

Д. О. ЛІПКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

МОДИФІКОВАНИЙ АКТИВНИЙ БАЛАНСИР ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В БАГАТОМОДУЛЬНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЯХ

Запропоновано вдосконалену топологію активного балансира, яка забезпечує додаткове балансування на рівні модулів, а також гнучку зміну способу балансування для його пришвидшення й збільшення надійності. Проведено моделювання швидкості балансування для різних топологій активних балансірів і підтверджено ефективність запропонованої топології.

Ключові слова: електромобіль, комірка, акумуляторна батарея, активне балансування, пасивне балансування, система керування акумуляторною батареєю.

Наразі у світі стрімко збільшується кількість електромобілів, а з ними й кількість акумуляторних батарей на основі літію. Акумуляторні батареї мають обмежений ресурс та з часом потребують заміни, але на сьогодні технологій їх утилізації та перероблення майже немає. З непридатних для використання в електромобілі акумуляторних батарей роблять стаціонарні накопичувачі енергії [1]. Акумуляторні батареї, що не підходять навіть для накопичувачів, зберігають на спеціалізованих складах доти, поки не буде знайдено дешевої та ефективної технології їх перероблення. У світлі цього очевидно, що продовження ресурсу акумуляторних батарей та відтермінування часу їх утилізації є досить актуальною проблемою.

Ресурс акумуляторної батареї характеризується кількістю повних циклів заряду-розряду до втрати певної ємності, але ця кількість може змінюватись як в бік збільшення, так і зменшення залежно від таких факторів як температура, струм заряду-розряду, глибина розряду тощо. На деградацію акумулятора впливають умови та термін його експлуатації. Наприклад, під час експлуатації акумулятора може виникати дисбаланс серед комірок акумулятора, одна з причин його виникнення — нерівномірною температура батареї в процесі її заряджання або розряджання, що спричиняє різний внутрішній опір комірок. Дисбаланс дуже погано впливає на акумуляторну батарею електромобіля через те, що одні комірки постійно є більш зарядженими, інші, навпаки, більш розрядженими, а деякі комірки більше часу працюють в крайніх діапазонах рівня заряду, що призводить до втрати ємності. Через це відбувається обмеження доступної для використання ємності акумулятора, що зменшує запас ходу електромобіля. Вагому роль у збереженні загального ресурсу акумуляторних бата-

рей відіграє система керування акумуляторною батареєю (*battery management system*, скор. BMS) — система, що контролює параметри та балансує батарею і тим самим протидіє дисбалансу [2].

Метою цієї роботи було поліпшення системи балансування акумуляторних батарей, що має позитивно впливати на їхній ресурс та термін експлуатації. Будемо розглядати акумуляторні батареї електромобілів — на сьогодні це найбільш актуальний приклад застосування, а отримані результати можуть бути розповсюджені на багатомодульні акумуляторні батареї іншого призначення.

Особливості будови акумуляторної батареї електромобіля

Акумуляторна батарея електромобіля складається з великої кількості окремих одиничних комірок, увімкнених послідовно або паралельно. Ці комірки складаються у модулі, а модулі, своєю чергою, в акумуляторну батарею (рис. 1), конфігурація якої залежить від того, який тип комірок застосовується. Комірки відрізняються між собою за формфактором і за типом хімічного складу компонентів.

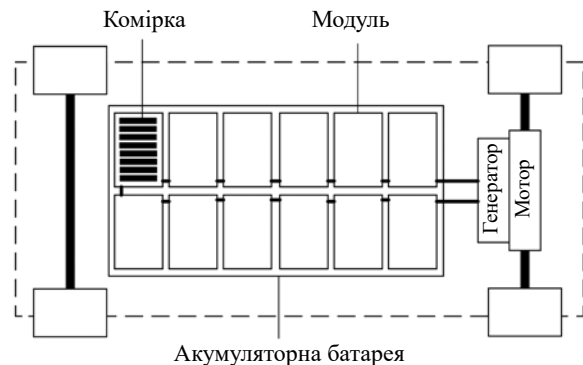


Рис. 1. Будова акумуляторної батареї електромобіля



Рис. 2. Типи формфакторів акумуляторів: циліндричний, призматичний, пакет

В електромобілях застосовуються три основні формфактори комірок (рис. 2):

- циліндричні: листи компонентів згорнуто у ролон всередині металевому циліндричному корпусі;
- призматичні: складені кілька разів листи розміщуються у корпусі прямокутної форми;
- пакети: комірки формуються з бажаної кількості однакових шарів листів, накладених один на інший, такі акумулятори є найбільш гнучкими.

Ці три формфактори можуть мати різні розміри, що й впливає на можливий об’єм накопиченої енергії.

Окрім розміру, на параметри акумулятора сильно впливає хімічний склад його компонентів. Наразі існує багато типів акумуляторів за видом хімічного складу, однак в сучасних електромобілях застосовуються три основні типи літєвих акумуляторів [3, 4]: NMC (нікель-марганець-кобальт), LFP (літій-залізо-фосфат) і NCA (нікель-кобальт-алюміній), експлуатаційні характеристики кожного зображені на рис. 3.

В акумуляторній батареї електромобіля кількість комірок та модулів відповідає напрузі та ємності, які хоче отримати виробник електромобіля з врахуванням певного простору для батареї всередині електромобіля. Ця кількість залежить від розміру комірок і їхньої енергетичної щільності. У більшості сучасних електромобілів (Tesla, Nissan [6], Renault) напруга тягової акумуляторної батареї лежить в межах 300 – 400 В, іноді напруга батареї складає 800 В, але може перекомутуватись у 400 В для станцій швидкої зарядки. Батарея може складатися з 96 послідов-

но з’єднаних комірок NCA або NMC або з 112 LFP. Кількість комірок 96 використовується виробниками через те, що це число має багато варіантів парного ділення націло, тобто є багато варіантів конфігурації модулів акумуляторної батареї. Започаткувала цей підхід компанія Tesla у своєму першому серійному електромобілі на NCA-комірках. В батареях на елементах LFP кількість комірок більша через те, що номінальна напруга такої комірки нижча, ніж NCA або NMC. Слід зазначити, що описані варіанти не є стандартом, в електромобілях можна побачити батарею, наприклад, як з 84 послідовно підключених комірок, так і зі 198.

У табл. 1 зведено інформацію щодо характеристик акумуляторних батарей різних серійних електромобілів, складену на основі [7] й доповнену з власних спостережень.

Безпечне використання акумуляторної батареї забезпечує система BMS, завданням якої є вимірювання напруги кожної комірки, сили струму, температури всередині батареї, опору ізоляції, замкненості силових роз’ємів. На основі цих даних BMS розраховує багато параметрів, зокрема рівні заряду та деградації акумуляторної батареї, доступну потужність заряду та розряду, внутрішній опір комірок, та передає їх до інших систем електромобіля через мережу CAN (*controller area network*). Рівні заряду (*state of charge, SoC*) та деградації (*state of health, SoH*) розраховуються за формулами

$$SoC = C_{current} / C_{real}; \tag{1}$$

$$SoH = C_{real} / C_{nom}; \tag{2}$$

- де $C_{current}$ — ємність акумулятора у поточний момент;
- C_{real} — ємність зарядженого акумулятора з урахуванням деградації;
- C_{nom} — номінальна ємність акумулятора.

BMS захищає акумуляторну батарею від надмірного розрядження та перезарядження, обмежує її використання в умовах низької або високої температури. Будь-яка BMS, призначена для використання в електромобілі, обов’язково має датчик вимірюван-



Рис. 3. Експлуатаційні характеристики акумуляторів з хімічними системами різних типів [5]

Характеристики акумуляторних батарей серійних електромобілів

Електромобіль	Ємність батареї	Конфігурація батареї	Кількість (конфігурація) модулів	Щільність комірок, Вт·год/кг	Форм-фактор	Тип хімії	Виробник			
Nissan Leaf	24	96s2p	48 (2s2p)	110	Пакет	NMC	Envision AESC			
	40	96s2p	24 (4s2p)	130						
	62	96s3p	24 (4s2p)	150						
Renault Zoe	40	96s2p	12 (8s2p)	145	Пакет	NMC	LG Chem			
	52	96s2p	12 (8s2p)	168						
Hyundai Kona Electric	64	98s3p	8(10s3p), 2(9s3p)	149						
Hyundai IONIQ Electric	28	96s2p	6(10s2p), 6(6s2p)	112						
Audi e-tron 55	95	108s4p	36(3s4p)	136						
Porsche Taycan Turbo S	93	198s2p	33(6s2p)	148						
Jaguar I-PACE	90	108s4p	36(3s4p)	149						
Tesla Model S	100	96s86p	16 (6s86p)	162				Циліндр	NCA	Panasonic
Tesla Model 3	75	96s46p	2 (25s46p), 2 (23s46p)	168						
Tesla Model X	100	96s86p	16 (6s86p)	162						
BMW i3	33	96s1p	8(12s1p)	132	Призма	NMC	Samsung SDI			
	42	96s1p	8(12s1p)	152						
VW e-Golf	36	88s3p	16(4s3p), 11(2s3p)	103	Пакет					
Peugeot e-208	50	108s2p	18(6s2p)	140	Призма	NMC	CATL			
Mercedes-Benz EQC	85	96s4p	4 (36s2p), 2 (24s2p)	130	Пакет	NMC	LG Chem або SK Innovation			

ня опору ізоляції батареї відносно кузова електромобіля, захищаючи тим самим людей від ураження струмом, а також інші електричні компоненти, якщо батарея вийде з ладу. Крім цього, BMS вирівнює напругу на комітках, що дуже важливо, оскільки дисбаланс зменшує діапазон заряду, в якому може працювати батарея, і безпосередньо впливає позитивно як на запас ходу електромобіля, так і на ресурс акумуляторної батареї.

BMS в електротранспорті може складатись з одного модуля або ж мати модульну структуру, де є головний модуль і другорядні, якими він керує (рис. 4). Другорядні модулі, вимірюють напругу комірок і надсилають дані до головного модуля (найчасті-

ше — через протокол обміну даними CAN, але також застосовують UART, *universal asynchronous receiver/transmitter*, або RS485, *recommended standard 485*). Головний модуль обробляє ці дані та відправляє їх до основної мережі CAN електромобіля для використання іншими системами. Також головний модуль керує процесом балансування комірок, даючи команду другорядним модулям під'єднувати шунтувальні резистори до певних комірок. У немодульній BMS всі комірки під'єднуються до одного основного модуля.

Модульна структура BMS має декілька переваг при застосуванні в електромобілі, зокрема дозволяє зменшити довжину балансувальних дротів, що підвищує точність вимірювання напруги комірок та змен-

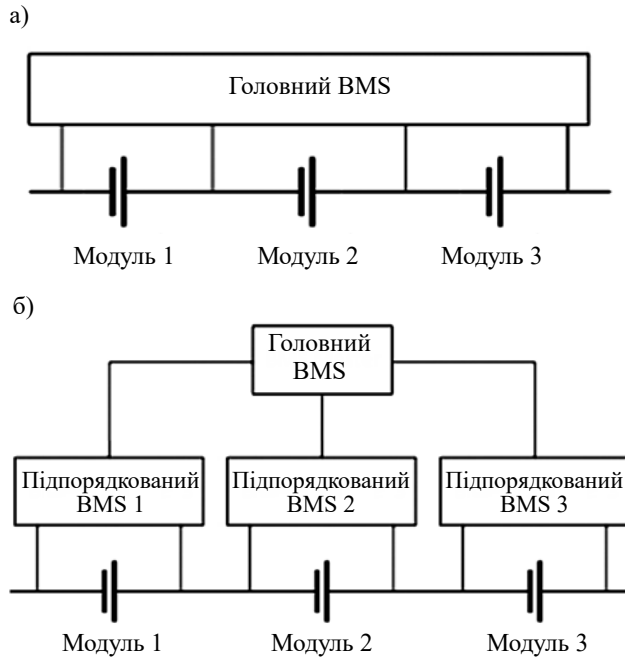


Рис. 4. Централізована (а) та модульна (б) структура BMS

шує вплив зовнішніх шумів. Також така структура дозволяє виробникам швидко змінювати конфігурацію батареї, варіюючи кількість модулів, від чого залежить кількість підключених комірок. Централізована BMS таких можливостей не надає, оскільки розрахована на певну кількість комірок.

Ємність комірки вимірюється в А·год та визначається як

$$C_{\text{cell}} = \int_{t_{\text{SoC}=0}}^{t_{\text{SoC}=1}} I_{\text{cell}} dt, \quad (3)$$

де I_{cell} — струм, що протікає через комірку;
 t — час.

Дисбаланс ємності комірок визначається як

$$\Delta \text{SoC} = \text{SoC}_{\text{max}} - \text{SoC}_{\text{min}}, \quad (4)$$

де SoC_{max} , SoC_{min} — рівні заряду комірок з максимальним та мінімальним зарядом відповідно.

Загальна ємність акумуляторної батареї дорівнює ємності комірки з найменшою ємністю, але з врахуванням дисбалансу загальну ємність акумуляторної батареї можна представити у вигляді

$$C_{\text{bat}} = \int_{t_{\text{SoC}=0}}^{t_{\text{SoC}=1-\Delta \text{SoC}}} I_{\text{bat}} dt, \quad (5)$$

де I_{bat} — струм, що протікає через батарею.

В нових акумуляторних батареях основною причиною виникнення дисбалансу є різний внутрішній опір комірок під час роботи батареї, що може бути спричинене різною температурою комірок, а також різною ємністю комірок внаслідок старіння акумуля-

лятора або фізичного пошкодження комірки під час виробництва або експлуатації.

Способи балансування акумуляторних батарей

Способи балансування акумуляторної батареї можна поділити на дві основні категорії: пасивне балансування та активне. Основна відмінність між ними полягає у тому, що у разі пасивного балансування енергія більш зарядженої комірки розсіюється в тепло. Активний спосіб передбачає перетікання енергії від більш зарядженої комірки до менш зарядженої. Наразі в електромобілях застосовується тільки пасивний метод.

Пасивний спосіб балансування можна поділити на два види залежно від того, яким чином використовуються шунтувальні резистори — під'єднуються до комірок фіксовано або перемикаються між комірками. У першому випадку комірки розряджаються резисторами, до яких вони під'єднані постійно. Оскільки опір всіх резисторів однаковий, струм від найбільш зарядженої комірки теж найбільший, тому ця комірка розряджається сильніше за інші [8]. Цей метод має багато недоліків, таких як великі втрати енергії, ризик глибокого розрядження комірок батареї через неконтрольованість процесу балансування, а єдиною його перевагою можна вважати лише його низьку вартість. Його можна застосовувати лише для свинцево-кислотних та нікелевих акумуляторів, оскільки для них, на відміну від літієвих, глибокий розряд не є настільки критичним.

Спосіб балансування, коли шунтувальні резистори перемикаються між комірками, зараз застосовується в усіх серійних електромобілях. Він полягає в тому, що резистори під'єднуються до більш заряджених комірок, розряджають їх до рівня інших і після цього від'єднуються. Зазвичай балансування відбувається, коли батарея майже заряджена. Цей спосіб характеризується простотою схемотехніки, модульністю, малою собівартістю. Основний його недолік — низька ефективність, оскільки надлишкова енергія з комірки розсіюється у вигляді теплоти.

При пасивному балансуванні акумуляторної батареї теплова потужність, що виділяється на шунтувальних резисторах, розраховується як

$$P_{\text{bal_loss}} = V_{\text{bal}} I_{\text{bal}} N_{\text{cell_bal}}, \quad (6)$$

де V_{bal} , I_{bal} — напруга та струм балансування комірки відповідно;

$N_{\text{cell_bal}}$ — кількість комірок, що потребують балансування (чим вона більша, тим більші втрати при балансуванні).

Пасивне балансування є ефективним, коли невелика частина комірок батареї має заряд більший за інші, тоді вони розряджаються до рівня основної час-

тини комірок. Проте у випадку, коли заряд невеликої кількості комірок нижчий, ніж у більшості, необхідно розряджати більшість комірок до рівня комірки з найнижчим зарядом, що, очевидно, є досить довгим та неефективним процесом. Активне балансування немає таких недоліків.

Способи активного балансування можна класифікувати за різними критеріями, оскільки варіантів топологій дуже багато, при цьому стандартизованої класифікації немає, тому багато дослідників намагались зробити свою [9]. В більш давніх публікаціях [10 – 12] можна знайти класифікацію методів активного балансування за типом елемента, через який перетікає енергія: конденсатор, трансформатор, DC–DC-перетворювач. Далі ці три категорії розділяються на підкатегорії за типом під'єднання цих елементів до комірок. На наш погляд, така класифікація не є точною та має помилки. У більш нових дослідженнях [13, 14] класифікація способів активного балан-

сування будується за типом перетікання енергії, що є більш узагальненим та краще відображає недоліки та переваги кожного способу. Проаналізувавши вище вказані джерела, ми розробили власну класифікацію способів балансування акумуляторних батарей за типом перетікання енергії (рис. 5).

Розглянемо приклади топологій активних балансірів, які наведено на рис. 6.

Топологія в обхід комірки, рис. 6, а: певні комірки обходять відповідними перемикачами, щоб запобігти їх надмірному зарядженню або розрядженню. У цьому способі втрата провідності є досить високою, що призводить до низької ефективності та надійності [15].

Топологія від комірки до сусідньої комірки, рис. 6, б: енергія перетікає від більш зарядженої комірки до менш зарядженої сусідньої. Цей вид балансування простий за схемотехнікою, і тільки в ньому допускається використання гальванічно неізолюваних перетворювачів. Основний недолік цієї топо-

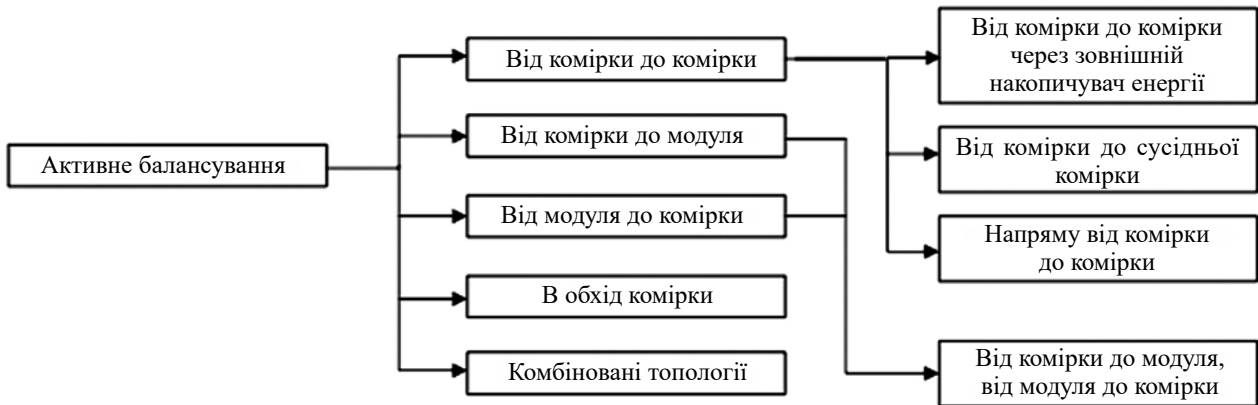


Рис. 5. Способи активного балансування акумуляторних батарей за типом перетікання енергії

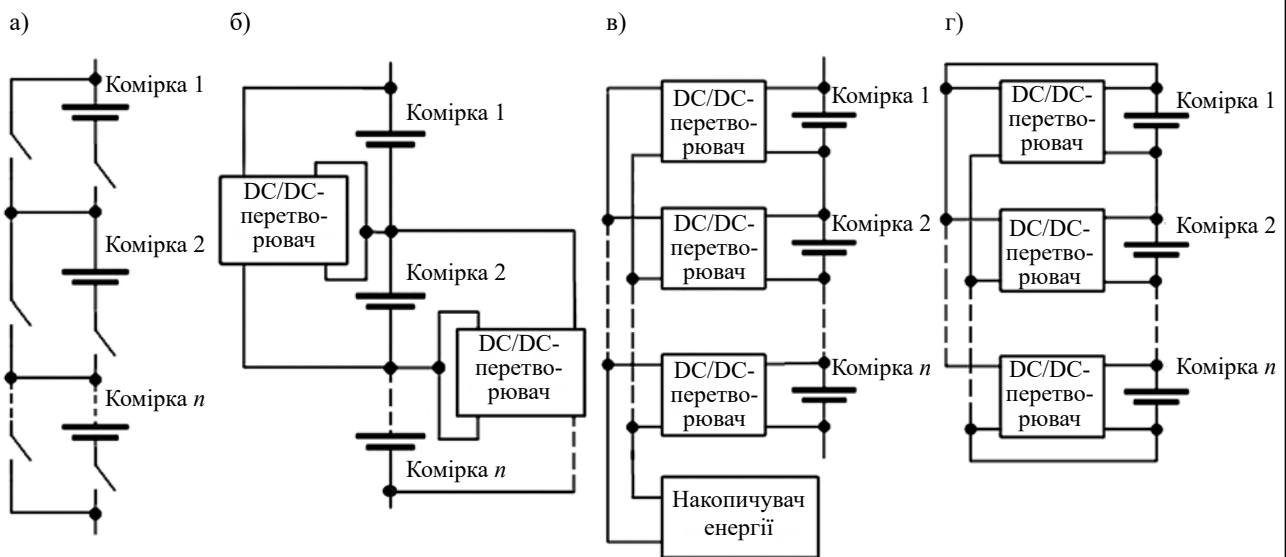


Рис. 6. Топології активного балансування (балансир) на основі перетворювачів з різними способами перетікання енергії: а — в обхід комірки; б — від комірки до сусідньої комірки; в — від комірки до комірки через зовнішній накопичувач енергії; г — від комірки до модуля й від модуля до комірки

гії в тому, що для балансування комірок, які не є сусідніми, енергію необхідно передавати ланцюжком через інші, сусідні, комірки, тим самим зайвий раз їх заряджати або розряджати, що погано впливає на ресурс комірок і на ефективність балансування в цілому. Зі збільшенням кількості комірок швидкість балансування зменшується, а втрати енергії при її передачі збільшуються [16].

Топологія від комірки до комірки через додатковий накопичувач енергії, рис. 6, в: кожна комірка батареї може заряджатись або розряджатись через двоспрямований ізольований перетворювач від додаткового накопичувача енергії. Перевага такої топології в тому, що обмін енергією може відбуватись між будь-якими комірками, що збільшує швидкість та ефективність балансування. Також можлива реалізація балансування всього акумуляторного модуля відносно інших модулів завдяки зарядженню або розрядженню всіх комірок модуля до певного рівня від додаткового накопичувача енергії, що неможливо при інших топологіях. Схемотехніка цієї топології більш складна та коштовна порівняно з попередніми [17].

Топологія від комірки до модуля і навпаки, рис. 6, г: комірка може заряджатись через двоспрямований ізольований перетворювач від модуля, в якому вона встановлена, або розряджатися на нього. Метод схожий із попереднім, проте тут немає додаткового накопичувача енергії, через що втрати енергії менші, але й немає можливості балансування акумуляторного модуля відносно інших [18].

Активні балансири на основі перетворювачів і комутаторів

Акумуляторні батареї в електротранспорті та стаціонарних накопичувачах енергії мають велику кількість комірок та модульну архітектуру, через що виникає складність у використанні активних балансирів. При активному балансуванні енергія розподіляється між всіма комірками батареї, тому необхідно забезпечити можливість перетікання енергії від будь-якої комірки до іншої, незалежно від того, де вони розміщені. Це ставить обмеження на модульність акумуляторних батарей, що може бути критичним в акумуляторах певної архітектури.

Розглянемо топології активних балансирів на основі DC–DC-перетворювача та матриці ключів. На рис. 7, а зображено схему балансира, що має один рівень ключів та двоспрямований ізольований DC–DC-перетворювач. За допомогою ключів певна комірка, яку необхідно збалансувати, під'єднується до DC–DC-перетворювача, під'єданого до загального акумуляторного блоку. Ця комірка може заряджатися або розряджатися залежно від потреби. Таку топологію можна віднести до категорії «комірка — мо-

дуль — комірка». Кількість комутаційних ключів складає $2n$ (де n — кількість комірок), тобто на кожен комірку модуля необхідно 2 ключі.

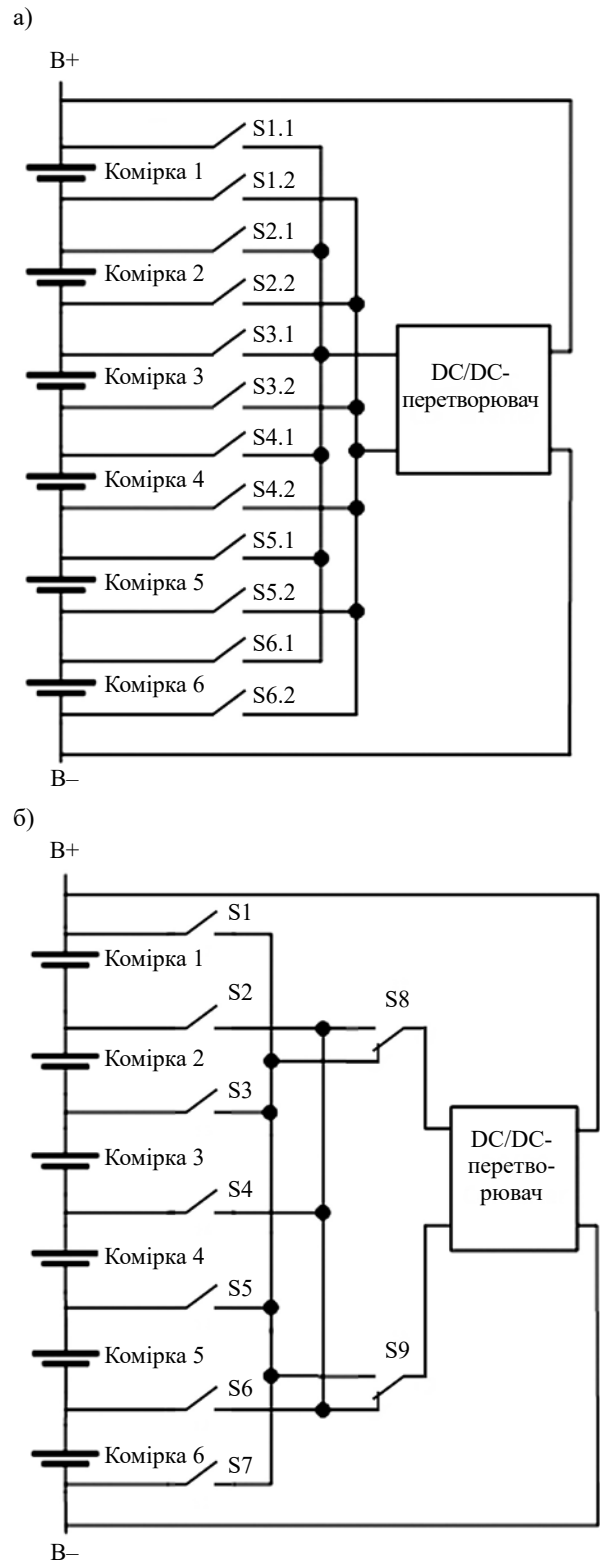


Рис. 7. Схема активного балансира на основі DC/DC-перетворювача з одним (а) та з двома (б) рівнями ключів

На рис. 7, б зображено схему активного балансира, що складається з двоспрямованого ізолюваного DC–DC-перетворювача та має два рівні комутувальних ключів. Час балансування такий самий, як і в попередній топології, але в цьому варіанті для комутації комірки до перетворювача необхідна менша кількість ключів. Недоліком цієї топології можна вважати неможливість комутації до перетворювача одразу декількох сусідніх комірок, що могло б пришвидшити процес балансування. Якщо схема масштабується, кількість комутаційних ключів дорівнює $n+4$. Це означає, що використання такого балансира має сенс в модулях, що містять більше ніж 4 послідовно під'єднаних комірок, за меншої кількості раціональніше використовувати схему з одним рівнем ключів.

Схема активного балансира на основі DC–DC-перетворювача (може бути як одно-, так і двоспрямованим) з двома однорівневими ключами має більше переваг, ніж описані варіанти (рис. 8). Основне — це більша швидкість балансування завдяки тому, що перетікання енергії відбувається від комірки до комірки, а також є можливість перетікання енергії від комірки до модуля і від модуля до комірки, що збільшує варіативність методів комутації. Тобто, залежно від ситуації балансирир може застосовувати найкращу комутацію. Наприклад, якщо рівень заряду лише однієї ко-

мірки відрізняється від інших, то краще під'єднати цю комірку до перетворювача, перетворювач до загальної напруги модуля, а всі інші комірки будуть однаково розряджатися або заряджатися. Кількість ключів в цій схемі дорівнює $4n$. Недоліком можна вважати більшу кількість комутаційних ключів порівняно з іншими схемами. Проте таку схему можна вважати більш надійною, оскільки у разі виходу з ладу однієї пари ключів, що комутують комірку, може під'єднатися другий комутатор, з іншого боку, й схема залишиться в робочому стані. Подібна схема розглядалась в дослідженні [22], але система комутаційних ключів була використана дворівнева, як на рис. 7, б, що позитивно впливає на кількість ключів при роботі балансира з більш ніж чотирма комірками, але робить неможливим під'єднання більше ніж однієї комірки до перетворювача.

Всі описані схеми активних балансірів мають один великий недолік — відсутність модульності через неможливість збалансовувати модулі між собою. Тобто, комірки всередині модуля можуть бути збалансованими, а модулі відрізнятися між собою рівнем заряду. Модульність балансірів досить важлива для акумуляторних батарей з великою кількістю комірок, що використовуються в електромобілях. Тому необхідно знайти розв'язання цієї проблеми.

У будь-якому електромобілі є допоміжна акумуляторна батарея, зазвичай на 12 В, для живлення бортової низьковольтної мережі. Від нього живляться всі електронні блоки електромобіля, також за його допомогою вмикаються контактори, що під'єднують або від'єднують високовольтну тягову батарею до високовольтної системи електромобіля. Після під'єднання високовольтної батареї вмикається DC–DC-перетворювач, що перетворює її постійну напругу у напругу низьковольтної системи та заряджає допоміжний акумулятор.

Оскільки будь-який електромобіль вже має вбудований DC–DC-перетворювач, що заряджає допоміжний акумулятор, цей акумулятор можна використовувати в системі балансування високовольтної акумуляторної батареї. Тому пропонується поліпшена схема активного балансира на основі DC–DC-перетворювача з двома однорівневими ключами для електромобіля (рис. 9).

Схема на рис. 9, а має додаткову пару ключів, що комутують 12-В акумулятор до DC–DC-перетворювача. Це дає можливість не тільки балансувати комірки всередині модуля, а й балансувати модуль відносно інших модулів шляхом перетікання енергії між модулем і 12-В акумулятором. Кількість комутаційних ключів в цій схемі дорівнює $4n+2$. DC–DC-перетворювач в балансірі має бути гальванічно ізолюваним і може бути як одно-, так і двоспря-

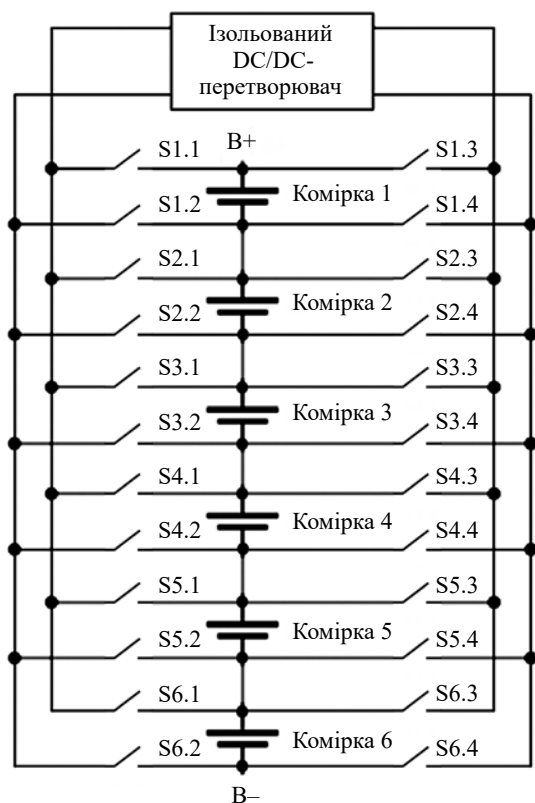


Рис. 8. Схема активного балансира на основі DC/DC-перетворювача з двома однорівневими ключами [21]

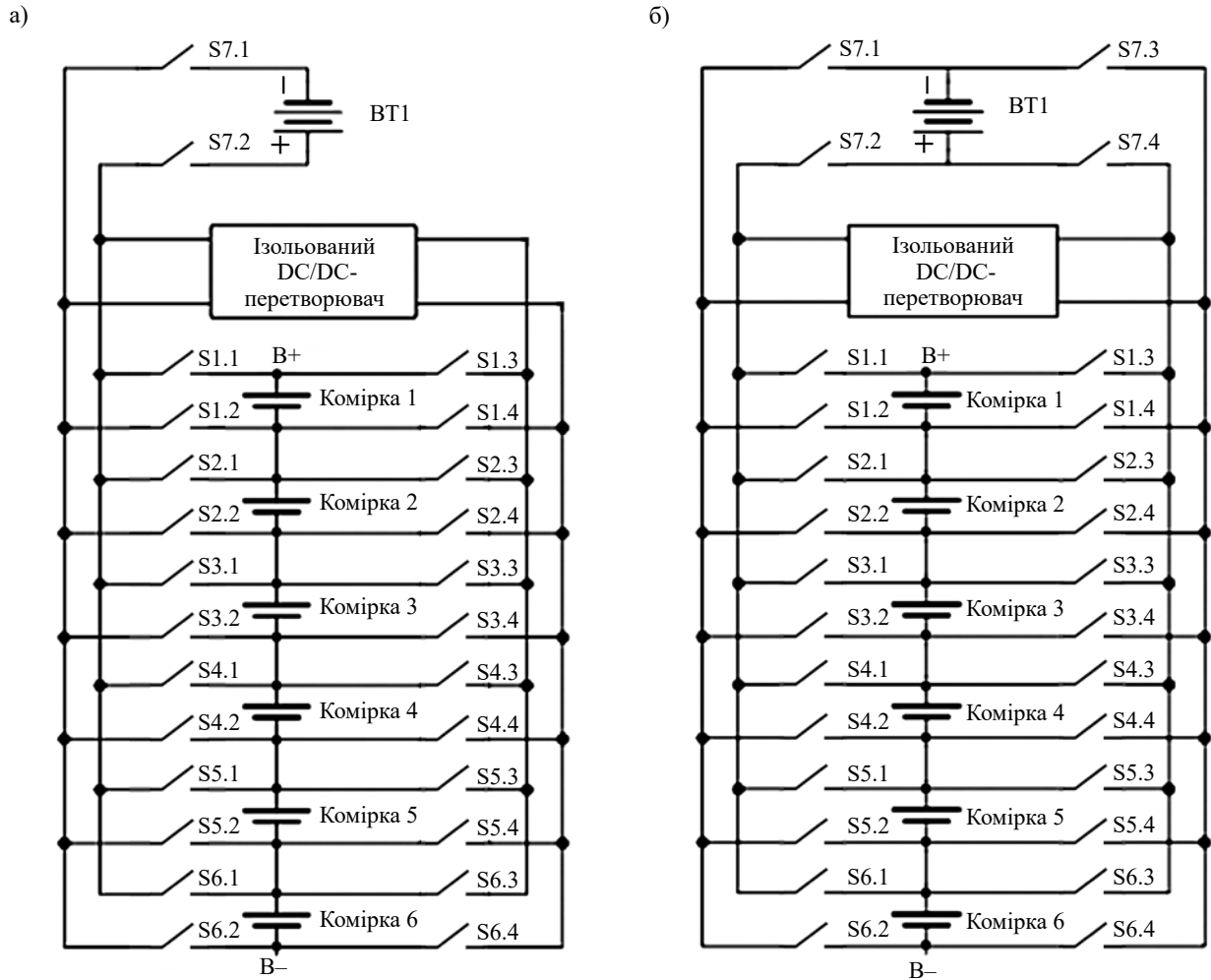


Рис. 9. Поліпшена схема активного балансира на основі DC–DC-перетворювача з двома однорівневими ключами для електромобіля

мованим, при цьому двоспрямований значно збільшує функціонал.

Схема на рис. 9, б аналогічна попередній, але має додаткову пару ключів, що дозволяє комутувати 12-В акумулятор з двох боків DC–DC-перетворювача. Кількість комутаційних ключів у схемі $4n+4$. Це дозволяє підвищити надійність балансира завдяки повністю дубльованій системі ключів, оскільки вихід з ладу одного з комутаторів не впливає на роботу балансира. Така особливість схеми може знайти своє застосування в авіації, де всі системи обов’язково мають дублюватися.

Розглянемо способи балансування батареї балансиrom на базі топології, представленої на рис. 9, б. Перевагою такої схеми балансира можна вважати можливість балансування комірки багатьма способами: шляхом перетікання енергії між коміркою та коміркою, між коміркою та модулем, між коміркою та декількома комірками, між коміркою та бортовим акумулятором, між багатьма комірками та бортовим

акумулятором, між модулем та бортовим акумулятором (рис. 10). Такий широкий набір способів балансування дозволяє збільшити його швидкість завдяки тому, що протягом одного циклу перетікання енергії може одразу заряджатись або розряджатись не одна, а декілька комірок. Перетікання енергії від однієї або декількох комірок до бортового акумулятора не впливає на баланс інших комірок, що також позитивно позначається на швидкості балансування. Очевидно, що через велику варіативність шляхів балансування надалі слід розробити алгоритм автоматичного пошуку найшвидшого шляху балансування.

Зазначимо, що для систем, де необхідна висока надійність, наприклад літальних апаратів, перевагою такої топології, окрім повної дубльованості комутаторів, є можливість замінити основний DC–DC-перетворювач у разі виходу його з ладу, не перериваючи роботу бортової мережі — балансиr може перейти в режим перетікання енергії від модуля до бортового акумулятора, тим самим підтри-

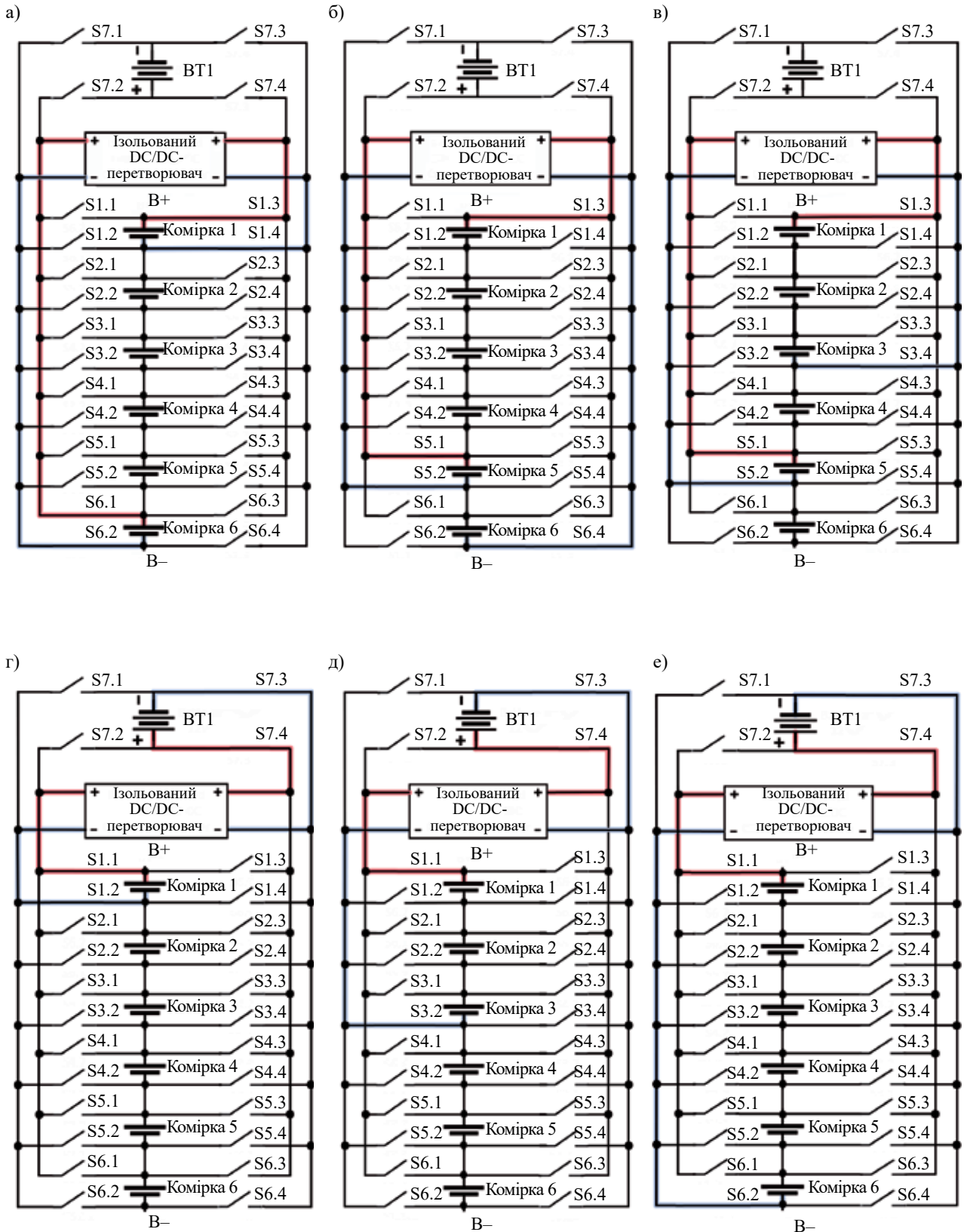


Рис. 10. Перетікання енергії в балансірі між комітками (а), між коміткою та модулем (б), між коміткою та декількома комітками (в), між коміткою та бортовим акумулятором (г), декількома комітками та бортовим акумулятором (д), між модулем та бортовим акумулятором (е)

муючи роботу в аварійному режимі. Більшу надійність також забезпечує дублювання — у разі виходу з ладу одного ключа його може замінити ключ, що стоїть навпроти, без втрати функціонала. Недоліком цієї схеми є велика кількість комутаційних ключів, що може бути критичним для застосувань, в яких це суттєво відіб'ється на собівартості.

Моделювання швидкості активного балансування

Моделювання проводилося для семи методів балансування, які використовуються у розглянутій вище топології активного балансира, за початкових умов, наведених у **табл. 2**.

Моделювання відбувалось за умови, що перетворювач працює в режимі постійного струму (*constant current*, скор. CC) та має максимальну потужність 4 Вт, а значить, струм балансування змінювався залежно від вхідної та вихідної напруги. Балансування зупинялось, коли різниця між коміркою з максимальною та мінімальною ємністю досягала 10 мА·год.

Отримані результати моделювання представлено у вигляді графіків на **рис. 11** і у **табл. 3**. Із семи методів балансування найбільшу швидкість показав метод від комірки до комірки (рис. 11, а), наступним за швидкістю були методи від модуля до комірки і навпаки (рис. 11, з), від зовнішньої батареї до комірки і навпаки (рис. 11, е), в інших вона була майже втричі меншою.

Отже, за результатами моделювання можна зробити висновок, що для модульного активного балансира за базовий треба брати метод від комірки до комірки. При цьому у випадку виходу з ладу одного з

ключів, що робить неможливим використання методу балансування від комірки до комірки, можна застосовувати інші методи балансування — тоді, хоча швидкість балансування буде нижчою, сам процес балансування продовжуватиметься.

Висновки

Судячи зі всього, відмова від неефективного пасивного способу балансування акумуляторів, яке зараз використовується в усіх електромобілях, на користь активного доволі швидко стане необхідністю, адже зі збільшенням ємності нових акумуляторів в електромобілях необхідно збільшувати струм балансування. Проте для активного балансування існує проблема балансування модулів акумуляторної батареї між собою. Існують різні топології активного балансування, і деякі з них можуть розв'язувати проблему модульності шляхом додаткових провідників і перетворювачів, але це ускладнює конструкцію. Перевага розглянутої топології в тому, що вона може повноцінно замінити модульні системи BMS з пасивним балансуванням, що вже встановлені в електромобілях. Надалі є можливість зробити BMS з активним балансуванням за цією топологією, що може повністю повторювати формфактор, спосіб під'єднання, інтерфейс обміну даними вже встановленої в електромобіль BMS та повноцінно її замінити. Така модернізація може значно збільшити тривалість життя акумуляторної батареї наявних електромобілів й тим самим надати виробникам додатковий час на пошук способів перероблення таких акумуляторів. BMS з активним балансуванням на основі запропонованої топології вбачається перспективною для її використан-

Таблиця 2

Початкові умови змодельованої системи

Кількість комірок	Потужність перетворювача, Вт	Ємність комірки, мА·год	SoC комірки, %					
			1	2	3	4	5	6
6	4	3000	40	50	60	70	80	90

Таблиця 3

Порівняння швидкості балансування методів балансування

Параметр	Метод балансування						
	від К до К	від К до М	від М до К	від М до К і навпаки	від К до ЗБ	від ЗБ до К	від ЗБ до К і навпаки
Швидкість балансування $v_{бал}$, с	465	1489	1531	929	1535	1486	913
Приріст $v_{бал}$ відносно найповільнішого методу, %	230,1	3,08	0,26	65,2	0	3,29	68,1

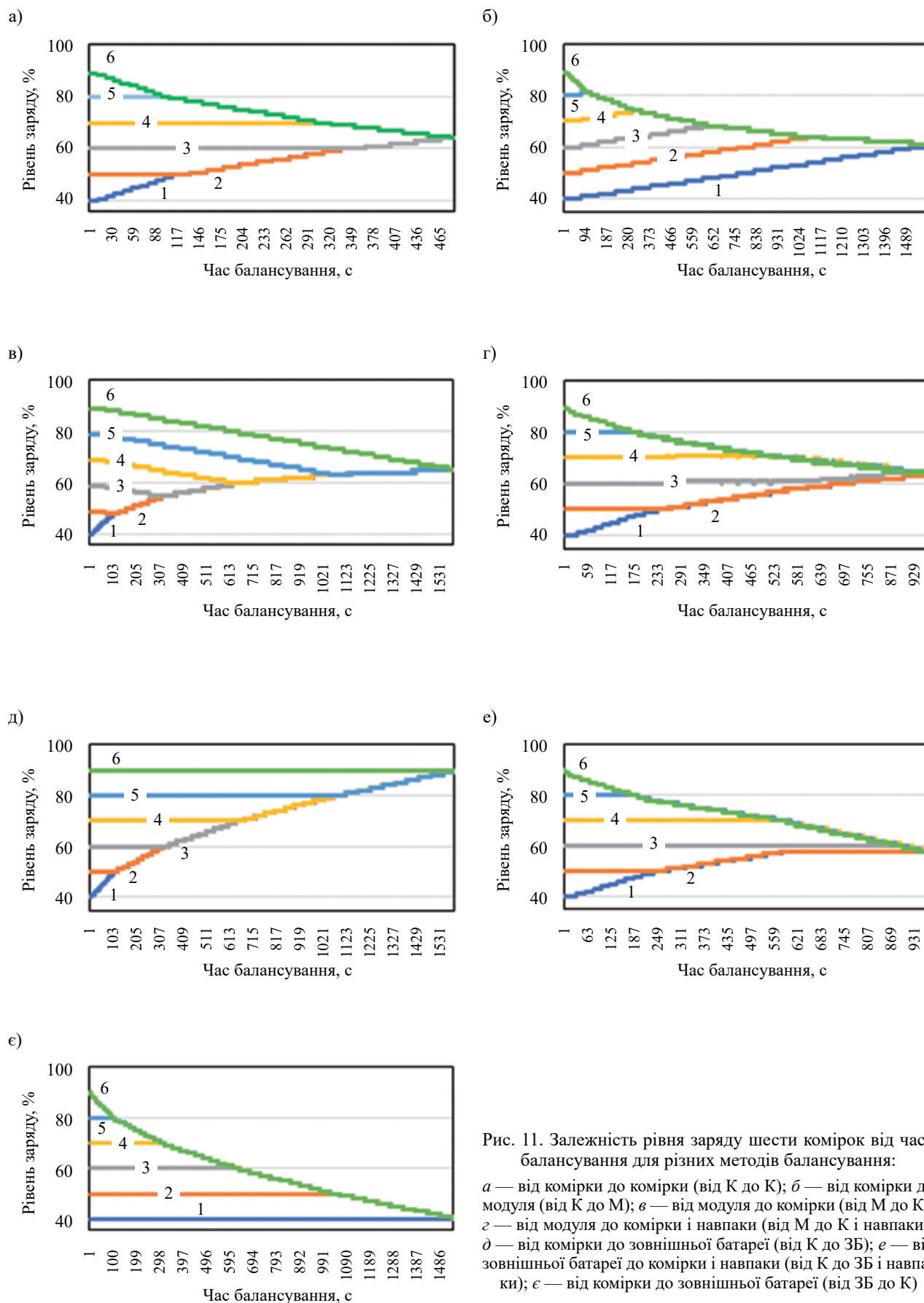


Рис. 11. Залежність рівня заряду шести комірок від часу балансування для різних методів балансування:
a — від комірки до комірки (від К до К); *б* — від комірки до модуля (від К до М); *в* — від модуля до комірки (від М до К);
г — від модуля до комірки і навпаки (від М до К і навпаки); *д* — від комірки до зовнішньої батареї (від К до ЗБ); *е* — від зовнішньої батареї до комірки і навпаки (від К до ЗБ і навпаки); *є* — від комірки до зовнішньої батареї (від ЗБ до К)

ня в електричних літальних апаратах завдяки надійності, простоті конструкції акумуляторної батареї через її модульність, що дозволяє зменшити кількість і довжину дротів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Leippi A., Fleschutz M., Murphy M. D. A review of ev battery utilization in demand response considering battery degradation in non-residential vehicle-to-grid scenarios, *Energies (Basel)*, 2022, vol. 15, no. 9, 3227. <https://doi.org/10.3390/en15093227>
2. Lipko D., Manzhelii A., Yamenko I., Bondarenko O. Possibilities and challenges of partially using a charge-discharge cycle of battery to increase its resource. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*. Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312983>
3. Ayuso P., Beltran H., Segarra-Tamarit J., Pérez E. Optimized profitability of LFP and NMC Li-ion batteries in residential PV applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, vol. 183, pp. 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.02.011>
4. Nikolian A., Jagemont J., de Hoog J. et al. Complete cell-level lithium-ion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (–5 °C to 45 °C) – Optimized modelling techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 133–146, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.031>
5. Miao Y., Hynan P., Von Jouanne A., Yokochi A. Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, 1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
6. Rastegarpanah A., Ahmeid M., Marturi N. et al. Towards robotizing the processes of testing lithium-ion batteries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, vol. 235, no. 8, pp. 1309–1325. <https://doi.org/10.1177/0959651821998599>
7. Pedro L. Comparison of different EV batteries in 2020. *PushEVs.com* [Electronic resource], April 4, 2020, Regime of access: <http://surl.li/tqich>
8. Kryvosheiev S., Styslo B., Makarov V. et al. Cell equalizer for series-connected lithium batteries. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, vol. 732–733, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559537>
9. Caspar M., Eiler T., Hohmann S. Comparison of active battery balancing systems. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2014.7007027>
10. Jiang B., Liu Y., Huang X., Prakash R. R. R. A new battery active balancing method with supercapacitor considering regeneration process. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2020, pp. 2364–2369, <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254839>
11. Qi J., Lu D. D.-C. Review of battery cell balancing techniques. *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Perth, WA, Australia, 2014, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514>
12. Daowd M., Omar N., Van Den Bossche P., Van Mierlo J. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043010>
13. Ghaeminezhad N., Ouyang Q., Hu X. et al. Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, vol. 36, no. 8, pp. 9119–9135. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3052163>
14. Kim C.-H., Kim M.-Y., Park H.-S., Moon G.-W. A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, vol. 27, no. 8, pp. 3764–3774. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185248>
15. Cao J., Schofield N., Emadi A. Battery balancing methods: A comprehensive review. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, 2008, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677669>
16. Ceylan M., Balıkcı A. An intermodular active balancing topology for efficient operation of high voltage battery packs in Li-ion based energy storage systems: Switched (flying) DC/DC converter. *Energies (Basel)*, 2023, vol. 16, no. 15. <https://doi.org/10.3390/en16155608>
17. Zhang F., Rehman M. M. U., Zane R., Maksimovic D. Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, vol. 27, no. 8, pp. 578–583. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8095835>
18. Ziegler A., Oeser D., Hein T., Ackva A. Development and application of an active balancing system for lithium-ion cells. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952317>
19. Kim C.-H., Kim Y.-D., Moon G.-W., Park H. Individual cell voltage equalizer using selective two current paths for series connected li-ion battery strings. *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 1812–1817. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316213>
20. Lee S. W., Lee K. M., Choi Y. G., Kang B. Modularized design of active charge equalizer for Li-ion battery pack. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 11, pp. 8697–8706. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2813997>
21. Elvira D. G., Blaví H. V., Moncusi J. M. B. et al. Active battery balancing via a switched DC/DC converter: Description and performance analysis. *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771697>
22. Pham V.-L., Duong V.-T., Choi W. High-efficiency active cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery modules using LLC resonant converter. *Journal of Power Electronics*, 2020, vol. 20, pp. 1037–1046. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00088-6>

Дата надходження рукопису
до редакції 13.05 2024 р.

Опис статті для цитування:

Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Модифікований активний балансер для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 11–23. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2024.1-2.11>

Cite the article as:

Lipko D. O., Bondarenko O. F. Modified active balancer for use in multi-module batteries. *Technology and design in electronic equipment*, 2024, no. 1–2, pp. 11–23. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2024.1-2.11>

MODIFIED ACTIVE BALANCER FOR USE IN MULTI-MODULE BATTERIES

The study considers the structure of multimodular batteries (on the example of electric vehicle batteries), cell configuration, chemical composition and capacity of the elements that form the cells. The authors compare the battery characteristics of most models of electric cars. Based on the analysis of the topologies of active balancers, it was proposed to additionally classify active balancers by a new classification feature, namely by the way energy flows between cells. The improved topology of the active balancer proposed in this study provides additional balancing at the module level and allows flexible change of the balancing method to speed it up and increase reliability. Modeling of the balancing speed for different active balancer topologies helped to confirm the effectiveness of the proposed topology.

Keywords: electric vehicle, cell, multi-module battery, active balancing, passive balancing, battery management system.

REFERENCES

1. Leippi A., Fleschutz M., Murphy M. D. A review of ev battery utilization in demand response considering battery degradation in non-residential vehicle-to-grid scenarios, *Energies (Basel)*, 2022, vol. 15, no. 9, 3227. <https://doi.org/10.3390/en15093227>
2. Lipko D., Manzhelii A., Yamenko I., Bondarenko O. Possibilities and challenges of partially using a charge-discharge cycle of battery to increase its resource. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*. Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1–5, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312983>
3. Ayuso P., Beltran H., Segarra-Tamarit J., Pérez E. Optimized profitability of LFP and NMC Li-ion batteries in residential PV applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, vol. 183, pp. 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.02.011>
4. Nikolian A., Jaguemont J., de Hoog J. et al. Complete cell-level lithium-ion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (–5 °C to 45 °C) – Optimized modelling techniques. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 133–146, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.031>
5. Miao Y., Hynan P., Von Jouanne A., Yokochi A. Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, 1074. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
6. Rastegarpanah A., Ahmeid M., Marturi N. et al. Towards robotizing the processes of testing lithium-ion batteries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, vol. 235, no. 8, pp. 1309–1325. <https://doi.org/10.1177/09596518211998599>
7. Pedro L. Comparison of different EV batteries in 2020. *PushEVs.com* [Electronic resource], April 4, 2020, Regime of access: <http://surl.li/tqich>
8. Kryvosheiev S., Styslo B., Makarov V. et al. Cell equalizer for series-connected lithium batteries. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, 2018, vol. 732–733, pp. 145–150. <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559537>
9. Caspar M., Eiler T., Hohmann S. Comparison of active battery balancing systems. *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Coimbra, Portugal, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2014.7007027>
10. Jiang B., Liu Y., Huang X., Prakash R. R. R. A new battery active balancing method with supercapacitor considering regeneration process. *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2020, pp. 2364–2369, <https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254839>
11. Qi J., Lu D. D.-C. Review of battery cell balancing techniques. *2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Perth, WA, Australia, 2014, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966514>
12. Daowd M., Omar N., Van Den Bossche P., Van Mierlo J. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043010>
13. Ghaeminezhad N., Ouyang Q., Hu X. et al. Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review. *IEEE Trans Power Electron*, 2021, vol. 36, no. 8, pp. 9119–9135. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3052163>
14. Kim C.-H., Kim M.-Y., Park H.-S., Moon G.-W. A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV. *IEEE Trans Power Electron*, 2012, vol. 27, no. 8, pp. 3764–3774. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2185248>
15. Cao J., Schofield N., Emadi A. Battery balancing methods: A comprehensive review. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, 2008, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677669>
16. Ceylan M., Balikci A. An intermodular active balancing topology for efficient operation of high voltage battery packs in Li-ion based energy storage systems: Switched (flying) DC/DC converter. *Energies (Basel)*, 2023, vol. 16, no. 15. <https://doi.org/10.3390/en16155608>
17. Zhang F., Rehman M. M. U., Zane R., Maksimovic D. Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles. *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, vol. 27, no. 8, pp. 578–583. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8095835>
18. Ziegler A., Oeser D., Hein T., Ackva A. Development and application of an active balancing system for lithium-ion cells. *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952317>
19. Kim C.-H., Kim Y.-D., Moon G.-W., Park H. Individual cell voltage equalizer using selective two current paths for series connected li-ion battery strings. *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 1812–1817. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316213>
20. Lee S. W., Lee K. M., Choi Y. G., Kang B. Modularized design of active charge equalizer for Li-ion battery pack. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 11, pp. 8697–8706. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2813997>
21. Elvira D. G., Blaví H. V., Moncusí J. M. B. et al. Active battery balancing via a switched DC/DC converter: Description and performance analysis. *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771697>
22. Pham V.-L., Duong V.-T., Choi W. High-efficiency active cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery modules using LLC resonant converter. *Journal of Power Electronics*, 2020, vol. 20, pp. 1037–1046. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00088-6>