

І. З. Щур,

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки і комп’ютеризованих електромеханічних систем,
ihor.z.shchur@lpnu.ua

І. Є. Біляковський,

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки і комп’ютеризованих електромеханічних систем,
ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua

Б. М. Харчишин

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електромехатроніки і комп’ютеризованих електромеханічних систем,
bohdan.m.kharchyshyn@lpnu.ua

ФОРМУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОВОЛЬТНИХ МОДУЛІВ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ

<http://doi.org/10.23939/sepes2022.01.088>

© Щур І. З., Біляковський І. Є., Харчишин Б. М., 2022

У сучасних автономних системах електричного живлення, зокрема для електричних транспортних засобів, часто застосовують акумуляторні батареї (АБ) як джерела енергії та суперконденсаторні (СК) модулі як джерела потужності. Щоб забезпечити необхідний рівень бортової напруги, ці засоби містять велику кількість низьковольтних комірок, роботу яких супроводжують непрості електронні системи енергетичного менеджменту (СЕМ). Спрощення роботи таких систем, зниження їх вартості, а також забезпечення низки інших переваг енергетично-тягових систем транспортних засобів можна досягти, застосувавши модульний підхід як до побудови двигунів із відповідними системами керування, так і до їх електричного живлення. У статті викладено результати формування та дослідження низьковольтних (12–16 В) модулів Li-Ion АБ та СК-модулів для побудови модульних систем електричного живлення транспортних засобів. Роботу розпочато із вимірювання основних параметрів – ємності та внутрішнього опору – для достатньо великої кількості однотипних Li-Ion та СК-комірок. У результаті подальшого відбору (скринінгу) комірок із подібними параметрами створено відповідні низьковольтні модулі. Їх функціонування досліджували в зарядно-розрядних циклах зі сталими значеннями струму, порівнюючи напруги на послідовно увімкнених елементах чи групах паралельно увімкнених елементів як із використанням спеціальних електронних плат СЕМ, так і без них, а також для випадків цілеспрямованого скринінгу комірок із подібними параметрами та довільного їх вибору. Дослідження низьковольтних модулів Li-Ion АБ показали, що у разі застосування спеціальної плати СЕМ підбирати параметри

елементів для їх паралельно-послідовного з'єднання не потрібно. Проте скринінг Li-Ion комірок за схожими основними параметрами у низьковольтних модулях дає подібні результати навіть без застосування СЕМ. У СК-модулях функцію пасивного балансування зарядів СК-комірок добре виконує проста захисна електронна плата, проте лише за повного заряджання комірок. Для активного балансування необхідні складніші й дорожчі СЕМ. Однак у випадку низьковольтного СК-модуля із відібраними СК-комірками з подібними параметрами відбувається самовирівнювання напруг шести послідовно з'єднаних СК-груп із двома паралельно з'єднаними СК-комірками в кожній групі. Отже, скринінг енергетичних комірок є дієвим підходом для створення простіших та дешевших низьковольтних Li-Ion АБ та СК-модулів.

Ключові слова: *Li-Ion елемент; суперконденсатор; скринінг енергетичних комірок; акумуляторна батарея; суперконденсаторний модуль; балансування зарядів; система енергетичного менеджменту.*

Постановка проблеми

Заміна автомобілів екологічно чистими повними електромобілями у наш час стримується лише проблемами, пов'язаними з бортовими системами енергетичного живлення (СЕЖ), найкращими з яких є акумуляторні батареї (АБ) [1]. До цих проблем належать порівняно низький термін служби АБ, їх висока вартість, тривалість заряджання, температурна залежність, скорочення доступних зарядно-розрядних циклів за високої потужності розряджання та заряджання, необхідність моніторингу та вирівнювання зарядів окремих комірок чи модулів АБ за допомогою непростих систем енергетичного менеджменту (СЕМ) [2].

Актуальність дослідження

Вирішення частини із вказаних проблем можливе завдяки поєднанню у бортовій СЕЖ двох чи більше джерел енергії із різними властивостями. Серед гібридних СЕЖ найпоширеніше поєднання АБ та суперконденсаторів (СК) [3]. Завдяки низькому внутрішньому опору СК можуть заряджатися і розряджатися великими струмами, тому в них приблизно на порядок вища, ніж АБ, питома потужність [4]. Крім того, у СК на два порядки більша, ніж АБ, кількість зарядно-розрядних циклів, а характеристики стабільні у широкому діапазоні робочих температур [5]. Поєднання у гібридних СЕЖ АБ та СК, об'єднаних у СК-модулі (СКМ), дає змогу забезпечувати за рахунок останнього великі потужності систем електроприводів електромобілів, що істотно полегшує роботу АБ і тим самим збільшує їх термін служби [6, 7]. Отже, дослідження та розроблення гібридних СЕЖ для електромобілів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для побудови бортових СЕЖ електричних транспортних засобів застосовують АБ різних типів, проте найчастіше тягові свинцево-кислотні АБ, нікель-металогідридні АБ та АБ літєвої групи [2]. Серед перелічених останні мають найвищі питомі масові показники енергії та потужності, тому їх і застосовують у СЕЖ переважно самостійно. Проте висока вартість літєвих АБ та порівняно мала кількість зарядно-розрядних циклів стримують розвиток електричних транспортних засобів [7]. Ці причини зумовлюють доцільність застосування СК-модулів як джерел потужності в гібридних СЕЖ разом із літєвими АБ [8]. Як показано в низці досліджень [8–10], додаткові затрати на СК-модулі в бортових гібридних СЕЖ окуповуються завдяки зменшенню встановленої ємності АБ та збільшенню їх терміну служби.

І АБ, і СК-модулі складаються із великої кількості окремих елементів із низькою фіксованою для кожного типу напругою. Наприклад, напруга одного Li-Ion елемента міститься у межах 2,8–4,2 В, а напруга СК змінюється від нуля до номінального рівня близько 2,7 В залежно від ступеня його зарядженості (англ. *State Of Charge – SOC*) [2, 3]. Для отримання потрібних робочих напруг АБ

та СК-модулів відповідну кількість низьковольтних елементів з'єднують послідовно, а для досягнення потрібної енергетичної ємності – ще й паралельно. Усі ці елементи чи їх групи заряджаються та розряджаються спільним для них струмом. У випадках неминучого розкиду параметрів окремих елементів та неоднакового початкового SOC окремих елементів такі циклічні процеси зумовлюють все більше відхилення між зарядами і напругами елементів. Це призводить до неповного використання їх робочої енергетичної ємності та можливого перерозрядження чи перезарядження, що стрімко знижує термін служби окремих елементів. Щоб запобігти цим негативним проявам, застосовують СЕМ – спеціальні електронні схеми, які здійснюють тим чи іншим способом (пасивним чи активним) балансування зарядів елементів чи їх груп та захищають їх від нештатних напругових чи струмових режимів [11]. Зростання кількості послідовно з'єднаних елементів у АБ та СК-модулях ускладнює процеси балансування їх зарядів та збільшує вартість СЕМ.

Якщо напруга АБ залежно від ступеня зарядженості батареї змінюється незначно, то в СК-модулі, як і в будь-якому конденсаторі, спостерігається квадратична залежність нагромадженої енергії від напруги. Тому для об'єднання АБ та СК-модулів у гібридних СЕЖ існують різні схеми, які поділяють на пасивні, напівактивні та активні [8, 9]. Для вирівнювання та/чи регулювання напруг у гібридних СЕЖ застосовують DC-DC перетворювачі різних топологій [12].

Останнім часом сформувався новий напрям щодо побудови енергетично-тягових систем електричних транспортних засобів, який ґрунтується на концепції модульності [13, 14], яка може передбачати модульність бортових СЕЖ, модульність електричних машин, а також модульність силового інтерфейсу між ними – напівпровідникових перетворювачів модульної, багаторівневої та каскадної топологій [14–16]. Серед цих складових енергетично-тягових систем модульність бортових СЕЖ має вагомі переваги над традиційними бортовими СЕЖ. Низьковольтні модулі АБ та СК-модулі (48–60 В) істотно підвищують відмовостійкість СЕЖ, енергетичну ефективність системи електроприводу та безпеку в обслуговуванні чи під час аварій. Крім того, завдяки модульній СЕЖ забезпечується можливість багаторівневого керування напругою двигуна, із дискретним регулюванням кількості послідовно ввімкнених модулів із ШІМ-регулюванням лише в одному з них, що зменшує втрати в системі електроприводу, покращує умови роботи силових напівпровідникових ключів, зменшує їх вартість та знижує рівень високочастотних завад [14].

Модульний підхід також відкриває нові можливості щодо конфігурування енергетично-тягових систем електричних транспортних засобів [16, 17]. Нові конфігурації уможливають живлення обмоток електричних двигунів чи їх обмоткових модулів від різних типів модулів електричного живлення залежно від режиму роботи транспортного засобу, що підвищує енергетичну ефективність електроприводу та збільшує термін служби АБ. Крім того, надмірність каналів керування модулями силового інтерфейсу дає змогу розширити функції СЕМ та здійснювати вирівнювання зарядів у окремих модулях СЕЖ під час роботи системи електроприводу.

Балансування SOC є необхідним завданням СЕМ у будь-якій АБ чи СК-модулі з послідовним з'єднанням елементів. Проте ступінь балансування та, відповідно, енергетичні й матеріальні затрати на балансування можна істотно знизити завдяки скринінгу комірок із близькими параметрами, з метою формування АБ чи СК-модуля.

Мета роботи

Мета роботи – побудова низьковольтних (до 20 В) модулів Li-Ion АБ та СК-модулів на основі відбирання відповідних комірок з подібними основними параметрами, а також експериментальні дослідження роботи створених модулів у розрядно-зарядних режимах з метою визначення необхідності та ступеня складності реалізації електронних систем для балансування зарядів комірок у модулях.

Виклад основного матеріалу

Експериментальне дослідження основних параметрів Li-Ion та СК-комірок

Для досліджень було придбано 60 нових Li-Ion елементів фірми Westinghouse ємністю 4500 мА·год (рис. 1, а) та 40 СК-комірок BIGCAP (рис. 1, б), основні параметри яких наведено в таблиці.



Рис. 1. Li-Ion (а) та СК (б) комірки, з якими виконували дослідження

Li-Ion комірки. За рекомендаціями, обґрунтованими в [18], у цій роботі застосовано два процеси скринінгу комірок: скринінг ємності та скринінг внутрішнього опору в межах групи. На першому етапі скринінгу відібрали комірки із близькими середніми значеннями енергетичної ємності. На другому етапі – комірки із близьким значенням внутрішнього опору, але використовували комірки, відібрані на першому етапі скринінгу. Після двох етапів остаточно відбирали комірки із подібними електрохімічними характеристиками. Їх можна використовувати для конфігурації Li-Ion АБ.

Основні параметри досліджуваних Li-Ion та СК-комірок

Параметр	Li-Ion елемент	СК-комірка
Виробник	Westinghouse	ROTHER Technologies
Розміри	26×65 мм (26650)	18×45 мм
Номінальна ємність	4500 мА·год	100 Ф
Напруга номінальна	3,7 В	2,8 В
Напруга повного заряду	4,2 В	2,8 В
Напруга повного розряду	2,8 В	0 В
Кількість циклів заряд/розряд	500 (за сили струму 1С)	500000
Максимальна тривала струмовіддача	5 А	10 А
Вага	90 г	22 г

Скринінг ємностей Li-Ion комірок. Виробництво постачає комірки із 40 % зарядом, що забезпечує їх довготривале зберігання. Для попереднього повного заряджання комірок використано два зарядні пристрої фірми LiitoKala (рис. 2, а). Такий пристрій заряджає комірки спочатку постійним струмом до певного значення заряду, а далі постійною напругою до повного заряду.

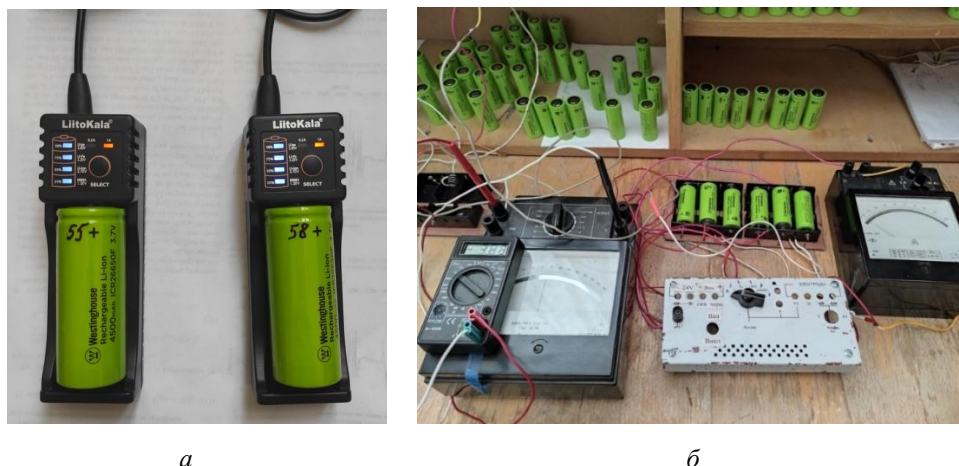


Рис. 2. Два використані зарядні пристрої фірми LiitoKala (а) та фото з місця дослідження (б)

Для вимірювання значення ємності під час першого процесу скринінгу усі комірки розряджались сталим струмом значенням 2,5 А. Щоб прискорити дослідження, виготовили стенд, у якому одночасно розряджались шість комірок, з'єднаних послідовно (рис. 2, б). Комірки поступово розряджались, а їх напругу періодично контролювали цифровим вольтметром. Для кожної комірки фіксували момент часу, за якого напруга комірки досягла 3,5 В, як час початку розряджання, та момент часу, коли напруга досягла 3,0 В – як кінцевий час розряду. За різницею часу відбирали комірки із близькими значеннями часу розряду.

Схему для розряджання комірок зображено на рис. 3. Вона складається із таких компонентів: шести послідовно з'єднаних Li-Ion елементів Б1 – Б6, вольтметра V для вимірювання їх напруг за допомогою шестиступінчастого перемикача S1, амперметра A для контролю струму розряджання, реостата R5, яким задавали потрібне значення опору в колі, блока живлення БЖ і ключа S2, який замикав коло. Для стабілізації струму розряджання застосовано блок живлення PS-305D фірми DAZHENG, який дає змогу працювати як у режимі стабілізації заданої напруги, так і в режимі стабілізації заданого струму. У дослідженні використано режим стабілізації заданого струму розряджання шести комірок, які підключали до БЖ.

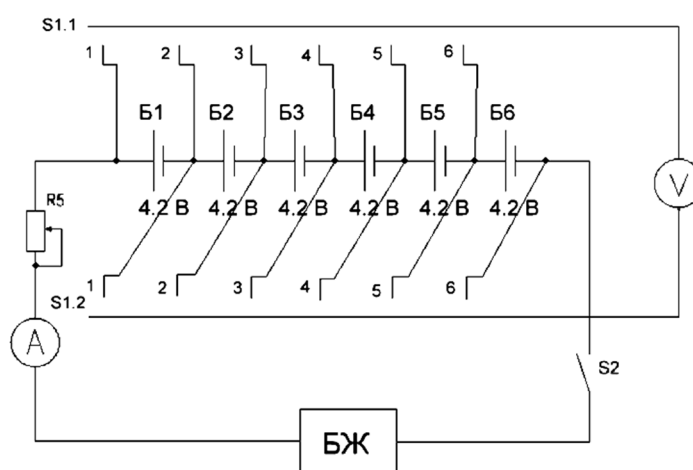


Рис. 3. Схема стенда групового розряджання/заряджання Li-Ion комірок на першому етапі процесу скринінгу

Для візуалізації отриманих результатів побудовано гістограму (рис. 4), яка показує кількості відібраних комірок, згрупованих за часом розряджання t_p у межах інтервалів тривалістю в 1 хв (по

осі абсцис показано ці інтервали у форматі год хв). Найбільше комірок (13 шт.) потрапило в інтервал часу розрядження 1 год 13 хв – 1 год 14 хв.

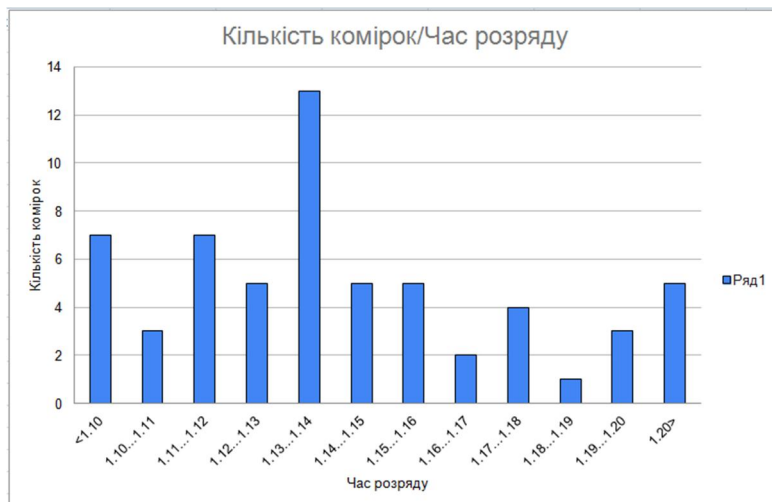


Рис. 4. Гістограма кількості комірок у певному проміжку часу розрядження

Скринінг внутрішніх опорів Li-Ion комірок. Під час другого процесу скринінгу із комірок групи з близькими значеннями ємності відбирали комірки із близькими значеннями внутрішнього опору. Для цього для кожної комірки вимірювали напругу неробочого ходу і напругу під навантаженням 4 А. Різниця між цими напругами, поділена на струм навантаження, визначає значення внутрішнього опору. Схема для вимірювання внутрішнього опору складалася із блока живлення PS-305D, який забезпечував стабільний струм навантаження 4 А, вольтметра, увімкненого паралельно з коміркою, амперметра, реостата і ключа, який дає змогу підключати навантаження.

За результатами вимірювання внутрішніх опорів усіх Li-Ion комірок було сформовано комплекти по три елементи (тріади) із близькими значеннями внутрішнього опору, причому отримали дві групи таких тріад, як з близькими відібраними на першому етапі скринінгу ємностями, так і з відмінними. Три елементи кожної тріади надалі з'єднували паралельно, а їх однакові внутрішні опори сприяли рівномірнішому розподілу струмів по елементах.

СК комірки. Як і для Li-Ion комірок, скринінг СК-комірок здійснювали за двома їх основними параметрами – електричною ємністю та еквівалентним послідовним внутрішнім опором – *equivalent series resistance*, ESR [19]. Проте у цьому випадку для кожної СК-комірки вказані параметри визначали в одному досліді циклічного заряджання та розряджання СК. Для цього застосували спеціально розроблений та виготовлений прилад із мікроконтролерним керуванням (рис. 5). Прилад забезпечує стабілізацію заданого струму та циклічно змінює його знак на протилежний у разі досягнення заданих значень максимальної та мінімальної напруг. Мікроконтролеру на початку задавали ці значення, а також кількість необхідних циклів дослідження.



Рис. 5. Прилад для дослідження параметрів СК

У такому виконанні приладу максимальне значення струму не повинно перевищувати 1 А, що обмежено умовами охолодження транзисторів джерела струму. Враховуючи велику тривалість зарядно-розрядних процесів таким струмом, запис напруги здійснювали на комп'ютері за допомогою спеціальної вимірювальної карти. Один із результатів експерименту подано на рис. 6.

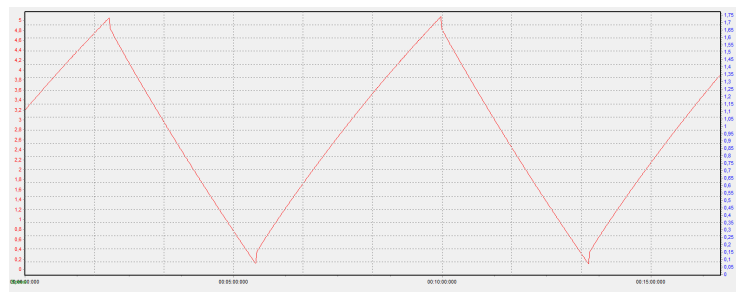


Рис. 6. Осцилограма напруги дослідного СК у зарядно-розрядних циклах зі струмом 1А

За наведеною на рис. 6 осцилограмою знаходили необхідні параметри СК-комірки:

– середню ємність у процесах заряджання C_l та розряджання C_r

$$C = \frac{C_l + C_r}{2} = \frac{|I_l|}{2} \times \frac{\Delta U_l}{\Delta U_r} + \frac{D_r}{D_l} \cdot \frac{\Delta U_l}{\Delta U_r}$$

– еквівалентний послідовний опір (ESR)

$$ESR = \frac{\Delta U}{2|I_l|}$$

де I_l – заданий стабілізований струм заряду і розряду; ΔU_l та ΔU_r – час заряджання та розряджання, відповідно; $\Delta U_l = \Delta U_r$ – задана мікроконтролеру різниця напруг між змінами режимів заряджання/розряджання СК; ΔU – стрибок напруги під час перемикавання режимів.

Результати досліджень подано у вигляді загальних гістограм для кожного із досліджуваних параметрів на рис. 7. Проте кожен СК характеризувався певними значеннями ємності та ESR, за якими можна формувати відповідні їх групи залежно від з'єднань у модулі.

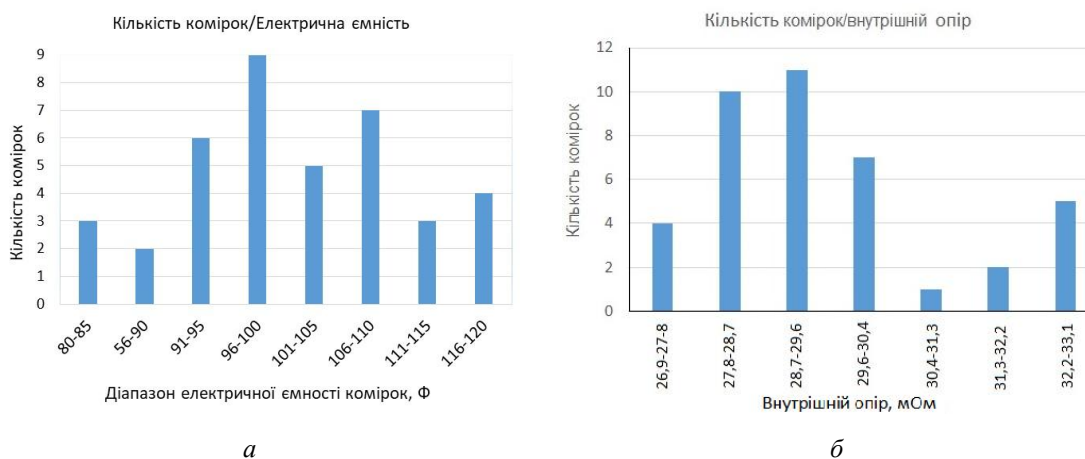


Рис. 7. Гістограми розподілу СК-комірок за їх ємністю (а) та ESR (б)

Виготовлення та дослідження модулів Li-Ion АБ

Для подальших досліджень було зібрано чотири модулі Li-Ion АБ, кожен із яких складався із дев'яти Li-Ion елементів, з'єднаних за схемою 3S3P (три групи, з'єднані послідовно, кожна з яких

складається із трьох елементів, з'єднаних паралельно), як показано на рис. 8. Для з'єднань елементів застосовували спеціальну нікелеву шину завширшки 8 мм і завтовшки 0,15 мм. Щоб уникнути пошкодження елементів, контактне зварювання шини з електродами замінили на магнітне, використавши неодимові (NdFeB) магнітні диски, діаметр яких 6 мм і товщина 2 мм. Сили, створюваної таким магнітом, цілком достатньо для забезпечення надійного електричного контакту шини з електродом елемента. Кожен модуль було надійно зафіксовано в спеціальному контейнері, який унеможлиблював рух елементів у модулі.

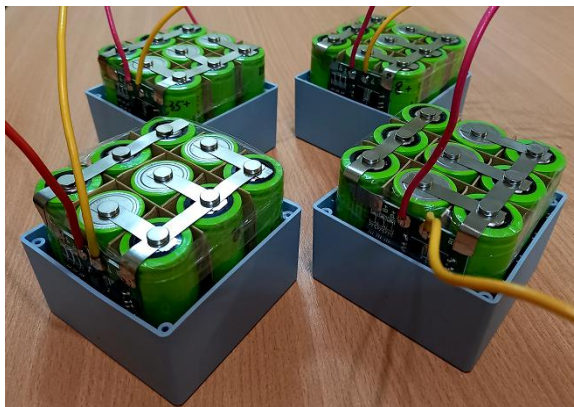


Рис. 8. Чотири виготовлені модулі Li-Ion АБ із платами BMS

Для побудови АБ використана спеціальна плата СЕМ (*battery management system* – BMS) HX-3S-FL25A-A, призначена для захисту Li-Ion АБ, складених із трьох послідовно з'єднаних груп елементів типу 18650, балансування ємностей цих груп, а також моніторингу їх стану (рис. 9, а) [20]. Застосування цієї плати забезпечує правильне та безпечне функціонування елементів та запобігає нештатним режимам роботи, виконуючи захист від перенапруг у процесах заряджання, захист від короткого замикання та захист від перезаряджання і перерозряджання АБ [20].

На рис. 9, б наведено схему підключення плати BMS HX-3S-FL25A-A до трьох послідовно з'єднаних Li-Ion елементів. Оскільки плата розрахована на струм споживання до 25А, то в АБ можна послідовно з'єднати три групи, складені із паралельно з'єднаних декількох елементів. Робоча напруга отриманого у такий спосіб модуля АБ – у діапазоні від 9,0 до 12,6 В.

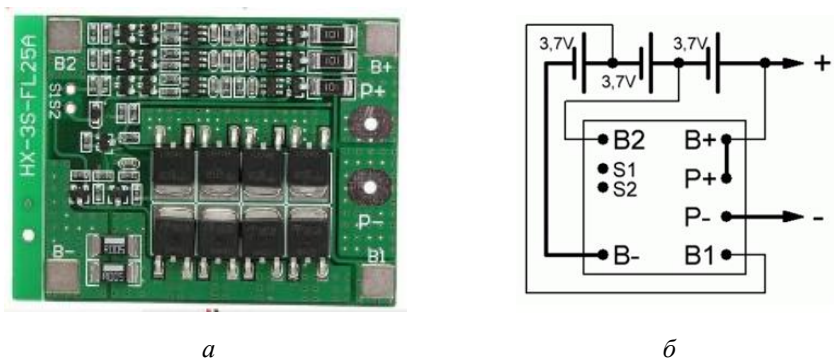


Рис. 9. Зовнішній вигляд плати BMS HX-3S-FL25A-A (а)
та схема її з'єднання з трьома Li-Ion елементами [20]

Створені модулі Li-Ion АБ досліджували в режимах їх заряджання та розряджання. Схема для дослідження цих процесів складалася із блока живлення PS-305D, який забезпечував стабільний струм навантаження 4,5 А, вольтметра, який по чергові підключався паралельно до кожної групи

комірок, амперметра, реостата і ключа, який давав змогу підключати навантаження та змінювати режими із заряджання на розряджання. Протягом заряджання/розряджання Li-Ion модуля АБ фіксували напруги на трьох послідовно з'єднаних тріадах комірок, як показано на рис. 10.

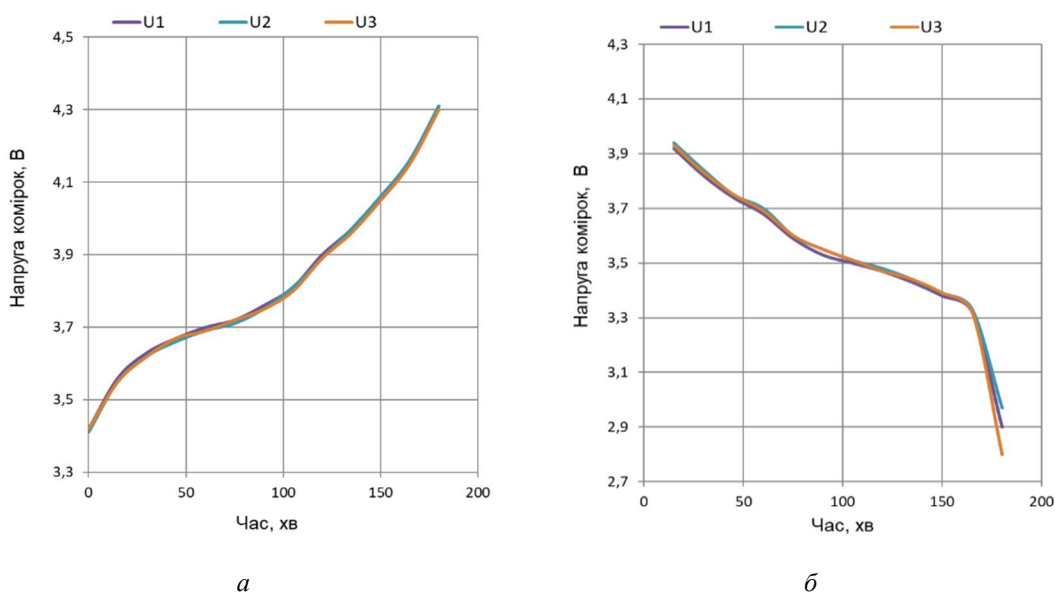


Рис. 10. Напруги на трьох послідовно з'єднаних тріадах Li-Ion комірок, отримані експериментально під час заряджання (а) і розряджання (б) Li-Ion модуля АБ струмом 4,5 А

За результатами аналогічних досліджень із кожним сформованим модулем Li-Ion АБ можна зробити такі висновки:

- під час дослідження роботи модулів АБ без плати BMS, у модулях, складених з комірок з близькими значеннями ємностей, розходження напруг послідовно з'єднаних тріад елементів істотно менше, ніж у випадку довільно вибраних ємностей комірок;
- застосування плати BMS значно зменшує розходження напруг послідовно з'єднаних тріад елементів;
- розходження напруг послідовно з'єднаних тріад елементів для випадків підібраних ємностей елементів і роботи модуля без плати BMS та довільно вибраних ємностей елементів за наявності плати BMS є приблизно однаковими.

Формування та дослідження СК-модулів

Для досліджень використано три СК-модулі із близькими номінальними напругами, які відрізнялися типом СК-елементів, сумарною ємністю та наявністю засобів для захисту і балансування комірок.

Перший СК-модуль було придбано в зборі (рис. 11, а). Він складається із шести послідовно з'єднаних СК ємністю 500 Ф та номінальною напругою 2,7 В фірми GDCPH типу CH18124. Отже, ємність першого СК-модуля становила $500/6 = 83,3$ Ф, а його максимальна напруга $2,7 \times 6 = 16,2$ В. Для захисту від перенапруг та балансування SOC окремих СК застосовано спеціальну плату із компараторами, транзисторними ключами й опорами (рис. 11, б). Експерименти показали, що ця плата лише захищає СК від перезаряджання: у разі досягнення якимось із СК напруги 2,65 В компаратор спрацьовує і транзистор замикає СК на свій розрядний опір. Розряджання конкретного СК відображається свіченням свого світлодіода. Після розряджання СК до напруги 2,6 В транзистор відключає опір від СК.



а



б

Рис. 11. Перший СК-модуль із шести послідовно з'єднаних СК (а), встановлених на платі захисту і балансування (б)

Другий модуль (рис. 12) сформовано з 18 СК типу BIGCAP ємністю 100 Ф та номінальною напругою 2,8 В (див. табл. 1), з'єднаних за схемою 6S3P (шість СК-груп, з'єднаних послідовно, кожна з яких складається із трьох СК, з'єднаних паралельно). Для формування модуля СК-комірки вибирали довільно, не беручи до уваги їх параметри. Сумарна ємність такого СК-модуля становить $3 \times 100 / 6 = 50$ Ф, а його максимальна напруга $2,8 \times 6 = 16,8$ В. Для захисту від перенапруг та балансування SOC окремих СК тут також застосовано спеціальну плату з компараторами, транзисторними ключами та опорами, яка працює аналогічно до попередньої.

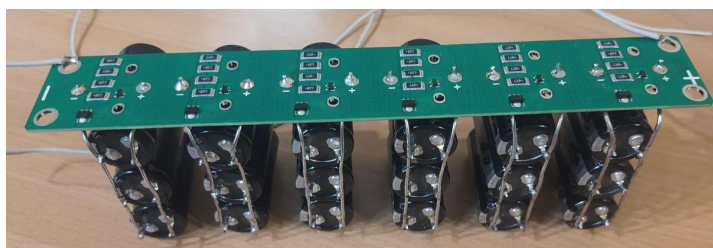


Рис. 12. Другий дослідний СК-модуль із платою захисту і балансування

Третій СК-модуль (рис. 13) складався із 12 таких самих, як і в другому модулі, СК-елементів, з'єднаних за схемою 6S2P. Для паралельного з'єднання підбирали СК з близькими значеннями ESR, а для послідовного – із близькими значеннями ємності. Ємність такого СК-модуля становила $2 \times 100 / 6 = 33,3$ Ф, а максимальна напруга $2,8 \times 6 = 16,8$ В. На відміну від двох попередніх, у цьому модулі балансування SOC окремих СК-груп не відбувалося, а досягнення ними в ході експериментів допустимої напруги 2,8 В контролювали за допомогою вольтметра.

Методика дослідження СК-модулів була такою.

Для дослідження процесів заряджання і розряджання СК-модулів складали схему, в яку входили блок живлення PS-305D, що забезпечував стабільний заданий струм навантаження до 4,5 А, вольтметр для оперативного вимірювання напруги на кожній з СК груп, амперметр і ключ, який давав змогу підключати навантаження та змінювати режими із заряджання на розряджання. Процеси заряджання/розряджання для кожного із трьох СК-модулів здійснювалися заданим стабільним струмом. Через наперед задані однакові періоди часу процес заряджання/розряджання короткочасно призупинявся для вимірювання напруг на кожній з СК груп без струму.



Рис. 13. Третій дослідний СК-модуль

У перших двох модулях під час їх заряджання після досягнення якоюсь із груп максимальної напруги 2,7 В у платі захисту і балансування спрацював компаратор цієї групи, який підключав до неї опір навантаження. СК-група розряджалася на цей опір, тоді як інші групи продовжували заряджатися. Якщо заряджання триватиме далі, то усі СК-групи модуля зарядяться до максимальної напруги, що забезпечить вирівнювання їх зарядів. Результати досліджень першого і другого модулів під час одного з циклів заряджання/розряджання подано на рис. 14 і 15, відповідно. Вони свідчать про високий ступінь рівності зарядів окремих СК-комірок чи СК-груп у модулі, особливо в першому модулі, де СК краще підібрані за ємністю (якісніший та дорожчий тип СК).

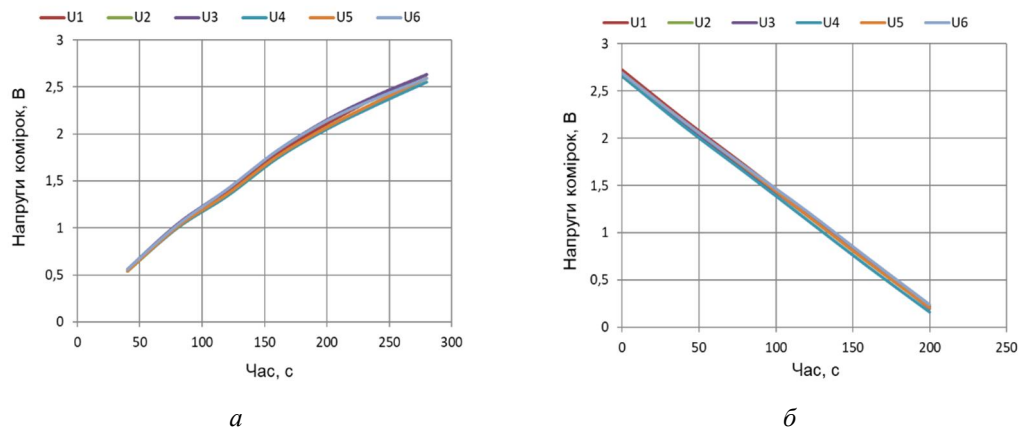


Рис. 14. Напруги на шести послідовно з'єднаних СК-комірках, отримані експериментально під час заряджання (а) і розряджання (б) першого СК-модуля струмом 4,16 А

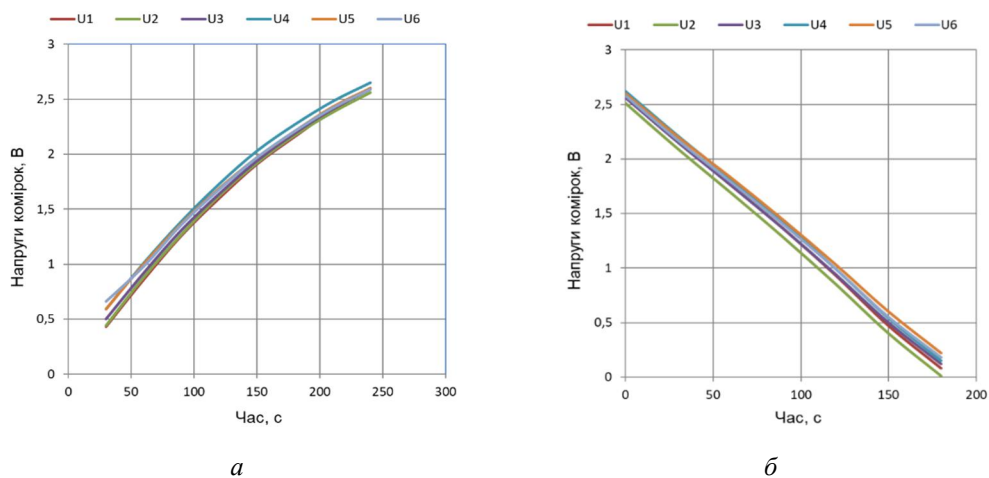


Рис. 15. Напруги на шести послідовно з'єднаних СК-групах, отримані експериментально під час заряджання (а) і розряджання (б) другого СК-модуля струмом 3,3 А

Для третього СК-модуля, без балансування зарядів окремих СК-груп, здійснено п'ять циклів розрядження/зарядження та розраховано відхилення напруг СК-груп від середнього їх значення у кінці циклу, в зарядженому стані. Ці відхилення вказано залежно від номера циклу на рис. 16. Як видно з отриманих результатів, зі зростанням кількості циклів відхилення напруг СК-груп від середнього їх значення не зростає, а, навпаки, дещо знижується. Це свідчить про деяке самовирівнювання зарядів у шести послідовно з'єднаних групах із двома паралельно з'єднаними СК-комірками в кожній групі.

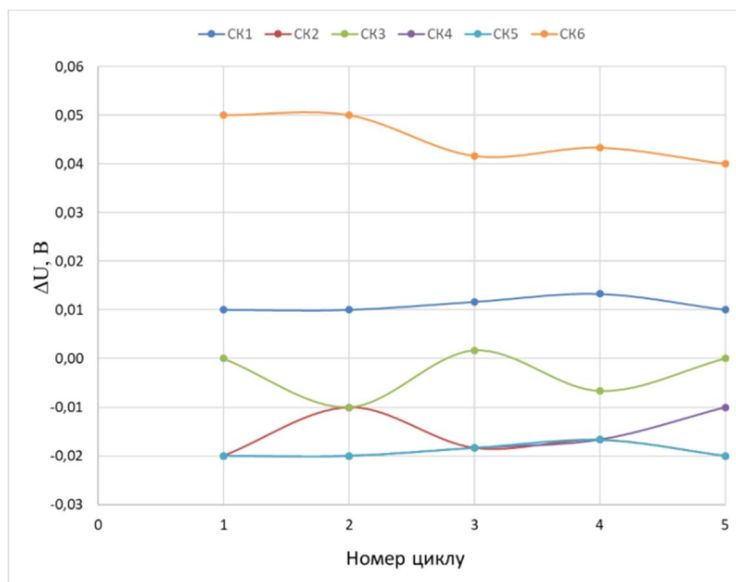


Рис. 16. Відхилення напруг шести СК-груп від середнього їх значення у кінці циклу розрядження/зарядження залежно від послідовного номера циклу

Висновки та перспективи подальших досліджень

Формування модулів Li-Ion АБ та СК-модулів із послідовно-паралельним з'єднанням елементів із близькими значеннями ємності та внутрішнього опору у випадку низьковольтних модулів (12–16 В) забезпечує позитивний результат щодо рівності зарядів послідовно з'єднаних груп елементів та дає змогу відмовитися від застосування додаткових електронних систем балансування напруг чи зарядів.

Використання у модулі Li-Ion АБ плати BMS дає добрі результати щодо балансування зарядів елементів навіть за значного відхилення їх основних параметрів.

Застосування простої та недорогої плати захисту та балансування напруг СК-комірок чи їх груп доцільне лише у випадках частого повного зарядження СК-модуля, коли й відбувається пасивне вирівнювання напруг. У разі нечастого повного зарядження, що частіше трапляється в системах автономного живлення транспортних засобів, для балансування зарядів СК-комірок необхідні досконаліші системи активного типу, які працюють постійно, що, звичайно, збільшує втрати енергії в ключах, підвищує вартість електронної системи балансування, а за великої кількості послідовно з'єднаних комірок ще й збільшує тривалість балансування. Вихід з цієї ситуації – застосування низьковольтних СК-модулів. У роботі зафіксовано самовирівнювання напруг шести послідовно з'єднаних СК-груп із двома паралельно з'єднаними комірками в кожній групі. Для побудови цього модуля підбирали СК-комірки з подібними параметрами: ESR для паралельно з'єднаних комірок та ємність для послідовно з'єднаних. Це явище потребує детального дослідження, яке ми плануємо здійснити.

Список літератури

1. Skouras T. A., Gkonis P. K., Ilias C. N., Trakadas P. T., Tsampasis E. G., Zahariadis T. V. *Electrical vehicles: current state of the art, future challenges, and perspectives. Clean Technologies*, 2020, Vol. 2, pp. 1–16. DOI: 10.3390/cleantechnol2010001.

2. Hannan M. A., Hoque M. M., Mohamed A., Ayob A. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 69, pp. 771–789. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.171.
3. Hemmati, R., Saboori, H. Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 65, pp. 11–23. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.029.
4. Tie S. F., Tan C. W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, Vol. 20, pp. 82–102. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.077.
5. Zhang L., Hu X., Wang Z., Sun F., Dorrell D. G. A review of supercapacitor modeling estimation and applications: a control/management perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 81, pp. 1868–1878. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.283.
6. Zhang C., Wang D., Wang B., Tong F. Battery degradation minimization-oriented hybrid energy storage system for electric vehicles. *Energies*, 2020, Vol. 13, 246. DOI: 10.3390/en13010246.
7. Han X., Lu L., Zheng Y., Feng X., Li Z., Li J., Ouyang M. A review on the key issues of the lithium-ion battery degradation among the whole life cycle. *eTransportation*, 2019, Vol. 1, 100005. DOI: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
8. Kachhwaha A., Rashed G. I., Garg A. R., Mahela O. P., Khan B., Shafik M. B., Hussien M. G. Design and performance analysis of hybrid battery and ultracapacitor energy storage system for electrical vehicle active power management. *Sustainability*, 2022, Vol. 14, 776. DOI: 10.3390/su14020776.
9. Kim Y., Raghunathan V., Raghunathan A. Design and management of battery-supercapacitor hybrid electrical energy storage systems for regulation services. *IEEE Trans. Multi-Scale Computing Systems*, 2017, Vol. 3, No. 1, pp. 12–24. DOI: 10.1109/TMSCS.2016.2627543.
10. Jing W., Lai C. H., Wallace Wong S. H., Dennis Wong M. L. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. *IET Renew. Power Gener.*, 2017, Vol. 11, Iss. 4, pp. 461–469. DOI: 10.1049/iet-rpg.2016.0500.
11. Kim C., Kim M., Kim Y., Moon G. A modularized charge equalizer using battery monitoring IC for series connected Li-Ion battery strings in an electric vehicle. *Proc. 8th Int. Conf. Power Electronics – ECCE Asia*, 2011, pp. 304–309. DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944609.
12. Shchur I., Bilyakovskyy I., Turkovskiy V. Improvement of switched structure semi-active battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *IET Electr. Syst. Transp.*, 2021, Vol. 11(3), pp. 241–255. DOI: 10.1049/els2.12017.
13. Stippich A., van der Broeck C. H., Sewergin A., Wienhausen A. H. Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles. *CPSS Trans. Power Electronics and Applications*, 2017, Vol. 2, is. 4, pp. 249–258. DOI: 10.24295/CPSSPEA.2017.00023.
14. Shchur I., Turkovskiy V. Integrated system of modular power supply and multilevel control of brushless DC motor for electric vehicles. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, Vol. 6, P. 107–115. DOI: 10.33271/nvngu/2020-6/068.
15. Shchur I., Biletskyi Y. Passivity-based control of hybrid energy storage system with common battery and modular multilevel DC-DC converter-based supercapacitor packs. *Proc. 2019 IEEE 20th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Sept. 15–18, 2019, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 1–6. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949174.
16. Shchur I., Turkovskiy V. Open-end winding dual three-phase BLDC motor drive system with integrated hybrid battery-supercapacitor energy storage. *Proc. 2021 IEEE 20th Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Sept. 21–24, 2021, Kremenchuk, Ukraine, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598697.
17. Shchur I., Turkovskiy V., Boichuk B. Dual battery powered drive system using an open-end winding brushless DC motor. *Proc. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2021)*, August 26–28, 2021, Lviv, Ukraine, pp. 327–332. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575807.
18. Kim J., Shin J., Chun C., Cho B. H. Stable configuration of a Li-Ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 411–424. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2158553.
19. González A., Goikolea E., Barrena J. A., Mysyk R. Review on supercapacitors: Technologies and materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 58, pp. 1189–1206. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.249.
20. Плата защиты BMS 3S 25A 11,1V (12,6V) для Li-Ion аккумуляторов (контроллер заряда/разряда) с балансировкой (HX-3S-FL25A-A). Интернет-ресурс. Режим доступа: https://bestbattery.com.ua/li_ion_1850/batteries_set/bms/bms_3s_25a.

References

1. Skouras T. A., Gkonis P. K., Ilias C. N., Trakadas P. T., Tsampasis E. G., Zahariadis T. V. *Electrical vehicles: current state of the art, future challenges, and perspectives*. *Clean Technologies*, 2020, Vol. 2, pp. 1–16. DOI: 10.3390/cleantechnol2010001.
2. Hannan M. A., Hoque M. M., Mohamed A., Ayob A. *Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 69, pp. 771–789. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.171.
3. Hemmati, R., Saboori, H. *Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 65, pp. 11–23. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.029.
4. Tie S. F., Tan C. W. *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, Vol. 20, pp. 82–102. DOI: 10.1016/j.rser.2012.11.077.
5. Zhang L., Hu X., Wang Z., Sun F., Dorrell D. G. *A review of supercapacitor modeling estimation and applications: a control/management perspective*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, Vol. 81, pp. 1868–1878. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.283.
6. Zhang C., Wang D., Wang B., Tong F. *Battery degradation minimization-oriented hybrid energy storage system for electric vehicles*. *Energies*, 2020, Vol. 13, 246. DOI: 10.3390/en13010246.
7. Han X., Lu L., Zheng Y., Feng X., Li Z., Li J., Ouyang M. *A review on the key issues of the lithium-ion battery degradation among the whole life cycle*. *eTransportation*, 2019, Vol. 1, 100005. DOI: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
8. Kachhwaha A., Rashed G. I., Garg A. R., Mahela O. P., Khan B., Shafik M. B., Hussien M. G. *Design and performance analysis of hybrid battery and ultracapacitor energy storage system for electrical vehicle active power management*. *Sustainability*, 2022, Vol. 14, 776. DOI: 10.3390/su14020776.
9. Kim Y., Raghunathan V., Raghunathan A. *Design and management of battery-supercapacitor hybrid electrical energy storage systems for regulation services*. *IEEE Trans. Multi-Scale Computing Systems*, 2017, Vol. 3, No. 1, pp. 12–24. DOI: 10.1109/TMSCS.2016.2627543.
10. Jing W., Lai C. H., Wallace Wong S. H., Dennis Wong M. L. *Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review*. *IET Renew. Power Gener.*, 2017, Vol. 11, Iss. 4, pp. 461–469. DOI: 10.1049/iet-rpg.2016.0500.
11. Kim C., Kim M., Kim Y., Moon G. *A modularized charge equalizer using battery monitoring IC for series connected Li-Ion battery strings in an electric vehicle*. *Proc. 8th Int. Conf. Power Electronics – ECCE Asia*, 2011, pp. 304–309. DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944609.
12. Shchur I., Bilyakovskyy I., Turkovskiy V. *Improvement of switched structure semi-active battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles*. *IET Electr. Syst. Transp.*, 2021, Vol. 11(3), pp. 241–255. DOI: 10.1049/els2.12017.
13. Stippich A., van der Broeck C. H., Sewergin A., Wienhausen A. H. *Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles*. *CPSS Trans. Power Electronics and Applications*, 2017, Vol. 2, is. 4, pp. 249–258. DOI: 10.24295/CPSSSTPEA.2017.00023.
14. Shchur I., Turkovskiy V. *Integrated system of modular power supply and multilevel control of brushless DC motor for electric vehicles*. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020, Vol. 6, P. 107–115. DOI: 10.33271/nvngu/2020-6/068.
15. Shchur I., Biletskyi Y. *Passivity-based control of hybrid energy storage system with common battery and modular multilevel DC-DC converter-based supercapacitor packs*. *Proc. 2019 IEEE 20th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Sept. 15–18, 2019, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 1–6. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949174.
16. Shchur I., Turkovskiy V. *Open-end winding dual three-phase BLDC motor drive system with integrated hybrid battery-supercapacitor energy storage*. *Proc. 2021 IEEE 20th Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Sept. 21–24, 2021, Kremenchuk, Ukraine, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598697.
17. Shchur I., Turkovskiy V., Boichuk B. *Dual battery powered drive system using an open-end winding brushless DC motor*. *Proc. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON-2021)*, August 26–28, 2021, Lviv, Ukraine, pp. 327–332. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575807.
18. Kim J., Shin J., Chun C., Cho B. H. *Stable configuration of a Li-Ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing*. *IEEE Trans. Power Electronics*, 2012, Vol. 27, No. 1, pp. 411–424. DOI: 10.1109/TPEL.2011.2158553.
19. González A., Goikolea E., Barrena J. A., Mysyk R. *Review on supercapacitors: Technologies and materials*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 58, pp. 1189–1206. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.249.

I. З. Щур, I. Є. Біляковський, Б. М. Харчишин

20. *Plata zashchity BMS 3S 25A 11,1V (12,6V) dlya Li-Ion akkumulyatorov (kontroller zaryada/razryada) s balansirovkoy (HX-3S-FL25A-A).* – *Internet-resurs. Rezhim dostupu* [tps://bestbattery.com.ua/li_ion_1850/batteries_set/bms/bms_3s_25a](https://bestbattery.com.ua/li_ion_1850/batteries_set/bms/bms_3s_25a).

I. Shchur

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
ihor.z.shchur@lpnu.ua

I. Biliakovskiy

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
ihor.y.biliakovskiy@lpnu.ua

B. Kharchyshyn

Lviv Polytechnic National University,
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,
bohdan.m.kharchyshyn@lpnu.ua

FORMATION AND RESEARCH OF LOW VOLTAGE MODULES OF BATTERIES AND SUPERCAPACITORS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

© Shchur I., Biliakovskiy I., Kharchyshyn B., 2022

In modern autonomous electric power supply systems, in particular, for electric vehicles (EV), rechargeable batteries (B) are often used as energy sources and supercapacitor (SC) modules are often used as power sources. To ensure the necessary level of on-board voltage, these devices consist of a large number of low-voltage cells, the work of which is accompanied by complex electronic energy management systems (EMS). Simplifying the operation of such systems, reducing their cost, as well as providing a number of other advantages of powertrain systems for EV can be achieved by applying a modular approach to both the design of electric motors with appropriate control systems and their electrical power supply. The work presents the results of the formation and research of low-voltage (12–16 V) Li-Ion B modules and SC modules for the construction of modular electric power supply systems for EVs. The work began with the measurement of the main parameters – a capacity and an internal resistance – for a sufficiently large number of Li-Ion and SC cells of the same type. Because of further selection (screening) of cells with similar parameters, appropriate low-voltage modules were created, the operation of which was studied in charging/discharging cycles at constant current values. At the same time, the voltages on series-connected elements or groups of parallel-connected elements were compared, both with and without the use of special EMS electronic boards, as well as for the purposeful screening of cells with similar parameters and their arbitrary selection. Conducted studies of low-voltage Li-Ion B modules showed that in the case of using a special EMS board, selection of element parameters for their parallel-serial connection is not required. However, screening of Li-Ion cells of similar basic parameters for low-voltage modules gives similar results even without the use of EMS. In SC modules, the function of passive charge balancing of SC cells is well performed by a simple protective electronic board, but only when the cells are fully charged. For active balancing, more complex and expensive EMSs are required. However, in the case of a low-voltage SC-module with selected SC-cells of similar parameters, the process of self-leveling of voltages of six series-connected SC-groups with two parallel-connected SC-cells in each group was noted. Thus, energy cell screening is an effective approach to create simpler and cheaper low-voltage Li-Ion Bs and SC modules.

Key words: Li-Ion cell; supercapacitor; energy cell screening; battery; supercapacitor module; charge balancing; energy management system.