цикли в межах вузького діапазону SoC, особливо якщо уникати граничних значень. Дослідження показують, що зменшення глибини розряду експоненційно збільшує циклічний ресурс. Наприклад, використання лише 30 % ємності може збільшити кількість циклів у 4 рази або більше порівняно зі 100 %. Обмеження максимального SoC до 50 % може збільшити очікуваний термін служби на 44–130 %. Заряджання в крайніх діапазонах SoC (наприклад, 0–20 або 80–100 %) може прискорювати специфічні механізми деградації: зростання імпедансу при низькому SoC та втрата ємності при високому SoC (особливо для NMC хімії – Літій-Нікель-Марганець-Кобальт-Оксид) порівняно із заряджанням у середньому діапазоні (наприклад, 40–60 % SoC). Високий SoC пов'язаний з високою напругою, що створює стрес для катода та прискорює окислення електроліту. Тому мінімізація часу, проведеного при високих рівнях SoC, є корисною стратегією. Дуже низький SoC може призводити до надмірного розряду, що також шкідливо для електродів. Робота в середньому діапазоні SoC дозволяє уникнути цих екстремальних умов. Акумулятори типу LFP (Літій-Залізо-Фосфат, LiFePO₄) менш чутливі до перебування при 100 % заряді. Стрес для катода при повній зарядці є набагато меншим, ніж у NMC. Однак стратегія заряджання 20–80 % є корисною для продовження служби будь-яких типів літій-іонних акумуляторів. Також для LFP акумуляторів рекомендується періодично заряджати їх до 100 %. Це дозволяє системі керування батареєю точно відкалібрувати показники і правильно визначати рівень заряду.

Адаптивний алгоритм заряджання акумулятора. Адаптивний алгоритм заряджання акумулятора на основі нечіткої логіки складається з таких основних кроків: постановка задачі; визначення лінгвістичних змінних та нечіткої множини, зокрема її поведінки; визначення механізму відпрацювання нечіткого висновку; побудова безпосередньо самої системи керування та її перевірка, а також процес налагодження та визначення дієздатності.

Таблиця. Вхідні та вихідні змінні системи керування заряджанням акумулятора на базі нечіткої логіки

№ п/п.	Тип змінної	Назва змінної	Діапазон	Нечітка множина
1	Вхідна	Напруга елемента	2.8–4.2 В на елемент	Критично низька, низька, номінальна, висока, критично висока
2		Зміна напруги dU/dt	Менше 0,0, 0–3 мВ/с, більше 3 мВ/с	Від'ємна, нуль, робоча, висока.
3		Поточний струм заряджання	0 А до C-номіналу	Нуль, дуже низький, низький, середній, високий, максимальний
4		Температура	0–40 °C (заряджання)	Критично холодна, холодна, оптимальна, гаряча, критично гаряча
5		Рівень заряду (SoC)	0–100 %	Дуже низький, низький, середній, високий, дуже високий
6		Стан здоров'я (SoH)	0–100 %	Дуже низький, низький, середній, високий, дуже високий

7		Стан функціонування (SoF)	0–100 %	Низький, середній, високий, дуже високий
8		Режим обмеження SoC	0–100 %	Низький, середній, високий
9		Час від початку заряджання	0–600 хв	Дуже короткий, короткий, середній, тривалий, надмірно тривалий
10		Тип акумулятора	LiFePO ₄ , NMC	Літій-Залізо-Фосфат, Літій-Нікель-Марганець-Кобальт-Оксид
11	Вихідна	Кінцева напруга заряджання	3.65–4.2 В	Критично низька, низька, номінальна, висока, критично висока
12		Зарядний струм	0 А до Макс C-rate	Нуль, крапельний, дуже низький, низький, середній, високий, максимальний
13		Режим роботи	Pre-charge, CC, CV, пауза, помилка	Pre-charge, CC, CV, пауза, помилка (Для цієї змінної нечітка множина представляє дискретні стани, вибір яких здійснюється нечітким контролером)

Вибір вхідних та вихідних змінних та представлення їх функціями належності є важливим початковим кроком, результат якого впливатиме на формування нечіткого рішення. Гнучкість та адекватна реакція системи буде залежати від зовнішніх факторів, які впливають на її поведінку, тобто від співвідношення лінгвістичних змінних і фізичних базових параметрів. У таблиці наведені запропоновані вхідні та вихідні змінні системи керування заряджанням акумулятора на базі нечіткої логіки.

Вхідні та вихідні змінні системи керування заряджанням акумулятора на базі нечіткої логіки:

1. Показник стану елемента, корисний для точного налаштування поблизу меж напруги.
2. На стадії CC напруга постійно зростає, тому dU/dt є позитивним. На стадії CV dU/dt різко зменшується і наближається до нуля, оскільки напруга утримується майже постійною. Невеликі від'ємні значення можуть виникати при нормальних переходах між стадіями, більші від'ємні значення можуть свідчити про несправність.
3. Вимірювання є необхідним для зворотного зв'язку та для реалізації режимів Pre-charge, CC та CV.
4. Критична для безпеки та здоров'я акумулятора. Заряджання поза допустимими межами шкідливе.
5. Визначає, скільки заряду потрібно та впливає на допустимий струм.
6. SoH є важливою змінною, особливо для вживаних акумуляторів, яка прямо вказує на ступінь деградації. Батарея з низьким SoH може вимагати нижчих максимальних струмів, нижчої максимальної напруги або обережнішого керування температурою під час заряджання. Оцінка SoH може бути отримана за допомогою методів, що базуються на вимірюванні ємності, внутрішнього опору, або складніших алгоритмів.
7. Стан функціонування відображає оцінку того, наскільки добре і безпечно акумулятор здатен виконувати свої призначені функції в поточний момент часу.

8. Режим обмеження SoC дає змогу встановити верхню та нижню межі діапазону SoC. Наприклад, використовувати акумулятор в діапазоні 20–80 % його ємності. Такий підхід може значно збільшити термін служби акумулятора.

9. Відстеження часу від початку заряджання діє як запобіжник, що обмежує максимальну тривалість процесу. Також цей час може слугувати резервним механізмом для перемикання між стадіями заряду у випадку, якщо основні індикатори (наприклад, напруги чи струму) працюють некоректно.

10. Від типу хімії акумулятора залежать ключові характеристики заряджання: максимальна напруга заряджання (LFP – 3.6/3.65 В на елемент, NMC – 4.2 В), струм заряджання (LFP – 0.5–1C, NMC – 0.5–0.7C), оптимальний діапазон SoC (LFP – 10–100 %, NMC – 20–80 %).

11. Нечіткий контролер може адаптувати кінцеву напругу заряджання, щоб зменшити навантаження на акумулятор та продовжити термін його служби.

12. Нечіткий контролер змінює максимальний струм залежно від SoH, SoC, SoF, температури, щоб оптимізувати швидкість та безпеку. Також враховується мінімальний струм на стадіях pre-charge та CV, при досягненні якого відбувається перехід у стадію CV або завершення заряджання.

13. Нечіткий контролер приймає рішення про перемикання між різними стадіями заряджання залежно від комбінації вхідних змінних.

Опис роботи адаптивного алгоритму заряджання акумулятора. Для керування процесом заряджання алгоритм використовує систему нечіткої логіки. На кожному етапі визначаються 10 вхідних параметрів: Напруга акумулятора; Зміна напруги (dU/dt); Поточний струм заряджання; Температура; SoC; SoH; SoF; Режим обмеження SoC; Час від початку заряджання; Тип акумулятора. На основі цих даних та бази правил нечіткої логіки контролер визначає оптимальні значення для трьох вихідних керуючих змінних: Кінцева напруга заряджання;

Зарядний струм; Режим роботи (Pre-charge, CC, CV, Пауза, Помилка). Процес заряджання складається з таких фаз:

Фаза 1. Ініціалізація. Система активується після підключення акумулятора до зарядного пристрою. Проводиться початкове зчитування всіх вхідних параметрів або використовуються останні відомі значення.

Перевірка безпеки:

Температура: Якщо температура «Критично холодна» (наприклад, нижче 0 °C) або «Критично гаряча» (наприклад, вище 40 °C) заряджання не розпочинається до нормалізації температури. Контролер переходить в режим «Помилка».

Напруга: Якщо початкова напруга акумулятора «Критично висока» (наприклад, 4.2 В і вище на елемент), це може свідчити про помилку або про те, що акумулятор заряджений.

SoH/SoF: Якщо SoH «Дуже низький» або SoF «Низький», контролер обмежує максимальний струм заряджання або видає повідомлення про необхідність додаткової діагностики. Після ініціалізації на основі початкових умов контролер визначає режим роботи.

Фаза 2. Попереднє заряджання (Pre-charge). Умови входу у фазу: зарядний пристрій переходить у режим «Pre-charge», якщо напруга акумулятора визначається як «Критично низька» (наприклад, нижче 3.0 В на елемент). Струм заряджання встановлюється на «Дуже низький» рівень (3 % від струму у фазі CC). Контролер постійно відстежує напругу елементів, температуру, dU/dt .

Умови виходу з фази: контролер переводить систему з режиму «Pre-charge» в режим «CC», коли напруга елемента досягає рівня «Низька» (наприклад, 3.0–3.2 В), і при цьому температура залишається в безпечних межах («Оптимальна» або «Холодна»).

Фаза 3. Заряджання постійним струмом (CC – Constant Current). Умови входу у фазу: Система переходить у режим «CC» з фази «Pre-charge» або одразу після ініціалізації, якщо напруга елемента не була «Критично низькою».

Оптимальний зарядний струм є динамічною величиною, яку контролер обчислює на основі комбінації параметрів. Для нових акумуляторів (високий SoH) та за оптимальної температури система вибирає високий струм (0.5C – 1.0C). Однак він знижується, якщо температура стає занадто високою чи низькою, або якщо акумулятор має ознаки зносу (низький SoH). Рівень заряду (SoC) також впливає на рішення: на початку фази CC струм може бути вищим. При цьому стан функціонування (SoF) виступає як пріоритетний обмежувальний фактор, примусово знижуючи струм за низьких показників. Одночасно контролер визначає цільову кінцеву напругу (наприклад, 4.2 В), яка може бути знижена для вживаних акумуляторів. Увесь цей час система веде постійний моніторинг напруги, струму, температури, SoC, dU/dt та тривалості процесу.

Контролер завершує фазу постійного струму (CC) і переходить до фази постійної напруги (CV), коли виконується одна з ключових умов. Перша – це досягнення напругою елемента свого цільового значення («Висока», 4.2 В). Друга, альтернативна умова – це значне сповільнення росту напруги (dU/dt наближається до нуля), що свідчить про насичення батареї. Існують також додаткові фактори, наприклад наближення температури до «Гарячого» стану або падіння SoF до «Низького», які можуть прискорити цей перехід.

Фаза 4. Заряджання постійною напругою (CV – Constant Voltage). Умови входу у фазу збігаються з умовами виходу системи з фази CC. Контролер підтримує напругу елемента на рівні, визначеному контролером як «Кінцева напруга заряджання». Зарядний струм починає зменшуватися, оскільки внутрішній опір акумулятора зростає. Головне завдання контролера на етапі постійної напруги (CV) – підтримувати заданий рівень напруги, хоча за потреби для безпеки він також може встановлювати верхню межу для струму. Постійно відстежуються струм заряджання (зменшується), напруга елемента (підтримується на заданому рівні), dU/dt (наближається до «Нуль»), температура, SoC (наближається до «Дуже високий»), час заряджання. Умови виходу з фази. Контролер переводить систему з режиму постійної напруги (CV) у режим «Пауза», що означає завершення заряджання, коли виконується одна з кількох умов. Цей перехід відбувається, коли струм заряджання падає до дуже низького рівня (зазвичай 3–5 % від номінального), швидкість зміни напруги (dU/dt) наближається до нуля, рівень заряду (SoC) досягає 95–100 %, або ж коли час заряджання стає надмірно довгим, а інші параметри вказують на завершення. Такий підхід дозволяє уникнути нескінченного заряджання, яке може виникнути через особливості акумулятора, та забезпечує ефективно й безпечно завершення циклу.

Завершення заряджання / пауза. Умови входу у фазу: 1. Система переходить у цей режим з фази «CV» після виконання умов завершення. 2. Також може перейти з будь-якої фази, якщо контролер визначає необхідність тимчасової зупинки. Контролер встановлює «Зарядний струм» на «Нуль», а «Режим роботи» на «Пауза» та продовжує вимірювати напругу елемента й температуру в режимі очікування. Контролер також може застосовувати короткочасне дозаряджання, якщо напруга впаде нижче певного рівня (наприклад, 4.2 В/елемент). Умови виходу з фази: 1. Відключення акумулятора. 2. Користувачка команда на продовження / початок нового циклу. 3. Якщо була тимчасова пауза (наприклад, через температуру), контролер може автоматично відновити заряджання, коли умови нормалізуються, повернувшись до відповідної фази.

Помилка. Контролер ініціює аварійну зупинку заряджання, переводячи систему в режим «Помилка», за будь-яких критичних умов. До таких умов належить перегрів акумулятора (вище 45–50 °C) або стрибок напруги вище безпечного значення (наприклад, 4.25–

4.3 В). Також аварійний режим вмикається, якщо швидкість зміни напруги (dU/dt) протягом тривалого часу залишається значно від'ємною, що може свідчити про серйозну несправність. Крім того, помилка фіксується, якщо заряджання триває надто довго без належного зростання рівня заряду (SoC) та напруги, що вказує на дефект самої батареї або зарядного пристрою.

На кожній фазі (особливо CC та CV) контролер постійно оцінює ступені належності всіх вхідних параметрів до їхніх нечітких множин (наприклад, температура може

бути на 60 % «Оптимальна» і на 40 % «Гаряча»). На основі цього та бази правил контролер генерує вихідні сигнали струму та напруги. Це дозволяє більш точно реагувати на зміни стану акумулятора, ніж за традиційних алгоритмів заряджання з фіксованими порогами. Наприклад, зниження струму при підвищенні температури буде не різким, а поступовим, відповідно до того, наскільки температура наближається до критичної. На рисунку представлена функціональна схема адаптивного алгоритму заряджання акумулятора.

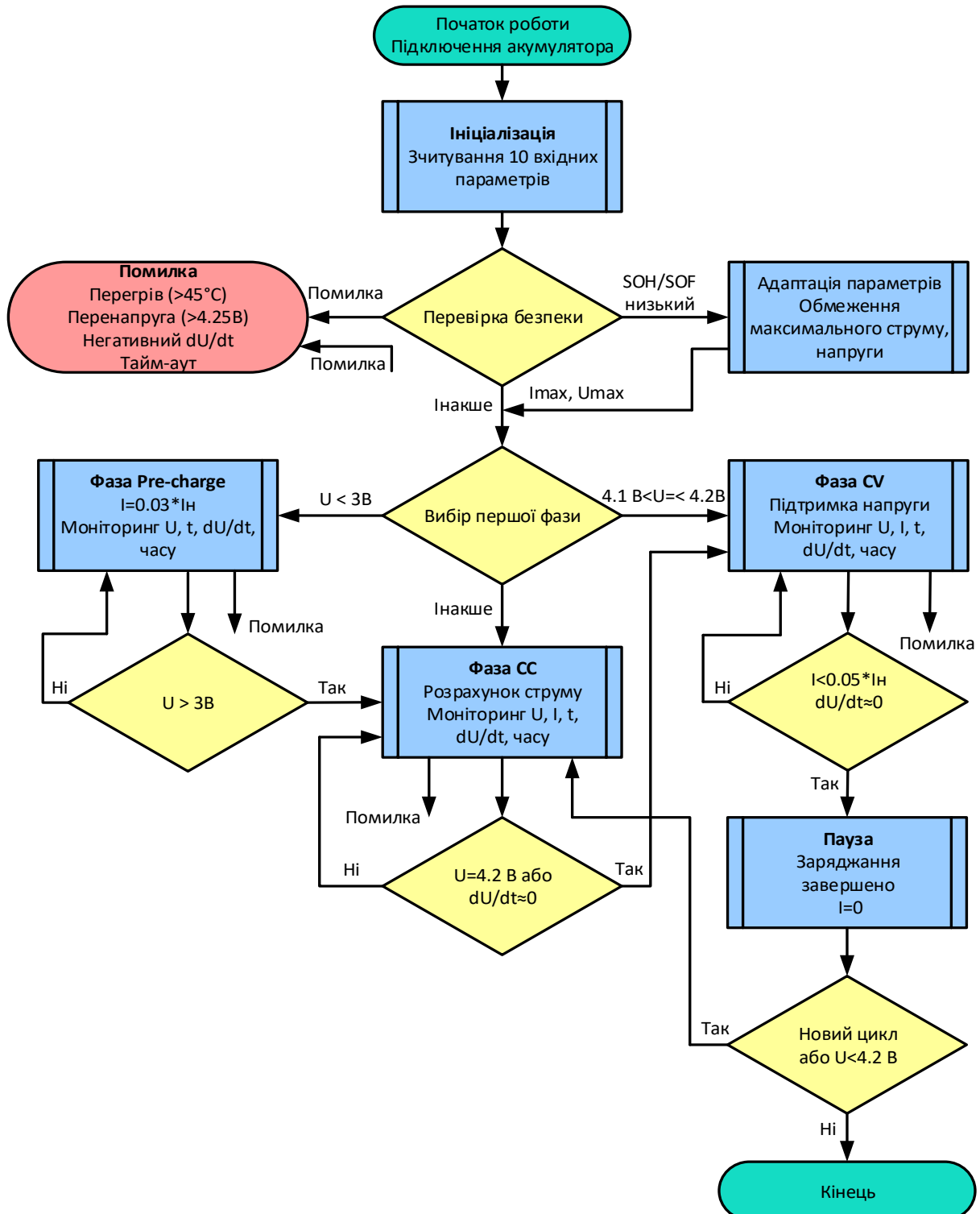


Рисунок. Функціональна схема алгоритму заряджання акумулятора

Висновки. Для заряджання вживаних акумуляторів доцільно застосовувати адаптивні алгоритми, які враховують їхні особливості, оптимізують використання та збільшують термін служби. Такі алгоритми можуть змінювати параметри заряджання (струм, напругу) у режимі реального часу на основі вимірювань поточних параметрів акумулятора та історичних даних. Це допомагає збільшити термін його служби. Застосування нечіткої логіки для розробки адаптивних алгоритмів керування заряджанням літій-іонних акумуляторів є високоефективним. Ключовими перевагами є: підвищена ефективність та скорочення часу заряджання, збільшення терміну служби акумулятора за рахунок мінімізації навантаження, підвищена безпека через запобігання перезарядженню та перегріванню, висока адаптивність до змін стану акумулятора та навколишнього середовища.

Розроблений адаптивний алгоритм з використанням нечіткої логіки, який враховує стратегію оптимізації процесу заряджання для використаних літій-іонних акумуляторів. Заряджання до високої напруги прискорює деградацію, а зниження кінцевої напруги заряджання може суттєво подовжити термін служби акумулятора. Високі струми можуть призвести до підвищення температури та прискореної деградації. Як високі, так і низькі температури значно прискорюють процеси деградації. Оптимальний діапазон температури – 20–25 °C. Часткові цикли в середньому діапазоні є менш стресовими та значно подовжують циклічний ресурс порівняно з повним розрядом. Тому корисною стратегією є використання акумулятора в оптимальному діапазоні SoC, 20–80 %, або, наприклад, 40–70 % у ситуаціях, коли повної ємності батареї не потребується.

Розроблений алгоритм заряджання дозволяє суттєво підвищити ефективність, безпеку та довговічність вживаних літій-іонних акумуляторів, що сприяє їх ширшому застосуванню в системах зберігання енергії, зокрема у відновлюваній енергетиці, та зниженню загальних витрат і позитивному впливу на навколишнє середовище завдяки зменшенню кількості відпрацьованих елементів.

Фінансування. Дослідження виконано в межах міжнародного проєкту Innovate Ukraine-2024 – supporting Ukraine's energy recovery: Mobile Energy's Torage unit with swappable second-life battery (METTLE) та державної науково-дослідної роботи "База-П10" «Розробити принципи побудови спеціалізованих систем керування перетворювачами напруги, струму та частоти для підвищення енергоефективності електротехнологічних установок».

ПОСИЛАННЯ

1. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/>.
2. Global Investment in the Energy Transition Exceeded \$2 Trillion for the First Time in 2024. BloombergNEF. Available at: <https://about.bnef.com/blog/global-investment-in-the-energy-transition-exceeded-2-trillion-for-the-first-time-in-2024-according-to-bloombergnef-report>.
3. Lu L., Han X., Li J., Hua J., & Ouyang M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013, vol. 226, pp. 272–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>.
4. Balagopal B., & Chow M. Y. The state of the art approaches to estimate the state of health (SoH) and state of function (SoF) of lithium ion batteries. *Proc. of the 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, 22–24 July 2015, Cambridge, UK, pp. 1302–1307. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281923>.
5. Wang X., Zhang Y., Deng Y., et al. Effects of Different Charging Currents and Temperatures on the Voltage Plateau Behavior of Li-Ion Batteries. *Batteries*. 2023, vol. 9, no. 1, 42. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9010042>.
6. Battery-Management-Systems. Available at: <https://www.vde.com/resource/blob/2105544/731ed20695f9fbf2f66423407554d1c5/fact-sheet-battery-management-system-pdf-file-data.pdf>.
7. What is a Battery Management System (BMS)? Synopsis. Available at: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>.
8. Wang S. C., Chen G. J., & Liu Y. H. Adaptive Charging Strategy With Temperature Rise Mitigation and Cycle Life Extension for Li-ion Batteries. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2018, vol. 3, no. 3.
9. Andersson M., Streb M., Prathimala V. G., et al. Electrochemical model-based aging-adaptive fast charging of automotive lithium-ion cells. *Applied Energy*. 2024, vol. 372, 123644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123644>.
10. Ahn J. H., & Lee B. K. High-Efficiency Adaptive-Current Charging Strategy for Electric Vehicles Considering Variation of Internal Resistance of Lithium-Ion Battery. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019, vol. 34, no. 4, pp. 3041–3052. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2848550>.
11. Al-Haj Hussein A., & Batarseh I. A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011, vol. 60, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2106527>.

12. Z. Xu, J. Wang, P. D. Lund, and Y. Zhang. Estimation and Prediction of State of Health of Electric Vehicle Batteries Using Discrete Incremental Capacity Analysis Based on Real Driving Data. *Energy*, vol. 225, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120160>.
13. Zaineb A., Vijayasanthi M., & Mandadi P. N. Fuzzy Logic Controller Based Charging and Discharging Control for Battery in EV Applications. *International Journal of Electrical and Electronics Research*. 2024, vol. 12, no. 1, pp. 1–7. Available at: <https://ijeer.forexjournal.co.in/papers-pdf/ijeer-120101.pdf>.
14. Lee C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*. 1990, vol. 20, no. 2, pp. 404–418. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.52551>.
15. Fuzzy Logic Control of Power Electronic Systems. Monolithic Power Systems. Available at: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/control-of-power-electronic-systems/fuzzy-logic-control-of-power-electronic-systems>.
16. Herasymenko P., Usenko S., Yarmolenko B., Gurin V. Control Strategy for Modular-Structured Series-Resonant Converters: Unifying Pulse-Density Modulation and Phase-Shift Control. *IET Power Electronics*. 2025, vol. 18, no. 1, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1049/pel2.70020>.
17. Стяжкін В. П., Зайченко О. А., Гаврилюк С. І., Рижков О. М., Теряев В. І., Красношанка Н. Д. Комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени суднової радіолокаційної станції з нечітким регулятором швидкості. *Технічна електродинаміка*. 2023. 3. С 60–67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.060>.
18. Зайченко О. А., Маруня Ю. В., Рижков О. М., Гаврилюк С. І., Хомицький О. І., Харченко О. О. Концепція побудови гібридної системи керування мікрогідроелектростанцією. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С 50–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.050>.
19. Ramalakshmi R., Sruthi S.M.R., & Reddy S. R. Fuzzy Logic Based Battery Charger For Inverter. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013, vol. 2, no. 7. Available at: <https://www.ijert.org/research/fuzzy-logic-based-battery-charger-for-inverter-IJERTV2IS70764.pdf>.
20. Shaout A.K., & Brauchler Z. Fuzzy Battery Manager: Charging and Balancing Rechargeable Battery Cells with Fuzzy Logic. *Electronics*. 2025, vol. 14, no. 7, 1470. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14071470>.
21. Madani S. S., Shabeer Y., Allard F., et al. A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis. *Batteries*. 2025, vol. 11, no. 4, 127. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11040127>.
22. Lim S., Ko W., Lee J., & Lee H. Voltage and temperature effects on low cobalt lithium-ion battery cathode degradation. *Environmental Science: Advances*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4YA00530A>.
23. BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries. Battery University. Available at: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>.
24. Mulpuri S. K., Sah B., & Kumar P. Unraveling capacity fading in lithium-ion batteries using advanced cyclic tests: A real-world approach. *iScience*. 2023, vol. 26, no. 10, 107770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107770>.
25. Xu B., Sun Y., & Onori S. Extending Life of Lithium-Ion Battery Systems by Embracing Heterogeneities via an Optimal Control-Based Active Balancing Strategy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3215610>.
26. Lithium-ion batteries in use: 5 more tips for a longer lifespan. Saft. Available at: <https://saft.com/en/energizing-iot/lithium-ion-batteries-use-5-more-tips-longer-lifespan>.
27. Woody M. Strategies to limit degradation and maximize Li-ion battery service lifetime - critical review and guidance for stakeholders. PhD thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 2019, 149 p. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/154859>.
28. Senol M., Papadopoulos P., McArthur S., & Emhemed A. Electric Vehicles Under Low Temperatures: A Review on Battery Performance, Charging Needs, and Power Grid Impacts. *IEEE Access*. 2023, vol. 11, pp. 39879–39912. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268615>.
29. Gao Y., Jiang J., Zhang C., Zhang W., & Jiang Y. Aging mechanisms under different state-of-charge ranges and the multi-indicators system of state-of-health for lithium-ion battery with Li(NiMnCo)O₂ cathode. *Journal of Power Sources*. 2018, vol. 401, pp. 176–184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.018>.
30. Habib A.K.M.A., Hasan M. K., Issa G. F., et al. Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations. *Batteries*. 2023, vol. 9, no. 3, 152. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9030152>.

ADAPTIVE ALGORITHM FOR CONTROLLING THE CHARGING PROCESS OF USED LITHIUM-ION BATTERIES BASED ON FUZZY LOGIC

Received Sept. 9, 2025; accepted Dec. 09, 2025
Available online Dec. 31, 2025

Havryliuk S.¹, Zaichenko O.², Marunia Yu.³,
Ryzhkov O.⁴, Chopyk V.⁵, Tereshenko A.⁶

Author for correspondence: Oleh Zaichenko,
e-mail: tems@ukr.net

¹ Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0002-7345-8405>

² Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0001-9311-3378>

³ Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0003-0071-1702>

⁴ PhD
<https://orcid.org/0000-0002-0011-9402>

⁵ Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>

⁶ PhD student
<https://orcid.org/0009-0001-9489-1793>

^{1, 2, 3, 4, 5} Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁶ Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. *The effective integration of intermittent renewable energy sources into the power grid largely depends on energy storage systems, where second-life batteries are playing an increasingly important role. In this paper, the features of controlling the charging processes of used lithiumion batteries are considered, for which traditional constant current and constant voltage (CC-CV) charging methods are ineffective and accelerate their degradation. The development and proposal of an adaptive charging algorithm based on fuzzy logic are presented. This approach allows optimizing the charging process by taking into account dynamic changes in battery characteristics, such as voltage, current, temperature, state of charge (SoC), battery health (SoH) and state of functioning (SoF). It is shown that the proposed algorithm increases efficiency, safety and significantly increases the service life of batteries compared to traditional methods, adapting to their condition in real time.*

Keywords: *lithium-ion batteries, battery charging, adaptive algorithms, fuzzy logic, used batteries, battery degradation, control systems.*

Introduction. According to data from the International Energy Agency [1], the share of electric vehicles (EVs) in the global automotive market more than doubled (from 4 % to 10 %) between 2021 and 2023. In the first quarter of 2024, EV sales increased by approximately 25 % compared to the first quarter of 2023. A Bloomberg NEF report indicates that global investments in the energy sector exceeded \$2 trillion for the first time in 2024 [2]. A significant portion of these investments is directed towards the development of battery energy storage systems (BESS), which are a key element for grid stabilization and the effective integration of renewable energy sources. Concurrently, substantial funds are being invested in the electrification of transport, which is also part of the global transformation of the energy sector.

These data demonstrate that global demand for electric transport is steadily increasing, driving an increase in the number of end-of-life (EOL) batteries. Battery disposal is a high-cost and technologically complex process that has a significant impact on the environment throughout its lifecycle. Firstly, the extraction of raw materials (lithium, cobalt, nickel) is associated with the depletion of natural resources and pollution. Secondly, if spent batteries are improperly disposed of, their components form toxic compounds that migrate into the soil and water, creating a long-term threat to the environment.

Most global electric vehicle manufacturers recommend replacing batteries when their capacity falls below 80 %. However, these battery packs remain suitable for second-life reuse in energy storage and accumulation systems, both in industry and in households. The reuse of batteries allows for a reduction in the capital costs associated with creating and updating energy storage systems while simultaneously providing the necessary power and duration of autonomous operation.

Given the constant growth in demand for electric transport and, consequently, the increasing number of used batteries suitable for reuse in energy storage systems, the topic of developing methods that allow for their efficient and safe charging is crucial and relevant. The traditional CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) charging protocol is not optimal for second-hand batteries and can accelerate their degradation. Therefore, a critical task is the creation of an adaptive control system for the lithium-ion battery charging process that takes into account the dynamic changes in their characteristics and optimizes charging parameters in real-time to increase the service life, enhance operational safety, and improve the efficiency of using second-hand lithium-ion batteries.

The objective of this work is to substantiate and develop an adaptive control algorithm for a charging system of second-hand lithium-ion batteries using fuzzy logic.

For reuse, spent battery packs are disassembled into separate modules or cells. After diagnostics, operational cells with similar characteristics are selected, grouped, and assembled into new battery packs. Typically, the following key characteristics are checked: capacity, internal resistance, voltage, and self-discharge. When assembling sections from used battery cells, it's crucial to group cells that are closest in capacity and internal resistance. Even a slight difference in these parameter values leads to a voltage variation among individual cells during operation, causing the Battery Management System (BMS) to disconnect the group of cells or the entire battery pack.

We will examine battery characteristics that can be used to assess their current state and suitability for reuse. One such indicator is the battery State of Health (SoH), expressed as a percentage and reflecting the battery's current condition relative to its initial state. The next indicator is the State of Charge (SoC), also expressed as a percentage, which shows how much energy remains in the battery relative to its full initial capacity.

However, assessing SoH and SoC is insufficient for second-hand batteries, as a comprehensive evaluation of the State of Function (SoF) is required to ensure the battery is suitable for reuse and can perform its functions safely and reliably. The SoF indicator is not a strictly defined concept but is generally defined as the battery's ability to maintain its functions for a specific application. SoF can take into account other indicators such as SoC and SoH, as well as operating temperature, charge/discharge history, presence of faults (overvoltage, overload, sharp temperature increase), concentration of flammable gases, and so on [3].

There are several methods for SoF estimation [4]. The battery State of Function (SoF) assessment can be performed using the Power Demand Based method. This method analyzes the battery's ability to operate under the current load. To do this, the open-circuit voltage (VOC) is first determined using the relationship between voltage and charge level (the VOC–SOC curve). Knowing the maximum voltage change and the battery's current capacity at a given time, one can calculate the battery's instantaneous deliverable power. Based on this calculation, the battery is assigned an operational status: SoF=1 (suitable) or SoF=0 (unsuitable).

In [3], SoF is defined based on the formula:

$SoF = (P - P_{demands}) / (P_{max} - P_{demands})$, where P is the power the battery can provide, $P_{demands}$ is the load power, and P_{max} is the maximum possible battery power.

Another method is the Terminal Voltage-Based Technique. SoF assessment is performed based on historical information and measured current data (voltage, SoH, maximum voltage). This method can determine the battery's ability to sustain operation under the required load. SoH is an important indicator when using this method, as it determines the rate of battery voltage drop.

Battery Charging Stages. Charging a lithium-ion battery most often occurs in three stages: the initial Pre-charge / Trickle Charge, the main CC (Constant Current), and the final CV (Constant Voltage). This ensures efficient and safe

charging of the battery, generally in the traditional use case of new batteries.

The Pre-charge stage is used for batteries that are deeply discharged, with the voltage across their terminals dropping below the permissible level. The key objective of this phase is to gradually restore the voltage to a level that allows for a safe transition to the main Constant Current (CC) charging stage. For this purpose, a small constant current is applied to the battery (e.g., $1/10^{\text{th}}$ of the nominal current of the CC stage). This approach is a precaution that prevents damage to the internal structure of the battery, which could occur if a significant current were applied to deeply discharged cells.

The Constant Current (CC) charging stage is the main and most prolonged stage. This stage allows the battery to be charged to approximately 80-90 % of its nominal capacity. The CC stage concludes when the battery voltage reaches the limit set by the manufacturer (e.g., 4.2 V for most types of lithium-ion batteries).

The final stage uses the Constant Voltage (CV) mode, which prevents dangerous overcharging while ensuring the battery is fully charged. In this stage, the voltage across the battery is maintained at the maximum permissible level specified by the manufacturer, while the charging current gradually decreases. As soon as the current drops to approximately 3-5 % of the current used in the CC stage, the charging process automatically terminates.

The CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) charging protocol is effective for charging new batteries; however, for second-hand batteries, this method is suboptimal and may accelerate further degradation. This is due to several characteristic changes that occur in the battery over time:

This is due to several characteristic changes that occur in the battery over time:

1. **Increased Internal Resistance.** The internal resistance of the battery increases over time, which is a consequence of two processes: the thickening of the Solid Electrolyte Interphase (SEI) layer on the anode and degradation changes in the structure of the electrodes themselves.

2. **Premature Transition to CV Mode.** Due to the elevated resistance, the voltage at the battery terminals reaches its upper limit much earlier during Constant Current (CC) charging. This causes the main charging phase to shorten, and the system switches to Constant Voltage (CV) mode when the battery hasn't yet reached the State of Charge (SoC) level a new one would have.

3. **Prolongation of the CV Stage.** Since the Constant Current (CC) phase becomes shorter, a larger portion of the charge accumulates during the Constant Voltage (CV) stage, significantly increasing its duration. This prolonged exposure to maximum voltage is a severe stress factor for the battery. It not only accelerates cathode degradation but also stimulates the further growth of the SEI layer on the anode, which is particularly detrimental to second-hand batteries.

4. Increased Heat Generation. Higher values of internal resistance lead to greater heat dissipation during the flow of charging current, especially in the main CC phase. Consequently, the temperature rises, which is the starting point for many degradation processes [5].

The Constant Current-Constant Voltage (CC-CV) charging method is unable to adapt to the dynamic changes in battery characteristics over the course of its operational life [6]. Therefore, it is appropriate to apply adaptive algorithms for charging second-hand batteries, as they account for these specific features and are capable of optimizing battery utilization. Such charging algorithms can modify charging parameters in real-time based on the measurement of current battery parameters and the use of historical data, which helps to increase battery lifespan and enhance operational safety [7].

Adaptive algorithms can be classified according to the methods used for adaptation decision-making: Rule-Based/Threshold-Based algorithms; Profile Analysis-Based (voltage/current profiles); Model-Based Algorithms; Data-Driven / Machine Learning (ML); and Adaptive Pulsed Charging.

Algorithms operating on the Threshold-Based principle rely on predefined rules. Their logic involves the system monitoring key parameters (voltage, current, temperature, etc.) and changing the charging conditions as soon as one or a group of parameters reach a specific limit. A typical rule is, for example, limiting the charging current or voltage upon overheating, or completely stopping the process when a dangerous temperature is reached [8, 9]. The algorithm can also be adapted to limit the maximum charging current depending on the battery capacity or its internal resistance. If the capacity has decreased or the resistance has increased, the maximum charging current can be reduced to prevent battery overheating [10]. Fuzzy Logic-based systems can be categorized under these algorithms.

Algorithms that analyze the dynamics of voltage and current values operate by identifying key features on the graphs of these parameters using pre-known profiles. These characteristic points or features are associated with the battery's current state during the charging process. Based on the results of such analysis, the system introduces corrections to the charge parameters, for example, using the rate of voltage change (dU/dt) or the acceleration of voltage change (d^2U/dt^2) to determine the transition points between charging stages [11]. These points can shift depending on the SoH. There are also algorithms that involve measuring internal resistance during charging, and this information is used to adapt the charging process.

Model-Based Algorithms utilize a mathematical model of the battery pack to predict the battery's behavior during charging. Battery state estimation (SoC, SoH, temperature, etc.) can be performed using state filters, such as the Kalman filter. The model can adapt to battery aging through periodic parameter correction.

Data-Driven Algorithms, including machine learning methods, use accumulated information about charging cycles to dynamically adjust parameters. For instance, charging parameters are optimized using neural networks or other models based on current battery state measurements [12].

Adaptive Pulsed Charging involves short current pulses whose parameters (amplitude, duration, frequency, and pause) change according to the battery's state. This method aims to reduce polarization—the deviation of the terminal voltage from the Open Circuit Voltage (Voc) during current flow—which potentially lessens cell degradation. This voltage deviation occurs due to internal processes within the battery that slow down the current flow and energy conversion.

In practice, hybrid methods that use elements from several algorithms are often applied. The goal of such a combination is to increase the overall performance, reliability, and robustness of the system. For example, a Coulomb counting mechanism can be combined with voltage and temperature correction mechanisms. Another common example is the use of a Kalman filter for accurate battery state estimation, complemented by algorithms that make decisions based on rules or optimization models.

Justification for the Selection of the Adaptive Charging Algorithm. Fuzzy Logic (FL) can effectively manage nonlinear systems without requiring a precise mathematical model [13]. For complex systems, such as lithium-ion batteries, where accurate modeling can be complicated, the application of fuzzy logic offers advantages. It allows for the integration of linguistic variables and fuzzy sets, obtained experimentally, into the automated control system [14].

Fuzzy logic controllers are generally robust against changes in system parameters and operating conditions. The use of symbolic fuzzy logic rules allows for the construction of fuzzy microcontroller structures with a human-like decision-making process [15]. Unlike microcontrollers based on sharp/crisp rules (microcontrollers with hard logic) [16], this structure makes it easy not only to adapt the control system to specific requirements but also to successfully combine it with traditional control methods [17, 18].

The main advantages of using Fuzzy Logic (FL) for battery charging are:

1. Increased Efficiency and Reduced Charging Time. A fuzzy logic-based controller can optimize charging profiles, potentially reducing charging time compared to traditional methods while maintaining or improving efficiency. For example, [19] notes that fuzzy logic-based control can shorten charging time while achieving higher efficiency and lower temperature rise.
2. Extended Battery Lifespan. By managing charging parameters such as current and temperature, a fuzzy logic-based controller can minimize stress on the battery, leading to an increase in its cycle life.
3. Enhanced Safety. A fuzzy logic-based control system can incorporate safety-critical rules to prevent overcharging,

overheating, and excessive current. Overcharging can damage physical components, and even a single minute of overcharging can lead to battery failure.

4. Adaptability. Fuzzy logic-based systems can be designed to adapt to changes in the battery's state and environmental conditions. [20] mentions that a fuzzy battery controller successfully achieves its charging and cell-balancing goals with high adaptability simply by adjusting the membership functions.

All key battery parameters—voltage, current, temperature, and SoC—are interdependent. During the constant current phase, for instance, voltage increases along with SoC. Furthermore, the efficiency of the battery's charge absorption changes depending on its temperature and current state of charge. Therefore, for effective control, a fuzzy logic-based system must evaluate the parameters not individually, but collectively, considering all existing interrelationships.

Thus, due to its flexibility and relative ease of understanding, which is based on ordinary human language, fuzzy logic is one of the most effective methods for controlling the charging process of second-hand lithium-ion batteries. Unlike currently known charging methods, fuzzy logic allows for the use of uncertain input data, can solve and combine contradictory tasks and goals, while also taking into account the experience of expert systems and being based on classical control laws.

Key Factors Affecting Battery Lifespan During Charging. The service life of lithium-ion batteries heavily depends on the charging conditions. Voltage, current, temperature, and State of Charge (SoC) play a critical role in the rate of degradation.

Charging a battery to a high voltage (e.g., 4.2 V per cell) allows for maximum capacity utilization, but simultaneously places significant stress on the battery components. The cathode material is particularly sensitive to high voltage, where degradation processes such as metal dissolution, structural changes, and other transformations accelerate [21]. High voltage also promotes the oxidation of the electrolyte on the cathode surface [22]. Maximum voltage is, in fact, one of the key factors determining the rate of cathode degradation.

Many studies show a direct correlation between maximum charging voltage and cycle life. Reducing the voltage even by a small amount can significantly extend the lifespan. For example, lowering the voltage from 4.2 V to 4.1 V per cell can double the number of cycles, and a further reduction to 4.0 V can double it again [23]. Research confirms accelerated degradation at voltages above 4.0 V for certain battery chemistries. The voltage considered optimal from the perspective of minimizing stress is around 3.90–3.92 V per cell, although this significantly limits the available capacity.

For every battery type, there are critical voltage thresholds, and exceeding them is a key factor in the nonlinear nature of degradation. As soon as the voltage crosses this boundary, destructive processes, such as intensive dissolution of

cathode metals or accelerated electrolyte oxidation, are significantly amplified. This is related to the electrochemical properties of the materials. When the applied voltage exceeds a certain threshold, irreversible changes begin to occur in the battery. Therefore, maintaining the voltage below these critical values can extend the battery's lifespan.

Influence of Charging Current. Although using high currents significantly reduces charging time, this approach carries risks that negatively affect the battery's longevity. Key issues include:

1. **Lithium Plating.** At high currents, the rate of lithium-ion influx to the anode can exceed the rate of their intercalation into the anode structure, especially at low temperatures, leading to the deposition of metallic lithium [24].
2. **Increased Temperature.** The flow of high current through the battery's internal resistance causes significant heat generation, which can lead to overheating and the acceleration of other degradation mechanisms [25].
3. **Mechanical Stress.** Rapid lithium intercalation into the electrode material creates internal pressure that can damage the electrodes or make them less elastic.

Lower charging currents are often recommended to extend service life [26]. Studies identify charging current as a stress factor. The primary damage from high charging currents may be related not so much to the current flow itself under ideal conditions, but to its consequences, namely the temperature increase. Therefore, maintaining a safe temperature and current range during fast charging is important for minimizing their negative impact.

Influence of Temperature. Charging at elevated temperatures (above 30°C, and especially above 60°C) is one of the most damaging factors for lithium-ion batteries. High temperature sharply accelerates almost all undesirable chemical reactions inside the cell: SEI (Solid Electrolyte Interphase) growth, electrolyte decomposition, and cathode degradation (including metal dissolution) [27].

Charging at low temperatures (below 0°C) is also harmful. At low temperatures, the battery's internal resistance increases significantly, charging efficiency decreases, and the risk of metallic lithium plating on the anode sharply rises [28, 29].

The best charging conditions are a temperature range close to room temperature (20–25°C). Charging within approximately 5°C to 35°C is generally considered acceptable. Since both high and low temperatures accelerate degradation during charging, effective battery thermal management is critically important [30].

Influence of SoC Range. The way the battery's capacity is used significantly impacts its service life. Repeated cycles with full discharge (from 100 % to 0 % SoC) are more stressful for the battery than partial cycles within a narrow SoC range, especially if extreme values are avoided.

Research shows that decreasing the depth of discharge exponentially increases the cycle life. For example, using only

30 % of the capacity can increase the number of cycles by four times or more compared to 100 %. Limiting the maximum SoC to 50 % can increase the expected lifespan by 44–130 %.

Charging in the extreme SoC ranges (e.g., 0–20 % or 80–100 %) can accelerate specific degradation mechanisms: impedance growth at low SoC and capacity loss at high SoC (especially for NMC (Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt-Oxide) chemistry) compared to charging in the mid-range (e.g., 40–60 % SoC). High SoC is associated with high voltage, which stresses the cathode and accelerates electrolyte oxidation. Therefore, minimizing the time spent at high SoC levels is a beneficial strategy. Very low SoC can lead to over-discharge, which is also detrimental to the electrodes. Operating in the mid-SoC range avoids these extreme conditions.

LFP (Lithium Iron Phosphate, LiFePO_4) batteries are less sensitive to being at 100 % charge. The stress on the cathode at full charge is much lower than in NMC. However, the 20–80 % charging strategy is useful for prolonging the service life of any type of lithium-ion battery. It is also recommended to periodically charge LFP batteries to 100 %. This allows the Battery Management System (BMS) to accurately calibrate the readings and correctly determine the state of charge.

Adaptive Battery Charging Algorithm. The adaptive battery charging algorithm based on fuzzy logic includes the following main steps: problem definition; definition of linguistic variables and the fuzzy set, including its behavior; definition of the fuzzy inference mechanism; construction of the control system itself and its verification; as well as the tuning process and determination of operational capability.

Table. Input and output variables of a fuzzy logic-based battery charging control system

№	Variable Type	Variable Name	Range	Fuzzy Set
1	Input	Cell Voltage	2.8 V - 4.2 V per cell	Critically Low, Low, Nominal, High, Critically High
2		Voltage Change (dU/dt)	Less than 0.0, 0–3 mV/s, more than 3 mV/s	Negative, Zero, Operational, High
3		Charging Current	0 A to C-rate	Zero, Very Low, Low, Medium, High, Maximum
4		Temperature	0 °C - 40 °C (charging)	Critically Cold, Cold, Optimal, Hot, Critically Hot
5		State of Charge (SoC)	0 % - 100 %	Very Low, Low, Medium, High, Very High
6		State of Health (SoH)	0 % - 100 %	Very Low, Low, Medium, High, Very High
7		State of Function (SoF)	0 % - 100 %	Low, Medium, High, Very High
8		SoC Limitation Mode	0 - 100 %	Low, Medium, High
9		Time from Start of Charging	0 - 600 min	Very Short, Short, Medium, Prolonged, Excessively Prolonged
10		Battery Type	LiFePO_4 , NMC	Lithium Iron Phosphate, Lithium Nickel-Manganese-Cobalt Oxide
11	Output	Final Charging Voltage	3.65 - 4.2 V	Critically Low, Low, Nominal, High, Critically High
12		Charging Current	0 A to Max C-rate	Zero, Trickle, Very Low, Low, Medium, High, Maximum
13		Operating Mode	Pre-charge, CC, CV, pause, error	Pre-charge, CC, CV, Pause, Error (For this variable, the fuzzy set represents discrete states, the selection of which is performed by the fuzzy controller.)

The selection of input and output variables and their representation using membership functions is a crucial initial step, the result of which will influence the formation of the fuzzy solution. The flexibility and adequate response of the system will depend on the external factors affecting its behavior, meaning the correlation between the linguistic variables and the physical base parameters. The table presents the proposed input and output variables for the fuzzy logic-based battery charging control system.

Input and Output Variables for the Fuzzy Logic-Based Battery Charging Control System:

1. Cell Voltage: Useful for precise adjustment near voltage limits.
2. Voltage Change (dU/dt): During the CC stage, the voltage constantly rises, so dU/dt is positive. In the CV stage, dU/dt sharply decreases and approaches zero as the voltage is held nearly constant. Small negative values may occur during normal transitions between stages, while larger negative values may indicate malfunctions.

3. **Current Charging Current:** Measurement is necessary for feedback and for implementing the Pre-charge, CC, and CV modes.

4. **Temperature:** Critical for the battery's safety and health. Charging outside the permissible limits is harmful.

5. **State of Charge (SoC):** Determines how much charge is needed and influences the permissible current.

6. **State of Health (SoH):** SoH is an important variable, especially for second-hand batteries, directly indicating the degree of degradation. A battery with low SoH may require lower maximum currents, a lower maximum voltage, or more cautious temperature management during charging. SoH estimation can be obtained using methods based on capacity measurement, internal resistance, or more complex algorithms.

7. **State of Function (SoF):** The state of function reflects an assessment of how well and safely the battery is able to perform its intended functions at the current time.

8. **SoC Limitation Mode:** The SoC limitation mode allows setting the upper and lower bounds of the SoC range. For example, to use the battery within 20–80 % of its capacity. This approach can significantly extend the battery's service life.

9. **Time from Start of Charging:** Tracking the time from the start of charging acts as a safeguard that limits the maximum duration of the process. This time can also serve as a backup mechanism for switching between charge stages in case primary indicators (such as voltage or current) are malfunctioning.

10. **Battery Type:** Key charging characteristics depend on the battery chemistry: maximum charging voltage (LFP–3.6/3.65 V per cell, NMC–4.2 V), charging current (LFP–0.5–1C, NMC–0.5–0.7C), optimal SoC range (LFP–10–100 %, NMC–20–80 %).

11. **Final Charging Voltage:** The fuzzy controller can adapt the final charging voltage to reduce stress on the battery and extend its service life.

12. **Charging Current:** The fuzzy controller modifies the maximum current depending on SoH, SoC, SoF, and temperature to optimize speed and safety. The minimum current in the Pre-charge and CV stages, upon reaching which the transition to the CV stage or the termination of charging occurs, is also considered.

13. **Operating Mode:** The fuzzy controller makes decisions regarding switching between different charging stages based on the combination of input variables.

Description of the Adaptive Battery Charging Algorithm. The algorithm utilizes a Fuzzy Logic system to control the charging process. At each stage, 10 input parameters are determined: Battery Voltage; Voltage Change (dU/dt); Current Charging Current; Temperature; SoC; SoH; SoF; SoC Limitation Mode; Time from Start of Charging; and Battery Type.

Based on this data and the fuzzy logic rule base, the controller determines the optimal values for three output control variables: Final Charging Voltage; Charging Current; and Operating Mode (Pre-charge, CC, CV, Pause, Error).

The charging process includes the following phases:

Phase 1: Initialization. The system is activated after the battery is connected to the charger. An initial reading of all input parameters is performed, or the last known values are used.

Safety Check:

Temperature: If the temperature is "Critically Cold" (e.g., below 0°C) or "Critically Hot" (e.g., above 40°C), charging does not start until the temperature normalizes. The controller switches to "Error" mode.

Voltage: If the initial battery voltage is "Critically High" (e.g., 4.2 V or higher per cell), this may indicate an error or that the battery is already charged.

SoH/SoF: If the SoH is "Very Low" or the SoF is "Low", the controller limits the maximum charging current or issues a message about the need for additional diagnostics.

After initialization, the controller determines the operating mode based on the initial conditions.

Phase 2: Pre-charge. Phase Entry Condition: The charger enters the "Pre-charge" mode if the battery voltage is defined as "Critically Low" (e.g., below 3.0 V per cell). The charging current is set to a "Very Low" level (3 % of the current in the CC phase). The controller continuously monitors cell voltage, temperature, and dU/dt .

Phase Exit Condition: The controller switches the system from "Pre-charge" to "CC" mode when the cell voltage reaches the "Low" level (e.g., 3.0–3.2 V), and the temperature remains within safe limits ("Optimal" or "Cold").

Phase 3: Constant Current Charging (CC - Constant Current). Phase Entry Condition: The system transitions to "CC" mode from the "Pre-charge" phase, or immediately after initialization if the cell voltage was not "Critically Low". The Optimal Charging Current is a dynamic value calculated by the controller based on a combination of parameters. For new batteries (High SoH) and under optimal temperature, the system selects a High Current (0.5C–1.0C). However, it is reduced if the temperature becomes too high or too low, or if the battery shows signs of wear (low SoH). The State of Charge (SoC) also influences the decision: the current may be higher at the beginning of the CC phase. Concurrently, the State of Function (SoF) acts as a priority limiting factor, forcibly reducing the current if indicators are low. At the same time, the controller determines the Target Final Voltage (e.g., 4.2 V), which may be lowered for second-hand batteries. Throughout this time, the system continuously monitors voltage, current, temperature, SoC, dU/dt , and process duration.

Phase Exit Condition: The controller concludes the Constant Current (CC) phase and transitions to the Constant

Voltage (CV) phase when one of the key conditions is met. The first is the cell voltage reaching its Target Value ("High", 4.2 V). The second, alternative condition is a significant slowing of voltage rise (dU/dt approaches zero), which indicates battery saturation. There are also auxiliary factors, such as the temperature approaching the "Hot" state or the SoF dropping to "Low", which may accelerate this transition.

Phase 4: Constant Voltage Charging (CV - Constant Voltage). Phase Entry Condition: The entry conditions for this phase coincide with the system's exit conditions from the CC phase. The controller maintains the cell voltage at the level determined by the controller as the "Final Charging Voltage". The charging current begins to decrease as the battery's internal resistance increases. The main task of the controller in the Constant Voltage (CV) stage is to maintain the set voltage level, although it can also set an upper current limit for safety, if necessary. Continuous monitoring includes: charging current (decreasing), cell voltage (maintained at the set level), dU/dt (approaching "Zero"), temperature, SoC (approaching "Very High"), and charging time.

Phase Exit Condition: The controller switches the system from the Constant Voltage (CV) mode to "Pause" mode, signaling the completion of charging, when one of several conditions is met. This transition occurs when the charging current drops to a very low level (usually 3–5 % of the nominal current), the rate of voltage change (dU/dt) approaches zero, the State of Charge (SoC) reaches 95–100 %, or when the charging time becomes excessively long and other parameters indicate completion. This approach prevents indefinite charging, which may occur due to battery peculiarities, and ensures an effective and safe cycle completion.

Charging Completion / Pause. Phase Entry Condition: 1. The system enters this mode from the "CV" phase after the completion conditions are met. 2. It may also transition from any phase if the controller determines the need for a temporary stop. The controller sets the "Charging Current" to "Zero" and the "Operating Mode" to "Pause" and continues to measure cell voltage and temperature in standby mode. The controller may also apply short-term top-up charging if the voltage drops below a certain level (e.g., 4.2 V/cell).

Phase Exit Condition: 1. Battery disconnection. 2. User command to continue/start a new cycle. 3. If the pause was temporary (e.g., due to temperature), the controller can automatically resume charging when conditions normalize, returning to the appropriate phase.

Error. The controller initiates an emergency charging stop, switching the system to "Error" mode, under any critical conditions. These conditions include battery overheating (above 45–50°C) or a voltage spike above a safe value (e.g., 4.25–4.3 V). The emergency mode is also triggered if the rate of voltage change (dU/dt) remains significantly negative for a prolonged period, which may indicate a serious malfunction. Furthermore, an error is recorded if charging

lasts too long without a proper increase in State of Charge (SoC) and voltage, indicating a defect in the battery or the charger itself.

At every phase (especially CC and CV), the controller constantly evaluates the degrees of membership of all input parameters in their fuzzy sets (e.g., temperature may be 60 % "Optimal" and 40 % "Hot"). Based on this and the rule base, the controller generates the current and voltage output signals. This allows for a more accurate reaction to changes in the battery's state than traditional charging algorithms with fixed thresholds. For example, the current reduction due to a temperature increase will not be sharp but gradual, corresponding to how close the temperature is to the critical point.

The figure presents the functional diagram of the adaptive battery charging algorithm.

Conclusions. It is expedient to apply adaptive algorithms for charging second-hand batteries, as they take into account their peculiarities, optimize utilization, and extend their service life. Such algorithms can modify charging parameters (current, voltage) in real-time based on current battery parameter measurements and historical data. This helps to extend its lifespan.

The application of Fuzzy Logic for developing adaptive control algorithms for charging lithium-ion batteries is highly effective. Key advantages include: increased efficiency and reduced charging time, extended battery lifespan by minimizing stress, enhanced safety through the prevention of overcharging and overheating, and high adaptability to changes in battery state and environmental conditions.

The developed adaptive algorithm using fuzzy logic incorporates an optimization strategy for the charging process of used lithium-ion batteries. Charging to a high voltage accelerates degradation, and lowering the final charging voltage can significantly extend the battery's service life. High currents can lead to increased temperature and accelerated degradation. Both high and low temperatures significantly accelerate degradation processes. The optimal temperature range is 20–25°C. Partial cycles within the mid-range are less stressful and significantly prolong the cycle life compared to a full discharge. Therefore, a useful strategy is to operate the battery within the optimal SoC range, such as 20–80 %, or, for instance, 40–70 % in situations where the full battery capacity is not required.

The developed charging algorithm allows for a significant improvement in the efficiency, safety, and durability of second-hand lithium-ion batteries, which promotes their wider application in energy storage systems, including in renewable energy, and contributes to a reduction in overall costs and a positive impact on the environment by decreasing the number of spent cells.

Funding

The research was conducted within the framework of the international project Innovate Ukraine-2024 – supporting Ukraine's energy recovery: Mobile Energy Storage unit with swappable second-life battery (METTLE) and the state

scientific research work "Baza-P10" ("Develop principles for constructing specialized control systems for voltage, current, and frequency converters to increase the energy efficiency of electro-technological installations").

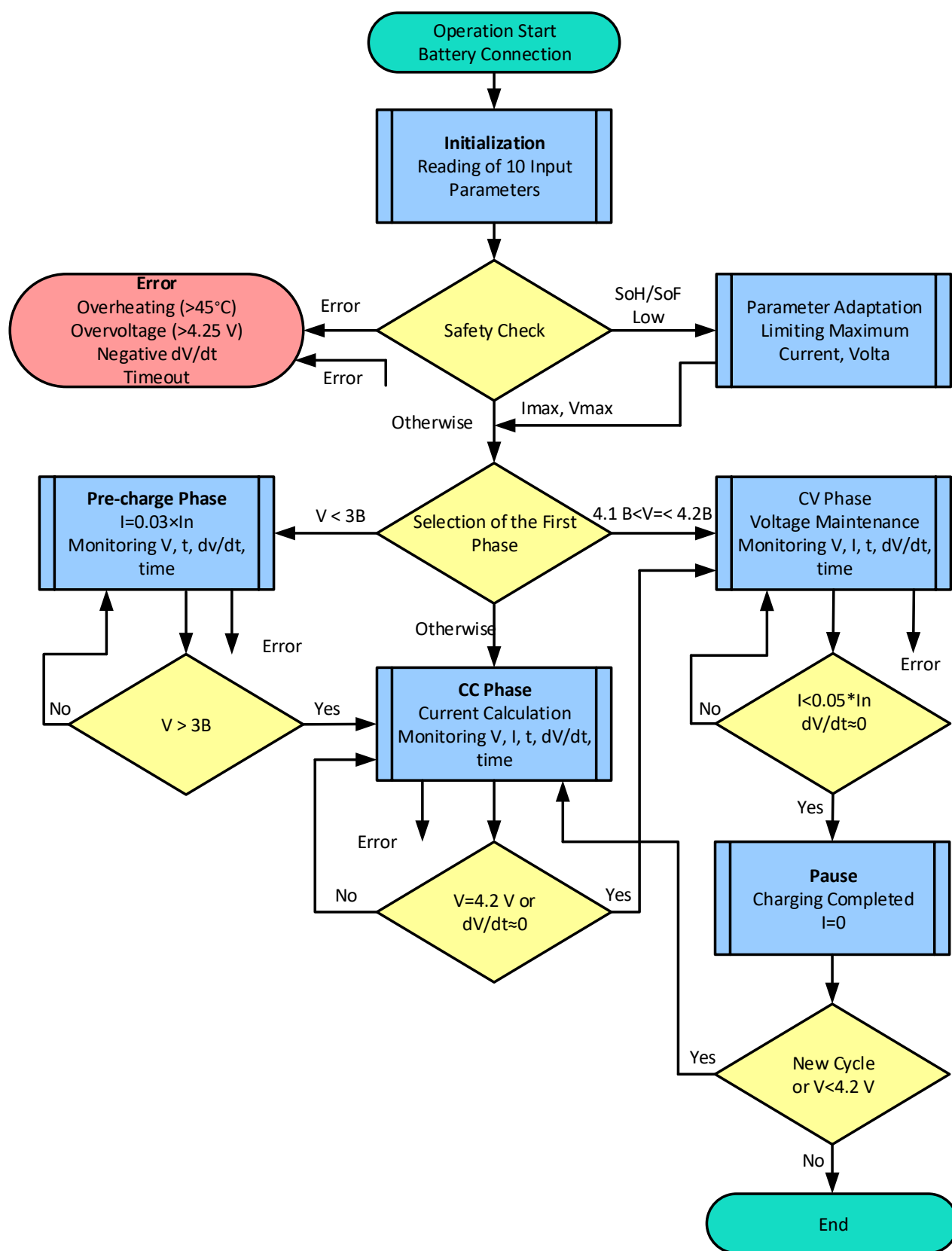


Figure. Functional scheme of the battery charging algorithm

REFERENCES

1. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/>.
2. Global Investment in the Energy Transition Exceeded \$2 Trillion for the First Time in 2024. BloombergNEF. Available at: <https://about.bnef.com/blog/global-investment-in-the-energy-transition-exceeded-2-trillion-for-the-first-time-in-2024-according-to-bloombergnef-report>.
3. Lu L., Han X., Li J., Hua J., & Ouyang M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013, vol. 226, pp. 272-288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>.
4. Balagopal B., & Chow M.Y. The state of the art approaches to estimate the state of health (SoH) and state of function (SoF) of lithium ion batteries. *Proc. of the 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, IEEE, 22-24 July 2015, Cambridge, UK, pp. 1302-1307. DOI: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2015.7281923>.
5. Wang X., Zhang Y., Deng Y., et al. Effects of Different Charging Currents and Temperatures on the Voltage Plateau Behavior of Li-Ion Batteries. *Batteries*. 2023, vol. 9, no. 1, 42. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9010042>.
6. Battery-Management-Systems. Available at: <https://www.vde.com/resource/blob/2105544/731ed20695f9fbf2f66423407554d1c5/fact-sheet-battery-management-system-pdf-file-data.pdf>.
7. What is a Battery Management System (BMS)? Synopsis. Available at: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>.
8. Wang S.C., Chen G.J., & Liu Y.H. Adaptive Charging Strategy with Temperature Rise Mitigation and Cycle Life Extension for Li-ion Batteries. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*. 2018, vol. 3, no. 3.
9. Andersson M., Streb M., Prathimala V.G., et al. Electrochemical model-based aging-adaptive fast charging of automotive lithium-ion cells. *Applied Energy*. 2024, vol. 372, 123644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123644>.
10. Ahn J.H., & Lee B.K. High-Efficiency Adaptive-Current Charging Strategy for Electric Vehicles Considering Variation of Internal Resistance of Lithium-Ion Battery. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019, vol. 34, no. 4, pp. 3041-3052. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2848550>.
11. Al-Haj Hussein A., & Batarseh I. A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2011, vol. 60, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2011.2106527>.
12. Z. Xu, J. Wang, P. D. Lund, and Y. Zhang. Estimation and Prediction of State of Health of Electric Vehicle Batteries Using Discrete Incremental Capacity Analysis Based on Real Driving Data. *Energy*, vol. 225, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120160>.
13. Zaineb A., Vijayasanthi M., & Mandadi P.N. Fuzzy Logic Controller Based Charging and Discharging Control for Battery in EV Applications. *International Journal of Electrical and Electronics Research*. 2024, vol. 12, no. 1, pp. 1-7. Available at: <https://ijeer.forexjournal.co.in/papers-pdf/ijeer-120101.pdf>.
14. Lee C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*. 1990, vol. 20, no. 2, pp. 404-418. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.52551>.
15. Fuzzy Logic Control of Power Electronic Systems. Monolithic Power Systems. Available at: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/control-of-power-electronic-systems/fuzzy-logic-control-of-power-electronic-systems>.
16. Herasymenko P., Usenko S., Yarmolenko B., Gurin V. Control Strategy for Modular-Structured Series-Resonant Converters: Unifying Pulse-Density Modulation and Phase-Shift Control. *IET Power Electronics*. 2025, vol. 18, no. 1, pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1049/pel2.70020>.
17. Stiazhkin V.P., Zaichenko O.A., Ryzhkov O.M., Gavryluk S.I., Teriaev V.I., Krasnoshapka N.D. Combined control of the gearless arc stator electric drive of the ship radar station antenna with a fuzzy speed controller. *Technical electrodynamics*. 2023. No. 3. P.60-67. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.060>. (Ukr)
18. Zaichenko O.A., Marunia Yu.V., Ryzhkov O.M., Havryliuk S.I., Khomytskyi O.I., Kharchenko O.O. Concept of building a hybrid control system for a microhydroelectric power plant. *Technical Electrodynamics*. 2024. №4. C.50-56. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.050>. (Ukr)
19. Ramalakshmi R., Sruthi S.M.R., & Reddy S.R. Fuzzy Logic Based Battery Charger For Inverter. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2013, vol. 2, no. 7. Available at: <https://www.ijert.org/research/fuzzy-logic-based-battery-charger-for-inverter-IJERTV2IS70764.pdf>.
20. Shaout A.K., & Brauchler Z. Fuzzy Battery Manager: Charging and Balancing Rechargeable Battery Cells with Fuzzy Logic. *Electronics*. 2025, vol. 14, no. 7, 1470. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics14071470>.
21. Madani S.S., Shabeer Y., Allard F., et al. A Comprehensive Review on Lithium-Ion Battery Lifetime Prediction and Aging Mechanism Analysis. *Batteries*. 2025, vol. 11, no. 4, 127. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries11040127>.

22. Lim S., Ko W., Lee J., & Lee H. Voltage and temperature effects on low cobalt lithium-ion battery cathode degradation. *Environmental Science: Advances*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4YA00530A>.
23. BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries. Battery University. Available at: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>.
24. Mulpuri S.K., Sah B., & Kumar P. Unraveling capacity fading in lithium-ion batteries using advanced cyclic tests: A real-world approach. *iScience*. 2023, vol. 26, no. 10, 107770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107770>.
25. Xu B., Sun Y., & Onori S. Extending Life of Lithium-Ion Battery Systems by Embracing Heterogeneities via an Optimal Control-Based Active Balancing Strategy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2022.3215610>.
26. Lithium-ion batteries in use: 5 more tips for a longer lifespan. Saft. Available at: <https://saft.com/en/energizing-iot/lithium-ion-batteries-use-5-more-tips-longer-lifespan>.
27. Woody M. Strategies to limit degradation and maximize Li-ion battery service lifetime - critical review and guidance for stakeholders. PhD thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 2019, 149 p. Available at: <https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/154859>.
28. Senol M., Papadopoulos P., McArthur S., & Emhemed A. Electric Vehicles Under Low Temperatures: A Review on Battery Performance, Charging Needs, and Power Grid Impacts. *IEEE Access*. 2023, vol. 11, pp. 39879-39912. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3268615>.
29. Gao Y., Jiang J., Zhang C., Zhang W., & Jiang Y. Aging mechanisms under different state-of-charge ranges and the multi-indicators system of state-of-health for lithium-ion battery with Li(NiMnCo)O₂ cathode. *Journal of Power Sources*. 2018, vol. 401, pp. 176-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.018>.
30. Habib A.K.M.A., Hasan M.K., Issa G.F., et al. Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations. *Batteries*. 2023, vol. 9, no. 3, 152. DOI: <https://doi.org/10.3390/batteries9030152>.