

Моделювання активного балансування елементів літій-іонних акумуляторних батарей в MATLAB/Simulink

Смирнов О. П.¹, Борисенко А. О.¹, Іноземцев Д. В.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Надійшла: 08.09.2025. Прийнято: 09.12.2025. Опубліковано: 10.12.2025. Відкритий доступ: CC BY 4.0.

Анотація. Стаття присвячена дослідженню активного балансування елементів літій-іонних акумуляторів. Обґрунтована необхідність активного балансування літій-іонних акумуляторів, яке підвищує безпеку, довговічність та ефективність акумуляторних батарей електромобілів. Наведено детальний огляд методів балансування. Побудована модель активного балансування двох літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год в MATLAB/Simulink. Моделювання проведено у двох режимах роботи: без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом. Результати моделювання свідчать, що використання зовнішнього джерела електричної енергії знижує час балансування приблизно у 2 рази та при цьому значно підвищує стан заряду акумуляторів. Таке дослідження сприяє екологічній стійкості транспортних засобів.

Ключові слова: літій-іонний акумулятор, балансування, джерело електричної енергії, електромобіль, ємність, моделювання, напруга, стан заряду

Вступ

З розвитком електромобілів технологія літій-іонних акумуляторів стала вирішальною з точки зору високої питомої енергії та питомої потужності. Літій-іонна акумуляторна батарея складається з елементів, з'єднаних послідовно та паралельно, щоб відповідати вимогам до напруги та потужності електропривода. Під час виробництва та експлуатації кожний акумулятор у батареї може мати неоднакову напругу та стан заряду SOC (англ. State of Charge, SOC). Стан заряду SOC всієї акумуляторної батареї електромобіля відображає залишок заряду та визначає запас ходу.

Літій-іонні акумулятори дуже чутливі до глибокого розряду або перезаряду, і їх впровадження в електромобілях породжує необхідність моніторингу параметрів стану акумуляторних батарей та належного механізму балансування, яке має вирішальне значення при експлуатації. При проектуванні систем управління акумуляторними батареями BMS (англ.

Battery Management System, BMS) для електромобілів моніторинг та точні прогнози стану заряду SOC є важливою проблемою.

Методи керування акумуляторними батареями та балансування елементів мають вирішальне значення для забезпечення високої ефективності, довговічності та надійності електромобілів. Контролюючи напругу, температуру та стан заряду кожного елемента, система управління акумуляторами BMS допомагає уникнути перезарядження та глибокого розрядження, що може призвести до проблем безпеки та скорочення терміну служби акумуляторної батареї.

Оптимальне керування та балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів гарантує, що кожен елемент отримує оптимальну кількість енергії, що максимізує ефективно та безпечно використання електричної енергії. Без належного балансування елементів акумуляторної батареї електромобілів може виникнути серйозна загроза безпеці, наприклад надмірне зарядження та глибоке розрядження акумуляторів. Балансування літій-

іонних акумуляторних батарей електромобілів стає важливим для кращого та ефективнішого використання електромобілів.

Враховуючи значний внесок балансування елементів у систему керування батареями BMS проведено дослідження надає детальний огляд методів балансування акумуляторів та демонструє приклад балансування на основі побудованої моделі активного балансування літій-іонних батарей в MATLAB/Simulink. Моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей демонструють покращену ефективність управління станом заряду SOC та напругою. Таке дослідження має вирішальне значення для підвищення ефективності електромобілів та сприяння екологічній стійкості.

Аналіз публікацій

У дослідженні [1] розроблено чотири двонаправлені понижувально-підвищувальні перетворювачі постійного струму. Балансування базується на стані заряду(SO) і сприяє ефективному розподілу енергії під час розряду батарей, а також коректному розподілу зарядного струму під час процесу заряджання.

У роботі [2] проведено аналіз інтелектуальних стратегій керування і методів балансування акумуляторів, що застосовуються в системах керування батареєю BMS електромобілів. Виділено інтелектуальні алгоритми оцінювання SOC акумуляторів, детально розглянуто їхні типи, функції, точність роботи, основні переваги та недоліки. Окрім цього, запропоновано конкретні рекомендації для вдосконалення BMS у майбутньому.

У статті [3] наведено огляд різних типів схем балансування акумуляторів на основі перетворювачів постійного струму. Проведено порівняння чотирьох схем балансування акумуляторів, а також розглянуто характеристики акумуляторних технологій, моделювання батарей, оцінку SOC і оптимізацію ефективності BMS в електромобілях. У матеріалі висвітлені проблеми, пов'язані з роботою BMS і балансуванням літій-іонних батарей, визначені потенційні шляхи для вдосконалення технологій і сформульовані рекомендації для розробки високоєфективних електромобілів у майбутньому.

У дослідженні [4] запропоновано підхід глибокого навчання для розв'язання проблеми дисбалансу акумуляторів в електромобілях. Ефективність запропонованої методики була підтверджена шляхом використання

MATLAB/Simulink для моделювання, навчання та тестування створених моделей, що також сприяло підвищенню ефективності роботи батарей.

У публікації [5] розроблено метод оцінки та прогнозування невідповідностей у літій-іонних акумуляторах електромобілів, який ґрунтується на реальних експлуатаційних даних. Стаття [6] пропонує гібридну методику з використанням ПІД-контролера для балансування напруги активних елементів акумуляторів електротранспорту.

У дослідженні [7] описано методику точного прогнозування стану працездатності акумуляторів електромобілів за допомогою моделей машинного навчання, що відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та підвищенні довіри споживачів.

У роботі [8] була запропонована схема балансування напруги, заснована на LC-перетворювачі, яка характеризується високою стабільністю та ефективністю, що робить її перспективною для впровадження в системи управління акумуляторних батарей електромобілів.

Стаття [9] представляє огляд ключових компонентів сучасних систем управління батареями BMS, таких як двонаправлене заряджання і розрядження, захист від перевищення постійного струму та напруги, а також методи балансування елементів літій-іонних акумуляторів.

У дослідженні [10] було розроблено нову активну стратегію балансування, яка враховує температурні показники для вдосконалення процесів управління літій-іонними акумуляторними батареями.

Робота [11] пропонує інтелектуальний підхід до активного балансування елементів акумуляторної батареї електромобіля, демонструючи використання алгоритмів машинного навчання для забезпечення оптимізації системи управління енергоспоживанням та працездатності BMS.

У роботі [12] проаналізовано різні аспекти систем управління акумуляторами BMS, включаючи архітектуру, функціональність, вимоги, топології, методи моделювання акумуляторів, різновиди моделей, а також завдання та виклики, що постають перед цими системами. Докладно висвітлено особливості BMS, проведено порівняння моделей акумуляторів та визначена їх важливість для забезпечення ефективної роботи акумуляторної батареї в електромобілях. Дослідження надає

всеосяжний огляд актуальних проблем BMS і пропонує рекомендації для їх розв'язання. Особливу увагу приділено балансуванню елементів, яке є ключовим фактором для підвищення ефективності роботи акумулятора. У роботі детально розглянуто різні методи балансування, їхню ефективність та проведено порівняльний аналіз. Окрім цього, змодельовано процес балансування з використанням програмного забезпечення MATLAB/Simulink для восьмиелементного літій-іонного акумуляторного блоку. Результати аналізу демонструють перевагу активного балансування над пасивним у контексті оптимізації роботи електромобілів.

Стаття [13] присвячена аналізу проблем, труднощів і можливих рішень, пов'язаних із літій-іонними акумуляторами. Розглянуто аспекти системи управління акумуляторами BMS, яка включає моніторинг напруги та струму, оцінку рівня заряду і розряду, функції захисту й вирівнювання, регулювання температури, а також управління й зберігання даних про акумулятори. Окрім цього, у дослідженні детально описано різні типи схем балансування елементів, їх складові, надійність роботи, втрати енергії, ефективність, габарити та вартість, а також висвітлено їх сильні та слабкі сторони. Додатково акцентовано увагу на проблемах і викликах у роботі систем управління акумуляторами. У статті також визначено ключові питання та завдання, які потребують подальшого опрацювання для створення оптимальних і надійних систем управління акумуляторами, орієнтованих на електромобілі та зберігання енергії з відновлюваних джерел.

Стаття [14] спрямована на розробку системи управління акумуляторами BMS, яка забезпечує моніторинг та контроль таких ключових параметрів, як температура, стан заряду SOC і стан справності (англ. State of Health, SOH). Це спрямовано на підвищення ефективності використання акумуляторних батарей. У рамках дослідження представлено активну систему балансування енергії для літій-іонного блоку акумуляторних батарей, яка базується на методах онлайн-оцінки SOC і SOH. Для визначення залишкової ємності акумулятора використовується процедура вимірювання напруги на клеммах кожного елемента. Система балансування активується у випадках, коли відхилення SOC окремого елемента від середнього значення перевищує або не до-

сягає заданого порогу, що дозволяє мінімізувати коливання вихідної напруги. Результати моделювання демонструють, що запропонована BMS здатна з високою точністю синхронізувати SOC і ефективно знижувати пульсації вихідної напруги.

Стаття [15] пропонує детальний аналіз різних типів схем балансування елементів на основі DC/DC перетворювачів постійного струму. Особлива увага приділяється порівнянню чотирьох схем балансування (ізолюваних та неізолюваних) на базі перетворювачів постійного струму, включаючи шунтувальну схему, яка враховує час балансування як у процесі заряджання, так і розряджання. Крім того, цей огляд охоплює глибокий аналіз сучасних акумуляторних технологій, методів моделювання акумуляторів, оцінки стану заряду SOC і оптимізації ефективності систем управління батареями BMS в електромобілях. Основна мета дослідження полягає у висвітленні характеристик, переваг і недоліків таких технологій, а також у розгляді викликів і перспектив для розвитку електромобільності. У завершальній частині статті обговорюються основні проблеми, пов'язані з BMS та балансуванням елементів акумуляторів, визначаються потенційні напрями вдосконалення і запропоновані рекомендації для поглиблення знань у створенні високоефективних електромобілів.

У статті [16] запропоновано автоматичний еквалайзер на основі комутованих конденсаторів, призначений для балансування елементів акумуляторних батарей. Для кожного елемента системи використовується лише два перемикачі та один конденсатор. Управління всіма MOSFET-транзисторами здійснюється за допомогою однієї пари комплементарних сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Енергія автоматично та безпосередньо передається від елементів із вищою напругою до тих, що мають нижчу напругу, без використання додаткових схем моніторингу. Це забезпечує високу ефективність і швидке балансування, незалежне від кількості елементів або початкової напруги кожного з них. Розроблений прототип для чотирьох літій-іонних акумуляторів підтвердив ефективність запропонованого підходу. Експериментальні дані демонструють значне поліпшення процесу балансування, а піковий ККД досягає 92,7%.

У роботі [17] аналізуються різноманітні

методи активного балансування з метою подовження терміну служби акумуляторної батареї. Балансувальна методика на основі індуктивності для системи акумуляторів напругою 60 В була реалізована в середовищі MATLAB/Simscape, а отримані результати представлені та обговорені.

Мета та постановка задачі

Метою роботи є проведення моделювання активного балансування елементів літій-іонних акумуляторів. Активне балансування підвищує безпеку, довговічність та ефективність акумуляторних батарей електромобілів.

Методологія дослідження заснована на використанні інтерактивного інструменту (програмного забезпечення) для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем MATLAB/Simulink.

Для досягнення мети проведені наступні дослідження:

- проведено обґрунтування необхідності балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів та визначені види балансування;
- побудована модель активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів в MATLAB/Simulink без зовнішнього джерела електричної енергії та проведено математичне моделювання;
- побудована модель активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів в MATLAB/Simulink із зовнішнім джерелом електричної енергії та проведено математичне моделювання;
- визначені висновки та рекомендації.

Обґрунтування необхідності балансування акумуляторних батарей

Аналіз публікацій [1-17] свідчить, що для підвищення безпеки, довговічності та ефективності літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів необхідно підтримувати однаковий рівень заряду всіх елементів. Це відбувається за допомогою їх балансування. Балансування літій-іонних акумуляторних батарей можна розділити на дві категорії: активне та пасивне.

Елементи акумуляторної батареї електромобілів мають допуски щодо їх ємності та внутрішнього опору. Під час циклів заряд/розряд різниця зарядів може накопичуватися між елементами, розташованими послідовно. Якщо розряджений акумулятор має меншу

ємність, він заряджатиметься швидше порівняно з іншими елементами. Таким чином, система керування акумуляторними батареями BMS зупиняє заряд таких елементів, інакше вони будуть перезаряджені, що може привести до збільшення температури та посиленої деградації всієї акумуляторної батареї електромобіля. При розряді, акумулятори, що мають меншу ємність, розряджаються швидше, ризикуючи тим, що критично знижується їх напруга та ємність, збільшується деградація.

Балансування акумуляторної батареї використовується для усунення розбіжності параметрів між всіма елементами шляхом узгодження їхніх характеристик. Дослідження [12, 13] підтверджують, що активне балансування є більш ефективним, ніж пасивне балансування для літій-іонних акумуляторних батарей, що призводить до кращої енергоефективності та довшого терміну служби акумуляторної батареї в електромобілі.

Таким чином доведено та обґрунтовано, що балансування акумуляторної батареї електромобіля – це обов'язковий та критичний процес для довгострокової ефективності та надійності електромобіля. Він забезпечує рівномірний рівень заряду всіх акумуляторів, що допомагає підтримувати максимальну ємність, підвищує рівень безпеки, пролонгує термін служби батареї та оптимізує її ефективність.

Види балансування акумуляторних батарей

Збалансована акумуляторна батарея – це стан, в якому кожний елемент працює максимально рівномірно з точки зору своїх робочих параметрів. Будь-які відхилення можуть призвести до проблем, включаючи:

- зменшення безпеки. Елементи, які працюють менш ефективно, можуть швидше розряджатися, перезаряджатися та перегріватися, що може поставити під загрозу безпеку акумуляторної батареї та всього електромобіля і призвести до потенційних інцидентів;
- зменшення ємності та терміну служби акумуляторної батареї. Неефективні елементи можуть стати вузькими місцями в акумуляторних батареях, обмежуючи загальну ємність і термін служби;
- зниження ефективності акумуляторної батареї. Елементи, які працюють нестабільно, можуть знизити ефективність батареї,

збільшити внутрішній опір і зменшити вихідну потужність.

Балансування акумуляторної батареї використовується для усунення розбалансування між всіма елементами шляхом узгодження їх характеристик.

Види балансування акумуляторних батарей розділяють на:

- пасивне балансування;
- активне балансування.

Ілюстрація різних видів балансування в порівнянні зі станом заряду акумуляторної батареї без балансування наведено на рис. 1 [11].

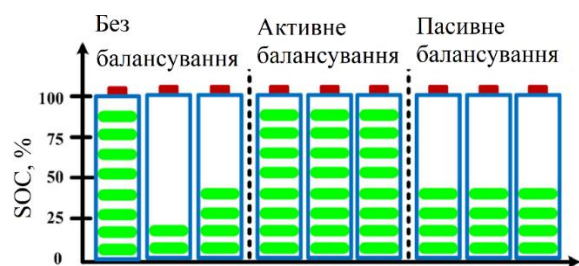


Рис. 1. Стан заряду акумулятора: без балансування, з активним балансуванням та пасивним балансуванням [11].

Пасивне балансування акумуляторних батарей здійснюється шляхом паралельного підключення шунтуючих резисторів до елементів із підвищеним рівнем заряду SOC і є найбільш поширеним методом балансування, який застосовується сьогодні завдяки його низькій вартості, компактному розміру та простоті алгоритмів управління. Проте основними недоліками пасивного балансування є низька енергетична ефективність та додатковий вплив на системи терморегулювання акумуляторної батареї.

На відміну від цього, активне балансування забезпечує можливість перерозподілу заряду між елементами, що сприяє підвищенню загальної ефективності силової установки електромобіля. Ця технологія, яка впроваджується у систему управління акумуляторами BMS, дозволяє підтримувати рівномірний рівень SOC для всіх елементів батареї, що позитивно впливає на її ефективність, безпеку та тривалість експлуатації. Активний підхід передбачає передачу енергії від акумуляторів із вищим рівнем заряду до тих, у яких SOC є нижчим. Ключовими параметрами, які враховуються під час активного балансування, є стан заряду SOC, напруга, струм, температура та ємність акумуляторів.

Пасивне балансування акумуляторних батарей споживає надлишок заряду через розрядні резистори, гарантуючи, що всі елементи батареї будуть мати приблизно еквівалентний стан заряду SOC. Приклад стратегії пасивного балансування акумуляторів (C1 – C4) наведено на рис. 2 [18]. Оскільки струм розряду акумуляторів (C1 – C4) протікає тільки через відкритий транзистор (стан ON), то тільки акумулятор C1 буде розряджати надлишок енергії та розсіювати її через резистор R.

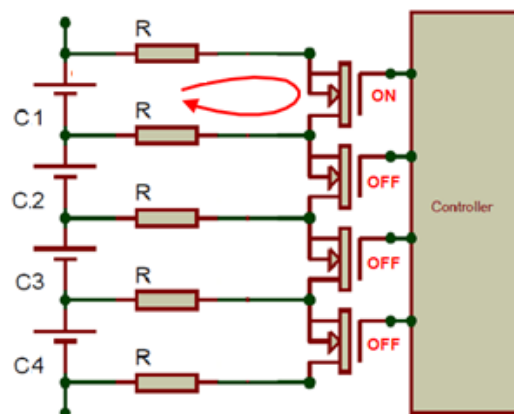


Рис. 2. Приклад стратегії пасивного балансування [18].

Активне балансування є більш складною технікою балансування. Оскільки заряд в елементах батареї перерозподіляється під час циклів заряджання та розряджання, загальний доступний заряд батареї також збільшується, таким чином збільшується дальність пробігу електромобіля. Порівняно з пасивним балансуванням, активне балансування може скоротити час заряджання та зменшити тепло, що виділяється під час балансування. Як правило, будь-яке балансування, досягнуте шляхом передачі енергії, називається активним балансуванням.

Активне балансування потребує щонайменше двохразового перетворення енергії для передачі від елементів з високим станом заряду SOC до елементів з низьким станом заряду SOC через компоненти накопичення енергії. В залежності від компонентів, які використовуються в схемах, активне балансування можна розділити на три основні групи: на основі конденсаторів, на основі індуктивності, на основі перетворювачів.

Активне балансування, яке базується на використанні конденсаторів, передбачає застосування конденсаторів у ролі енергетичних накопичувачів. Вони підключаються па-

ралельно до акумуляторів, що наочно ілюструється на рис. 3 [19].

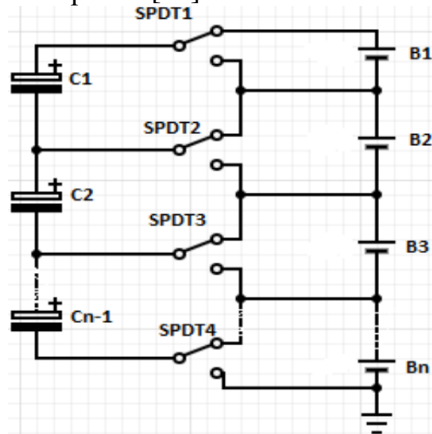


Рис. 3. Схема активного балансування на основі конденсаторів [19].

Активне балансування, яке базується на принципі індуктивності, передбачає використання котушок як елементів для зберігання енергії. У схемі, зображеній на рис. 4, застосовується енергія магнітно-зв'язаних котушок.

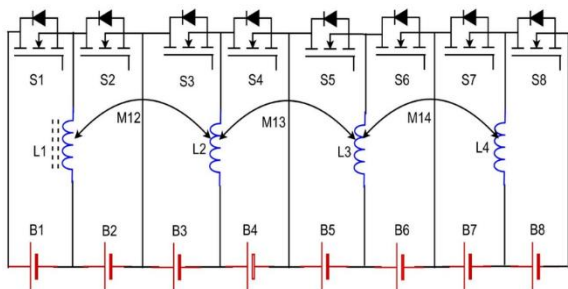


Рис. 4. Схема активного балансування на основі магнітно-зв'язаних котушок [20].

Активне балансування на основі перетворювача має високу гнучкість керування процесом балансування, але зазвичай є більш складним і дорогим. Розрізняють різні категорії активного балансування на основі перетворювачів: балансування підвищувального перетворювача, балансування одиночного перетворювача, балансування Сук-перетворювача, балансування квазірезонансного перетворювача, балансування перетворювача зі зворотним зв'язком тощо.

Схема електрична принципова балансування одиночного резонансного перетворювача наведена на рис. 5 [20].

Принцип дії резонансного перетворювача полягає в тому, щоб накопичувати енергію в резонансному колі LC від самого зарядженого акумуляторного елемента, який підключений

до обох сторін окремих елементів батареї через шини (dc1 і dc2) і перемикачі MOSFET ($S_1, S_2, \dots, S_n$), як показано на рис. 5.

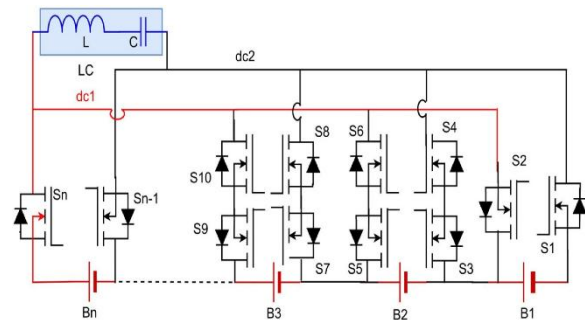


Рис. 5. Схема активного балансування на основі резонансного одиночного перетворювача [20].

Для кожного акумулятора передбачена окрема мікросхема моніторингу напруги всіх елементів, з'єднаних послідовно, які передають дані на систему керування BMS для проведення процедури активного балансування акумуляторів. Для вмикання використовуються додаткові сигнали ШІМ MOSFET вмикається або вимикається під час балансування.

Моделювання активного балансування акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії

Нами побудована модель активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей в Matlab/Simulink без зовнішнього джерела електричної енергії. У моделі використано генератор ШІМ сигналів з частотою 50 Гц, з паралельно з'єднаними конденсаторами, також використані перемикачі та діоди.

У запропонованій системі балансування акумуляторних батарей спочатку визначаються стан заряду, повні напруги і струми всіх елементів акумуляторної батареї. Потім оцінюється стан заряду SOC кожного акумулятора за допомогою методу інтеграції для обчислення середнього значення SOC, таким чином оцінюючи дисбаланс акумуляторів. Якщо виявлено дисбаланс, для кожного елемента проводяться процедури балансування зарядки і розрядки на основі різниці між станом заряду SOC елемента і середнім значенням SOC всіх акумуляторів.

Для активного балансування літій-іонних акумуляторів електромобілів використовуються різні стратегії балансування. Під час заряджання акумуляторів з станом заряду SOC,

вищим за середній SOC, балансуються за допомогою стратегії розряджання, тоді як під час заряджання акумулятора з станом заряду SOC, нижчим за середній SOC, балансуються за допомогою стратегії заряджання.

На рис. 6 наведена модель активного балансування літій-іонних акумуляторів, що побудована в MATLAB/Simulink. Основною метою запропонованої моделі балансування без зовнішнього джерела електричної енергії є вирівнювання стану заряду SOC між усіма

елементами акумуляторної батареї з використанням конденсаторного перемикавання.

В моделі активного балансування акумуляторів з використанням конденсаторного перемикавання, що побудована в MATLAB/Simulink, використано два літій-іонних акумулятора номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год. Процес моделювання проводилося протягом 40 с з частотою дискретизації 10^{-5} с.

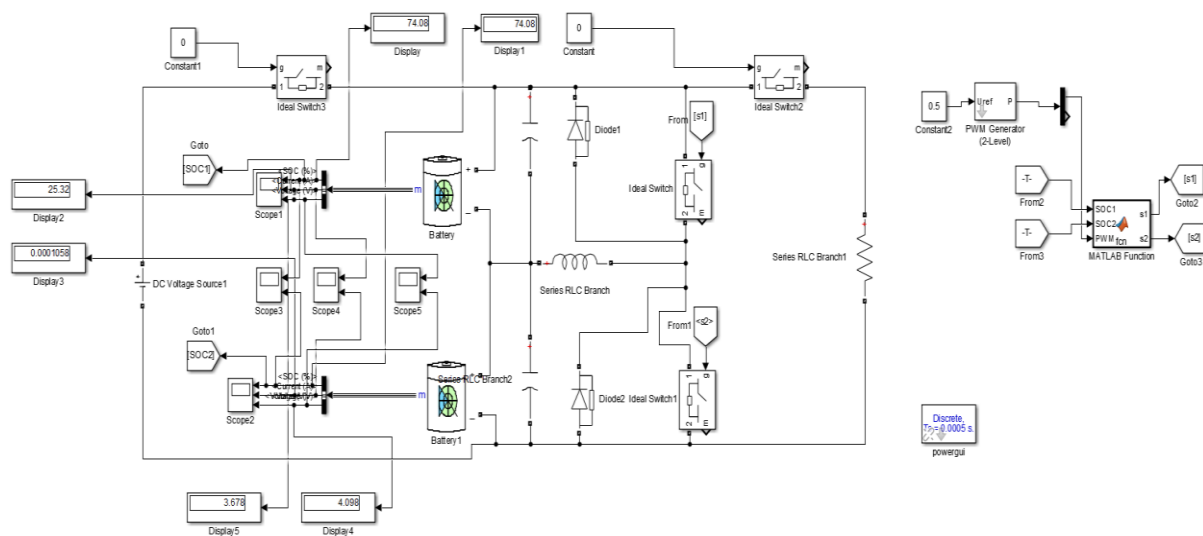


Рис. 6. Модель активного балансування літій-іонних акумуляторів в MATLAB/Simulink]

Моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторів без зовнішнього джерела в MATLAB/Simulink полягає у наступному. Для вирівнювання стану заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї розраховується середнє значення SOC на основі початкових значень SOC кожного елемента.

Згодом усереднене значення SOC застосовується блоком управління для регулювання процесів зарядки або розрядки кожного акумулятора, забезпечуючи оптимальний баланс роботи акумуляторної батареї. У процесі розрядки окремі елементи батареї можуть мати різний рівень заряду, що зумовлено такими чинниками, як особливості виробництва, наявність домішок у матеріалах, температурні коливання та відмінності в початковому стані заряду акумуляторів.

Акумуляторна батарея, застосована у моделюванні, включає два літій-іонні елементи, кожен із яких характеризується різним почат-

ковим рівнем заряду SOC, як наведено в Таблиці 1.

На рис. 7 наведені результати моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей в Matlab/Simulink без зовнішнього джерела електричної енергії, а саме: фрагмент графіку зміни станів заряду двох акумуляторів SOC1 та SOC2, які вирівнюється приблизно через 24 с, фрагменти зміни струмів (Струм 1, Струм 2) та напруги (Напруга 1, Напруга 2) в період від 23,2 с до 24,4 с.

Таблиця 1 – Початкові та кінцеві рівні заряду SOC двох акумуляторів, що використовуються при моделюванні балансування без залучення зовнішнього джерела електричної енергії

Акумулятор	Початковий SOC	Кінцевий SOC
Акумулятор 1	90 %	74,08 %
Акумулятор 2	68 %	74,08 %

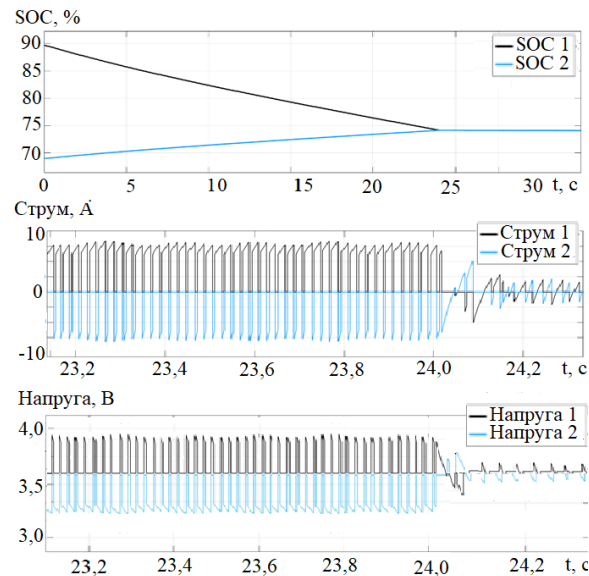


Рис. 7. Результати моделювання активного балансування двох акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії

Моделювання активного балансування акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії

В моделі активного балансування літій-іонних акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії, що приблизно аналогічна моделі, що наведена на рис. 6, також використано два літій-іонних акумулятора номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год. Моделювання проводилося протягом 40 с з частотою дискретизації 10^{-5} с.

Основною метою запропонованої системи балансування є не тільки вирівнювання стану заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї, але й зарядження акумуляторних батарей з одночасним вирівнюванням станів їх заряду.

Моделювання проводиться у два етапи:

- на першому етапі для вирівнювання стану заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї розраховується середнє значення SOC на основі початкових значень SOC кожного елемента. Згодом це середнє значення SOC використовується блоком управління для визначення зарядки або розрядки кожного акумулятора, забезпечуючи збалансовану роботу акумуляторної батареї;

- на другому етапі стан заряду SOC між усіма елементами акумуляторної батареї вирівнюється та починається паралельний заряд акумуляторів.

Початкові стани заряду SOC та SOC сходження при моделюванні балансування двох

акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2. Початкові рівні заряду SOC та SOC сходження двох акумуляторів, що використовуються при моделюванні балансування із зовнішнім джерелом електричної енергії

Акумулятор	Початковий SOC	SOC сходження
Акумулятор 1	90 %	86,2 %
Акумулятор 2	68 %	86,2 %

На рис. 8 наведені результати моделювання активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей в Matlab/Simulink із зовнішнім джерелом електричної енергії, а саме: фрагмент графіку зміни станів заряду двох акумуляторів SOC1 та SOC2, які вирівнюються приблизно через 24 с, фрагменти зміни струмів (Струм 1, Струм 2) та напруги (Напруга 1, Напруга 2) в період від 12,3 с до 14,4 с.

Таким чином, в результаті дослідження проведено теоретичне обґрунтування необхідності активного балансування літій-іонних акумуляторних батарей електромобілів. Побудовано модель активного балансування з використанням перемикаючого конденсатора для двох літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год протягом 40 с в MATLAB/Simulink у двох варіантах роботи: без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом.

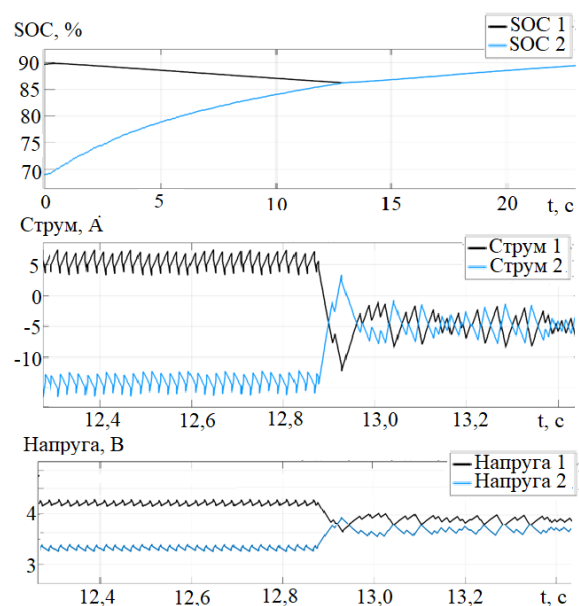


Рис. 8. Результати моделювання активного балансування двох акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії.

У першому варіанті моделі моделювання відбувається без зовнішнього джерела. В результаті моделювання продемонстрована робота балансування літій-іонних акумуляторів з початковими станами заряду у 90 % та 68 %. Через 24 с стан заряду акумуляторів вирівнявся на значенні $SOC=74.08\%$ і в подальшому не змінив свого значення.

У другому варіанті моделі за допомогою констант було додано зовнішнє джерело електричної енергії для заряду акумуляторів. Результати моделювання свідчать, що на першому етапі моделювання, який триває приблизно 12,9 с стан заряду акумуляторів $SOC\ 1$, $SOC\ 2$ на величині 86,2 %. На другому етапі моделювання стан заряду SOC акумуляторів поступово підвищується з однаковою швидкістю. Через 40 с моделювання стан заряду цих акумуляторів досягає 93,84 %.

Висновки

Балансування акумуляторної батареї електроавтомобіля – це обов'язковий та критичний процес, який відбувається для підвищення безпеки, довговічності та довгострокової ефективності. Він забезпечує рівномірний рівень заряду всіх акумуляторів, що дозволяє підвищити безпеку, продовжити термін служби батареї та покращити її ефективність.

Побудовано модель активного балансування з використанням перемикаючого конденсатора для двох літій-іонних акумуляторів з номінальною напругою 3,7 В і номінальною ємністю 5,4 А·год в MATLAB/Simulink у двох режимах роботи: без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом.

Результати моделювання активного балансування двох літій-іонних акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії демонструють, що, під час балансування акумуляторів з початковими станами заряду $SOC1=90\%$ та $SOC2=68\%$, вирівнювання їх стану заряду відбувається через 24 с моделювання на рівні $SOC1=SOC2=74.08\%$ і в подальшому не змінює свого значення.

Результати моделювання активного балансування двох літій-іонних акумуляторів із зовнішнім джерелом електричної енергії демонструють, що, під час балансування акумуляторів з початковими станами заряду $SOC1=90\%$ та $SOC2=68\%$, вирівнювання їх стану заряду відбувається приблизно через 12,9 с моделювання на рівні $SOC1=SOC2=86,2\%$. Після цього стан заряду обох акумуляторів продовжує

жує однаково підвищуватись. Після 40 с моделювання стан заряду двох акумуляторів дорівнював $SOC1=SOC2=93.84\%$.

Порівняння результатів моделювання активного балансування двох літій-іонних акумуляторів без зовнішнього джерела електричної енергії та із зовнішнім джерелом електричної енергії демонструє, що при використанні зовнішнього джерела електричної енергії час балансування акумуляторів знижується практично у 2 рази (з 24 с до 12,9 с), при цьому акумулятори мають значно більший SOC сходження ($SOC1=SOC2=86,2\%$ замість $SOC1=SOC2=74.08\%$).

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо публікації цієї статті.

Література

1. Luo, Y.-F., Chen, G.-J., Liu, C.-L., Chen, Y.-S., & Hsieh, H.-S. (2025). An active bidirectional balancer with power distribution control strategy based on state of charge for Lithium-ion battery pack. *Applied Energy*, 377, 124661. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124661>
2. Singh, A. K., Kumar, K., Choudhury, U., Yadav, A. K., Ahmad, A., & Surender, K. (2024). Applications of Artificial Intelligence and Cell Balancing Techniques for Battery Management System (BMS) in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.09.105>
3. Khan, N., Ooi, C. A., Alturki, A., Amir, M., Shreath & Alharbi, T. (2024). A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, 11, 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.041>
4. Arandhakar, S., & Nakka, J. (2025). Deep Learning-Driven Robust Model Predictive Control Based Active Cell Equalisation for Electric Vehicle Battery Management System. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 101694. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101694>
5. Wang, S., Wang, Y., & Soo, Y.-Y. (2025). Evaluation and prediction of lithium-ion battery pack inconsistency in electric vehicles based on actual operating data. *Energy*, 319, 134879. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134879>
6. Divya, T., Umayal C & Vasan Prabhu, V. (2024). A hybrid GTOA-DRN approach based active cell voltage balancing of electric vehicle batteries using PID controller. *Journal of Energy Storage*, 98, 113095.

- <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113095>
7. Yang, C., Ye, Z., Xiong, X., Su, C., & Xie, M. (2024). Improving electric vehicles sustainability: Accurate forecasting of lithium-ion battery health using machine learning models. *Journal of Energy Storage*, 103, 114280. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114280>
 8. Habib, A. K. M. A., & Hasan, M. K. (2023). Lithium-ion battery state-of-charge balancing circuit using single resonant converter for electric vehicle applications. *Journal of Energy Storage*, 61, 106727. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106727>
 9. K, K., & P, P. (2024). Analysis of cell balancing of Li-ion batteries with dissipative and non-dissipative systems for electric vehicle applications. *Energy Reports*, 12, 2408–2428. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.08.023>
 10. Yue, S., Xia, B., Liang, C., Zhang, F., Qu, L., & Huang, X. (2025). Temperature-considered active balancing strategy for lithium-ion battery packs with surrogate optimization algorithm. *Journal of Energy Storage*, 108, 115073. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115073>
 11. Rao, V. S., Sajja, G. S., Manur, V. B., Arandhakar, S., & Krishna, V. B. M. (2025). An exploratory Study on Intelligent Active Cell Balancing of Electric Vehicle Battery Management and Performance Using Machine Learning Algorithms. *Results in Engineering*, 104524. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104524>
 12. Uzair, M., Abbas, G., & Hosain, S. (2021). Characteristics of Battery Management Systems of Electric Vehicles with Consideration of the Active and Passive Cell Balancing Process. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3), 120. <https://doi.org/10.3390/wevj12030120>
 13. Habib, A. K. M. A., Hasan, M. K., Issa, G. F., Singh, D., Islam, S., & Ghazal, T. M. (2023). Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations. *Batteries*, 9(3), 152. <https://doi.org/10.3390/batteries9030152>
 14. Ren, H., Zhao, Y., Chen, S., & Wang, T. (2019). Design and implementation of a battery management system with active charge balance based on the SOC and SOH online estimation. *Energy*, 166, 908–917. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.133>
 15. Khan, N., Ooi, C. A., Alturki, A., Amir, M., Shreasth & Alharbi, T. (2024). A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, 11, 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.041>
 16. Shang, Y., Xia, B., Lu, F., Zhang, C., Cui, N., & Mi, C. C. (2017). A Switched-Coupling-Capacitor Equalizer for Series-Connected Battery Strings. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(10), 7694–7706. <https://doi.org/10.1109/tpe.2016.2638318>
 17. Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11(2), 571. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579>
 18. EV Battery Testing Parameters & Battery Management System. – E-Mobility Institute. (2022). E-Mobility Institute – Hardware Enabled E-Mobility Upskilling Platform. <https://courses.divyaguru.org/battery/ev-battery-testing-parameters-battery-management-system/>
 19. Duraisamy, T., & Kaliyaperumal, D. (2020). Active cell balancing for electric vehicle battery management system. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11(2), 571. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i2.pp571-579>
 20. Ashraf, A., Ali, B., Alsunjury, M. S. A., Goren, H., Kilicoglu, H., Hardan, F., & Tricoli, P. (2024). Review of Cell-Balancing Schemes for Electric Vehicle Battery Management Systems. *Energies*, 17(6), 1271. <https://doi.org/10.3390/en17061271>
- Смирнов Олег¹**, д.т.н., професор кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: smirnov1oleg@gmail.com,
+38 068 609 94 58,
ORCID: 0000-0003-4881-9042
- Борисенко Анна¹**, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки,
e-mail: anutochka2111@gmail.com,
тел. +38 096 110 69 49,
ORCID: 0000-0001-5992-8274
- Іноземцев Дмитро¹**, студент групи АЕ-51-25,
e-mail: inozema03@gmail.com, +380 98 112 42 94
ORCID: 0009-0000-3067-2607
- ¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.
- Modeling active cell balancing of lithium-ion batteries in MATLAB/Simulink**
Abstract. Problem. The article investigates active balancing of lithium-ion battery cells for electric vehicles. Active balancing is crucial for achieving high efficiency, durability and reliability of traction batteries. By monitoring the state of charge (SOC), voltage and temperature of each cell, the battery management system (BMS) prevents overcharge and deep discharge, which cause ageing and safety risks. Optimal control and balancing ensure that each cell receives the required energy, thus maximizing the efficient and safe use of the battery pack. Considering the significant role of cell balancing in BMS operation, the study provides a brief overview of balancing methods and focuses on an example of

active balancing based on a MATLAB/Simulink model. **Goal.** The goal is to simulate active balancing of lithium-ion battery cells and to evaluate its influence on safety, durability and efficiency of electric vehicle batteries. **Methodology.** The research uses MATLAB/Simulink as an interactive environment for modelling, simulation and analysis of dynamic systems. An active balancing model with a switched capacitor for two lithium-ion batteries with a nominal voltage of 3.7 V and a nominal capacity of 5.4 A·h is developed in two operating modes: without an external energy source and with an external source.

Results. Simulation of active balancing of two batteries without an external source shows that, for initial states of charge SOC1 = 90 % and SOC2 = 68 %, SOC equalisation occurs after 24 s at SOC1 = SOC2 = 74.08 % and then remains constant. When an external energy source is used, equalisation is achieved after about 12.9 s at SOC1 = SOC2 = 86.2 %. Afterwards, both batteries charge equally and after 40 s reach SOC1 = SOC2 = 93.84 %. Comparisons show that the external source reduces the balancing time by almost half and provides significantly higher SOC convergence. **Practical value.** Battery balancing is a necessary and critical process for improving

safety, durability and long-term performance of electric vehicles. It ensures uniform charging of all cells, increases safety, extends battery life and improves overall vehicle efficiency, contributing to environmental sustainability.

Key words: lithium-ion battery, balancing, electric power source, electric vehicle, capacity, modeling, voltage, state of charge

Smyrnov Oleh¹, professor, Doct. of Science, Vehicle Electronics Department, tel. +38 068-60-99-458, smirnov1oleg@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4881-9042

Borysenko Anna¹, Ph.D., Assoc. Prof., Vehicle Electronics Department, tel. +38 096-11-06-949, anutochka2111@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5992-8274

Inozemtsev Dmytro¹, student of the group AE-51-25, tel. +380 98 112 42 94, inozema03@gmail.com ORCID: 0009-0000-3067-2607

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine