

Дмитро ЛІПКО, Арсеній НАЙДЬОНОВ, Юлія КОЖУШКО,
Юлія БОНДАРЕНКО, Павло САФРОНОВ, Олександр БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АКТИВНОГО БАЛАНСУВАННЯ В БАГАТОМОДУЛЬНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЯХ

Досліджено вплив дисбалансу комірок на ефективність багатомодульних літій-іонних акумуляторних батарей. Дисбаланс призводить до суттєвого зниження корисної ємності батареї та запасу ходу електромобілів. Експеримент показав, що застосування активного балансира на модулі з комітками зі зниженим ресурсом дозволило зменшити максимальний дисбаланс з 220 до 45 мВ, що призвело до збільшення реального запасу ходу електромобіля на 56%. Результати підтверджують високу ефективність активного балансування як засобу відновлення корисної ємності та подовження життєвого циклу акумуляторних батарей в електротранспорті та системах накопичення енергії.

Ключові слова: акумуляторна батарея, система керування акумуляторною батареєю, активне балансування, дисбаланс, електромобіль, запас ходу, ресурс.

В сучасних акумуляторних батареях (АБ), зокрема в електромобілях, проблема дисбалансу рівнів заряду (англ. *state of charge*, SoC) між комітками батареї є одним із ключових факторів, що визначають ефективність, надійність та довговічність системи. Дисбаланс виникає внаслідок технологічної неоднорідності елементів, відмінностей у внутрішньому опорі, рівнях деградації (*state of health*, SoH) і температурних градієнтах, похибок вимірювальних каналів у системах керування, неоднакових умов охолодження [1], [2], [3], [4]. Такі відмінності призводять до зменшення корисної ємності АБ, підвищення теплових навантажень і нерівномірного розподілу струму під час заряджання та розряджання, що у підсумку знижує ефективність та термін служби батареї [5].

Особливої актуальності набувають дослідження методів балансування для батарей електромобілів, у яких високий рівень енергетичної щільності поєднується з жорсткими вимогами до безпеки та надійності [6]. У роботі [7] показано, що використання часткового зарядно-розрядного циклу дозволяє збільшити ресурс акумуляторної батареї завдяки обмеженню рівнів заряду комірок. Дослідження [7], [8] також засвідчили, що навіть незначний дисбаланс напруги у багатомодульній батареї може спричиняти передчасну деградацію окремих елементів.

Значна увага в сучасних публікаціях приділяється порівнянню пасивних і активних систем балансування [9]. Пасивні схеми є конструктивно простими та дешевими, однак характеризуються великими втратами енергії, низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД) та обмеженим струмом балансування [10]. Активні методи передбачають передачу енергії

між комітками та модулями за допомогою DC–DC–перетворювачів або індуктивно-ємнісних ланок, що дозволяє суттєво підвищити енергоефективність [11]. В роботах [12], [13] представлено активний балансір для багатомодульних батарей, який забезпечує керувану передачу енергії між комітками, а також проаналізовано його роботу в умовах реальної експлуатації в електротранспорті.

Попередні дослідження вказують на перспективність застосування активного балансування для підвищення однорідності стану заряду, зменшення теплових втрат і збільшення строку служби акумуляторних систем [14], [15]. Разом з тим, такі системи потребують ускладнених алгоритмів керування, гальванічної розв'язки між ланками перетворення енергії та точних вимірювальних засобів, що впливає на собівартість і загальну надійність системи [15].

Метою цієї роботи є експериментальна перевірка ефективності активного балансування в багатомодульних акумуляторних батареях, визначення його впливу на рівень дисбалансу та показники енергоефективності, а також формування практичних рекомендацій щодо застосування активних балансірів у системах електротранспорту.

Огляд систем балансування

Для розуміння масштабу проблеми балансування в потужних системах, що живляться від акумуляторних батарей, необхідно мати уяву про їхню структуру. Сучасні тягові батареї електромобілів та системи накопичення енергії мають ієрархічну архітектуру [16]. Базовим елементом є комірка — окремий акумулятор. Комірки з'єднуються послідовно та паралельно

для досягнення необхідної напруги та ємності, формуючи модуль. Далі модулі з'єднуються між собою, утворюючи пакет. Така багатомодульна архітектура означає, що дисбаланси можуть виникати одночасно на двох рівнях: внутрішньомодульному (між комітками всередині одного модуля) та міжмодульному (між окремими модулями в пакеті) [17]. Зі збільшенням кількості коміток у послідовному з'єднанні проблема дисбалансу зростає, тому для багатомодульних батарей балансування стає обов'язковим етапом керування.

Пасивні системи балансування працюють за принципом розсіювання надлишкової енергії через резистивні елементи, перетворюючи надлишковий заряд коміток з вищою напругою у тепло [18]. Їхньою основною перевагою є простота реалізації, низька вартість та висока надійність завдяки мінімальній кількості компонентів. Водночас головними недоліками є значні енергетичні втрати, локальне нагрівання коміток і тривалий час балансування, що робить такі схеми доцільними лише для систем із малими ємностями або низькими вимогами до ефективності.

Активне балансування базується на обміні енергією між комітками або модулями за допомогою перетворювальних ланок [19]. На відміну від пасивних, активні схеми дозволяють зменшити втрати енергії та підвищити ефективність використання акумуляторної батареї, досягаючи ККД у 80–97% [20]. За архітектурою активні системи класифікують відповідно до шляху передачі енергії: від комітки до комітки (Cell-to-Cell, C2C), від комітки до модуля (Cell-to-Module, C2M), від модуля до комітки (Module-to-Cell, M2C). При цьому C2C розділяється на два підтипи: до будь-якої комітки (Cell-to-Any-Cell, C2AC) та до сусідньої комітки (Cell-to-Neighbor-Cell, C2NC).

Аналіз схемотехнічних рішень дозволяє виділити три ключові підходи при реалізації активного балансування. Найпростішим з них є конденсаторне балансування (*switched-capacitor*), де заряд передається через конденсатори, що по чергову перемикаються [21]. Цей спосіб балансування є найменш енергоефективним і забезпечує ККД на рівні 80–90%. Індуктивне балансування (*flying-inductor*), за якого одна індуктивність по чергову під'єднується до різних коміток для перенесення енергії від більш заряджених до менш заряджених, забезпечує вищу ефективність (85–95%) та більші струми [22]. Схеми на основі DC–DC-перетворювачів, які можуть бути неізованими (*buck, boost*) або ізованими (*flyback, Ćuk*), забезпечують найвищий ККД (90–97%) та значні струми балансування, що дозволяє реалізувати топології C2M, M2C та C2C.

Критичним недоліком конденсаторних та індуктивних схем в контексті багатомодульних батарей є

можливість реалізації ними переважно тільки методу балансування C2NC. При значному дисбалансі в довгому послідовному з'єднанні акумуляторних елементів (наприклад, 96 і більше) енергії доведеться пройти десятки проміжних перемикачів, що каскадно знижує загальну швидкість та сумарну ефективність процесу. Натомість топології на базі DC–DC-перетворювачів, що реалізують принцип балансування C2AC, є значно ефективнішими. Вони дозволяють передавати енергію безпосередньо від найбільш заряджених коміток до найменш заряджених, що є ключовою перевагою для потужних тягових батарей електромобілів та стаціонарних систем накопичення енергії.

Огляд систем балансування демонструє, що активні методи пропонують ефективне розв'язання проблеми дисбалансу [23], яка є критичною для надійної та продуктивної роботи акумуляторних батарей, особливо у багатомодульних конфігураціях [24]. При цьому розвиток систем на базі DC–DC-перетворювачів можна розглядати як найперспективніший на сьогодні напрям для забезпечення довготривалої експлуатації багатомодульних акумуляторних батарей [25].

Опис експериментальної установки

Для перевірки ефективності активного балансування в багатомодульних акумуляторних батареях, визначення його впливу на рівень дисбалансу та показники енергоефективності було створено експериментальну установку на основі електромобіля Renault Fluence ZE 2012 року випуску, що мав акумуляторну батарею з низьким запасом ходу. Особливістю моделі є модульна конструкція батарейного відсіку, що спрощує доступ до окремих модулів АБ і їх заміну.

Заводська батарея була замінена на літій-іонну систему LG Chem конфігурації 96s6p (96 послідовно та 6 паралельно з'єднаних коміток), яка складається з 576 коміток, об'єднаних у 16 модулів конфігурації 12s3p. До неї було додано систему керування акумуляторною батареєю — BMS (*battery management system*), виконану за ієрархічною архітектурою. Вона містить п'ять модулів: один центральний контролер BMS (*BMS master unit*), до якого підключено чотири підпорядковані модулі моніторингу коміток (*BMS slave unit*), що контролюють батарейний стек з 24 послідовно з'єднаних коміток (24s) (рис. 1).

На першому етапі проводилася діагностика АБ. До діагностичного порту OBD-2 електромобіля під'єднували діагностичний пристрій ELM327 та програмне забезпечення CanZE, що дозволило спостерігати стан АБ і виявити причину стрімкого зниження запасу ходу порівняно із запасом ходу на початку її експлуатації. Діагностика показала наявність дисбалансу.

Щоб отримувати та зберігати для подальшого аналізу дані з АБ електромобіля в режимі реально-го часу, було створено CAN-аналізатор на базі мікроконтролера ESP32 з трансивером SN65HVD230 та LIN ATA6662, який підключався до порту OBD-2 електромобіля [26].

Отримані від CAN-аналізатора дані виводились на ПК за допомогою програмного забезпечення SavvyCAN. Через відсутність у відкритому доступі протоколу обміну даними необхідні параметри АБ визначалися шляхом власного аналізу повідомлень CAN-шини. Після цього було створено файл з роз-

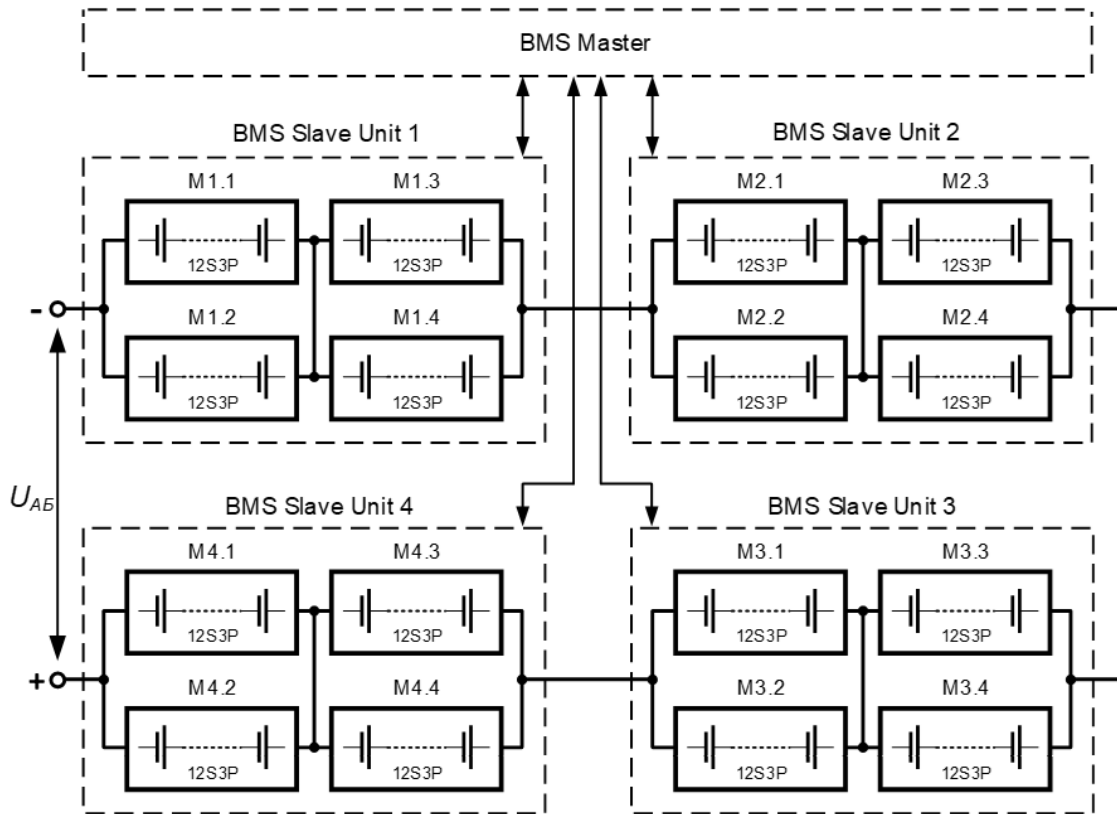


Рис. 1. Схема акумуляторної батареї досліджуваного електромобіля

File	RE Tools	Send Frames	Connection						
	Timestamp	ID	Ext	RTR	Dir	Bus	Len	ASCII	Data
44608	71.79985	0x155	0	0	Rx	0	8	...T...'	82 87 BC 54 98 60 02 C8 <x155>...
44609	71.80196	0x19F	0	0	Rx	0	8	...J.P.	E1 E1 7D 01 00 6A 50 FE <x19F> RPM: 0 RPM Speed_Fluence: 0 Km/h
44610									
44611	71.80222	0x157	0	0	Rx	0	8		D5 C8 09 C4 FF E0 00 80
44612	71.80370	0x1C7	0	0	Rx	0	4		AA A0 FF C0
44613	71.80696	0x1A1	0	0	Rx	0	8	..z4e..	B1 CA 7A 34 65 8C 80 20
	71.80981	0x155	0	0	Rx	0	8	...T...'	82 87 BC 54 98 60 02 C8 <x155> Max_charge_rate: 65 Amps SoC: 97.52 % power_charge: 130 Current: -5 A charger_state: 84 Voltage: 386 V
44614									
44615	71.81001	0x424	0	0	Rx	0	8	..@V.?^U@	11 40 56 C8 3F 5E 55 40 <x424>...
44616	71.81026	0x425	0	0	Rx	0	8	*.D.B...	2A D3 44 9C 42 1E FD 0E <x425>...
44617	71.81191	0x157	0	0	Rx	0	8		D5 1B 09 C4 FF E0 00 80
44618	71.81216	0x19F	0	0	Rx	0	8	...J.P.	E1 E1 7D 06 00 6A 50 FE <x19F>...
44619	71.81372	0x1C7	0	0	Rx	0	4		AA A0 FF C0
44620	71.81602	0x1A1	0	0	Rx	0	8	..z4e..	B1 CA 7E 34 65 8C 80 20

Total Frames Captured: 3841437
Frames Per Second: 0
Suspend Capturing
Normalize Frame Timing
Clear Frames
☐ Keep Filters When Clearing
☐ Auto Scroll Window
☐ Overwrite Mode
☒ Interpret Frames
Expand All Rows
Collapse All Rows
Bus Filtering:
☒ 0 VECTOR_1F
Frame Filtering:
☒ 0x659
☒ 0x69F
All
None

Connected to 0 buses
Test drive 1.csv loaded (X)
Press F1 on any screen for help

Рис. 2. Дані з CAN-шини електромобіля Renault Fluence ZE в програмному забезпеченні SavvyCAN

ширенням .dbc, який автоматизує процес декодування даних з CAN-шини у фізичні величини (рис. 2).

Отже, для наступних досліджень було розроблено експериментальну установку та програмно-апаратний комплекс, що дозволяють у режимі реального часу отримувати та записувати швидкість руху електромобіля, параметри SoC, SoH, напругу кожної комірки, напругу та струм АБ, а також її температуру.

Експериментальні дослідження та обговорення отриманих результатів

Первинна діагностика АБ виявила наявність значного дисбалансу напруги, який сягав 220 мВ, що обмежує доступну корисну ємність системи та суттєво знижує запас ходу.

Для дослідження впливу дисбалансу на АБ було проведено два експерименти. У першому заряджали батарею до рівня SoC 100% та виконували тес-

тувальну поїздку до досягнення SoC 10%. Другий експеримент проводився так само, але зі встановленим активним балансиrom, що усував дисбаланс комірок АБ. Оскільки ідеальної повторюваності профілю руху досягти неможливо, поїздки відбувалися в дорожніх умовах міського руху, які можна вважати подібними. Щоб мінімізувати фактор рельєфу місцевості, маршрут закінчувався у тій точці, де починався. На початку та наприкінці експериментів записували мапу напруги комірок. На рис. 3 представлено таку мапу, отриману під час першого експерименту. Для візуалізації отриманих даних комірки зображувалися у різних відтінках залежно від рівня заряду. Три комірки, які мають найнижчий SoC, що створює основний дисбаланс, обведені прямокутником.

Перед проведенням другого експерименту АБ заряджали до рівня SoC 100%, після чого встанов-

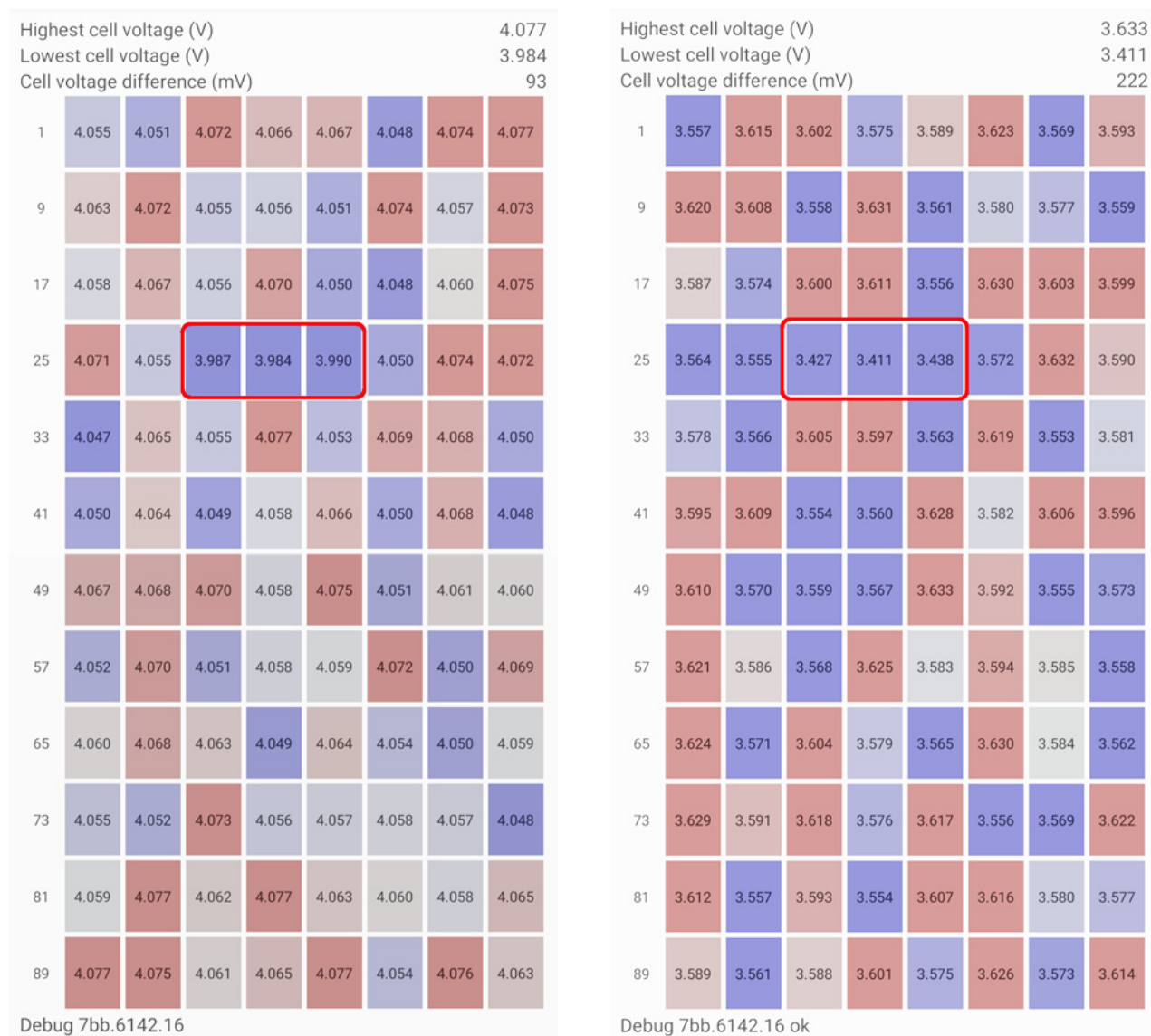


Рис. 3. Мапа комірок зарядженої (ліворуч) та розрядженої (праворуч) батареї без активного балансира



Рис. 4. Мапа комірок зарядженої (ліворуч) та розрядженої (праворуч) батареї з активним балансиrom

лювали активний балансиr на 12 комірок модуля, який містив три комірки з найнижчим рівнем заряду. Застосування активного балансира протягом 24 годин забезпечило зниження цього дисбалансу до 45 мВ (рис. 4). Після цього було зроблено другу тестувальну поїздку.

На основі записаних у цих двох експериментах масивів даних були сформовані часові залежності основних експлуатаційних параметрів: швидкість руху, пройдений шлях, SoC, напруга та струм батареї (рис. 5). Це дозволило провести комплексний аналіз параметрів АБ у змінних режимах руху.

Графік SoC демонструє стабільну тенденцію до зниження рівня заряду: протягом експерименту він зменшився зі 100 до 10%, що дозволяє оцінити ре-

альний запас ходу транспортного засобу за заданих умов. Крива SoC має мікроскопічні флуктуації, зумовлені чергуванням циклів розряду та рекуперативного підзаряду під час гальмування.

Аналіз миттєвих значень струму та напруги АБ підтверджує високу динамічність навантаження в умовах міського трафіку. Спостерігається чітка кореляція між величиною прискорення та стрибками споживання струму, які супроводжуються відповідним падінням напруги через внутрішній опір АБ.

У таблиці наведено загальні результати, отримані в тестувальних поїздках без активного балансира та з ним. Як видно, внаслідок усунення дисбалансу показник SoH збільшився з 69 до 81%, що свідчить про відновлення доступу до значної частини раніше

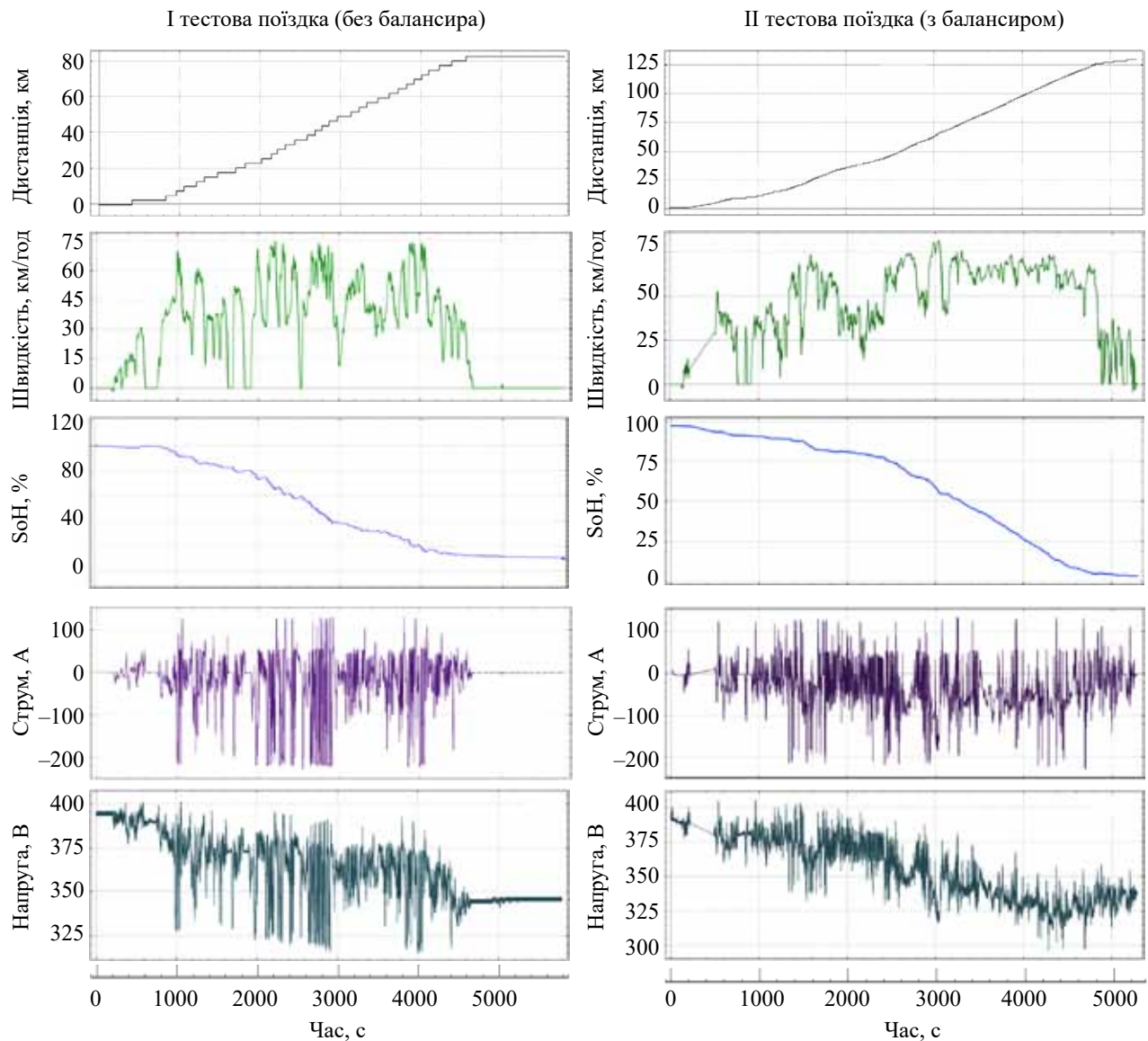


Рис. 5. Графіки зміни параметрів під час тестувальних поїздок

Загальні результати, отримані в тестувальних поїздках без активного балансира та з ним

Тестувальна поїздка	Пройдений шлях, км	Загальна ємність, А·год	Максимальний дисбаланс, мВ	SoH, %	Середнє споживання, кВт·год/100 км	Внутрішній опір АБ, мОм
I	82	33	220	69	16,3	121
II	128	43	45	81		

невикористовуваної ємності. Найбільш показовим результатом стало зростання пройденого шляху на одному заряді (зменшення SoC від 100 до 10%) з 82 до 128 км, що забезпечило приріст запасу ходу на 56%.

Висновки

У результаті проведеного експериментального дослідження підтверджено суттєвий вплив дисбалансу напруги між комірками на енергетичну ефективність і доступну ємність багатомодульної літій-іонної акумуляторної батареї електромобіля. Встановлено, що

локальне застосування активного балансира лише на одному модулі, що містить комірки з найнижчим рівнем заряду, є ефективним засобом зменшення загального дисбалансу всієї батарейної системи. Використання активного балансира впродовж 24 годин після заряджання батареї до рівня SoC = 100% дозволило знизити максимальний дисбаланс напруги з 220 до 45 мВ, тобто більш, ніж у 4,8 рази.

Отримані результати підтверджують наявність прямої кореляції між величиною дисбалансу та до-

ступною ємністю акумуляторної батареї. Зменшення дисбалансу призвело до зростання ефективно використовуваної ємності з 33 до 43 А·год, а також до збільшення оціненого показника SoH з 69 до 81%, що свідчить про відновлення доступу до раніше недоступної частини енергетичного ресурсу батареї.

Найбільш наочним практичним результатом стало зростання реального запасу ходу електромобіля в міському циклі руху з 82 до 128 км при розрядженні батареї зі 100 до 10%, що відповідає приросту SoH на 56%. Це свідчить про те, що навіть вибіркового впливу лише на найбільш деградовані або критичні комірки може суттєво покращити інтегральні експлуатаційні характеристики всієї багатомодульної акумуляторної системи.

Отримані експериментальні дані дозволяють зробити висновок, що локальне активне балансування є ефективним та економічно доцільним підходом для відновлення корисної ємності, підвищення енергоефективності та збільшення терміну служби тягових акумуляторних батарей без необхідності повномасштабного балансування всіх модулів. Такий підхід є перспективним для практичного впровадження в системах електротранспорту та стаціонарних системах накопичення енергії, особливо на етапі експлуатаційного відновлення батарей з неоднорідним ступенем деградації.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Hemavathi S. Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology. *Energy Storage*. 2021, vol. 3, e203. <https://doi.org/10.1002/est.2203>
- Omariba Z.B., Zhang L., Sun D. Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 129335–129352. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2940090>
- Liu X., Li W., Guo X. et al. Advancements in Energy-Storage Technologies: A Review of Current Developments and Applications. *Sustainability*. 2025, vol. 17, no. 18, 8316. <https://doi.org/10.3390/su17188316>
- Li S., Zhang C., Zhao Y. et al. Effect of thermal gradients on inhomogeneous degradation in lithium-ion batteries. *Communications Engineering*. 2023, vol. 2, 74. <https://doi.org/10.1038/s44172-023-00124-w>
- Ashraf A., Ali B., Al Sunjuri M.S.A., Tricoli P. A Comprehensive Review of the Art of Cell Balancing Techniques and Trade-Offs in Battery Management Systems. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 13, 3321. <https://doi.org/10.3390/en18133321>
- Fraccaroli E., Jang S., Stach L. et al. To Balance or to Not? Battery Aging-Aware Active Cell Balancing for Electric Vehicles. arXiv. Jan. 2024. Режим доступу: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.03124>
- Бондаренко О., Ліпко Д. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2023, № 3–4, с. 9–15. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2023.3-4.09>
- Бондаренко О., Ліпко Д. Модифікований активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2024, № 1–2, с. 11–23. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2024.1-2.11>
- Khan N., Ooi C.A., Alturki A. et al. A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies, and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*. 2024, vol. 11, pp. 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.041>
- Ліпко Д.О., Бондаренко О.Ф. Розробка DC-DC перетворювача для використання в системах активного балансування акумуляторних батарей в межах студентських змагань. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2024, вип. 3, с. 316127.1–316127.8. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.316127>
- Lipko D., Bondarenko O. Modified Active Balancer for Multi-Module Battery Pack. *Proc. 19th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*. Tallinn, Estonia, 2024, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/BEC61458.2024.10737985>
- Cao J., Xia B., Zhou J. An Active Equalization Method for Lithium-ion Batteries Based on Flyback Transformer and Variable Step Size Generalized Predictive Control. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 1, 207. <https://doi.org/10.3390/en14010207>
- Farzan Moghaddam A., Van den Bossche A. An Efficient Equalizing Method for Lithium-Ion Batteries Based on Coupled Inductor Balancing. *Electronics*. 2019, vol. 8, no. 2, 136. <https://doi.org/10.3390/electronics8020136>
- Gao Z.C., Chin C.S., Toh W.D. et al. State-of-Charge Estimation and Active Cell Pack Balancing Design of Lithium Battery Power System for Smart Electric Vehicle. *Journal of Advanced Transportation*. 2017, Article ID 6510747, 14 p. <https://doi.org/10.1155/2017/6510747>
- Narayanawamy S., Kauer M., Steinhorst S., et al. Modular Active Charge Balancing for Scalable Battery Packs. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*. 2017, vol. 25, no. 3, pp. 974–987. <https://doi.org/10.1109/TVLSI.2016.2611526>
- Li L., Li Z., Zhao J., Guo W. Lithium-ion battery management system for electric vehicles. *International Journal of Performability Engineering*. 2018, vol. 14, no. 12, pp. 3184–3194. <https://doi.org/10.23940/ijpe.18.12.p28.31843194>
- Lee D., Kang S., Shin C.B. Modeling the Effect of Cell Variation on the Performance of a Lithium-Ion Battery Module. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 21, 8054. <https://doi.org/10.3390/en15218054>
- Babu P.S., Ilango K. Comparative Analysis of Passive and Active Cell Balancing of Li Ion Batteries. *Proc. 3rd Int. Conf. Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*. Kannur, India, 2022, pp. 711–716. <https://doi.org/10.1109/ICICT54557.2022.9917778>
- Jiang W., Zhou F. Active Battery Balancing System for High Capacity Li-Ion Cells. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 23, 6371. <https://doi.org/10.3390/en18236371>
- Wei C., Li X. Review of Bidirectional DC-DC Converters for Electric Vehicle Energy Management Systems. *Proc. 7th Int. Conf. Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*. Lanzhou, China, 2023, pp. 432–436. <https://doi.org/10.1109/ICSGSC59580.2023.10319186>
- Farzan Moghaddam A., Van den Bossche A. A Ćuk Converter Cell Balancing Technique by Using Coupled Inductors for Lithium-Based Batteries. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 15, 2881. <https://doi.org/10.3390/en12152881>
- Chandran V., Patil C.K., Karthick A. et al. State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles Using Machine Learning Algorithms. *World Electric Vehicle Journal*. 2021, vol. 12, no. 1, 38. <https://doi.org/10.3390/wevj12010038>
- Wu H., Zhao H., Yang J. et al. Battery Active Grouping and Balancing Based on the Optimal Energy Transfer Direction. *Sustainability*. 2025, vol. 17, no. 11, 5219. <https://doi.org/10.3390/su17115219>
- Dorronsoro X., Garayalde E., Iraola U., Aizpurua M. Modular battery energy storage system design factors analysis to improve battery-pack reliability. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 54, 105256. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105256>
- Tuluhong A., Xu Z., Chang Q., Song T. Recent Developments in Bidirectional DC-DC Converter Topologies, Control Strategies, and Applications in Photovoltaic Power Generation Systems: A Comparative Review and Analysis. *Electronics*, 2025, vol. 14, iss. 2, 389. <https://doi.org/10.3390/electronics14020389>
- Ліпко Д.О. Прилад для контролю параметрів акумуляторної батареї : магістерська дис. Київ, 2020. 77 с. URI: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38755>

Дата надходження рукопису
до редакції 27.10 2025 р.

DOI: 10.15222/TKEA2025.3-4.47
UDC 621.355:621.311.61

Dmytro LIPKO, Arsenii NAIDONOV,
Yuliia KOZHUSHKO, Yuliia BONDARENKO,
Pavlo SAFRONOV, Oleksandr BONDARENKO

Ukraine, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

APPLICATION PROSPECTS OF ACTIVE BALANCING IN MULTI-MODULE BATTERY PACKS

In modern batteries, particularly those used in electric vehicles, one of the key factors determining efficiency, reliability, and durability is the imbalance of charge levels (state of charge, SoC) between cells. This imbalance arises due to technological heterogeneity of cells, differences in internal resistance, degradation levels (state of health, SoH), temperature gradients, measurement errors in control channels, and unequal cooling conditions. The imbalance leads to reduced usable capacity, increased thermal loads, and uneven current distribution during charging and discharging, which ultimately lowers efficiency and shortens battery lifetime. Previous studies highlight the potential of active balancing to mitigate charge-level imbalance in multi-module batteries.

The aim of this work is to experimentally verify the effectiveness of active balancing, determine its impact on imbalance levels and energy efficiency indicators of multi-module lithium-ion batteries, and formulate practical recommendations for the use of active balancers in electric transport systems. The study showed that applying an active balancer to a module with degraded cells reduced the maximum imbalance from 220 mV to 45 mV, increased usable capacity from 33 Ah to 43 Ah, improved the estimated SoH from 69% to 81%, and extended the real driving range of the electric vehicle by 56% (from 82 km to 128 km when discharged from 100% to 10% SoC).

The experimental data confirm that local active balancing is an effective and economically feasible approach to restoring usable capacity, improving energy efficiency, and extending the service life of traction batteries without requiring full-scale balancing of all modules. This approach is promising for practical implementation in electric transport systems and stationary energy storage, particularly for operational restoration of batteries with heterogeneous degradation levels.

Keywords: battery, battery management system (BMS), active balancing, imbalance, electric vehicle (EV), driving range, lifetime.

REFERENCES

- [1] H. S. Hemavathi, "Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology," *Energy Storage*, vol. 3, p. e203, 2021, doi: 10.1002/est2.203.
- [2] Z. B. Omariba, L. Zhang, and D. Sun, "Review of Battery Cell Balancing Methodologies for Optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129335–129352, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940090.
- [3] X. Liu, W. Li, X. Guo, B. Su, S. Guo, Y. Jing, and X. Zhang, "Advancements in Energy-Storage Technologies: A Review of Current Developments and Applications," *Sustainability*, vol. 17, no. 18, Art. no. 8316, 2025, doi: 10.3390/su17188316.
- [4] S. Li, C. Zhang, Y. Zhao, Y. Liu, Z. Chen, Y. Chen, et al., "Effect of thermal gradients on inhomogeneous degradation in lithium-ion batteries," *Communications Engineering*, vol. 2, p. 74, 2023, doi: 10.1038/s44172-023-00124-w.
- [5] A. Ashraf, B. Ali, M. S. A. Al Sunjury, and P. Tricoli, "A Comprehensive Review of the Art of Cell Balancing Techniques and Trade-Offs in Battery Management Systems," *Energies*, vol. 18, no. 13, p. 3321, 2025, doi: 10.3390/en18133321.
- [6] E. Fraccaroli, S. Jang, L. Stach, et al., "To Balance or to Not? Battery Aging-Aware Active Cell Balancing for Electric Vehicles," *arXiv preprint arXiv:2401.03124*, Jan. 2024, doi: 10.48550/arXiv.2401.03124.
- [7] O. Bondarenko, and D. Lipko, "Using partial charge-discharge cycle of battery to increase its lifespan," *Technology and Design in Electronic Equipment*, no. 3–4, pp. 9–15, 2023, doi: 10.15222/TKEA2023.3-4.09.
- [8] O. Bondarenko, and D. Lipko, "Modified active balancer for use in multi-module batteries," *Technology and Design in Electronic Equipment*, no. 1–2, pp. 11–23, 2024, doi: 10.15222/TKEA2024.1-2.11.
- [9] N. Khan, C. A. Ooi, A. Alturki, M. Amir, Shreasth, and T. Alharbi, "A critical review of battery cell balancing techniques, optimal design, converter topologies and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 4999–5032, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.04.041.
- [10] D. Lipko, and O. Bondarenko, "Development of a DC-DC Converter for Active Battery Balancing Systems in a Format of Student Competition," *Microsystems, Electronics and Acoustics*, pp. 316127.1–316127.8, Dec. 2024, doi: 10.20535/2523-4455.me.316127.
- [11] D. Lipko, and O. Bondarenko, "Modified Active Balancer for Multi-Module Battery Pack," in *Proc. 19th Biennial Baltic Electronics Conf. (BEC)*, Tallinn, Estonia, 2024, pp. 1–5, doi: 10.1109/BEC61458.2024.10737985.
- [12] J. Cao, B. Xia, and J. Zhou, "An Active Equalization Method for Lithium-ion Batteries Based on Flyback Transformer and Variable

Step Size Generalized Predictive Control,” *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 207, 2021, doi: 10.3390/en14010207.

[13] A. Farzan Moghaddam, and A. Van den Bossche, “An Efficient Equalizing Method for Lithium-Ion Batteries Based on Coupled Inductor Balancing,” *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 136, 2019, doi: 10.3390/electronics8020136.

[14] Z. C. Gao, C. S. Chin, W. D. Toh, J. Chiew, and J. Jia, “State-of-Charge Estimation and Active Cell Pack Balancing Design of Lithium Battery Power System for Smart Electric Vehicle,” *Journal of Advanced Transportation*, Art. no. 6510747, 14 p., 2017, doi: 10.1155/2017/6510747.

[15] S. Narayanaswamy, M. Kauer, S. Steinhurst, M. Lukaszewicz, and S. Chakraborty, “Modular Active Charge Balancing for Scalable Battery Packs,” *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 974–987, Mar. 2017, doi: 10.1109/TVLSI.2016.2611526.

[16] L. Li, Z. Li, J. Zhao, and W. Guo, “Lithium-ion battery management system for electric vehicles,” *International Journal of Performability Engineering*, vol. 14, no. 12, pp. 3184–3194, 2018, doi: 10.23940/ijpe.18.12.p28.31843194.

[17] D. Lee, S. Kang, and C. B. Shin, “Modeling the Effect of Cell Variation on the Performance of a Lithium-Ion Battery Module,” *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8054, 2022, doi: 10.3390/en15218054.

[18] P. S. Babu, and K. Ilango, “Comparative Analysis of Passive and Active Cell Balancing of Li Ion Batteries,” in *Proc. 3rd Int. Conf. Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, Kannur, India, 2022, pp. 711–716, doi: 10.1109/ICICT54557.2022.9917778.

[19] W. Jiang, and F. Zhou, “Active Battery Balancing System for High Capacity Li-Ion Cells,” *Energies*, vol. 18, no. 23, p. 6371, 2025, doi: 10.3390/en18236371.

[20] C. Wei, and X. Li, “Review of Bidirectional DC-DC Converters for Electric Vehicle Energy Management Systems,” in *Proc. 7th Int. Conf. Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC)*, Lanzhou, China, 2023, pp. 432–436, doi: 10.1109/ICSGSC59580.2023.10319186.

[21] A. Farzan Moghaddam, and A. Van den Bossche, “A Ćuk Converter Cell Balancing Technique by Using Coupled Inductors for Lithium-Based Batteries,” *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2881, 2019, doi: 10.3390/en12152881.

[22] V. Chandran, C. K. Patil, A. Karthick, D. Ganeshaperumal, R. Rahim, and A. Ghosh, “State of Charge Estimation of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles Using Machine Learning Algorithms,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 1, p. 38, 2021, doi: 10.3390/wevj12010038.

[23] H. Wu, H. Zhao, J. Yang, D. Qin, and J. Chen, “Battery Active Grouping and Balancing Based on the Optimal Energy Transfer Direction,” *Sustainability*, vol. 17, no. 11, p. 5219, 2025, doi: 10.3390/su17115219.

[24] X. Dorronsoro, E. Garayalde, U. Iraola, and M. Aizpurua, “Modular battery energy storage system design factors analysis to improve battery-pack reliability,” *Journal of Energy Storage*, vol. 54, p. 105256, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105256.

[25] A. Tuluhong, Z. Xu, Q. Chang, and T. Song, “Recent Developments in Bidirectional DC-DC Converter Topologies, Control Strategies and Applications in Photovoltaic Power Generation Systems: A Comparative Review and Analysis,” *Electronics*, vol. 14, no. 2, p. 389, 2025. doi: 10.3390/electronics14020389.

[26] D. O. Lipko, *Device for Monitoring Battery Parameters*, M.Sc. thesis, Dept. Micro- and Nanosystems Technology, Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, 77 p. [Online]. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38755>.



Copyright: © 2025, The author(s). Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).