

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Особливості забезпечення ефективної роботи комірок у складі
аккумуляторних батарей

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКм-23
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Максим ОСПЕННИКОВ**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **к.т.н., доц., В. КАЛИНИЧЕНКО**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Максиму ОСПЕННІКОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Особливості забезпечення ефективної роботи комірок у складі акумуляторних батарей

керівник роботи Валерій КАЛИНИЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Напруга батареї $U = 48$ В, струм

$I(t) = 12$ А, номінальна ємність $Q_{\text{ном}} = 340$ А год, часовий інтервал

$\Delta t = 10$ с, початкове значення SOC $SOC(0) = 0,8$, напруга RC-ланцюга

$U_{RC}(t) = 0,2$ В, внутрішній опір акумуляторної батареї $R_0 = 0,05$ Ом,

напруга холостого ходу OCV = 48,5 В, початкова матриця коваріації

$P(0) = \text{diag}(1; 1; 1)$, коефіцієнт коригування $\lambda = 0,98$, вектор регресії

$m(t) = [1; I(t); SOC(t)]^T$, початковий вектор параметрів

$r(0) = [48; 0,05; 0,8]^T$, температура батареї $T = 25^\circ\text{C}$, граничний струм

заряду $I_{\text{max}} = 50$ А, гранична напруга заряду $U_{\text{max}} = 58,4$ В, частота

вимірювання $\nu = 0,1$ Гц, час роботи батареї $t_{\text{роб}} = 2$ год, кількість циклів

заряд-розряд $N_{\text{цикл}} = 4000$, тип батареї – LiFePO₄.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Загальний огляд технології акумуляторних комірок на основі літій-залізо-фосфатної технології.

2. Огляд проблемних питань балансування акумуляторних батарей.

3. Покращення принципів керування роботою акумуляторних батарей.

4. Моделювання динамічних процесів у комірках акумуляторної батареї.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	В. КАЛИНИЧЕНКО, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 30 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	30.09.2024 - 03.10.2024	
2.	Розділ 2	04.10.2024 - 07.10.2024	
3.	Розділ 3	08.10.2024 - 11.10.2024	
4.	Розділ 4	12.10.2024 - 10.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Максим ОСПЕННИКОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Валерій КАЛИНИЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Максим ОСПЕННИКОВ. Особливості забезпечення ефективної роботи комірок у складі акумуляторних батарей / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Дрогобич, 2023.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі наведено основні відомості про системи зберігання електричної енергії за допомогою акумуляторних комірок на основі літій-залізо-фосфатної технології.

У другому розділі було здійснено огляд технології облаштування систем BMS для захисту акумуляторних систем та проблемні питання їх балансування.

У третьому розділі наведено принципи покращення принципів керування роботою акумуляторних батарей LiFePO_4 .

У четвертому розділі було здійснено моделювання динамічних процесів у комірках акумуляторної батареї.

Ключові слова: акумулятор, комірка, акумуляторна збірка, літій-залізо-фосфатна технологія, BMS, мікроконтролер, дисбаланс, балансування, заряджання, перезаряджання, показник ефективності

SUMMARY

Maksym OSPENNIKOV. Features of ensuring the efficient operation of the cells in the storage batteries / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Drohobych, 2024.

The diploma work consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, a list of used literature and appendices.

The first section provides basic information about electrical energy storage systems using rechargeable cells based on lithium-iron-phosphate technology.

The second section provides an overview of the technology for arranging BMS systems to protect rechargeable systems and problematic issues of their balancing.

The third section provides principles for improving the principles of controlling the operation of LiFePO_4 rechargeable batteries.

The fourth section provides modeling of dynamic processes in rechargeable battery cells.

Keywords: battery, cell, battery assembly, lithium iron phosphate technology, BMS, microcontroller, imbalance, balancing, charging, recharging, efficiency index

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ АКУМУЛЯТОРНИХ КОМІРОК НА ОСНОВІ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	10
1.1 Загальний огляд технології акумуляторних комірок на основі літій-залізо-фосфатної технології	10
1.2 Важливість застосування систем керування батареями у збірках комірок LiFePO ₄	13
1.3 Застосування 48-вольтової конфігурації в різних додатках	16
1.4 Огляд проблем, пов'язаних з підтримкою ефективності та довговічності акумуляторних батарей LiFePO ₄ у збірках 48 В	21
1.5 Оцінка показників ефективності BMS	28
2 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ОБЛАШТУВАННЯ СИСТЕМ BMS	30
2.1 Складові елементи схем BMS	30
2.2 Роль і функції датчиків у складі BMS	32
2.3 Блок мікроконтролера у складі BMS	34
2.4 Інтерфейси зв'язку в BMS	36
2.5 Схеми захисту BMS	40
2.6 Проблемні питання при проектуванні та експлуатації BMS	43
2.7 Огляд проблемних питань балансування акумуляторних батарей	47
2.7.1 Дисбаланс під час заряджання комірок з різним хімічним складом	47
2.7.2 Вплив внутрішнього опору комірок на дисбаланс акумуляторної батареї	49
2.7.3 Порушення вимог безпеки в разі перезаряджання комірок	50

2.8 Огляд наукових досліджень по роботі акумуляторних збірок LiFePO ₄	52
3 ПОКРАЩЕННЯ ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ LiFePO ₄	63
3.1 Апаратна реалізація балансування комірок	63
3.2 Складання лінійної моделі та розрахунки її роботи	69
4 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОМІРКАХ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ	77
ВИСНОВКИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	85
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	89
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	95

ВСТУП

Літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) батареї зарекомендували себе як добрий вибір у сфері зберігання енергії завдяки своїм унікальним електрохімічним властивостям, які пропонують явні переваги перед іншими літій-іонними хімічними елементами. Розроблені наприкінці 1990-х років комірки LiFePO_4 набули популярності в різних сферах застосування: електромобілі, накопичувачі у джерелах відновлюваної енергії та портативна електроніка. Це стало можливим завдяки їх винятковій безпеці, термічній стабільності, великій кількості циклів заряду-розряду та тривалому терміну експлуатації.

Висока енергетична щільність, стабільність роботи та екологічна безпечність роботи робить дані батареї одним із найперспективніших рішень у галузі зберігання енергії. Проте, як і будь-які технічні системи, акумуляторні збірки LiFePO_4 стикаються з головною проблемою – нерівномірність розрядження окремих комірок, що може викликати втрати енергетичної ефективності та передчасну деградацію цих систем. Дана проблема пояснюється відмінністю внутрішніх характеристиках, таких як опір, ємність і стабільність напруги, що може ускладнити управління системою та призводити до непродуктивних енергетичних втрат. Для вирішення таких завдань можуть бути розроблені різноманітні моделі, які дозволять врахувати вплив динамічних факторів, таких як струмові імпульси, температурні зміни та процеси поляризації. Застосування таких моделей дозволить спрогнозувати поведінку комірок та оптимізувати роботу акумуляторних систем загалом.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи акумуляторних батарей шляхом удосконалення методів оцінки стану заряду (SOC) та внутрішніх параметрів кожної комірки. Важливим аспектом є також аналіз впливу динамічних імпульсів

на поляризаційний опір, що забезпечує більш точне балансування комірок і зменшує ризик деградації.

Мета роботи полягає у створенні адаптивної моделі динамічних процесів у LiFePO_4 батареях, яка враховує вплив нерівномірності характеристик комірок, імпульсних струмів та температурних факторів.

Завданнями роботи є:

- дослідження параметрів акумуляторних батарей,
- визначення принципів контролю стану та балансування комірок,
- розробка моделі динамічних процесів у комірках,
- оцінку впливу імпульсів струму на SOC і опір,
- аналіз результатів моделювання для оптимізації роботи батарей.
- розробка рекомендацій для покращення керування акумуляторними системами.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються у комірках акумуляторних батарей LiFePO_4 .

Предмет дослідження – динамічні параметри SOC та опору комірок у процесі функціонування акумуляторних батарей.

1 ОСНОВНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ АКУМУЛЯТОРНИХ КОМІРОК НА ОСНОВІ ЛІТІЙ-ЗАЛІЗО-ФОСФАТНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1 Загальний огляд технології акумуляторних комірок на основі літій-залізо-фосфатної технології

Останніми роками літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) батареї привернули значну увагу завдяки їх явним перевагам над іншими хімічними літій-іонними батареями (комірками). Технологія даних комірок була започаткована наприкінці 1990-х років, та знайшла застосування в різних застосунках – електромобілях, накопичувачах відновлюваної енергії та портативній електроніці. Ключ до їх широкого впровадження полягає в електрохімічних властивостях сполуки LiFePO_4 як катодного матеріалу, який поєднує безпеку, стабільність та довговічність, що може задовольнити найвибагливіші умови.

Комірки LiFePO_4 працюють за принципом літій-іонної міграції, коли іони літію рухаються між анодом і катодом під час циклів заряду та розряду. Катод у цих батареях виготовлено з літій-залізо-фосфатної сполуки – матеріалу, який може похвалитися досить міцною структурою. Дана структура забезпечує значну термічну стабільність, що є критичним фактором для підвищення рівня безпеки експлуатації комірок акумуляторів. На відміну від інших літій-іонних сполук, наприклад, таких як оксид літій-кобальту (LiCoO_2), що схильні до перегріву під впливом високих температур або під час перезаряджання, комірки LiFePO_4 дуже стійкі до цих подій. Ще однією позитивною особливістю комірок LiFePO_4 є їх тривалий термін служби – вони характеризуються величною понад 2000 циклів заряджання-розряджання, що значно вище, ніж у інших літій-іонних батареях, таких як літій-марганцево-оксидних (LiMn_2O_4) або літій-нікель-кобальт-алюмінійоксидних (NCA). Цей подовжений термін служби

в основному пояснюється стабільністю катода LiFePO_4 , який не руйнується так швидко, як інші матеріали. Крім того, низький внутрішній опір комірок LiFePO_4 сприяє мінімальній втраті енергії під час роботи, ще більше подовжуючи термін служби батареї та покращуючи їх загальну ефективність. З точки зору щільності енергії, акумулятори LiFePO_4 демонструють нижчу питому енергію порівняно з іншими літій-іонними акумуляторами, такими як літій-нікель-марганецьоксид-кобальт (NMC). Хоча батареї NMC можуть досягати щільності енергії понад 200 Вт·год/кг, для батареї LiFePO_4 цей показник зазвичай коливається в межах 90-140 Вт·год/кг. Однак пошук компромісу між щільністю енергії та питанням безпеки є часто виправданим у застосуваннях, де пріоритетом є надійність і довговічність над компактністю [1].

Однією з найбільш переконливих переваг комірок LiFePO_4 є їх висока термічна стабільність. Склад електроліту та міцна структура катода сприяють вищій температурі розкладання, що зазвичай перевищує значення 250 °C. Цей високий тепловий поріг значно знижує ризик перегріву, що робить комірки LiFePO_4 ідеальними для використання у потужних системах накопичення енергії, де безпека має першочергове значення. Крім того, відсутність кобальту в катодному матеріалі не тільки знижує витрати, але й зменшує «екологічні» проблеми, пов'язані з видобутком кобальту [1].

Комірки LiFePO_4 також демонструють відмінні характеристики заряджання та розряджання, особливо в умовах протікання високого струму. Ці батареї можуть підтримувати високу швидкість розряду без значного погіршення, що робить їх придатними для застосувань, які вимагають швидкої доставки енергії, наприклад, для електроінструментів і електромобілів. Плоска крива розряду акумуляторів LiFePO_4 забезпечує стабільну вихідну напругу протягом більшої частини циклу розряду, що є корисним для підтримки постійної продуктивності в пристроях, які потребують постійного живлення (рис. 1.1–1.3) [2].

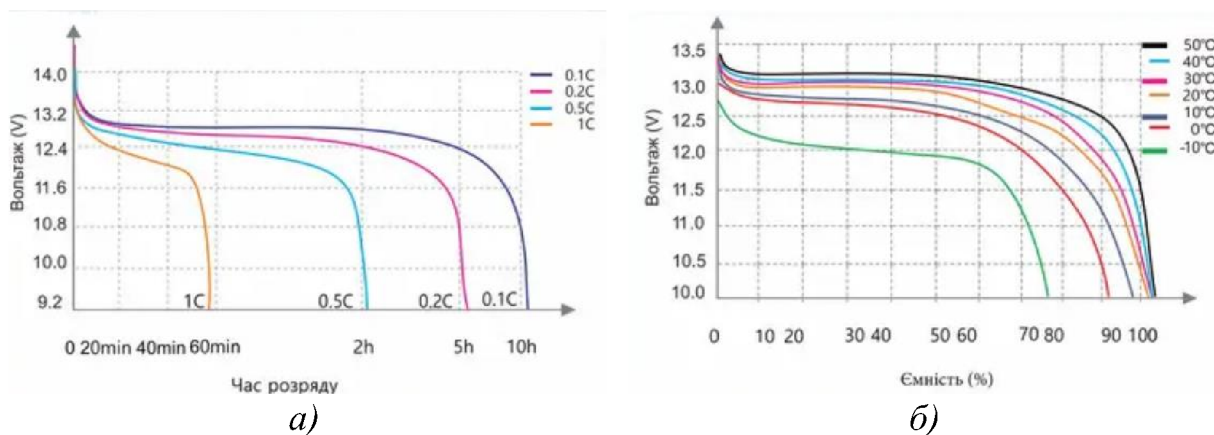


Рисунок 1.1 – Криві розряду: *а* – під різним навантаженням (струмом) при температурі 25 °С, *б* – при різних температурах (при навантаженні/струмі 1С)

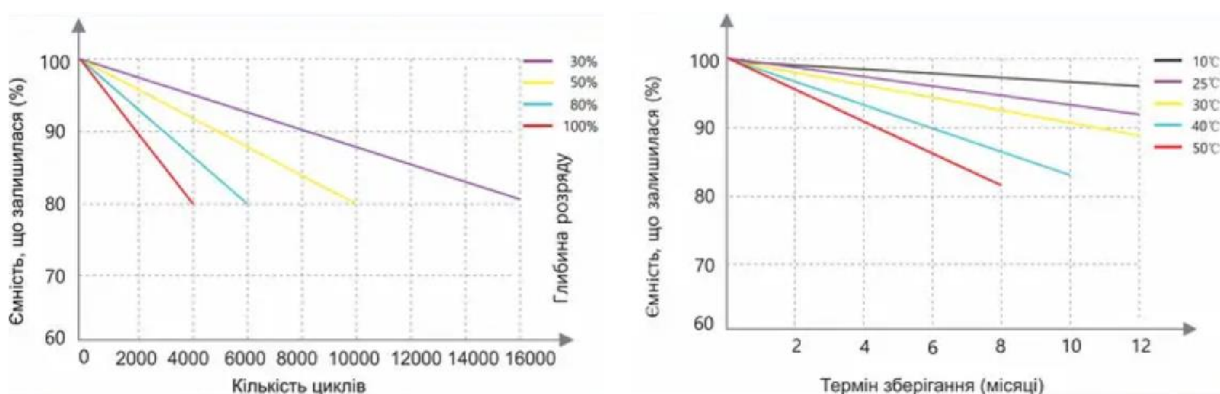


Рисунок 1.2 – Характеристики розрядження: *а* – залишкова ємність при розряді струмом 0,5С при температурі 25 °С, *б* – саморозряд при різній температурі зберігання

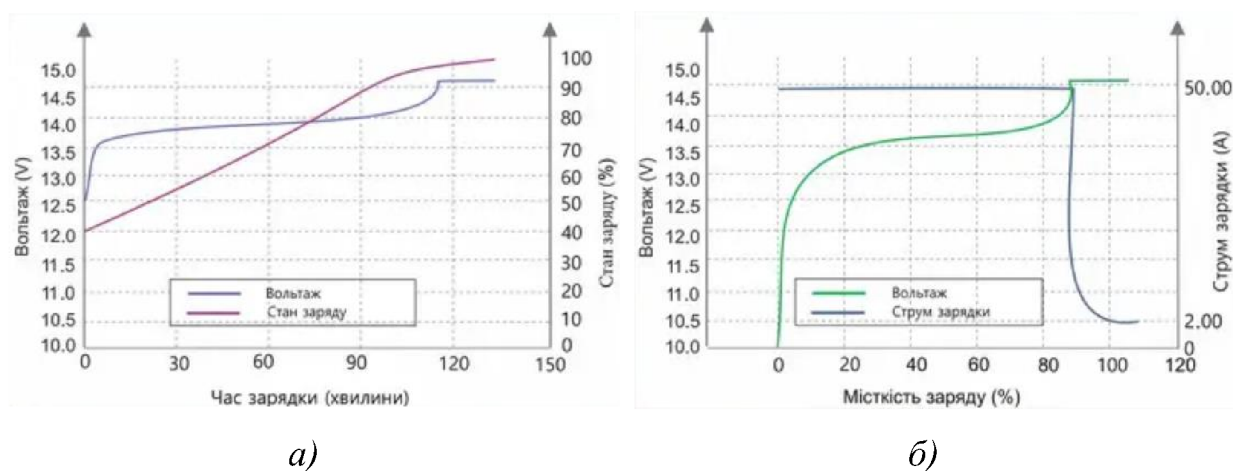


Рисунок 1.3 – Крива стану заряджання при зарядці при температурі 25 °С: *а* – струмом 0,2С, *б* – струмом 0,5С

Незважаючи на численні переваги, комірки LiFePO_4 мають певні недоліки, серед яких можна виділити [3]:

- нижча щільність енергії порівняно з іншими літій-іонними комірками, що може бути проблемою в застосуваннях, коли вага та об'єм є критичними параметрами,

- вища початкова вартість через складність процесу їх виробництва, що може стати перешкодою для впровадження, особливо на ринках, де вартість є основним критерієм вибору. Економічна ефективність цих комірок «розкривається» з часом, завдяки подовженому терміну їх служби та низьким вимогам до обслуговування, що часто компенсує початкові інвестиції.

У підсумку можна сказати, що комірки LiFePO_4 окремо та у складі збірок акумуляторних батарей являють собою міцне та надійне рішення для накопичення енергії, особливо в застосунках, де безпека, довговічність і термічна стабільність є надзвичайно важливими. Хоча нижча щільність енергії може обмежити її використання в певних секторах, може бути знівельована тим, що поточні дослідження та розробки зосереджені на підвищенні щільності енергії та зниженні витрат для потенційного розширення застосованості комірок LiFePO_4 у майбутньому.

1.2 Важливість застосування систем керування батареями у збірках комірок LiFePO_4

Системи керування батареєю/акумулятором/акумуляторною збіркою (BMS – Battery Management System) є обов'язковим елементом сучасних технічних рішень для зберігання енергії та слугують критичним елементом/посередником між акумуляторною батареєю та пристроями, що до неї приєднано. Оскільки впровадження систем зберігання енергії в

різних секторах економіки та господарювання зростає, роль BMS у забезпеченні безпеки, ефективності та довговічності цих систем стає все більш важливою. Складність і різноманітність сучасних засобів накопичення енергії вимагає вибагливого підходу до управління різними параметрами, які впливають на функціонування акумуляторних батарей, що робить BMS незамінним елементом у цій системі.

По суті BMS відповідає за моніторинг і керування станом акумуляторних збірок: оцінка стану заряду (SOC), оцінка стану розряду (SOH), балансування окремих елементів і захист від ненормальних умов експлуатації. Однією з найважливіших ролей BMS є точна оцінка SOC батареї, яка є важливою для прогнозування залишкової корисної енергії. Оцінка SOC включає складні алгоритми, які враховують такі фактори, як напруга, струм, температура та попередні моделі використання. Точна оцінка величини SOC має вирішальне значення для різних застосувань, де точна інформація про час роботи акумулятора може мати вирішальне значення. Контроль значення SOH батареї забезпечує індикацію загального стану батареї та залишкового терміну служби. Оцінка SOH особливо важлива в застосуваннях, коли батарея підлягає частим циклам заряджання та розряджання, оскільки це допомагає передбачити початок зменшення ємності та інші форми погіршення стану. Постійно оцінюючи значення SOH, BMS може ініціювати сповіщення про технічне обслуговування або заміну, тим самим запобігаючи неочікуваним збоям і забезпечуючи надійність системи зберігання енергії. Балансування елементів є однією найважливіших функцій BMS, особливо в акумуляторних збірках, що складаються з кількох елементів, з'єднаних послідовно та паралельно. З часом окремі елементи акумуляторної батареї можуть вийти з рівноваги через коливання їх ємності, внутрішнього опору та швидкості саморозряду. Якщо не контролювати цей дисбаланс, це може призвести до перезаряджання або надмірного розряджання певних елементів, значно знижуючи загальну продуктивність і термін служби акумуляторної батареї.

BMS зменшує цей ризик, реалізуючи методи активного або пасивного балансування, які здатні вирівняти заряди в усіх елементах, тим самим підвищуючи ефективність і довговічність акумуляторних систем. Безпека має першочергове значення для будь-якої системи накопичення енергії, і BMS може відігравати цю життєво важливу роль у захисті акумулятора під час виникнення небезпечних умов і явищ. Літій-іонні батареї, зокрема, чутливі до таких факторів, як перезарядження, глибокий розряд, високі температури та короткі замикання, що може призвести до перегріву та, у крайніх випадках, до пожежі та/або вибуху. BMS постійно контролює такі ключові параметри, як напруга, струм і температура для виявлення будь-яких аномалій, що можуть вказувати на потенційну загрозу безпеці. При виявленні таких станів, BMS може ініціювати захисні дії, такі як відключення батареї від навантаження або джерела зарядки, обмеження струму або активація систем охолодження для запобігання перегріву [4].

У контексті зберігання енергії з відновлюваних джерел, де батареї часто інтегруються у фотоелектричні або вітрові системи, BMS гарантує, що акумуляторна батарея буде працювати в безпечних і оптимальних межах за різних умов у навколишньому середовищі. Переривчастий характер генерації від відновлюваних джерел енергії створює специфічні проблеми для управління акумуляторними батареями – BMS вирішує і ці проблеми, оптимізуючи цикли заряджання та розряджання відповідно до доступності енергії з відновлюваних джерел, таким чином максимізуючи ефективність і термін служби системи зберігання. Пристрої BMS підвищують загальну інтелектуалізацію акумуляторної системи, взаємодіючи з іншими компонентами системи зберігання енергії, такими як інвертори, зарядні пристрої та системи управління потоками енергії. За допомогою протоколів зв'язку, таких як CAN-шина, Modbus або Smbus, пристрої BMS можуть обмінюватися даними в реальному часі з цими компонентами, забезпечуючи узгоджені стратегії керування, які дозволяють підвищувати продуктивність і надійність усієї системи [4].

Отже, неможливо переоцінити важливість BMS для сучасних рішень для зберігання електричної енергії. Оскільки акумуляторні батареї продовжують відігравати ключову роль у переході до чистіших і стійкіших енергетичних систем та забезпеченні безперебійного енергопостачання, BMS гарантує, що ці батареї працюватимуть безпечніше, ефективніше та надійніше. Забезпечення точної оцінки параметрів SOC і SOH, підтримуючи баланс між окремими комірками, захищаючи від небезпечних умов і взаємодіючи з іншими компонентами системи, BMS має важливе значення для розкриття повного потенціалу сучасних технологій зберігання електричної енергії. За мірою того як зазначена галузь продовжує розвиватися, прогрес у технології BMS матиме вирішальне значення для існуючих вирішення проблем накопичення енергії та забезпечення широкого впровадження рішень з живленням від батарей у різноманітних застосуваннях.

1.3 Застосування 48-вольтної конфігурації в різних додатках

48-вольтна конфігурація є особливо актуальним і універсальним вибором у сучасних системах зберігання енергії. Важливість застосування цього рівня напруги полягає в його здатності встановлювати баланс між енергоефективністю, безпекою та можливістю гнучких змін, що робить його придатним як для споживчих, так і для промислових застосувань. За мірою зростання попиту на більш ефективні та адаптивні рішення для накопичення енергії актуальність 48-вольтної конфігурації продовжує зростати завдяки її унікальним перевагам щодо продуктивності та економічної ефективності.

Одне з найвидатніших застосувань 48-вольтної конфігурації в автомобільній промисловості, зокрема в електричних транспортних

засобах з м'яким гібридом (MHEV). Автомобільний сектор спостерігає швидкий зсув у бік «електрифікації», зумовлений необхідністю скоротити викиди вуглецю та підвищити ефективність використання палива. У цьому контексті 48-вольтна система пропонує «золоту» середину між традиційними 12(24)-вольтними та високовольтними системами, які використовуються в повністю електричних автомобілях. 48-вольтна система дозволяє істотно покращити економію палива завдяки підтримці таких функцій, як функція старт-стоп, рекуперативне гальмування та електричний наддув. Ці системи можуть рекуперувати та накопичувати енергію, яка інакше була б витрачена під час гальмування, згодом використовуючи її для допомоги двигуну внутрішнього згоряння, таким чином зменшуючи споживання палива та викиди. Застосування 48-вольтної конфігурації в MHEV також мотивовано перевагами безпеки. Системи вищої напруги, зазвичай понад 60 вольт, вимагають значних заходів безпеки для захисту від ураження електричним струмом та інших небезпек. Навпаки, 48-вольтна система працює нижче порогу, визначеного багатьма стандартами безпеки, що дозволяє створювати простіші та економічніші конструкції безпеки, забезпечуючи при цьому значну потужність. Це робить його привабливим варіантом для автовиробників, які прагнуть покращити продуктивність автомобіля, не зазнаючи складності та витрат, пов'язаних із високовольтними системами [5].

У сфері зберігання енергії з відновлюваних джерел 48-вольтна конфігурація відіграє вирішальну роль при оптимізації інтеграції систем накопичення енергії з відновлюваними джерелами. Переривчастість виробництва енергії з відновлюваних джерел створює специфічні проблеми, вимагаючи систем накопичення енергії, які можуть ефективно керувати циклами заряду та розряду, зберігати при цьому стабільність і надійність. 48-вольтна конфігурація особливо добре підходить для житлових і невеликих комерційних систем зберігання енергії, де вона забезпечує гарний баланс між вихідною потужністю та складністю

системи. Сумісність 48-вольтних систем із широко доступними стандартними компонентами, такими як інвертори та інше системне обладнання, ще більше підвищує їх привабливість у секторі відновлюваної енергетики. Крім того, відносно низька напруга цих систем зменшує ризики, пов'язані з виникненням електричної дуги та перегрівом, що робить їх більш безпечними для використання в житлових приміщеннях, де необхідно дотримуватися суворих правил безпеки [5].

Промислове застосування також отримує переваги від конфігурації 48-вольт, особливо в умовах, де надійність і міцність є першочерговими. У джерелах безперебійного живлення (UPS), телекомунікаціях і операціях центрів обробки даних конфігурація 48-вольт забезпечує стабільне та надійне джерело живлення, яке може відповідати вимогам критичної інфраструктури. Можливість масштабування 48-вольтних систем шляхом з'єднання кількох акумуляторних/батарейних модулів у послідовних і паралельних конфігураціях дозволяє налаштовувати їх відповідно до конкретних вимог до потужності, що робить їх гнучким рішенням для широкого спектру промислових застосувань [5].

Крім того, актуальність 48-вольтової конфігурації розповсюджується на «нові» технології, такі як електричні дво- та триколісні транспортні засоби. Ці агрегати вимагають легких, ефективних і рентабельних рішень для забезпечення живлення, які можуть надати адекватну продуктивність без необхідності використання складних механізмів безпеки. 48-вольтна конфігурація добре відповідає цим вимогам, забезпечуючи достатню потужність для приводу двигунів, одночасно забезпечуючи безпеку користувача. Очікується, що впровадження 48-вольтних систем для малопотужних електричних транспортних засобів зростатиме через попит на чисті, ефективні та доступні транспортні рішення.

Отже, 48-вольтна конфігурація дуже актуальна для різноманітних застосувань завдяки унікальному поєднанню ефективності, безпеки та можливості масштабування.

На продуктивність роботи акумуляторних систем LiFePO_4 у збірках 48В впливають різноманітні параметри та показники, які разом визначають ефективність, надійність і довговічність акумуляторів. Розуміння та оптимізація цих ключових факторів має важливе значення для ефективного впровадження технології LiFePO_4 у різних сферах застосування. Аналізуючи ці параметри можна краще передбачити поведінку батареї, підвищити продуктивність і зменшити можливі проблеми, що можуть виникнути.

Серед найважливіших параметрів, що впливають на продуктивність акумулятора можна виділити [5, 6]:

- величина SOC – «Стан заряду». SOC представляє залишок заряду батареї відносно її повної ємності (зазвичай виражається у відсотках від повної ємності/заряду). Точна оцінка SOC має вирішальне значення для керування споживанням енергії, оскільки вона дає змогу приймати рішення щодо заряджання, розряджання та балансування акумуляторної батареї. Варіації SOC можуть призвести до неефективності, особливо в конфігураціях із кількома комірками, коли дисбаланс між осередками може призвести до зниження загальної ємності та збільшення навантаження на окремі комірки,

- величина SOH – «Загальний стан»/«Стан здоров'я» акумулятора, який вказує на загальний стан батареї та її здатність утримувати та віддавати заряд. На значення SOH впливають такі фактори, як зменшення ємності, внутрішній опір і кількість циклів заряду-розряду, які з часом погіршуються, оскільки батарея проходить повторні цикли заряджання та розряджання. Моніторинг SOH дає уявлення про остаточний термін служби батареї і допомагає передбачити, коли може знадобитися технічне обслуговування або заміна,

- величина «внутрішній опір», який означає протидію електричному струму всередині батареї, який зростає зі старінням і деградацією. Високий внутрішній опір призводить до більших втрат енергії у вигляді тепла, що

знижує загальну ефективність батареї, та сприяє падінню напруги під час сильного розряду, що може обмежити вихідну потужність і зменшити ефективну ємність акумулятора. Моніторинг внутрішнього опору дозволяє завчасно виявити деградацію комірок та інформувати про необхідність коригування параметрів заряджання або впровадження методів балансування комірок,

– «температура» – один з ключових показників, який впливає як на миттєву продуктивність, так і на довгострокову працездатність акумуляторних систем. Температура впливає на електрохімічні реакції в елементах батареї, при цьому високі температури прискорюють деградацію, а низькі температури зменшують ємність і збільшують внутрішній опір. Контроль температури особливо важливий у збірних системах, коли багато елементів розташовані досить щільно, що підвищує ризик нерівномірного нагрівання та утворення «гарячих» точок,

– «кількість циклів заряджання-розряджання», який визначає кількість повних циклів заряджання-розряджання, які може «витримати» батарея, перш ніж її ємність впаде нижче заданого порогу (як правило, 80% від початкової ємності). На термін служби акумуляторів LiFePO_4 впливають різні фактори, зокрема глибина розряду, швидкість заряджання та робоча температура. Батареї з довшим терміном служби пропонують кращу довгострокову повноту ємності та надійність, що робить даний параметр критично важливим у застосунках, які вимагають частих циклів заряду-розряду,

– «швидкість заряджання та розряджання» – параметр, який часто виражають як «C». Він є досить важливим параметром і який визначає те, наскільки швидко акумулятор може заряджатися або розряджатися відносно його загальної ємності. Високі швидкості заряджання та розряджання можуть скоротити час, необхідний для перезаряджання або споживання, збільшуються навантаження на акумуляторну батарею і призводять до прискореного старіння акумуляторів,

– «стабільність напруги» – параметр, який враховує коливання напруги, які можуть вказувати на такі проблеми, як дисбаланс комірок, зміни внутрішнього опору або погіршення «теплової картини». Підтримка стабільного значення напруги на акумуляторній батареї має важливе значення для стабільної роботи та запобігання пошкодженню як батареї, так і підключеного навантаження,

– «енергоефективність» – це багатогранний показник, який охоплює загальну ефективність акумуляторної системи при перетворенні накопиченої енергії для живлення навантаження. На даний параметр впливають такі фактори, як внутрішній опір, температура і якість балансування та захисту.

Отже, продуктивність акумуляторних систем LiFePO_4 у збірках 48 В регулюється складною взаємодією параметрів і показників. Ретельно відстежуючи та оптимізуючи дані параметри можна підвищити продуктивність, надійність і термін служби цих акумуляторних систем, забезпечуючи їх ефективність у широкому діапазоні застосувань.

1.4 Огляд проблем, пов'язаних з підтримкою ефективності та довговічності акумуляторних батарей LiFePO_4 у збірках 48 В

Широке застосування акумуляторних батарей LiFePO_4 у збірках 48 В у різних сферах застосування підкреслює важливість збереження їх ефективності та довговічності їх роботи. Незважаючи на беззаперечні переваги хімічного складу комірок LiFePO_4 , включаючи його термічну стабільність, безпеку та тривалий термін служби, необхідно вирішити кілька проблем, щоб оптимізувати продуктивність і термін служби акумуляторних блоків, що зібрано з цих комірок. Ці проблеми виникають як через електрохімічні характеристики елементів LiFePO_4 , так і через

складності, пов'язані з керуванням окремими комірками в акумуляторних блоках в конфігураціях 48 вольт.

Однією з головних проблем у підтримці ефективності роботи акумуляторних батарей LiFePO_4 у збірках 48 В є керування та балансування окремих елементів (комірок). У 48-вольтовій системі кілька елементів з'єднані послідовно для досягнення бажаного рівня напруги. Однак через виробничі неузгодженості, коливання старіння елемента та відмінності в умовах експлуатації окремі елементи (комірки) можуть демонструвати різні значення ємності, внутрішнього опору та здатності до заряджання. З часом ці змінні можуть призвести до дисбалансу всередині акумуляторної збірки, коли деякі елементи можуть бути перезаряджені або недостатньо заряджені порівняно з іншими. Цей дисбаланс не тільки знижує загальну ефективність батареї, але й прискорює деградацію окремих елементів, що зрештою скорочує термін служби всієї акумуляторної батареї [7].

Для вирішення зазначеної проблеми, необхідно застосувати ефективні методи балансування комірок у збірці. Пасивне балансування, яке передбачає розсіювання надлишкової енергії від перезаряджених елементів у вигляді тепла, є найбільш поширеним підходом, але може призводити до непродуктивних втрат енергії та загальної неефективності. Активне балансування, яке перерозподіляє енергію від надмірно заряджених елементів до недостатньо заряджених, є більш ефективним рішенням, але додає складності облаштування та вартості системі керування акумулятором – BMS. При цьому основним завданням є впровадження стратегії балансування між оптимальною підтримкою ефективності роботи акумуляторної батареї та забезпеченням довговічності на тлі менших експлуатаційних витрат [7].

Іншим важливим викликом є управління температурою, що становить ще одну важливу проблему для підтримки ефективності та довговічності акумуляторних батарей LiFePO_4 у збірках 48 В. Хоча елементи LiFePO_4

відомі своєю термічною стабільністю, вони все ще чутливі до екстремальних температур. Високі температури можуть прискорити швидкість зменшення ємності та збільшити ризик перегріву, а низькі температури можуть зменшити доступну ємність і збільшити внутрішній опір. У конфігураціях акумуляторних збірок на напругу 48 В, де кілька елементів розташовані досить щільно, підтримувати однаковість температур у всіх комірках стає важким завданням. При цьому всередині збірки можуть виникати «гарячі» точки, що призводить до нерівномірного старіння та зниження загальної продуктивності акумуляторної системи. Впровадження ефективної системи керування температурою (TMS) має вирішальне значення для вирішення зазначених проблем. У якості доступних рішень керування температурою виступають рідинне охолодження та примусове повітряне охолодження, які дозволяють підтримувати оптимальний діапазон робочих температур для акумуляторних збірок. Однак такі системи збільшують вагу, складність і вартість акумуляторних систем. Крім того, розробка TMS, які дозволяють рівномірно охолоджувати усі комірки в щільно упакованій 48-вольтовій конфігурації вимагає глибоких наукових і експериментальних досліджень. Відсутність ефективного керування температурою може призвести до передчасного старіння акумуляторних батарей, скорочення терміну їх служби та зниження ефективності [7].

Ще однією проблемою, пов'язаною з підтримкою довговічності батареї LiFePO_4 у збірках 48 В – вплив глибокого розряду та перезаряду на стан окремих комірок. Розряд акумулятора LiFePO_4 до дуже низьких рівнів SOC або його перезаряджання за межі рекомендованого діапазону напруги може призвести до незворотного пошкодження елементів, що призведе до втрати ємності та збільшення внутрішнього опору. З часом ці пошкодження можуть накопичуватися, що призведе до значного зменшення корисної ємності акумулятора та загального терміну служби. Незважаючи на те, що елементи LiFePO_4 більш стійкі до перезаряду та

глибокого розряду, ніж інші літій-іонні комірки, ці чинники все ще становлять ризики для тривалого здоров'я акумулятора.

Для зменшення означених ризиків, пристрої BMS мають бути розроблені з впровадженням надійних захисних механізмів, які запобігають перезарядженню та глибокому розрядженню комірок. Зазначене вимагає точного моніторингу значень напруг та струмів, а також застосування «безпечних» вимкнень, коли відключення акумуляторної батареї від навантаження або зарядного пристрою здійснюється у «лагідних» умовах. Забезпечити точність і надійність цих захисних заходів досить складно, особливо в динамічних процесах та застосунках. Будь-який збій у роботі BMS та неточний/неповноцінний/невчасний моніторинг та контроль вищезазначених параметрів може призвести до значного погіршення стану акумуляторної батареї [8].

Циклічна робота акумуляторних батарей LiFePO_4 у збірках 48 В створює додаткові проблеми для забезпечення їх ефективності та довговічності. Часті перемикання, особливо за високої швидкості розряду, можуть призвести до підвищеного зношення комірок, що призведе до зменшення ємності та збільшення внутрішнього опору. Для збалансування потреби в частому перемиканні за мети максимізації терміну служби батареї, необхідно ретельно керувати процесами заряджання та розряджання, а також впровадження розширених алгоритмів роботи BMS, які оптимізують поведінку зазначених циклів на основі даних про величини контрольованих параметрів у реальному часі [7].

Отже, підтримка ефективності та довговічності роботи акумуляторних батарей LiFePO_4 у збірках 48 В є складним завданням, яке передбачає вирішення проблем, пов'язаних з балансуванням окремих комірок, керуванням температурою, захистом від перезаряду та глибокого розряду, а також циклічною роботою акумуляторної батареї. Щоб подолати ці труднощі, необхідна інтеграція розширених систем керування батареями та керування температурою, а також постійний моніторинг і оптимізація

продуктивності. Оскільки попит на 48-вольтні накопичувачі енергії продовжує зростати, поточні дослідження та розробки будуть мати вирішальне значення для визначення та запровадження технологій і стратегій, що дозволять підвищити ефективність і термін служби цих акумуляторних збірок.

Система керування батареями (BMS) є головним компонентом у подоланні зазначених проблем. Забезпечуючи повний набір функцій моніторингу, контролю та захисту, BMS відіграє провідну роль у забезпеченні того, щоб акумуляторна батарея працювала в межах її оптимальних параметрів, тим самим зменшуючи ризик дисбалансу, коливань температури, перезарядження, глибокого розряду та надмірної циклічності роботи. Одна з головних ролей BMS – балансувати станами комірок у акумуляторній збірці 48 В. З огляду на те, що конфігурація 48 В зазвичай включає кілька комірок LiFePO_4 , з'єднаних послідовно, і вірогідність дисбалансу між окремими комірками є досить високою. Зміна величин ємності комірок, їх внутрішнього опору та швидкості саморозряду, що може призвести до нерівномірного заряджання та розряджання, в результаті чого одні комірки будуть перезаряджатися, а інші лишатимуться недозарядженими. Цей дисбаланс не тільки знижує ефективність батареї, але й прискорює деградацію комірок. BMS вирішує зазначену проблему за допомогою передових технологій балансування [8].

Захист від перезаряду та глибокого розряду є однією з найважливіших ролей BMS у забезпеченні довговічності акумуляторних батарей. Перезарядження може призвести до осадження зайвої кількості літію на аноді, що збільшує внутрішній опір і зменшує ємність, тоді як глибокий розряд може призвести до незворотного пошкодження матеріалу катода. BMS зменшує ці ризики, точно контролюючи напругу та струм під час процесів заряджання та розряджання. Це відбувається шляхом встановлення верхньої та нижньої межі напруги для кожної комірки та всієї акумуляторної батареї, гарантуючи, що елементи не будуть ані

перезаряджені, ані глибоко розряджені. На додаток до захисних функцій, BMS постійно контролює стан і відсоток заряду (SOC) та поточний стан (SOH) акумулятора. Точна оцінка SOC має вирішальне значення для оптимізації споживання енергії та запобігання надмірній розрядці, а моніторинг SOH дає уявлення про загальний стан акумулятора та термін служби, що залишився. Аналізуючи тенденції зміни SOC і SOH, BMS може передбачити, коли батарея може вимагати обслуговування або заміни, тим самим запобігаючи несподіваним збоям і продовжуючи термін служби батареї. BMS також відіграє провідну роль в управлінні циклічною поведінкою акумуляторних батарей, особливо в застосуваннях, де спостерігаються часті цикли заряду-розряду. BMS використовує складні алгоритми для оптимізації процесів заряджання та розряджання з урахуванням таких факторів, як потреба в навантаженні, доступність енергії та поточний стан акумулятора. Пристосовуючись до циклічної поведінки для конкретних потреб і технологій, BMS допомагає мінімізувати знос комірок, тим самим збільшуючи загальний термін служби акумуляторної батареї. Крім того, BMS виступає у якості осередку зв'язку між акумуляторною батареєю та іншими компонентами системи зберігання енергії, такими як інвертори, зарядні пристрої та засоби керування живленням. За допомогою стандартних протоколів зв'язку BMS може обмінюватися даними в режимі реального часу з цими компонентами, забезпечуючи узгоджені стратегії керування, які підвищують загальну ефективність і надійність системи [8].

Отже, BMS є обов'язковою і невід'ємною частиною вирішення проблем, пов'язаних із підтриманням ефективності та довговічності акумуляторів LiFePO₄ у збірках 48 В. Завдяки розширеним функціям по балансуванню, управлінню температурою, захисним заходам і функціям зв'язку BMS гарантує, що акумуляторна батарея буде працювати в межах своїх оптимальних параметрів, тим самим максимізуючи її продуктивність і термін служби.

BMS для досягнення максимальної ефективності, забезпечення безпеки та довговічності здійснює точну оцінку стану заряду (SOC – показник залишкового заряду акумулятора, виражений у відсотках від його загальної ємності). Точна оцінка SOC інформує про необхідність прийняття рішення щодо того, коли необхідно заряджати, розряджати або балансувати кожен з комірок у складі акумуляторної батареї. BMS використовує вдосконалені алгоритми, такі як фільтрація Калмана, підрахунок Кулона та оцінки на основі моделі, для здійснення постійного моніторингу та розрахунку SOC у режимі реального часу. Надаючи точні дані SOC, BMS гарантує, що батарея працює в межах оптимальних меж заряджання та розряджання, тим самим запобігаючи перезарядженню та глибокому розрядженню, які з часом можуть знизити ефективність і погіршити роботу акумуляторної батареї. Дисбаланс виникає тоді, коли окремі комірки акумуляторної батареї відрізняються по значенню величини SOC, ємності або внутрішньому опору. Ці дисбаланси можуть призвести до загальної неефективності, оскільки ємність цілої акумуляторної батареї обмежена ємністю «найслабшої» комірки. BMS вирішує цю проблему за допомогою як пасивних, так і активних методів балансування. Пасивне балансування передбачає розсіювання надлишкової енергії від перезаряджених елементів у вигляді тепла. При активному балансуванні відбувається перерозподіл надлишкового заряду з надмірно заряджених елементів на недозаряджені, таким чином підтримуючи рівномірність значення SOC у всіх елементах, забезпечуючи збалансованість усіх елементів. У періоди високого попиту BMS може обмежити струм розряду, щоб запобігти надмірному падінню напруги, що може поставити під загрозу ефективність роботи акумуляторної системи. Так само під час заряджання BMS регулює струм, щоб уникнути перезаряду, який може призвести до втрат енергії та скоротити термін служби акумулятора. Завдяки точному управлінню потоком енергії система BMS забезпечує ефективну роботу акумулятора за різних умов

навантаження. Крім того, BMS сприяє довгостроковій ефективності акумуляторної системи шляхом безперервного контролю стану акумулятора – SOH, який є індикатором загального стану акумулятора та залишкового терміну його служби, що здійснюється шляхом відстеження різноманітних параметрів, таких як зниження ємності, зміна внутрішнього опору та підрахунок кількості циклів заряду-розряду. Маючи точні дані, BMS дає змогу розробляти стратегії прогнозного технічного обслуговування та запобігти виникненню неочікуваних збоїв та оптимізувати робочі параметри протягом усього терміну служби акумулятора [8].

1.5 Оцінка показників ефективності BMS

Оцінка показників ефективності BMS формує мету роботи: комплексна оцінка систем керування батареями (BMS), які використовуються в акумуляторних батареях LiFePO_4 у збірках 48В, з особливим акцентом на розумінні того, як різні функції та особливості роботи BMS впливають на продуктивність, ефективність і довговічність систем, що досліджуються. Дослідження повинно дати детальний аналіз різних конфігурацій BMS, вивчення їх можливостей в управлінні ключовими параметрами продуктивності та визначення найкращих схем для оптимізації керування батареями в різноманітних застосуваннях [9].

Для повноцінного дослідження необхідно розглянути кілька типів BMS, які зазвичай використовуються в акумуляторних батареях LiFePO_4 у збірках 48 В, враховуючі як системи пасивного, так і активного балансування, а також BMS з різними рівнями складності в функціях моніторингу, контролю та зв'язку.

Пасивні BMS характеризуються своєю простотою та економічною ефективністю та використовують резистивні схеми для розсіювання надлишкової енергії від надлишково заряджених елементів у вигляді тепла. Цей метод, незважаючи на його простоту, призводить до втрат енергії та зниження ефективності, особливо в потужних системах. Активні BMS використовують більш просунуті методи, такі як перерозподіл заряду, коли надлишок енергії від надмірно заряджених елементів передається до недостатньо заряджених, покращуючи загальну ефективність і подовжуючи термін служби батареї. Необхідно якісно порівняти ці два підходи, оцінити їх переваги та недоліки в управлінні балансуванням комірок. Крім того, до аналізу та порівняння методів балансування необхідно вивчати поведінку BMS з огляду на можливість управління температурою (TMS), як за допомогою пасивних методів охолодження, природної конвекції та системи з активними системами охолодження. Їх оцінку можна здійснити на основі ефективності у підтримці оптимальних робочих температур, запобіганні перегріву та забезпеченні рівномірного розподілу температури в акумуляторній батареї [9].

З точки зору показників ефективності, необхідно визначити можливість керування ключовими параметрами: ефективність балансування комірок, ефективність термоконтролю, точність визначення значень SOC і SOH, підтримка сталості та стабільності напруги, енергоефективність. Під час досліджень необхідно отримати повне розуміння того, яким чином різні конфігурації BMS впливають на зазначені показники, та отримати інформацію про те, яким чином можна керувати вибором компонентів і проектуванням BMS для конкретних застосувань. Порівнюючи різні типи BMS необхідно визначити найкращі практики для підвищення ефективності, забезпечення цілісності та надійності і довговічності акумуляторних систем LiFePO₄ у збірках 48 В [9].

2 ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ ОБЛАШТУВАННЯ СИСТЕМ BMS

2.1 Складові елементи схем BMS

Система керування батареями (BMS) – це складна система, призначена для нагляду за функціональністю та безпекою акумуляторних блоків. BMS складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких виконує певну роль, що сприяє загальній ефективності, безпеці та довговічності акумуляторної системи. Ці компоненти включають датчики, блок мікроконтролера (MCU), комунікаційні інтерфейси та схеми захисту, кожен з яких відіграє вирішальну роль в ефективному управлінні акумулятором (рис. 2.1) [9].



Рисунок 2.1 – Апаратне забезпечення BMS

В основі BMS лежить набір датчиків, які необхідні для моніторингу різних параметрів акумуляторної батареї. Блок мікроконтролера (MCU) служить центральним процесором BMS. Комунікаційні інтерфейси мають вирішальне значення для інтеграції BMS із зовнішніми системами. Схеми захисту призначені для захисту акумуляторної батареї від потенційно шкідливих умов. Інтеграція цих компонентів у BMS створює комплексну систему, здатну керувати складною взаємодією між елементами батареї та зовнішнім середовищем. Завдяки безперервному моніторингу та контролю різних аспектів роботи батареї BMS підвищує продуктивність, безпеку та надійність акумуляторної батареї (рис. 2.2) [10].

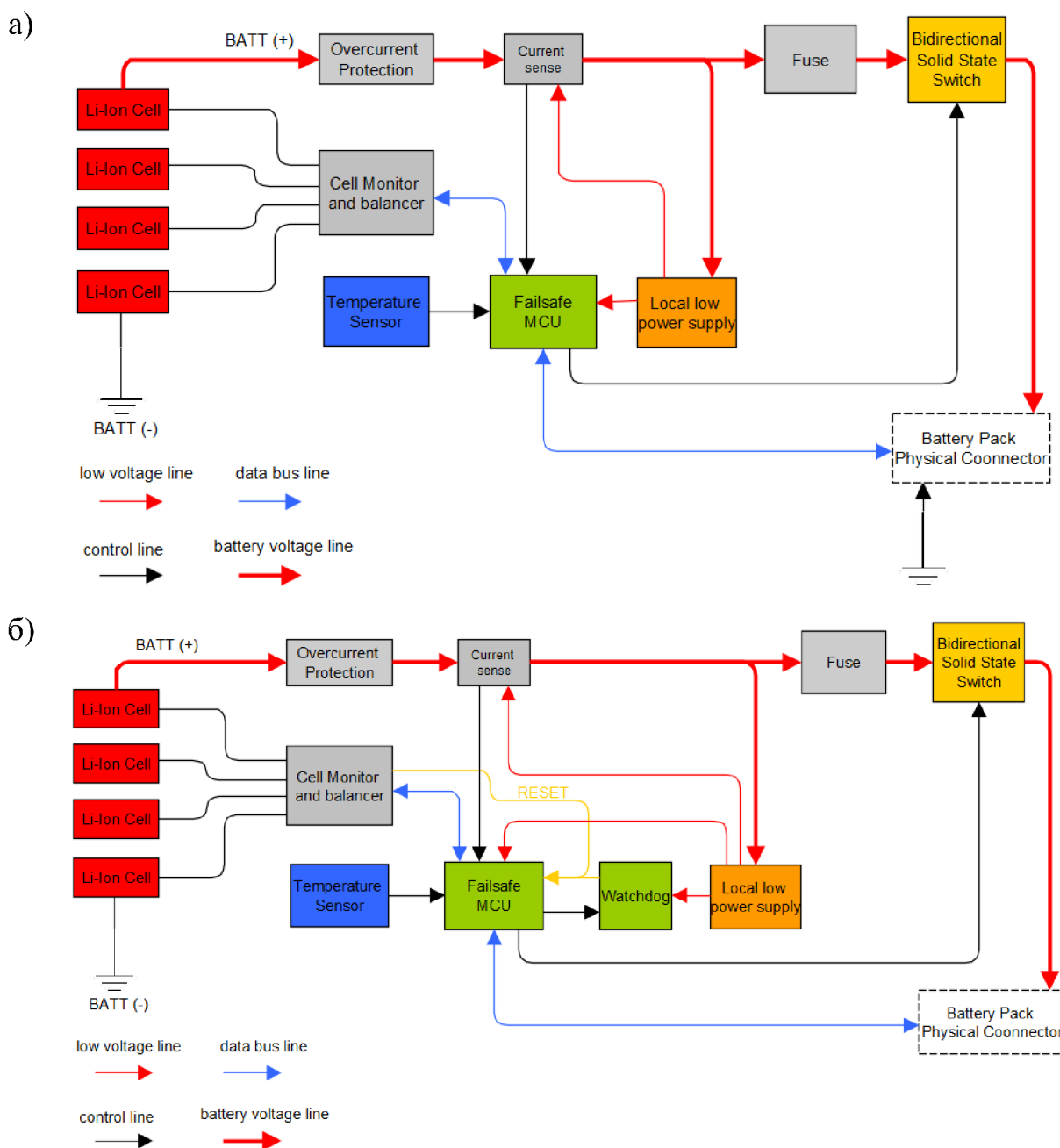


Рисунок 2.2 – Типові блок-схеми BMS: а – із застосуванням безпекового таймера MCU, б – з повною реалізацією переваг безпекового таймера: «Li-Ion Cell» – літій-іонний елемент, «Overcurrent Protection» – захист від перевантаження струмом, «Current sense» – вимірювання струму, «Cell Monitor and balancer» – моніторинг та балансування елементів, «Temperature Sensor» – датчик температури, «Failsafe MCU» – контролер безпеки, «Watchdog» – безпековий таймер, «Local low power supply» – низьковольтне джерело живлення, «Fuse» – запобіжник, «Bidirectional Solid State Switch» – двонаправлений твердотільний перемикач, «Battery Pack Physical Connector» – фізичний вимикач батарейного пакета, «low voltage line» – лінії низької напруги, «data bus line» – лінії передачі даних, «control line» – лінії управління, «battery voltage line» – лінії живлення від акумулятора

Кожен компонент відіграє особливу роль, від визначення критичних параметрів до обробки даних і впровадження захисних заходів, забезпечуючи ефективну та безпечну роботу акумулятора протягом усього життєвого циклу.

2.2 Роль і функції датчиків у складі BMS

Датчики є невід'ємною частиною функціональності системи керування батареями (BMS), та надають важливі дані, які керують механізмами моніторингу, контролю та захисту системи. У контексті BMS датчики маємо справу з датчиками напруги, датчиками струму та датчиками температури, кожен з яких виконує окрему роль у підтримці ефективності та безпеки роботи акумуляторної батареї. Датчики напруги мають вирішальне значення для відстеження електричного потенціалу елементів акумулятора. Вони вимірюють напругу окремих елементів або груп елементів, щоб переконатися, що кожен елемент працює в межах заданого діапазону напруги. Дані вимірювання є життєво важливим для запобігання таким ситуаціям, як надмірне заряджання та/або надмірне розрядження, які можуть призвести до скорочення терміну служби батареї або навіть до небезпечних/аварійних ситуацій. Датчики напруги зазвичай використовують комбінацію дільників напруги та аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) для перетворення аналогового сигналу напруги в цифровий формат, який може обробити BMS. Забезпечуючи безперервні зчитування напруги, ці датчики допомагають BMS збалансувати напругу в елементі, керувати процесом заряджання та виявляти будь-які розбіжності, які можуть вказувати на погіршення чи несправність елемента. Точний контроль напруги є важливим для збереження працездатності батареї та забезпечення оптимальної продуктивності [9].

Датчики струму вимірюють електричний струм в акумуляторній батареї. Ці датчики є основними для визначення стану заряду (SOC) і загального стану (стану працездатності) (SOH) акумулятора. Датчики струму можуть використовувати різні технології, такі як принцип Холла та/або шунтуючі резистори. Датчики на принципі Холла працюють шляхом виявлення магнітного поля, створеного струму, забезпечуючи постійність та точність вимірювання. Шунтуючі резистори вимірюють падіння напруги на еталонному резисторі, щоб визначити значення струму. Вибір вимірювальної технології впливає на точність визначення значення SOC і здатність BMS ефективно керувати процесами заряджання та розряджання. Постійно контролюючи струм, датчики струму допомагають запобігти таким проблемам, як перегрів і надмірне навантаження, забезпечуючи роботу батареї в безпечних межах струму та підвищуючи її загальну ефективність і безпеку [9].

Датчики температури відповідають за контроль теплових умов роботи акумуляторної батареї. Враховуючи, що LiFePO_4 батареї та інші літієві батареї чутливі до коливань температури, точне вимірювання температури має вирішальне значення для підтримки їх продуктивності та безпеки. Датчики температури, такі як термістори або резистивні датчики температури (RTD), надають дані про температуру в реальному часі, які BMS використовує для реалізації стратегій управління температурою. Дані стратегії можуть включати активацію систем охолодження або регулювання швидкості або струму заряджання для запобігання перегріву. Ефективне керування температурою має вирішальне значення, щоб уникнути перегріву, небезпечного стану, коли надмірне виділення тепла може призвести до виходу з ладу акумулятора або до пожежі [9].

Інтеграція зазначених датчиків у BMS забезпечує комплексну систему моніторингу, яка дозволяє точно контролювати робочі параметри батареї. Датчики напруги, струму та температури при спільній роботі сприяють детальному розумінню поточного стану батареї, дозволяючи BMS

оптимізувати продуктивність, підвищити безпеку та подовжити термін служби батареї. Кожен датчик надає важливі дані, які інформують про процеси прийняття рішень самою BMS, забезпечуючи ефективну та надійну роботу акумуляторів за різних експлуатаційних умов.

2.3 Блок мікроконтролера у складі BMS

Блок мікроконтролера (MCU) є центральним компонентом обробки системи керування акумулятором (BMS), функціонуючим як мозок, який інтерпретує дані з датчиків і координує відповіді системи. MCU має ключове значення для виконання алгоритмів і стратегій керування, необхідних для керування продуктивністю, безпекою та довговічністю батареї.

MCU обробляє дані від різних датчиків, вбудованих у BMS – датчиків напруги, струму та температури. Він виконує складні обчислення для оцінки стану заряду (SOC) і загального стану акумулятора (SOH). SOC показує поточний рівень заряду відносно загальної ємності батареї, а SOH дає уявлення про загальний стан батареї та термін служби, що залишився. Аналізуючи дані датчиків, MCU може визначити, чи працює батарея в безпечних межах, і за необхідності внести корективи в процеси заряджання або розряджання (рис. 2.3) [11].

MCU забезпечує кілька ключових функцій, які сприяють ефективному управлінню акумулятором. Даний блок реалізує алгоритми, що оптимізують балансування елементів, забезпечуючи рівномірний заряд і розряд усіх комірок акумулятора. Балансування окремих комірок має вирішальне значення для підтримки продуктивності та терміну служби акумуляторної батареї, оскільки дисбаланс може призвести до зниження ефективності та прискореної деградації слабших елементів. MCU також

мікроконтролери загального призначення з відповідним програмним забезпеченням для керування функціями BMS. Вибір MCU впливає на загальну продуктивність і можливості BMS, причому на ефективність його роботи впливають такі значення, як потужність обробки, пам'ять і комунікаційні можливості. Загалом, MCU займає центральне місце у BMS, який координує збір та обробку даних, реалізує алгоритми керування та впроваджує заходи безпеки. Його роль є вирішальною для забезпечення ефективної, безпечної роботи батареї та в межах запроєктованих параметрів. Керуючи складною взаємодією між елементами батареї та зовнішніми системами, MCU допомагає оптимізувати роботу батареї та подовжити термін її служби [11].

2.4 Інтерфейси зв'язку в BMS

Комунікаційні інтерфейси є важливими компонентами системи керування акумулятором (BMS), що дозволяє їм обмінюватися даними із зовнішніми системами та контролерами. Виокремлюють два основні комунікаційні інтерфейси, що використовуються в конструкціях BMS, – це шина ланцюгів контролера (CAN) і апаратний модуль (UART), кожен з яких пропонує різні переваги та область застосування.

Ланцюги контролера (CAN) – це досить надійний і широко використовуваний протокол зв'язку. Даний інтерфейс забезпечує високошвидкісний та надійний спосіб обміну даними між кількома пристроями. У BMS шина CAN дозволяє BMS обмінюватися даними з іншими компонентами, такими як головний блок керування, система заряджання та діагностичні інструменти. CAN-шина працює на основі протоколу, що оперує повідомленнями від пристроїв, що містять дані в стандартизованому форматі. Це забезпечує ефективний зв'язок у режимі

реального часу. Протокол CAN-шини дозволяє виявити та виправити помилки, забезпечуючи цілісність переданих даних і підвищуючи надійність мережі зв'язку. Однією з ключових переваг CAN-шини є її здатність одночасно обробляти кілька каналів зв'язку, здійснюючи одночасний обмін даними між різними пристроями. Ця спроможність може бути особливо корисною в складних системах, де BMS потрібно взаємодіяти з кількома зовнішніми контролерами та датчиками. Крім того, CAN-шина підтримує конфігурацію з кількома майстрами, що означає, що кілька пристроїв можуть ініціювати зв'язок, що додає системі гнучкості та масштабованості. CAN-шина також відома своєю надійністю в «порушених» електричних середовищах, що робить її придатною для використання в автомобільних і промислових умовах, де електромагнітні перешкоди можуть бути суттєвою проблемою (рис. 2.4) [12].

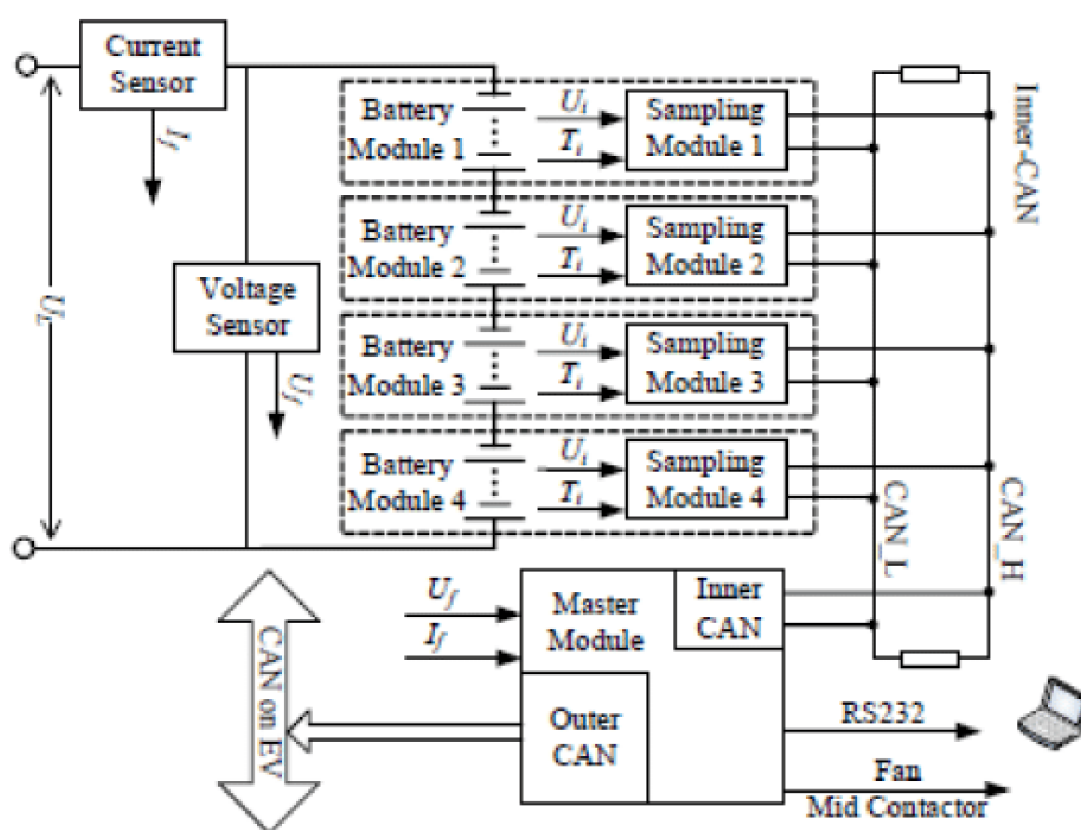


Рисунок 2.4 – Структура BMS на основі CAN-шини

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) є ключовим компонентом у системах управління батареями (BMS), який забезпечує асинхронну передачу даних між різними модулями системи або між BMS та зовнішніми пристроями. UART виконує функцію апаратного модуля, який дозволяє здійснювати послідовну передачу даних без необхідності використання додаткових синхронізуючих ліній, як це характерно для синхронних протоколів, таких як SPI або I2C. Ця асинхронна передача досягається шляхом попереднього узгодження швидкості передачі даних між передавачем і приймачем, що забезпечує надійний і ефективний зв'язок між компонентами системи. У системі BMS модуль UART використовується для забезпечення обміну інформацією між системою управління акумуляторними батареями і зовнішніми пристроями, до яких можуть належати комп'ютери, контролери або інші модулі системи. Такий обмін може включати передачу критично важливих даних про стан батареї, зокрема інформацію про напругу, струм, температуру, рівень заряду, а також команди для налаштування та/або оновлення системи. Однією з важливих переваг UART є його простота в реалізації та висока надійність, що робить його особливо привабливим для використання у вбудованих системах, де потрібна економічно ефективна комунікація з мінімальними вимогами до апаратного забезпечення (рис. 2.5) [13].

UART працює з використанням лише двох основних ліній зв'язку: TX для передачі і RX для прийому даних. Це робить його надзвичайно компактним рішенням для комунікації в системах, де простота і надійність є пріоритетом. Додаткові лінії, такі як RTS (Request to Send) і CTS (Clear to Send), можуть використовуватися для керування потоком даних, але вони не є обов'язковими і застосовуються тільки за необхідністю. Цей підхід дозволяє мінімізувати складність системи і водночас підтримувати високий рівень надійності передачі інформації. UART є невід'ємним компонентом сучасних систем управління акумуляторними батареями, і здатен забезпечити ефективний та надійний обмін інформацією між

2.5 Схеми захисту BMS

Схеми захисту, реалізовані в системах управління батареями (BMS), є ключовим елементом для забезпечення безпечної і надійної роботи акумуляторних систем. Ці схеми призначені для запобігання потенційно небезпечним станам, які можуть виникнути під час експлуатації акумуляторів, і для забезпечення тривалого терміну їх служби. Основними функціями схем захисту BMS є моніторинг і управління критичними параметрами батареї, такими як напруга, струм і температура, а також запобігання небезпечним станам, таким як перезаряд, надмірний розряд, перевищення встановленої величини струму або коротке замикання (рис. 2.6) [14].

Захист від перезаряду є основною функцією BMS, що запобігає перезарядці батареї понад максимальне значення напруги. Заряджання акумулятора вище номінальної напруги може спричинити значні проблеми, зокрема перегрів, скорочення терміну служби, а в окремих випадках – суттєве перегрівання або пожежу. Щоб запобігти перезарядці, BMS постійно відстежує напругу кожної комірки та порівнює її з заздалегідь визначеними граничними значеннями. Коли напруга елемента наближається або перевищує максимальну межу, BMS «втручається», зменшуючи зарядний струм або від'єднуючи батарею від зарядного пристрою. Такий підхід допомагає підтримувати акумулятор у безпечних діапазонах напруги та запобігає потенційним загрозам безпеці, пов'язаним із перезарядженням [9].

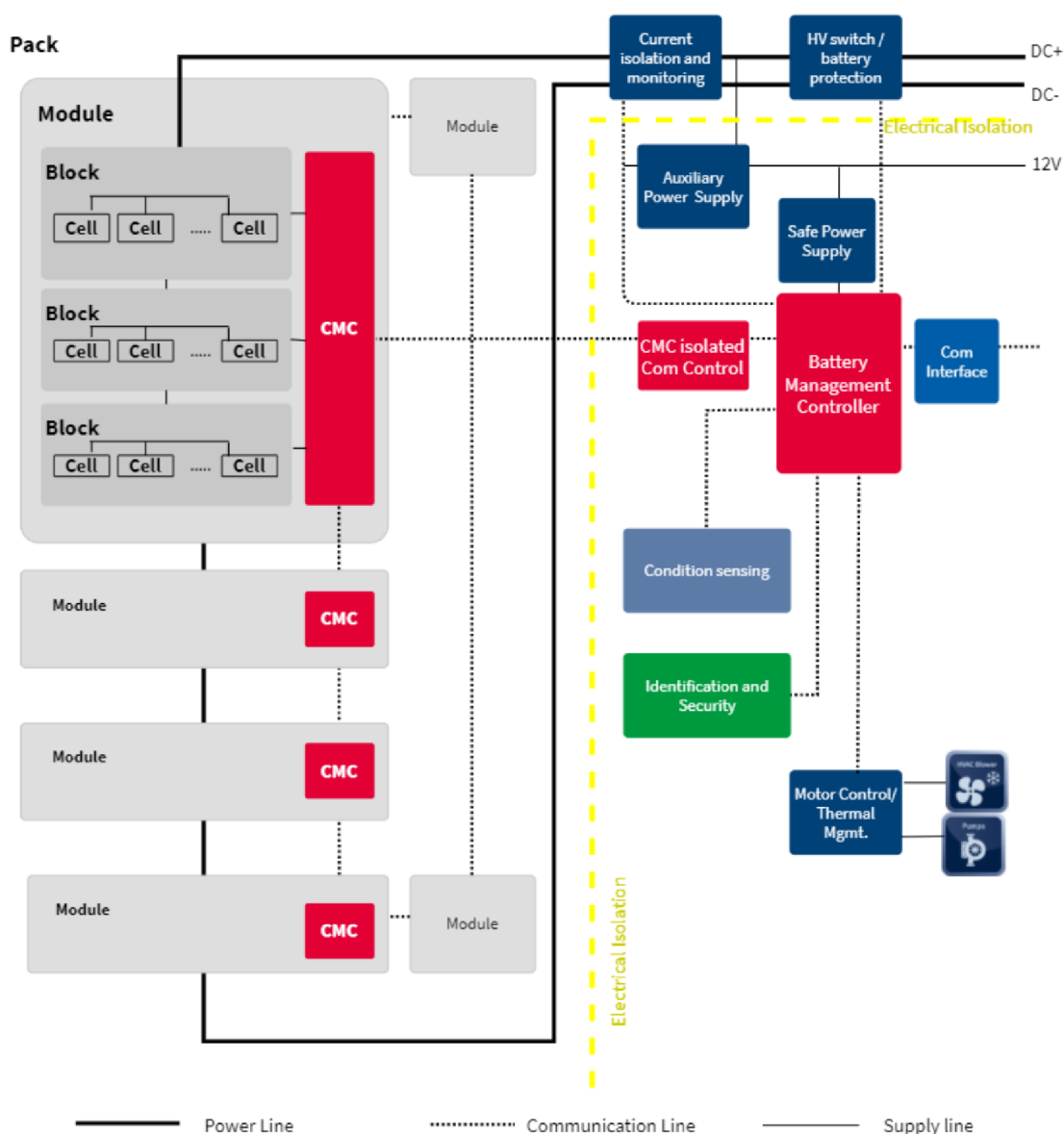


Рисунок 2.6 – Схема захисту багатомодульних батарей: Ось усі переклади в одному рядку за заданим шаблоном: «Pack» – пакет, «Module» – модуль, «Block» – блок, «Cell» – акумуляторна комірка, «CMC» – центральний модуль управління (ЦМУ), «Current isolation and monitoring» – ізоляція і моніторинг струму, «HV switch/battery protection» – високовольтний перемикач/захист батареї, «Auxiliary Power Supply» – додаткове живлення, «Safe Power Supply» – аварійне живлення, «Battery Management Controller» – контролер управління акумулятором, «CMC isolated Com Control» – ізольоване керування комунікацією ЦМУ, «Com Interface» – інтерфейс комунікації, «Condition sensing» – відстеження стану, «Identification and Security» – ідентифікація та безпека, «Motor Control/Thermal Mgmt.» – керування двигуном/теплове управління, «Electrical Isolation» – електрична ізоляція, «Power Line» – силова лінія живлення, «Communication Line» – лінія зв'язку, «Supply Line» – лінія живлення, «DC+» – постійний струм +, «DC-» – постійний струм -, «12V» – 12В.

Захист від надмірного розряду також важливий, оскільки він гарантує, що акумулятор не розрядиться нижче мінімального порогу напруги. Занадто глибокий розряд акумулятора може призвести до незворотного пошкодження, вплинувши на ємність акумулятора та його загальний стан. BMS контролює рівні напруги окремих комірок під час розряду та активує захисні заходи, коли напруга падає до небезпечного рівня. Відключаючи батарею або обмежуючи струм розряду, BMS запобігає глибоким розрядам, які можуть поставити під загрозу продуктивність і термін служби акумуляторної батареї [9].

Захист від перевантаження по струму має на меті запобігання протіканню надлишкових струмів, який може спричинити перегрів або пошкодження елементів акумуляторної батареї. Цей захисний механізм особливо важливий під час ситуацій високого навантаження, коли можливі раптові стрибки струму. BMS використовує датчики струму для моніторингу потоку електроенергії та порівнює його з «безпечними» значеннями. Якщо струм перевищує ці межі, BMS запускає захисні дії, такі як зменшення потоку струму або відключення батареї від навантаження. Це допомагає запобігти перегріву та гарантує, що батарея працює в межах безпечного діапазону струмів [9].

Захист від короткого замикання є ще однією важливою функцією безпеки, розробленою для виявлення та зменшення впливу короткого замикання, які можуть спричинити швидкі та потенційно небезпечні для елементів акумуляторної батареї величини струмів. Коротке замикання може призвести до надмірного виділення тепла, що потенційно може спричинити пожежу або пошкодити батарею. BMS містить схеми, які можуть швидко визначати наявність струмів короткого замикання та відповідним чином зреагувати, від'єднуючи уражені комірки або вимикаючи всю акумуляторну систему [9].

Тепловий захист важливий для керування температурою акумуляторної батареї, оскільки LiFePO_4 та інші літєві батареї чутливі до

екстремальних температур. BMS використовує датчики температури для моніторингу теплового стану акумуляторної батареї та за потреби реалізує стратегії охолодження чи нагрівання. Якщо температура перевищує безпечні пороги, BMS може активувати системи охолодження, зменшити швидкість зарядки або запустити інші захисні заходи, щоб повернути температуру акумуляторної батареї в прийнятні межі [9].

Загалом схеми захисту є життєво важливими для ефективного керування акумуляторною батареєю, запобігаючи різним ризикам, пов'язаним із надмірним заряджанням, надмірним розрядом, надмірним струмом, короткими замиканнями та температурними умовами. Завдяки безперервному моніторингу та реагування на ці умови, BMS підвищує безпеку та надійність акумуляторної системи, забезпечуючи її роботу в межах проектних параметрів і подовжуючи термін її служби.

2.6 Проблемні питання при проектуванні та експлуатації BMS

Масштаби досліджень про технологію літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів і пов'язаних із ними систем керування акумуляторами (BMS) в останні роки значно збільшилися. Це зростання зумовлено зростаючим попитом на ефективні, безпечні та надійні рішення для накопичення енергії в різних сферах застосування. Незважаючи на значний прогрес у цьому питанні, існують кілька чинників, які обмежують повне розуміння та оптимізацію акумуляторних систем з LiFePO_4 [9]:

- відсутність однозначних довгострокових даних про нормальну роботу акумуляторів LiFePO_4 , особливо за різних умов експлуатації. На теперішній час більшість досліджень зосереджено на коротко- та середньострокових показниках роботи акумуляторних систем. Здійснювані циклічні випробування в контрольованих лабораторних умовах часто не

враховують складності реальних умов роботи та впливу факторів навколишнього середовища (коливання температури, вологість, механічні вібрації та інші),

– відсутність однозначних даних про вплив різноманітних «факторів стресу» протягом тривалих періодів експлуатації – висока швидкість розряду, збільшення числа циклів зарядів-розрядів, виникнення екстремальних температур.

Незважаючи на те, що роль BMS у підвищенні безпеки, ефективності та тривалості функціонування акумуляторів LiFePO_4 визначена як однозначна, існують помітні прогалини в дослідженнях, спрямованих саме на оптимізацію алгоритмів BMS та апаратного забезпечення для конкретного хімічного складу LiFePO_4 . Більшість конструкцій BMS розроблено з використанням універсального підходу, враховуючи низку літій-іонних хімікатів без пристосування до унікальних характеристик акумуляторів LiFePO_4 . Ця відсутність специфічності може призвести до неоптимальної продуктивності, оскільки BMS може не повністю використовувати переваги, властиві LiFePO_4 , такі як більш широкий діапазон безпечних робочих температур і низький ризик перегріву. Тому існує нагальна потреба в дослідженнях, зосереджених на розробці вдосконалених алгоритмів оцінки стану заряду (SOC) і стану працездатності (SOH), які будуть спеціально оптимізовані для елементів LiFePO_4 . Існуючі алгоритми часто мають проблеми з точністю через «плоску» криву розряду акумуляторів LiFePO_4 , що робить оцінку SOC більш складною порівняно з іншими хімічними складами акумуляторів. Крім того, методи моніторингу SOH, розроблені для повільної та стабільної деградації елементів LiFePO_4 , є недосконалими, що призводить до менш точних прогнозів тривалості роботи акумулятора та поточного стану [9].

Іншою прогалиною в дослідженнях є обмежене розуміння впливу високошвидкісного заряджання та розряджання на комірки акумуляторів

LiFePO₄. Хоча ці батареї відомі своєю здатністю витримувати відносно високі швидкості заряду та розряду, конкретні механізми, за допомогою яких високі швидкості впливають на їх продуктивність і довговічність, до кінця не з'ясовані. Більшість існуючих досліджень зосереджено на низьких і помірних рівнях, залишаючи прогалину в знаннях щодо поведінки акумуляторів LiFePO₄ в екстремальних умовах або сценаріях швидкісної зарядки. Вплив високошвидкісного заряджання на внутрішній опір, зменшення ємності та управління температурою всередині акумуляторної батареї є областями, які потребують подальшого дослідження. Розуміння цих факторів має вирішальне значення для оптимізації алгоритмів BMS, які можуть ефективно керувати високошвидкісними операціями без шкоди для безпеки та/або довговічності функціонування акумуляторів. Крім того, розробка та впровадження ефективних стратегій управління температурою, які можуть впоратися зі збільшенням теплогенерації, пов'язаного з високошвидкісним заряджанням і розряджанням, є тією областю, де необхідні подальші дослідження [8].

Оскільки впровадження акумуляторів LiFePO₄ продовжує зростати, питання переробки та управління терміном служби (EOL) стає все більш актуальним. Однак поточні дослідження процесів переробки та впливу батарей LiFePO₄ на навколишнє середовище відносно обмежені. Більшість досліджень з переробки батарей зосереджено на інших літій-іонних хімічних конструкціях, таких як оксид літію-кобальту (LiCoO₂), через високий вміст цінних та небезпечних матеріалів, таких як кобальт. Навпаки, акумуляторам LiFePO₄, які не містять кобальту чи інших токсичних важких металів, приділяється менше уваги в контексті їх переробки. Тому існує потреба в додаткових дослідженнях ефективних і стійких методів переробки акумуляторів LiFePO₄, включаючи відновлення літієвих, залізних і фосфатних матеріалів. Крім того, у дослідженнях слід досліджувати розвиток додатків другого терміну служби LiFePO₄ батарей, де використані батареї перепрофілюються для менш вимогливих

застосувань перед повною переробкою. Розуміння екологічних та економічних наслідків цих процесів має вирішальне значення для розвитку циклічної економіки використання акумуляторів LiFePO_4 . Дослідження в цій області повинні бути спрямовані на надання більш повної картини «екологічного сліду» від акумуляторів LiFePO_4 , включаючи викиди парникових газів, споживання енергії та потенціал виснаження ресурсів. Це допомогло б порівняти стійкість акумуляторів LiFePO_4 з іншими технологіями накопичення енергії та виявити можливості для зменшення їх впливу на навколишнє середовище шляхом удосконалення конструкції, виробництва та управління після закінчення терміну служби.

Нарешті, досі існують прогалина в області стандартизації та порівняльному аналізі продуктивності BMS для батарей LiFePO_4 . Незважаючи на те, що різні дослідження вивчали різні аспекти функціональності BMS, не вистачає узгоджених підходів, які можна було б використовувати для порівняння продуктивності різних конструкцій BMS. Відсутність стандартизації ускладнює оцінку ефективності нових технологій BMS або визначення найкращих методів керування LiFePO_4 батареями в різних застосуваннях. Встановлення стандартизованих протоколів тестування та показників продуктивності для BMS у акумуляторних системах LiFePO_4 було б значним кроком вперед. Ці стандарти мають охоплювати широкий спектр умов, включаючи різні швидкості заряджання та розряджання, температури та циклічні сценарії, щоб забезпечити комплексну оцінку продуктивності BMS.

У підсумку, незважаючи на значний прогрес у розробці та розумінні акумуляторів LiFePO_4 та пов'язаних з ними технологій BMS, у поточному дослідницькому середовищі залишається кілька критичних «недоробок». Усунення цих прогалин, таких як потреба в довгострокових даних про продуктивність, оптимізація BMS для конкретного хімічного складу LiFePO_4 , розуміння високошвидкісних операцій, міркування щодо переробки та сталого розвитку, а також стандартизація, буде мати важливе

значення для просування галузі та забезпечення широкого впровадження батарей LiFePO_4 у різноманітних застосуваннях.

2.7 Огляд проблемних питань балансування акумуляторних батарей

2.7.1 Дисбаланс під час заряджання комірок з різним хімічним складом

Дослідження алгоритмів балансування елементів в акумуляторних блоках LiFePO_4 , особливо тих, що містять визначену кількість послідовно-з'єднаних елементів, виявило значну проблему для досягнення найбільш ефективного використання акумуляторної збірки. Балансування комірок зазвичай досягається шляхом виокремлення тих, на яких під час заряджання або розряджання виявлена відмінна за встановлене значення напруга. Однак ефективність такого підходу є досить неефективною. Використання такого показника як «різниця напруг» у якості індикатора дисбалансу не повністю враховує складність хімічних процесів, що відбуваються в акумуляторі та швидкість заряду або розряду. Ця обмеженість у використанні показників стану може призвести до прийняття невірних стратегій балансування. Застосування методів балансування на основі напруги іноді може призвести до того, що акумуляторна батарея буде більш незбалансованою, ніж якби балансування взагалі не проводилося. Таким чином, можна зробити висновок, що хоча балансування елементів є критично важливим аспектом керування батареєю, поточні підходи, засновані на напрузі, можуть бути недостатніми або навіть потенційно шкідливими для акумуляторів. Для розробки більш ефективних і надійних стратегій балансування необхідне більш повне розуміння основних хімічних процесів і поведінки акумуляторних батарей [15].

Дисбаланс під час заряджання між комірками виникає в разі, коли окремі комірки заряджені до різних рівнів SOC, що призводить до розбіжностей у їх хімічному стані. Цей дисбаланс проявляється, коли елементи з однаковою ємністю розряджаються нерівномірно, що призводить до різного відсоткового значення SOC. Комірка з нижчим SOC демонструватиме нижчу напругу холостого ходу (OCV), оскільки OCV безпосередньо пов'язана з SOC. Хоча відсоток дисбалансу SOC залишається постійним під час розряду, різниця напруги між осередками коливається через різне співвідношення між напругою та SOC. Це підкреслює складність управління дисбалансом SOC в акумуляторних системах [15].

Варіативність хімічного складу окремих комірок може мати значний вплив на їх ємність, особливо в залежності від того, як вони реагують на показник заряду (SOC) під час експлуатації. Навіть коли комірки розряджаються на однакову величину, відмінність в їх хімічному стані/складі впливає на кінцеву ємність в результаті заряду. Це явище пояснюється тим, що елементи з різною ємністю досягають різних рівнів SOC, навіть якщо вони піддаються ідентичним умовам розряду та заряду. Ця відмінність хімічного стану між комірками може призвести до розбіжностей у їх напругах холостого ходу (OCV), на які безпосередньо впливає SOC. Це вказує на те, що, незважаючи на те, що дисбаланс ємності між комірками дійсно впливає на різницю по напрузі, і ці відмінності, як правило, менш виражені, ніж ті, що спричинені дисбалансом прямого заряду. Така поведінка підкреслює важливість врахування різниці ємностей під час оцінки балансу комірок в пакеті. Зв'язок між SOC, ємністю та OCV є складним і взаємозалежним, що підкреслює необхідність ретельного управління дисбалансом ємності для забезпечення оптимальної продуктивності та довговічності акумуляторних систем. Розуміння цієї динаміки має вирішальне значення для розробки більш ефективних і надійних рішень для накопичення енергії [16].

2.7.2 Вплив внутрішнього опору комірок на дисбаланс акумуляторної батареї

У виробничих партіях акумуляторів спостерігається досить широка варіація внутрішнього опору комірок, що може значно вплинути на працездатність і стійкість під час заряджання та розряджання. Відмінності внутрішнього опору не впливають на напругу холостого ходу (OCV) комірок, вона призводить до розбіжностей напруг комірок під навантаженням. Зокрема, під час розряду елементи з вищим внутрішнім опором демонструють нижчу напругу, тоді як під час заряджання спостерігається підвищене значення напруги. Ключовою проблемою, пов'язаною з дисбалансом опорів, полягає в тому, що його неможливо виправити за допомогою алгоритмів балансування, які зазвичай використовуються для керування різницями в стані заряду (SOC). Спроба збалансувати комірки на основі вимірювань напруги під навантаженням може призвести до неправильної інтерпретації, оскільки різниця напруги, що спостерігається, може бути наслідком різних внутрішніх опорів, а не дисбалансу заряду. Це невірне тлумачення може призвести до того, що процес балансування посилить розбіжності у величині SOC між комірками, що призведе до ще більшого дисбалансу SOC до кінця циклу заряджання. Результатом такого керування дисбалансом є те, що комірки з вищим значенням внутрішнього опору можуть досягати вищих значень напруги холостого ходу наприкінці заряджання, потенційно запускаючи механізми безпеки, призначені для запобігання перезаряду. Це підкреслює важливість врахування величин внутрішнього опору комірок під час керування акумуляторними системами, оскільки неправильне поводження з цим дисбалансом може поставити під загрозу продуктивність і безпеку акумуляторної батареї. Розуміння складних взаємодій між внутрішнім опором і значенням SOC може бути вирішальним при пошуку шляхів для

розробки більш ефективних стратегій керування акумуляторними батареями та забезпечення довгострокової надійності систем зберігання енергії [16].

2.7.3 Порухення вимог безпеки в разі перезаряджання комірок

Акумуляторні батареї LiFePO_4 через високу щільність енергії в них та компактні розміри характеризуються ризиком для безпеки. Це значною мірою пов'язано з використанням активних хімічних елементів, що «запаковано» в невеликому об'ємі. Сучасні засоби захисту можуть ефективно запобігати різноманітним електричним аваріям, а справжня небезпека полягає в потенційній можливості перезаряджання та як наслідок – до перегріву. Зазначені умови можуть викликати небезпечні хімічні реакції між активними компонентами батареї та електролітом, що може призвести до аварійних станів. Наприклад, перегрів виникає в разі, коли один елемент перезаряджається понад встановлені межі напруги, що викликає низку реакцій, які призводять до надмірного виділення тепла. Це тепло може поширюватися на сусідні елементи акумуляторної батареї, викликаючи ланцюгову реакцію, яка може завершитися вибухом або пожежею. Тому, вкрай важливо впроваджувати механізми балансування комірок, щоб запобігти набуття будь-якою окремою коміркою небезпечного рівня напруги. Захисні схеми повинні бути розроблені таким чином, щоб негайно припинити зарядку, якщо вони виявляють, що комірка наближається до небезпечного порогу напруги, таким чином запобігаючи виникненню небезпечних станів [17].

Системи керування акумуляторними батареями реалізують функції контролю перенапруги комірок і призначені для автоматичного припинення процесу заряджання, якщо напруга будь-якого елемента

перевищує попередньо встановлений поріг. Цей механізм дуже ефективний у запобіганні загроз безпеці, пов'язаних із надмірним заряджанням. Недоліком цього захисного заходу є те, що він часто призводить до недозаряду комірок акумуляторних батарей, що значно зменшує їх корисну ємність. Якщо заряджання припиняється передчасно, щоб уникнути перенапруги, акумуляторна батарея може не досягти свого повного потенціалу заряду, що призведе до зниження загальної здатності накопичувати енергію. Це зменшення ємності може вплинути на продуктивність і термін служби акумуляторної батареї, зменшуючи її ефективність при тривалому використанні. Ефективне балансування комірок може допомогти зберегти цілісність акумуляторної батареї, запобігаючи ситуаціям виникнення перенапруги, таким чином дозволяючи батареї досягти свого повного потенціалу заряду та подовжуючи термін її служби. Це підкреслює тонкий баланс між забезпеченням безпеки та досягненням максимальної корисної ємності акумулятора [17].

Щоб захистити комірки акумуляторних батарей від пошкодження внаслідок надмірного розряду, системи керування батареями повинні бути запрограмовані на припинення процесу розряду, коли будь-яка окрема комірка досягає критичного низького значення напруги. Цей поріг ретельно встановлюється, як правило, на рівні трохи нижчому за середню напругу в усьому блоку, щоб врахувати незначні дисбаланси між комірками. Встановлення цього обмеження необхідно для запобігання поступовому пошкодженню комірок, що може виникнути, якщо їх напруга падає до досить низького рівня. Ці захисні заходи також можуть обмежити загальний час розряду батареї і щоб вирішити цю проблему застосовують стратегію, що полягає в «обході» елементів з низьким значенням напруги на останніх стадіях розряду, що ефективно подовжує час роботи всієї акумуляторної батареї. Реалізація такого обходу вимагає високошвидкісних засобів, які забезпечать можливість обходу. Так засоби є досить дорогими та складними для інтеграції в систему контролю. Більш

ефективний і дешевший підхід передбачає безперервне керування та виправлення будь-яких дисбалансних станів у стані заряду (SOC) протягом усього циклу заряджання та розряджання. Усунення цих дисбалансів на ранніх стадіях і послідовно для визначених комірок, а не лише тоді, коли значні перепади напруги виникають наприкінці фази розряду, можна покращити загальну продуктивність і довговічність акумуляторних батарей. Ця стратегія завчасного управління не тільки збільшує час розряду батареї, але й сприяє більш збалансованій і стабільній системі зберігання енергії, зменшуючи потребу у дорогих апаратних рішеннях [17].

2.8 Огляд наукових досліджень по роботі акумуляторних збірок LiFePO_4

У статті [18] представлено дослідження, спрямоване на підвищення продуктивності та довговічності літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторних блоків, які зазвичай використовуються в електромобілях (EV) через їх високу щільність енергії, тривалий термін служби та високу ефективність. У дослідженні розглядається критична проблема невідповідності напруги та ефективності використання ємності в акумуляторних блоках, що складаються з кількох елементів, з'єднаних послідовно або паралельно, проблема, яка виникає як через відмінності у виробництві, так і через умови експлуатації. Основна мета дослідження полягає в оптимізації граничної напруги розряду (DCV), ключового параметра, який суттєво впливає на постійність напруги на клеммах і ефективність використання ємності акумулятора. За допомогою цієї оптимізації автори намагаються знайти баланс та компроміси між підтримкою високої ефективності використання ємності та запобіганням

надмірному розрядженню окремих елементів, що може призвести до проблем з безпекою та прискореної деградації. Пропонується метод оптимізації, який враховує три основні чинники: ефективність використання потужності, дисперсію напруги на клеммах і мінімальну напругу на клеммах. Застосовуючи цей метод, можна визначити зв'язок між оптимізованим значенням DCV і кількістю елементів в акумуляторній батареї. Дослідження показує, що за допомогою оптимізації значення постійного струму різницю напруги на клеммах можна значно зменшити – до 10,7% – у той час як мінімальна напруга на клеммах трохи збільшується, забезпечуючи запобігання перерозряду елементів. Хоча є незначне зниження ефективності використання ємності (приблизно 0,5%), це вважається незначним у світлі загальних переваг. Отримані дані свідчать про те, що оптимізація значення DCV не тільки покращує узгодженість напруг на клеммах елементів, подовжуючи таким чином термін служби акумуляторної батареї, але також підвищує безпеку та надійність акумуляторної системи.

У статті [19] представлено детальне дослідження оптимізації роботи систем керування батареями (BMS) з акцентом на оцінку стану заряду (SOC) за допомогою передових методів фільтрації. Основна мета дослідження полягає в тому, щоб підвищити точність і надійність оцінки SOC, що має вирішальне значення для ефективної роботи і довговічності літій-іонних акумуляторів. Дослідження визнає проблеми, пов'язані з моделюванням SOC через нелінійну поведінку батарей і наявність шуму в даних, зібраних під час роботи. Щоб вирішити ці проблеми, дослідження вивчає застосування двох методів фільтрації: розширеного фільтра Калмана (EKF) і фільтра часток (PF). Хоча метод EKF широко використовується завдяки балансу між точністю та простотою обчислень, він має суттєві помилки ініціалізації та є менш ефективним за наявності «шуму». За допомогою моделювання в роботі визначено, що застосування фільтрів, незважаючи на зростання числа обчислень, забезпечує більш точні

оцінки SOC в умовах наявності «шуму». Дослідження підкреслює необхідність подальшого вдосконалення функцій напруги відкритого ланцюга (OCV) та вдосконалення алгоритму на основі PF для зменшення помилок оцінки стану LiFePO_4 акумуляторних батарей.

У статті [20] дослідження, зосереджене на розробці та впровадженні системи керування батареями (BMS) з використанням принципу пасивного балансування. Супутньо вирішуються проблеми, пов'язані зі збереженням продуктивності та подовженням терміну служби літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторних батарей з огляду на їх високу щільність енергії та вимоги до безпеки. Дослідження визнає необхідність керування станом заряду (SOC) і станом розряду (SOH) окремих елементів всередині акумуляторної батареї, оскільки розбіжності в поведінці заряджання та розряджання елементів можуть призвести до серйозних проблем, таких як перезарядження, недозарядження та теплові розбіжності, що зрештою погіршує загальну продуктивність і безпеку акумуляторної батареї. Для вирішення зазначених проблем, дослідники пропонують до застосування систему керування батареями, яка включає мережу пасивного балансування комірок, що реалізується шляхом керування процесором цифрових сигналів (DSP). Ця система призначена для вирівнювання напруги окремих елементів шляхом розсіювання надлишкової енергії через резистори, тим самим запобігаючи несприятливим ефектам дисбалансу напруги. Дослідження спирається як на результати моделювання, так і результати апаратного забезпечення для підтвердження ефективності запропонованого підходу. Було показано, що мережа пасивного балансування елементів, керована DSP, ефективно підтримує значення напруги в елементах і точно оцінює SOC, тим самим підвищуючи надійність і безпеку акумуляторної батареї. Результати показали, що, хоча пасивне балансування комірок є менш ефективним, ніж активні методи через розсіювання енергії, воно залишається життєздатним і економічно ефективним рішенням. Запропонована система не тільки покращує

довговічність і продуктивність акумуляторної батареї, але також пропонує практичний і економічно обґрунтований підхід до впровадження BMS.

У статті [21] здійснено детальне дослідження щодо розробки та перевірки передових алгоритмів оцінки стану заряду (SOC) елементів літій-іонної батареї з використанням фільтра Калмана (UKF). Метою роботи було підвищення точності та надійності оцінки SOC в системах керування батареями (BMS), що має вирішальне значення для безпечної та ефективної роботи систем зберігання енергії. Дослідження визнає складність точного вимірювання та оцінки стану батареї, наприклад SOC, через нелінійну поведінку та різні умови роботи літій-іонних елементів. Щоб вирішити ці проблеми, дослідження зосереджено на впровадженні фільтра UKF, вдосконаленого алгоритму оцінки стану, який пропонує покращену точність у порівнянні з традиційними методами, такими як розширений фільтр Калмана (EKF), шляхом зменшення помилок лінеаризації. Дослідження описує розробку апаратного тестового стенду (HiL) у режимі реального часу для перевірки алгоритму UKF. На цьому випробувальному стенді моделюється поведінка літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) елементів за різних умов, що дозволило дослідникам перевірити алгоритм у контрольованому середовищі без ризиків, пов'язаних із реальними акумуляторними системами. Налаштування HiL дозволяє симулювати критичні та небезпечні стани, такі як глибокий розряд, який важко перевірити на реальних батареях. Дослідження демонструє, що UKF може точно оцінити SOC окремих елементів акумуляторної батареї з максимальною похибкою не більше 1% під час тестування. Такий рівень точності має вирішальне значення для забезпечення безпечної роботи акумуляторних систем і оптимізації їх продуктивності та терміну служби. Крім того, дослідження підкреслює переваги використання тестового стенду HiL, включаючи можливість введення шуму вимірювання та зсувів, тим самим перевіряючи надійність алгоритму в реальних умовах. Результати вказують на те, що UKF дуже ефективний в управлінні

помилками оцінки, які зазвичай виникають через неточності вимірювань, що робить його цінним інструментом для пристроїв BMS.

У статті [22] представлено дослідження, метою якого була розробка та перевірка розширеного алгоритму оцінки стану заряду (SOC) літій-залізо-фосфатної (LiFePO_4) батареї. Основною метою дослідження було вирішення проблем оцінки параметра SOC, який є критичним для ефективного управління та безпеки акумуляторних систем. Традиційні методи, такі як підрахунок Кулона (CC), схильні до помилок з часом через їх чутливість до неточностей вимірювань, що призводить до значних розбіжностей між оціненим і фактичним значенням SOC. Щоб подолати ці обмеження, дослідження запроваджує гібридний алгоритм, який поєднує розширений кулонівський підрахунок (ECC) з виявленням заряду постійної напруги (CVCD) та моделлю напруги відкритого ланцюга (OCV). Цей гібридний підхід призначений для підвищення точності, простоти та адаптації до різних умов експлуатації. Дослідження були методично перевірені за допомогою експериментів у реальному часі з використанням трьох різних типів елементів LiFePO_4 у різноманітних тягових застосуваннях. Кожна програма визначила унікальні проблеми з точки зору типів навантаження, температур і діапазонів SOC, що дозволило дослідникам продемонструвати універсальність і надійність алгоритму. Процес перевірки передбачав використання платформи перевірки в реальному часі, оснащеної спеціально розробленим апаратним забезпеченням Module Management System (MMS) і системою віртуального прототипування dSPACE для моделювання реальних умов експлуатації. Результати показали, що запропонований алгоритм постійно підтримував помилки оцінки SOC у прийнятних межах, з максимальною помилкою близько 5% у найскладніших сценаріях. У дослідженні зроблено висновок, що запропонований алгоритм оцінки SOC є дуже ефективним та пропонує баланс між точністю та обчислювальною ефективністю. Представлений алгоритм робить його придатним для різних конфігурацій акумуляторних

батарей і умов експлуатації. Моделі, що враховують ефекти гістерезису та температурні залежності елементів LiFePO_4 , підвищує надійність оцінки SOC у широкому діапазоні середовищ.

У статті [23] представлено комплексне дослідження щодо розробки та впровадженні нової конструкції батареї, яка значно підвищує надійність, відмовостійкість та ефективність перетворення енергії багатoelementних батарейних систем. Традиційні багатoelementні батареї, які покладаються на фіксовані конфігурації для послідовного та паралельного з'єднання елементів, страждають від низької надійності та неефективності через їх нездатність адаптуватися до змінних робочих умов і станів елементів. Основна мета цього дослідження полягає в тому, щоб подолати ці обмеження, запропонувавши самореконфігуровану конструкцію багатoelementної батареї, здатну динамічно змінювати свою конфігурацію на основі роботи навантаження в реальному часі та реальному стану окремих елементів. Така конструкція дозволяє акумуляторній батареї самостійно відновлюватися після збоїв, самостійно балансувати через коливання стану елементів і забезпечувати самооптимізацію для досягнення максимальної енергоефективності, таким чином вирішуючи критичні проблеми, пов'язані з традиційними акумуляторними системами. Ідея полягає у запровадженні нової схеми комутації комірок, що дозволяє контролювати кожен комірку незалежно одна від одної, і використання вискоефективної системи керування батареєю (BMS), що здійснює безпосереднє керування, виявлення проблем, моніторинг, контроль та захист батареї. Схема перемикання використовує силові МОП-транзистори для керування зарядом, розрядом і відсіченням кожної комірки, тоді як BMS оптимізує конфігурацію комірок відповідно до вимог напруги та струму. У дослідженні представлено гібридну модель батареї, яка об'єднує модель електричного кола з моделлю змінної батареї для точного моделювання ефектів нелінійної ємності та динамічних характеристик елементів батареї. Результати демонструють те, що конструкція батареї,

що самостійно реконфігурується, значно покращує споживання енергії порівняно з батареями фіксованої конфігурації. Наприклад, коли певні комірки всередині батареї виснажуються, реконфігурована конструкція може продовжувати постачати енергію від інших «здорових» комірок. У різних сценаріях тестування запропонована конструкція батареї показала помітне покращення енергопостачання, у деяких випадках на 44,7%. Крім того, система досягла ефективності понад 98%, підкреслюючи її потенціал для практичного застосування. Дослідження прийшло до висновку, що конструкція багатоелементної батареї, що самостійно реконфігурується, пропонує універсальне рішення, застосовне до широкого діапазону типів і розмірів батарей, забезпечуючи підвищену надійність, збільшений термін служби та чудову енергоефективність, а також закладає основу для подальших розробок в управлінні акумуляторними батареями та оптимізації технології енергопостачання.

У статті [24] представлено детальне дослідження впливу змінних показників струму та температури на загальну ємність літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) акумуляторів. Основна мета дослідження полягала в тому, щоб зрозуміти, як умови експлуатації обладнання впливають на загальну ємність батареї, як у новому, так і в вживаному стані, а також дослідити, як ці ефекти можна включити в алгоритми роботи системи керування батареєю (BMS) для більш точної оцінки її стану. Дослідження передбачало систематичне тестування елементів LiFePO_4 за різних умов струму та температури, включаючи як постійну, так і змінну швидкість розряду, а також різні налаштування температури. Тести були розроблені таким чином, щоб визначити, чи впливають зміни зазначених параметрів лише на останніх етапах процесу розряду чи протягом усього циклу роботи, а також оцінити вплив «старіння» батареї на дані ефекти. Отримані результати показують, що як сила струму, так і температура значно впливають на загальну ємність, причому ефекти більш виражені у вживаних комірках. Вищі струми та нижчі температури визначають

тенденцію до зменшення ємності через збільшення дифузійної перенапруги та зниження кінетики реакцій, які є особливо очевидними на останніх стадіях процесу розряду. Дослідження також показало, що наявність перерв під час розряду впливає на продуктивність батареї, особливо при вищих значеннях струму, коли ємність знижується більш помітно після тривалих пауз. У дослідженні зроблено висновок, що зазначені фактори необхідно ретельно враховувати при розробці алгоритмів роботи BMS.

У статті [25] здійснено розробку та впровадження методу оцінки внутрішнього опору літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) батарей за допомогою сигналів, що генеруються комутованим конденсатором (SCE). Метою роботи було підвищення функціональності систем керування батареями (BMS) шляхом надання оцінки внутрішнього опору в режимі реального часу, що має вирішальне значення для моніторингу стану батареї та оцінки температури без необхідності використання додаткових датчиків, які збільшують складність і вартість системи. У дослідженні визнаються проблеми прямого вимірювання таких параметрів, як стан заряду (SOC) і стан розряду (SOH), які є досить важливими для безпечної та ефективної роботи акумуляторних систем у різноманітних застосуваннях. Дослідники пропонують новий підхід, який використовує природні сигнали під час регулярної роботи SCE для оцінки опору батареї. Цей метод є досить ефективним, оскільки не заважає нормальному функціонуванню акумуляторної системи та може бути реалізований онлайн та забезпечити безперервний моніторинг без необхідності використання додаткового обладнання. Результати були підтверджені шляхом поєднання здійснення моделювання та експериментальних випробувань. У роботі зазначається, що розрахунковий внутрішній опір змінюється залежно від температури, і цю залежність можна використати для моделювання та точного прогнозування температури батареї. Результати досліджень показали, що запропонований метод ефективний на

різних частотах комутації та в різних робочих умовах, підтверджуючи його надійність і застосовність. Отримані дані мають суттєве значення для проектування та роботи систем керування акумуляторними батареями. Завдяки можливостям оцінки внутрішнього опору в BMS з використанням існуючих сигналів SCE, дослідження пропонує економічно ефективне та надійне рішення для покращення безпеки та продуктивності акумулятора, тим самим подовжуючи термін його служби, і який можна широко застосовувати до різних хімічних складів і конфігурацій акумуляторів, забезпечуючи масштабований і практичний метод моніторингу та керування акумулятором у режимі реального часу в різноманітних застосуваннях.

У статті [26] представлено дослідження, спрямоване на розробку та перевірку комплексної методології для прогнозування терміну служби літій-іонних батарей, які мають вирішальне значення для продуктивності та надійності систем зберігання енергії. Основною метою дослідження було створення надійної моделі, яка зможе точно передбачити старіння та деградацію літій-іонних акумуляторів з часом у різних умовах експлуатації. Це важливо для оптимізації конструкції та роботи акумуляторних систем, забезпечення їх довговічності та зниження загальної вартості володіння. У роботі була представлена напівемпірична модель старіння, яка поєднує прогнози календарного терміну служби та циклу, враховуючи різні стресові фактори, такі як температура, стан заряду (SOC), глибина розряду (DOD) і швидкість заряду/розряду. Дослідження підкреслює важливість перевірки цих моделей за допомогою статичних і динамічних умов тестування (для різних сценаріях у «реальному житті»). Процес перевірки включає в себе прискорені тести на старіння, які імітують календарний і циклічний термін служби за різних умов, надаючи дані для вдосконалення моделей і підвищення їх точності. У роботі також досліджується інтеграція «застарілих» моделей у системи керування батареями (BMS), що може дозволити моніторинг у реальному часі та

коригування для оптимізації роботи батареї та продовження терміну її служби. Результати дослідження показали, що запропонована методологія може прогнозувати погіршення стану батареї з високим ступенем точності, при цьому помилки залишаються в прийнятних межах у різних сценаріях тестування. Дослідження підкреслює потенційні можливості застосування цих моделей для оптимізації конструкцій акумуляторних батарей, підвищення запасів надійності та зниження витрат шляхом кращого прогнозування того, коли батарея досягне кінця свого терміну служби.

У статті [27] автори зосередились на розробці моделі батареї, яка точно може прогнозувати продуктивність літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) батарей у стаціонарних та перехідних режимах. Основною метою дослідження було постулювання того, що система керування акумулятором (BMS) є критично важливим компонентом у здійсненні моніторингу та контролю роботи акумулятора, та створення оптимально функціонуючої моделі, що відображає динамічну поведінку акумулятора. У дослідженні було здійснено огляд різних моделей акумуляторів, розглянуті експериментальні, математичні моделі та моделі еквівалентних схем – визначено їх «сильні» та «слабкі» сторонами. Автори наголошують на необхідності створення моделі, яка забезпечує баланс між точністю роботи та простотою конструкції BMS. До складання аналогії пропонується використання RC-ланцюга, що містить резистивні та ємнісні елементи для імітації динамічної поведінки батареї. В дослідженні здійснюється визначення параметрів RC-моделі шляхом проведення серії контрольованих циклів заряду-розряду, які дозволили точно вимірювати напругу, струм і температуру на клеммах батареї. Точність RC-моделі перевірялась за допомогою чисельного моделювання та експериментальних випробувань, проведених у стаціонарних і перехідних умовах. Результати показують, що модель забезпечує надійне прогнозування реакції напруги на клеммах батареї з мінімальною помилкою, що підтверджує її надійність і застосовність.

У статті [28] представлено дослідження, спрямоване на розробку вдосконаленого алгоритму оцінки стану заряду (SOC) літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) батарей. Основною метою цього дослідження було підвищення точності та надійності оцінки SOC, що має вирішальне значення для забезпечення безпеки, ефективності та довговічності акумуляторних систем. Запропонований алгоритм розроблено для калібрування оцінок SOC в режимі онлайн за допомогою характерних кривих, отриманих з фактичних даних про роботу батареї. Цей метод значно покращує надійність і точність оцінки SOC порівняно з автономним кулоновським підрахунком. Дослідження включає детальний аналіз характеристичних кривих, отриманих з циклів заряджання та розряджання, підкреслюючи, як ці криві можна використовувати для коригування оцінок SOC під час експлуатації. Підбираючи виміряні дані до еталонних кривих за допомогою інтерполяції, алгоритм може коригувати оцінку SOC у режимі реального часу, ефективно пом'якшуючи помилки, спричинені різними умовами експлуатації, змінами температури та старінням батареї. Експериментальна перевірка алгоритму проводиться з використанням акумуляторної батареї LiFePO_4 , налаштованої для типових додатків навантаження. Результати демонструють, що алгоритм забезпечує значне покращення точності оцінки SOC, при цьому помилка зменшується до 1% у найскладніших сценаріях. Дослідження робить висновок, що цей алгоритм калібрування не тільки ефективний, але й простий у практичному застосуванні, пропонуючи надійне рішення для підвищення продуктивності та безпеки систем керування батареями в електромобілях і системах зберігання енергії.

3 ПОКРАЩЕННЯ ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ РОБОТОЮ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ LiFePO_4

3.1 Апаратна реалізація балансування комірок

Балансування елементів в акумуляторних системах можна реалізувати за допомогою різних підходів, головною метою яких є підтримка рівномірного рівня заряду та розряду в усіх комірках. Одним з найпоширеніших методів є використання польових транзисторів (FET), які встановлюють паралельно кожній комірці для керування ними. Даний тип транзисторів піддається керуванню за допомогою простих алгоритмів, спираючись на значення виміряної напруги, які активують функцію обходу при виникненні різниці напруги. Це також можна реалізувати за допомогою більш просунутих алгоритмів на основі мікроконтролерів, які здатні постійно керують балансуванням незалежно від коливання напруги. Вибір того чи іншого методу залежить від конкретних потреб застосування. Здебільшого потужності польових транзисторів достатньо для керування комірками акумуляторів, що мають низькі значення струму саморозряду. Для більших струмів та вищих швидкостей саморозряду може знадобитися використання більш потужних польових транзисторів, здатних витримувати більші значення байпасних струмів для забезпечення ефективного балансування комірок [29].

Одним із недоліків зазначеного підходу – створення байпасного переходу за допомогою польових транзисторів – є те, що під час цього відбувається марне розсіювання надлишкового заряду у вигляді тепла, що призводить до непродуктивних втрат енергії. Хоча величина цих втрат енергії може бути прийнятною, коли батарею підключено до джерела живлення під час заряджання, це стає критичним з точки зору ефективності під час фактичного використання акумуляторної батареї для живлення, коли енергозбереження має вирішальне значення. Щоб

вирішити зазначену проблему, необхідно розробити альтернативні методи балансування комірок для більш ефективного перерозподілу надлишкового струму від комірок, що є або набули вищого ступеня заряду, до комірок, що є недозарядженими у той самий період часу. Для цього може бути використаний підвищувальний перетворювач DC-DC, хоча при цьому знижується загальна ефективність джерела живлення і зростає загальна складність системи. У іншому схемному підході відбувається передача заряду (електричної енергії) безпосередньо між комірками, а не розсіюють її, що може бути ефективнішим у збереженні ємності акумулятора під час його використання [29].

Подальші розробки в технології балансування запропонували методи на базі систем передачі заряду за допомогою ємнісних елементів та індуктивні конвертери за допомогою індуктивних елементів. Системи передачі заряду використовують конденсатори для передачі енергії між комірками, але вони характеризуються підвищеними втратами енергії, особливо коли різниця напруг між елементами є незначною. Ці системи можуть бути найбільш ефективними в кінці циклу розряду, коли різниця напруг стає більш помітною, але загалом обсяг розбалансу, який вони можуть виправити за один цикл, є досить обмеженим (рис. 3.1) [30].

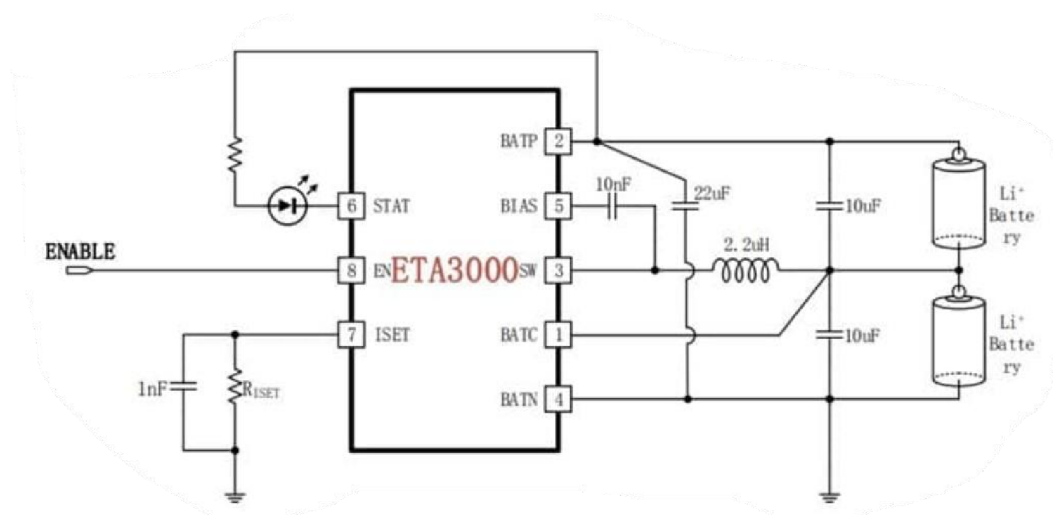


Рисунок 3.1 – Принципова схема з використанням ємнісного балансиру

Індуктивні конвертери пропонують інший підхід, передаючи енергію від усього пакета комірок до окремих елементів за допомогою спеціального живлячого трансформатора. Цей метод уникає проблеми незначної різниці напруг, але він вводить додаткові вартісні елементи та збільшують розмір пристрою та знижують енергетичну ефективність, що робить його більш придатним для використання у високопотужних системах (рис. 3.2) [31].

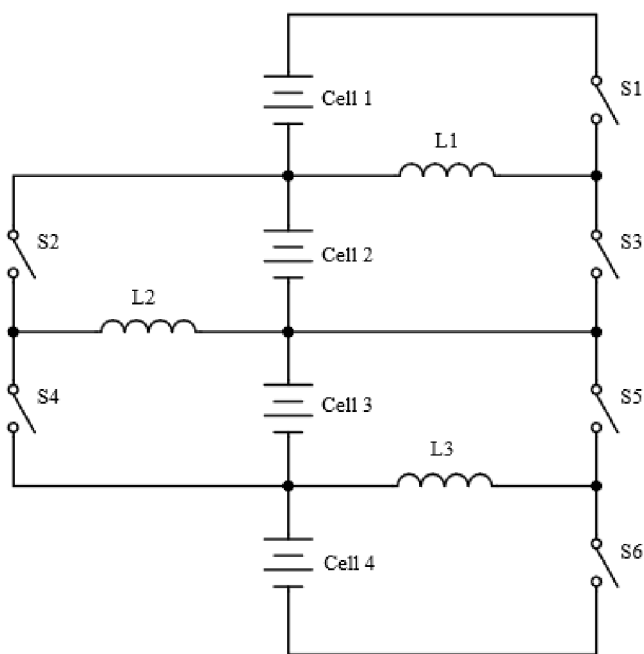


Рисунок 3.2 – Принципова схема з використанням індуктивностей

Ефективність балансування комірок акумуляторної батареї значною мірою визначається алгоритмами, які визначають час активації механізмів балансування. Робота найпростіших алгоритмів заснована на різниці напруги між комірками, коли при перевищенні попередньо визначеного граничного значення, вмикається байпас. Більш складні алгоритми можуть бути реалізовані за допомогою мікроконтролерів, які дозволяють оптимізувати процес балансування. Просунуті алгоритми можуть включати такі функції, як балансування лише під час заряджання для збереження енергії в портативних пристроях, балансування на високих

напругах заряджання для мінімізації впливу дисбалансу опору та при одночасному балансуванні кількох елементів акумуляторної батареї. Для прийняття оптимальних рішень необхідно постійно здійснювати точну та надійну оцінку рівня заряду (SOC) акумулятора. У цьому процесі зазвичай застосовується алгоритм розрахунку найменших квадратів (RLS) для здійснення он-лайн ідентифікації параметрів роботи акумулятора. Після цього може бути використано алгоритм «Unscented Kalman Filter (UKF)» – це різновид алгоритму Калмана, який використовується для нелінійної фільтрації та оцінки стану динамічних систем. Основна мета цього алгоритму – точно оцінити невідомі параметри або стани системи на основі шумів та/або обмеженої кількості вимірювань. UKF особливо корисний для нелінійних систем, де класичний фільтр Калмана не може забезпечити високу точність через лінійні наближення. Ключова відмінність UKF від традиційного фільтра Калмана полягає в тому, що він використовує методику, яка називається «unscented-трансформація» для обробки нелінійностей. Ця методика дозволяє точно апроксимувати розподіл ймовірностей нелінійних систем шляхом вибору певного набору точок (сигма-точок), які є репрезентативними для розподілу стану системи. Ці точки обробляються через нелінійні моделі, і на їх основі оцінюється оновлений стан системи. Зазначений підхід має високу адаптивність завдяки постійності онлайн ідентифікації параметрів акумулятора, що дає підстави називати цей метод адаптивною технікою оцінки SOC [32].

Ємність акумуляторних комірок можуть значно варіюватися, навіть якщо їх кінцеві напруги схожі або майже однакові, коли вони перебувають у стані «спокою». Зазначена невідповідність між комірками LiFePO_4 досить успішно може бути визначена шляхом застосування алгоритму UKF.

Останніми роками індустрія збереження енергії розвивається надзвичайно швидкими темпами. Акумулятори починають виступати в якості головних засобів збереження. Серед численних типів акумуляторів,

LiFePO_4 вважається одним з найбільш перспективних завдяки своїм унікальним властивостям, тому надійна система управління такими акумуляторами (BMS) є необхідною складовою для їх ефективного використання та функціонування. Однією з найважливіших функцій BMS є оцінка стану заряду (SOC). Вона постачає важливу інформацію про залишковий заряд акумулятора, що допомагає приймати обґрунтовані рішення під час керування автомобілем. Проте, якщо оцінка SOC має значну похибку, це може спричинити значні проблеми та ускладнити експлуатацію електрообладнання. Тому точність оцінки SOC є надзвичайно важливою для коректної роботи BMS. Водночас, нелінійні та динамічні показники, що характеризують властивості роботи акумуляторів значно ускладнюють процес точної оцінки SOC. Сьогодні існують різні методи оцінки SOC. Найбільш розповсюдженим є метод підрахунку ампер-годин, але через труднощі з визначенням початкового значення SOC і поступовим накопиченням похибок, цей метод часто застосовується у поєднанні з іншими більш точними підходами. Моделювання є одним із найпопулярніших методів оцінки стану заряду (SOC) акумулятора. Серед моделей, що використовуються для цієї мети, найбільш розповсюдженими є електрична та електрохімічна моделі. Електрична модель базується на рівняннях, які застосовують принципи теорії електричних кіл. Для оцінки SOC зазвичай спочатку визначається еквівалентна електрорушійна сила (EMF), відома також як напруга холостого ходу (OCV), після чого SOC визначається на основі взаємозв'язку між OCV і SOC (OCV-SOC). Одним із основних недоліків цього підходу є те, що адаптація параметрів моделі на зазначеному співвідношенні потребує складних алгоритмів розрахунку і визначення параметрів протягом всього терміну експлуатації акумулятора та може змінюватися в залежності від умов експлуатації. Основною перевагою електрохімічних моделей є здатність точно відображати електрохімічну поведінку акумулятора, однак це супроводжується значним ускладненням самої моделі та необхідністю використання великої

кількості параметрів для оцінки стану акумулятора. Часто ці моделі застосовуються разом з адаптивними фільтрами або датчиками для підвищення точності оцінки SOC, що також збільшує вимоги до наявності обчислювальних ресурсів і часу розрахунків. Іншим методом оцінки SOC є аналіз опору акумулятора, оскільки численні дослідження показують, що існує залежність між SOC і опором, проте ця залежність може суттєво змінюватися протягом терміну служби акумулятора. Значення опору акумулятора також є дуже чутливим до значення температури, що додатково ускладнює процес оцінки. У останній час широкого застосування знаходять інші підходи, такі як методи нечіткої логіки, штучні нейронні мережі та методи опорних векторів. Методи нечіткої логіки зазвичай використовуються як допоміжний інструмент для підвищення точності інших методів оцінки. Методи на основі штучних нейронних мереж потребують значного об'єму даних для навчання, а їх результати можуть погіршитися з часом через процеси старіння акумулятора [33].

З огляду на зазначені методи, головним завданням є пошук оптимального балансу між точністю, надійністю, можливістю до адаптації, вартістю обладнання та складністю застосованого програмного забезпечення.

У даному дослідженні застосуємо метод, заснований на складанні електричної моделі. При цьому спочатку ідентифікація параметрів роботи моделі акумуляторної батареї здійснюється за допомогою алгоритму визначення найменших квадратів (RLS) досліджуваних показників. На другому етапі відбувається оцінка SOC за допомогою Unscented Kalman Filter (UKF). На кожному кроці розрахунків параметри моделі акумулятора оновлюються з використанням RLS відповідно до вхідних та вихідних даних роботи акумулятора. Такий підхід має високу адаптивність до реальних умов експлуатації і, як наслідок, забезпечує точну оцінку SOC акумулятора. Концепція визначення середньоквадратичного значення

(RLS) може бути виражена з урахуванням коригуючого значення та оціненого значення на поточному кроці вимірювання з урахуванням оціненого значення на попередньому кроці вимірювання. Ця операція є досить простою та може бути здійснена за допомогою звичайних мікроконтролерів. Рекурсивний метод найменших квадратів (RLS) є одним із найбільш ефективних інструментів для оцінювання параметрів у реальному часі в системах зі змінними характеристиками. Цей метод базується на мінімізації середньоквадратичної похибки між виміряним та оціненим значенням, а його головною перевагою є здатність до адаптації, що особливо важливо у системах із часовими змінами параметрів. Оцінювання параметрів у RLS здійснюється рекурсивним шляхом, що дозволяє уникнути необхідності перераховувати всі попередні дані щоразу, коли надходять нові вимірювання. Нижче наведено детальний розгляд теоретичної основи цього методу.

3.2 Складання лінійної моделі та розрахунки її роботи

Для лінійної моделі оцінювання параметрів системи розглядається залежність у вигляді визначення значення на часовому інтервалі t [33]:

$$q(t) = m(t) \cdot r(t) + \epsilon(t) \quad (3.1)$$

де $m(t)$ – вектор вхідних параметрів,

$r(t)$ – вектор оцінювання параметрів моделі,

$\epsilon(t)$ – випадкова похибка.

Основним критерієм точності моделі є мінімізація середньоквадратичної помилки. Відповідна функція помилки на кожному кроці може бути визначена як [33]:

$$J(t) = \lambda \cdot J(t-1) + e^2(t) \quad (3.2)$$

де $e(t)$ – помилка передбачення [33]:

$$e(t) = q(t) - m^T(t) \cdot r(t-1) \quad (3.3)$$

λ – коефіцієнт, що контролює вплив попередніх вимірювань на здійснену оцінку, $\lambda \in (0; 1]$.

Алгоритм рекурсивного оцінювання параметрів включає кілька етапів. Оновлення коефіцієнта Калмана здійснюється за залежністю [33]:

$$K(t) = \frac{P(t-1) \cdot m(t)}{\lambda + m^T(t) \cdot P(t-1) \cdot m(t)} \quad (3.4)$$

де $P(t-1)$ – матриця коваріації параметрів на попередньому кроці.

Оновлення оцінки параметрів здійснюється за залежністю [33]:

$$r(t) = r(t-1) + K(t) \cdot e(t) \quad (3.5)$$

Оновлення матриці коваріації здійснюється за залежністю [33]:

$$P(t) = \frac{1}{\lambda} \cdot [P(t-1) - K(t) \cdot m^T(t) \cdot P(t-1)] \quad (3.6)$$

Модель можна також адаптувати для опису систем з динамічними характеристиками. Для оцінки стану заряду (SOC) акумуляторної батареї лінійна модель базується на залежності між напругою $U(t)$, струмом $I(t)$ та параметрами акумулятора [33]:

$$U(t) = OCV(SOC) - I(t)R_0 - U_{RC}(t) \quad (3.7)$$

де $U(t)$ – напруга на клеммах акумуляторної батареї, В,
 $OCV(SOC)$ – напруга холостого ходу, що залежить від стану заряду, В,
 R_0 – внутрішній опір акумуляторної батареї, Ом,
 $U_{RC}(t)$ – напруга на RC-ланцюгу, що визначається динамічними процесами, що протікають.

Стан заряду (SOC) здійснюється за залежністю [33]:

$$SOC(t) = SOC(t - 1) - \frac{\Delta t \cdot I(t)}{Q_{\text{ном}}} \quad (3.8)$$

де $Q_{\text{ном}}$ – номінальна ємність акумуляторної батареї, А·год,
 Δt – часовий інтервал між сусідніми вимірюваннями, с.

Використання Unscented Kalman Filter (UKF) – метод Калмана – дозволяє розв’язувати нелінійні задачі ідентифікації, використовуючи набір сигма-точок для точного представлення ймовірнісного розподілу.

Поведінка динамічної системи може бути описана за допомогою:

– рівняння стану [33]:

$$s(t + 1) = f(s(t), m(t)) + w(t) \quad (3.9)$$

– за рівнянням вимірювання [33]:

$$q(t) = h(s(t)) + v(t) \quad (3.10)$$

де $s(t)$ – вектор стану, у якості якого можуть бути обрані змінні SOC, U_{RC} ,

$m(t)$ – вектор входних дій, у якості якого можуть бути струм $I(t)$,

$w(t)$ – шуми процесу розрядження/зарядження,

$v(t)$ – шуми при вимірюванні/визначенні параметрів.

Основні етапи роботи методу Калмана (UKF) полягають у наступному [34]:

- генерацію сигма-точок для апроксимації розподілу станів,
- прогнозування стану за допомогою визначеної функції (f),
- прогнозування вимірювання завдяки використанню функції (h).
- оновлення стану та коваріаційних матриць на основі коефіцієнта Калмана.

Для покращення результату разом з методом UKF може бути застосовано метод найменших квадратів (RLS), що забезпечить [34]:

- підвищену адаптивність моделі: у нашому випадку – оновлення параметрів батареї (R_0 , $Q_{\text{ном}}$) у реальному часі,
- забезпечення точності: мінімізація помилок при прогнозуванні величини SOC навіть за умов сильних шумів,
- розширена гнучкість: можливість використання складеної моделі для різних типів батарей та змінних умов експлуатації.

Такий підхід має досить широке застосування у системах управління енергоспоживанням, коли точна оцінка величини SOC є важливим для забезпечення надійності та тривалої роботи акумуляторних батарей.

За вихідними даними здійснюємо розрахунки за наведеними залежностями.

Визначення значення величини SOC:

$$SOC(1) = SOC(t - 1) - \frac{\Delta t \cdot I(t)}{Q_{\text{ном}}} = 0,8 - \frac{120}{340 \cdot 3600} \approx 0,7999$$

Напруга акумуляторної батареї:

$$U(1) = OCV(SOC) - I(t) \cdot R_0 - U_{RC}(t) = 48,5 - 0,6 - 0,2 = 47,7 \text{ В}$$

Оновлення параметрів за методом RLS:

$$\begin{aligned}
e(1) &= q(1) - m^T(1) \cdot r(0) = \\
&= 47,7 - [1; 12; 0,7999] \cdot [48; 0,05; 0,8]^T = \\
&= 47,7 - (48 + 12 \cdot 0,05 + 0,7999 \cdot 0,8) \approx -1,53992 \text{ В}
\end{aligned}$$

Коефіцієнт Калмана:

$$\begin{aligned}
K(1) &= \frac{P(0) \cdot m(1)}{\lambda + m^T(1) \cdot P(0) \cdot m(1)} = \\
&= \frac{[1 \cdot 1 + 1 \cdot 12 + 1 \cdot 0,7999]}{0,98 + [1; 12; 0,7999] \cdot [1; 1; 1] \cdot [1; 12; 0,7999]^T} = \\
&= \frac{1 + 12 + 0,7999}{0,98 + (1 + 12 + 0,7999)^2} \approx 0,072
\end{aligned}$$

Оновлення параметрів:

$$\begin{aligned}
K(1) &= r(1) = r(0) + K(1) \cdot e(1) = \\
&= [48; 0,05; 0,8]^T + 0,072 \cdot [-1,53992] \cdot [1; 12; 0,7999]^T = \\
&= 48 - 0,072 \cdot 1,53992; 0,05 - 0,072 \cdot 12 \cdot 1,53992; 0,8 - \\
&\quad - 0,072 \cdot 0,7999 \cdot 1,53992 \approx [47,89; -1,26; 0,71]
\end{aligned}$$

Дана модель може бути використана для:

- моніторингу стану заряду батареї (SOC) – отримані значення SOC дозволяють контролювати рівень заряду в реальному часі, що корисно для здійснення оптимізації енергоспоживання,
- прогнозування часу роботи батареї – значення напруги на клеммах і SOC можуть використовуватися для передбачення залишкового часу роботи акумуляторної батареї до її припустимої величини розряду,
- адекватна діагностика – визначення аномальних станів та сигналізація про потребу у перевірці фізичного стану акумуляторної батареї.

– адаптація зарядних алгоритмів – за точним значенням SOC можна регулювати струм і напругу заряджання для мінімізації деградації акумуляторної батареї.

За отриманими в результаті розрахунків значеннями можна зробити наступні висновки:

– оновлене значення SOC ($SOC(1) \approx 0,7999$) – воно залишилося майже стабільним, що свідчить про невеликі втрати енергії в батареї за час розрахункового кроку вимірювання ($\Delta t = 10$ с). Висока точність у розрахунках SOC дозволяє використовувати модель для динамічного моніторингу стану заряду батареї в реальному часі,

– напруга на клеммах ($U(1) \approx 47,7$ В) – зниження напруги з початкових 48 В до 47,7 В є очікуваним через недосить високе значення струму $I(t) = 12$ А і внутрішнього опору батареї ($R_0 = 0,05$ Ом), що свідчить про правильність врахування внутрішніх втрат у акумуляторній батареї.

– оновлений параметр $r_0 = 47,89$ залишається близьким до початкового значення (48 В), що демонструє стабільність оцінки напруги відкритого кола (OCV).

Які недоліки можна відзначити:

– оновлене значення $R_0 = -1,26$ означає негативне значення внутрішнього опору є фізично некоректним, що може бути наслідком помилок у моделі, недостатньої кількості вихідних даних або неправильного вибору початкових умов ($P(0)$). Дана проблема вимагає перегляду алгоритму та/чи повторного калібрування моделі.

– значне зниження SOC до 0,71, якщо це значення є частиною прогнозу, воно не узгоджується з основною тенденцією для значення SOC ($SOC(1) \approx 0,7999$). Це може вказувати на невірне оновлення параметрів моделі при використанні коефіцієнта Калмана.

Для того, щоб покращити модель необхідно зробити наступне:

- перевірити точність емпіричних даних,
- налаштувати початкові параметри, зокрема матрицю коваріації $P(0)$ і значення λ ,
- впровадження додаткового контроль фізичних обмежень (наприклад, забезпечення умови $R_0 > 0$) для уникнення некоректних значень.

Замінімо емпіричне значення $OCV(0,8) = 48,5$ В на більш точне: $OCV(0,8) = 48,4$ В, відповідно до типових даних для LiFePO_4 .

Встановимо обмеження: $R_0 > 0$ – якщо результат розрахунку дасть значення $R_0 < 0$, модель буде застосовувати мінімальне значення $R_0 = 0,01$ Ом.

Актуалізуємо матрицю коваріації ($P(0)$), для якої початкові ваги для параметрів будуть змінені наступним чином:

$$P(0) = \text{diag}(1; 0,1; 0,1)$$

Коефіцієнт коригування (λ) змінимо з 0,98 на 0,99 – це зменшить вплив поточного шуму на оновлення параметрів.

Оновлення значення SOC:

$$SOC(1) = 0,8 - \frac{10 \cdot 12}{340 \cdot 3600} \approx 0,7999$$

Напруга акумуляторної батареї:

$$U(1) = 48,4 - 12 \cdot 0,05 - 0,2 = 47,6 \text{ В}$$

Прогноз помилки:

$$e(1) = 47,6 - [1; 12; 0,7999]^T \cdot [48; 0,05; 0,8]^T \approx -1,63992 \text{ В}$$

Коефіцієнт Калмана:

$$K(1) = \frac{[1 \cdot 1 + 0,1 \cdot 12 + 0,1 \cdot 0,7999]}{0,99 + [1; 1,2; 0,08] \cdot [1; 12; 0,7999]^T} \approx 0,0734$$

Оновлення параметрів:

$$\begin{aligned} r(1) &= [48; 0,05; 0,8]^T + 0,0734 \cdot (-1,63992) \cdot [1; 12; 0,7999]^T \approx \\ &\approx [47,88; 0,01; 0,704] \end{aligned}$$

За результатами розрахунків можна зробити наступні висновки:

- параметри набули фізично-коректних значень,
- зміни SOC і напруги узгоджуються з вихідними даними,
- модель стабільно враховує обмеження та корекції.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОМІРКАХ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

Моделювання складних технічних систем може бути основою для їх чіткого розуміння, вдосконалення та оптимізації. Програмні середовища відіграють провідну роль для досягнення зазначеної мети, забезпечують широкий набір функцій для створення, тестування та візуалізації складених моделей. Одним із таких універсальних інструментів є Matlab/Simulink, який може надати досконалі засоби для моделювання різноманітних динамічних систем, у тому числі і енергетичні [35].

Завдяки можливості поєднання текстового і графічного інтерфейсів Matlab/Simulink дозволяє створювати як суто математичні моделі, так і моделі зі складною структурою. Дана платформа дає змогу використовувати існуючі бібліотеки для блочно-орієнтованого моделювання та забезпечує швидкий доступ до енергетичних компонентів. Програмне середовища полягає у можливості комбінування різноманітних інструментів для створення комплексних систем з великою кількістю взаємопов'язаних параметрів [36].

Основна перевага Matlab/Simulink полягає в його інтеграції з фізичними пристроями через системи швидкого прототипування (Rapid Control Prototyping, RCP). Це дозволяє перевіряти точність складених моделей в реальному часі, використовуючи різноманітні сигнали. Такий підхід імітує реальні умови роботи складних електромеханічних та електронних пристроїв, забезпечує точність та ефективність у процесі розробки нових та дослідженні параметрів існуючих систем [37].

Іншою перевагою програмного середовища. Matlab/Simulink є можливість візуалізації результатів моделювання. Можна в реальному часі відображати зміну параметрів, таких як стан заряду акумулятора (SOC), температурні показники або напруга на виході системи. Програмне

середовище також надає можливості для ідентифікації та оцінки параметрів системи, що змінюються динамічно. Використання алгоритмів, таких як Recursive Least Squares (RLS), дозволяє адаптувати модель до нових умов експлуатації. Ці алгоритми забезпечують можливість автоматичної корекції значень внутрішнього опору, ємності чи інших параметрів, що змінюються з часом. Інтеграція з Unscented Kalman Filter (UKF) додає можливість враховувати нелінійні зміни та випадкові збурення, що є важливим для динамічних систем [34, 37].

Для аналізу роботи комірок акумуляторної батареї складемо код, який реалізує аналіз основних параметрів акумуляторної батареї, що складається з 16 послідовно з'єднаних комірок, з використанням програмного середовища MATLAB. Отримані дані можна візуалізувати у вигляді трьох графіків, які відображають розподіл основних параметрів (напруга, струм, температура).

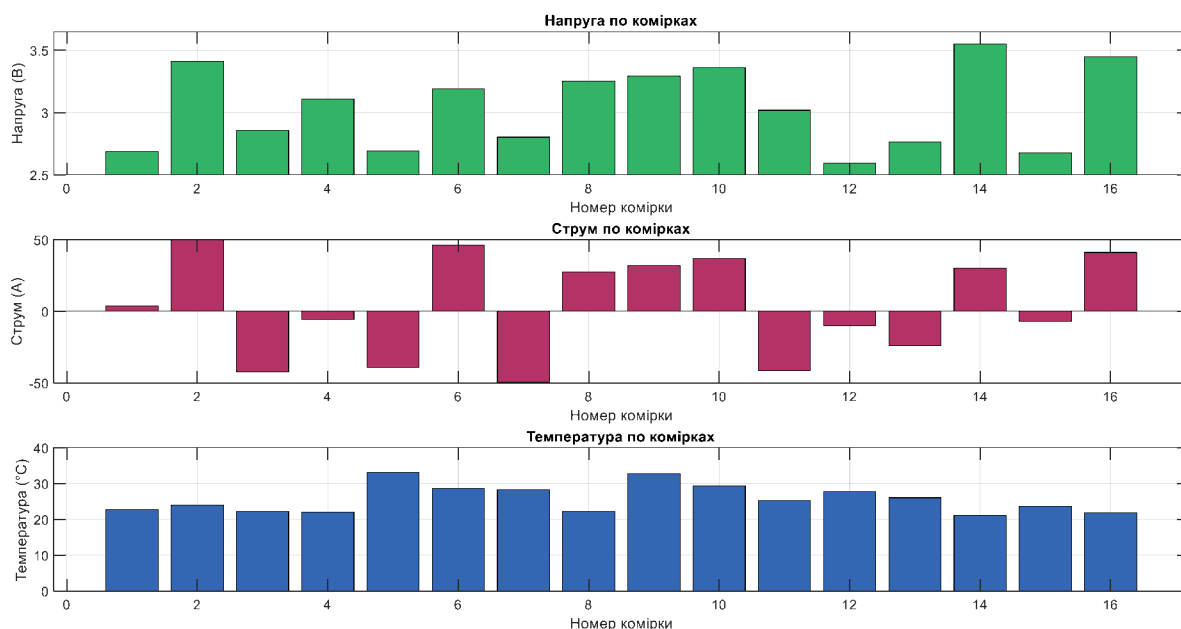


Рисунок 4.1 – Розподіл параметрів акумуляторної батареї по коміркам

Графіки на рис. 4.2 відображає кінцеві напруги 16 комірок акумуляторної збірки під час розряджання. Передумовою є симуляція

роботи батареї з урахуванням варіацій внутрішнього опору, ємності та впливу струмових імпульсів. Напруга змінюється залежно від розрядних імпульсів і початкових характеристик кожної комірки, враховуючи їхню неоднорідність. Отримані залежності демонструють поступове зниження напруги в комірках під час розряджання. Наявність розходжень між кривими вказує на неоднорідність характеристик комірок, що є ключовим фактором зниження ефективності батареї. Значне падіння напруги під час імпульсів свідчить про високе навантаження, що потребує балансування елементів.

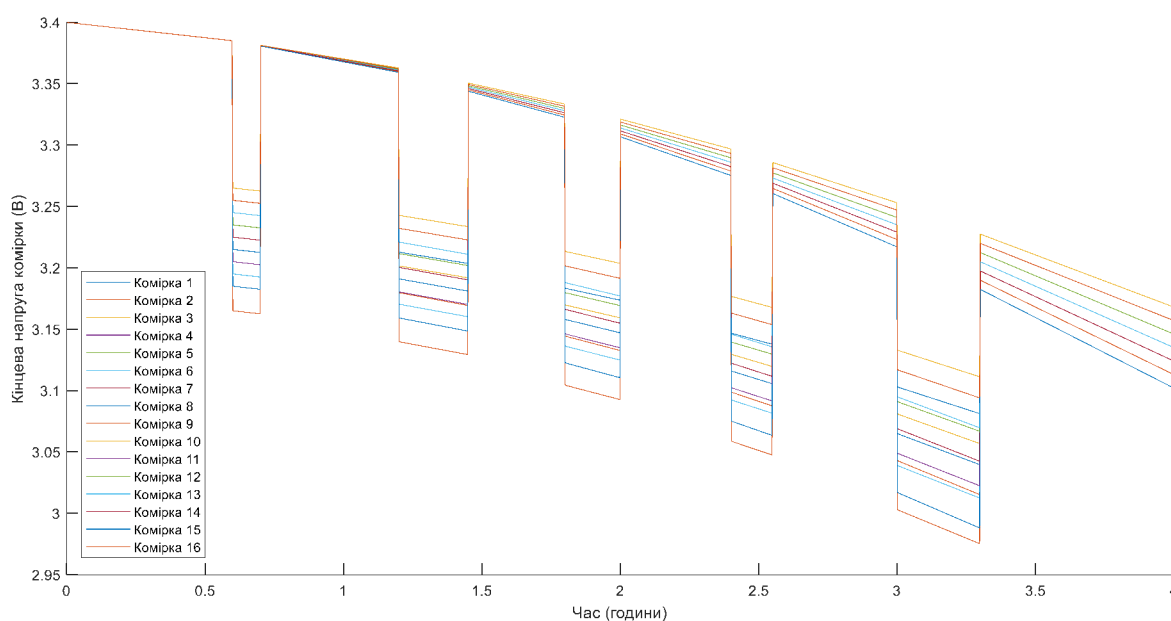


Рисунок 4.2 – Кінцеві напруги комірок акумуляторної збірки у процесі розряджання

Графіки на рис. 4.3 ілюструє зміну внутрішнього опору 16 комірок акумуляторної батареї під час розряджання. Початкові значення опору встановлювалися із врахуванням випадкових варіацій для моделювання реальних умов та стану окремих комірок. У процесі розряджання враховувалися динамічні імпульси струму, що викликали ступінчасте зменшення опору з часом. Поступове зниження внутрішнього опору з часом відповідає процесу стабілізації комірок під навантаженням.

Ступінчасті зниження опору свідчать про вплив струмових імпульсів. Незначні розходження між кривими вказують на неоднорідність характеристик комірок.

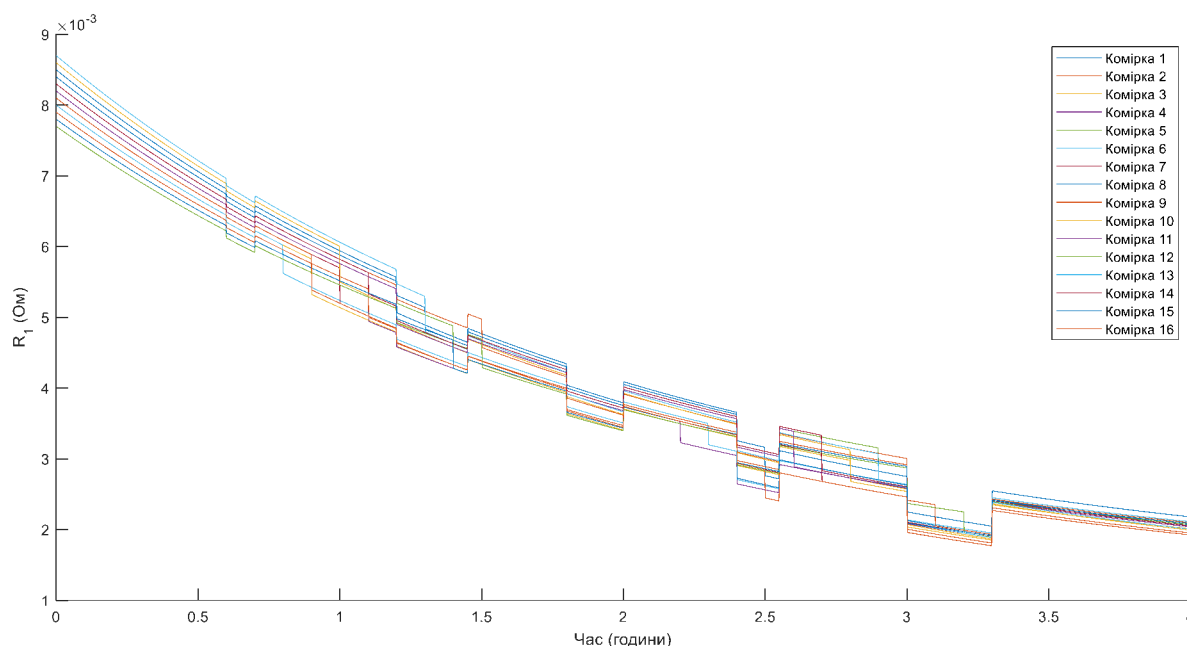


Рисунок 4.3 – Зміна опору комірок з часом у процесі розряджання

Графіки на рис. 4.4 відображає динаміку зміни поляризаційного опору для 16 комірок акумуляторної батареї в процесі розряджання. Початкові значення цього опору встановлені з випадковими варіаціями, що імітують неоднорідність комірок. Зменшення даного опору моделювалося з урахуванням струмових імпульсів, які викликають локальні зниження опору в окремі моменти часу. Поступове зниження опору з часом відповідає зменшенню поляризаційного ефекту в комірках. Ступінчасті спади свідчать про вплив імпульсних навантажень.

Графіки на рис. 4.5 показують зміну значення стану заряду (SOC) для 16 комірок акумуляторної батареї в процесі розряджання. Зменшення SOC моделювалось із урахуванням нерівномірності розряджання через зміну внутрішнього опору та вплив струмових імпульсів. Незначні розбіжності між кривими вказують на неоднорідність параметрів комірок, а

ступінчастий характер змін SOC пояснюється імпульсними навантаженнями, які спричиняють інтенсивні короточасні розряди. Зазначене підкреслює важливість необхідності балансування комірок в акумуляторній збірці.

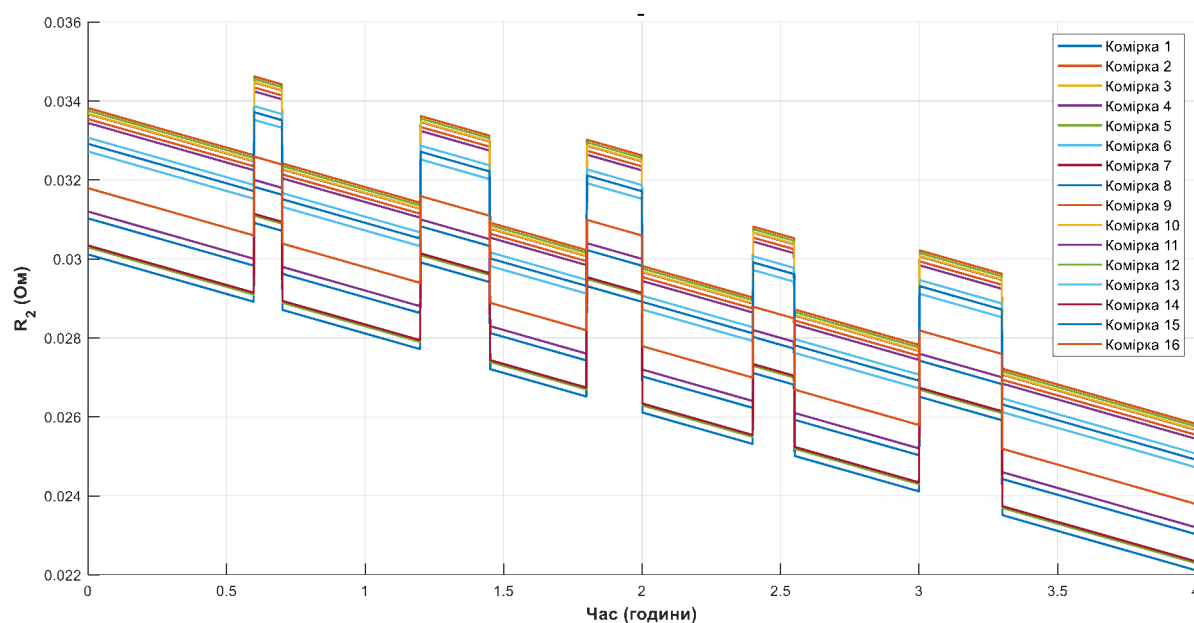


Рисунок 4.4 – Зміна поляризаційного опору комірок з часом у процесі розрядження

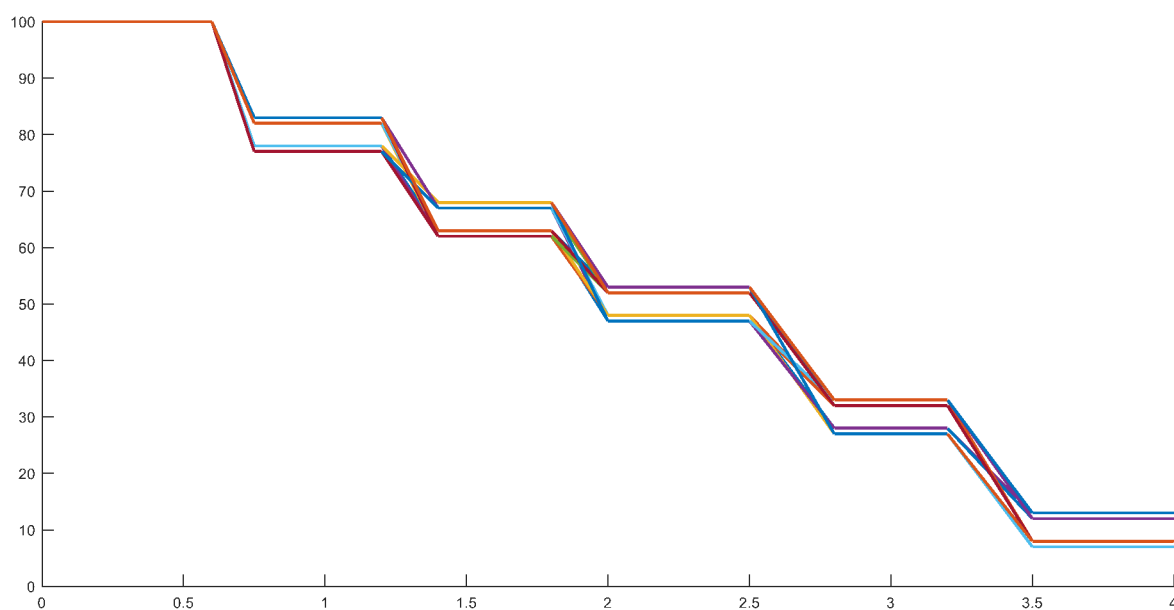


Рисунок 4.5 – Зміна значення SOC комірок з часом

Моделювання динамічних процесів у комірках акумуляторної батареї продемонструвало суттєвий вплив неоднорідності характеристик на показники напруги, внутрішнього і поляризаційного опору, а також SOC. Отримані результати підкреслюють важливість балансування комірок для забезпечення рівномірного розрядження, підвищення ефективності роботи батареї та зменшення ризику деградації її окремих елементів.

ВИСНОВКИ

Результати моделювання динамічних процесів у літій-залізо-фосфатних (LiFePO_4) комірках акумуляторних збірок підтвердили важливість врахування особливостей кожної комірки для забезпечення рівномірної роботи акумуляторної системи. Використані підходи до аналізу стану заряду (SOC), внутрішнього та поляризаційного опору дозволили ідентифікувати основні причини нерівномірного розрядження комірок, серед яких неоднорідність параметрів і вплив імпульсних навантажень.

Дослідження показали, що в разі врахування динаміки зміни SOC і внутрішнього опору в процесі розрядження дозволяє ефективніше управляти роботою акумуляторної батареї. Було виявлено, що імпульсні струми суттєво впливають на зміну поляризаційного опору, викликаючи короточасні спади його значень, що може негативно позначитися на терміні служби окремих комірок і акумуляторної збірки в цілому. Така поведінка підкреслює необхідність впровадження алгоритмів балансування, які враховують варіативність динамічних параметрів.

Математичні моделі, розроблені у процесі дослідження, забезпечили точну імітацію змін параметрів комірок у реальних умовах експлуатації. Зазначене дозволило отримати практичні рекомендації для вдосконалення систем керування акумуляторними системами. Для цього доцільно інтегрувати механізми адаптивного балансування для зменшення впливу внутрішньої неоднорідності комірок.

Додатково до проведеного моделювання необхідно підкреслити значення інтеграції апаратних і програмних компонентів у системах керування батареями (BMS), що забезпечить стабільну роботу літій-залізо-фосфатних акумуляторних збірок. Запровадження удосконалених апаратних рішень для активного балансування комірок дозволить

мінімізувати нерівномірність їх розрядження. Точне визначення стану заряду (SOC) значною мірою залежить від характеристик датчиків та алгоритмів обробки сигналів, які входять до складу мікроконтролерів BMS.

Проблеми, пов'язані з дисбалансом під час заряджання та розряджання, потребують комплексного підходу, який враховує хімічні властивості комірок і їх внутрішній опір. Проведений аналіз показав, що використання вдосконалених алгоритмів балансування дозволяє підвищити довговічність акумуляторних батарей навіть у складних експлуатаційних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Modern Battery Engineering: A Comprehensive Introduction. Kai Peter Birke / ProQuest (Firme). World Scientific Publishing Company Pte Limited, 2019. – 304 p.
2. [Електронний ресурс]. – https://images.prom.ua/4716573948_w640_h640_110ah-akkumulyator-12.jpg
3. Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. Reiner Korthauer / Springer, 2018. – 413 p.
4. Battery Management Systems: Design by Modelling. H.J. Bergveld, W.S. Kruijt, P. H. L. Notten / Springer, 2002. – 295 p.
5. 48-Volt Developments. Kevin Jost / SAE International, 2017. – 320 p.
6. 48-Volt Electrical Systems: A Key Technology Paving the Road to Electric Mobility. ZVEI / ZVEI Publishing, 2016. – 284 p.
7. Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies. Masaki Yoshio, Ralph J. Brodd, Akiya Kozawa / Springer, 2009. – 452 p.
8. Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications. P. H. L. Notten, H. J. Bergveld, W. S. Kruijt / Springer, 2005. – 238 p.
9. Battery Management System and Its Applications. Xiaojun Tan, Andrea Vezzini, Yuqian Fan, Neeta Khare, You Xu, Liangliang Wei / Wiley, 2017. – 350 p.
10. [Електронний ресурс]. – <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/battery-management-system-failure-mitigation/>
11. Kivrak Sinan, Özer Tolga, Oğuz Yüksel. Can bus based bms control card design and implementation by using stm32f103 series microcontroller. E-journal of New World Sciences Academy. 15, 2020. 27-33. 10.12739/NWSA.2020.15.1.1A0448.

12. Okoro Faith. Li-ion batteries for electric mobility, 2018. 10.13140/RG.2.2.36748.77446.
13. Ruiz Mariano. Embedded Linux systems using buildroot for building embedded Linux systems T, 2014.
14. [Электронный ресурс]. – <https://www.infineon.com/cms/en/applications/solutions/battery-management-system/industrial-and-consumer-bms/battery-protection/>
15. Modern Battery Engineering: A Comprehensive Introduction. Authors: Qiang Zhang, Jia-Qi Huang / Wiley, 2020. – 500 p.
16. Rechargeable Batteries: Materials, Technologies and New Trends. Zhengcheng Zhang, Sheng Shui Zhang / Springer, 2015. – 450 p.
17. Battery Safety. Daniel H. Doughty, E. Peter Roth / Springer, 2022. – 350 p.
18. Sui Xin, He Shan, Meng Jinhao, Stroe Daniel-Ioan, Huang Xinrong, Teodorescu Remus. Optimization of the discharge cut-off voltage in LiFePO₄ battery packs. P.1-P.8, 2019. doi: 10.23919/EPE.2019.8914986.
19. Zahid T., Xu G., Li W., Zhao L., Xu, K. Performance analysis of particle filter for SOC estimation of LiFePO₄ battery pack for electric vehicles. IEEE International conference on information and automation (ICIA), 2014. doi: 10.1109/icinfa.2014.6932806.
20. Dalvi S., Thale S. Design of DSP controlled passive cell balancing network based battery management system for EV application. IEEE India council international subsections conference (INDISCON), 2020. doi: 10.1109/indiscon50162.2020.00029.
21. Rathmann H., Weber C., Benecke W., Kahler D. Sophisticated estimation of hardly measurable conditions of lithium-ion batteries. IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. doi: 10.1109/iecon.2013.6699415.
22. Garmendia M., Gandiaga I., Perez G., Viscarret U., Etxeberria-Otadui I. Proposal and validation of a SOC estimation algorithm of LiFePO₄ battery

packs for traction applications. World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013. doi: 10.1109/evs.2013.6914951.

23. Kim T., Qiao W., Qu L. Self-reconfigurable multicell batteries. IEEE Energy conversion congress and exposition, Phoenix, AZ, USA, 2011, pp. 3549-3555, doi: 10.1109/ECCE.2011.6064249.

24. Marongiu A., Pavanarit T., Sauer D.U. Influence of current and temperature variation on a LiFePO₄ battery total capacity. World electric vehicle symposium and exhibition (EVS27), 2013. doi: 10.1109/evs.2013.6914768.

25. Gonzalez Moral C., F. Laborda D., Sanchez Alonso L., Guerrero J. M., Fernandez D., Riva C., Reigosa D. Battery internal resistance estimation using a battery balancing system based on switched capacitors. IEEE Transactions on Industry Applications, 1–1, 2020. doi: 10.1109/tia.2020.3005382.

26. Sarasketa-Zabala E., Laresgoiti I., Alava I., Rivas M., Villarreal I., Blanco F. Validation of the methodology for lithium-ion batteries lifetime prognosis. World electric vehicle symposium and exhibition (EVS27), 2013. doi: 10.1109/evs.2013.6914730.

27. Dannier A., Ferraro L., Miceli R., Piegari L., Rizzo R. Numerical and experimental validation of a LiFePO₄ battery model at steady state and transient operations. Eighth international conference and exhibition on ecological vehicles and renewable energies (EVER), 2013. doi: 10.1109/ever.2013.6521570.

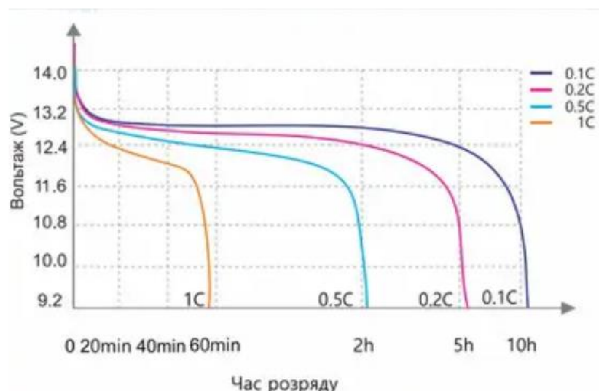
28. Hou C., Chen J., Hu J., Wang H., Xu S. An online calibration algorithm of SOC for LiFePO₄ battery by using characteristic curve. 5th International conference on electric utility deregulation and restructuring and power technologies (DRPT), 2015. doi: 10.1109/drpt.2015.7432595.

29. Barsukov Yevgen & Instruments, Texas. Battery Cell Balancing: What to Balance and How.

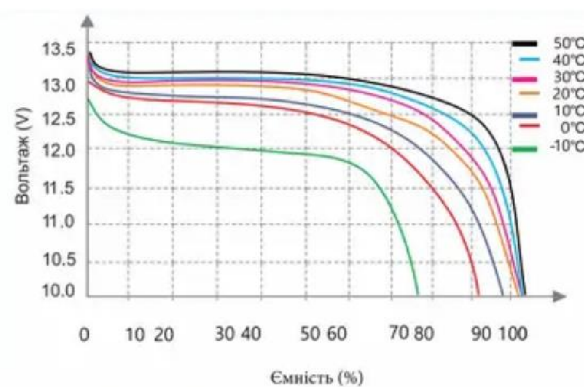
30. [Електронний ресурс]. – <https://www.quant.ua/yholkyn-serhej-balansyr-dlia-akkumuliatornykh-batarej-s-zashchytoj-po-toku/>

31. Farzan Moghaddam, A., & Van den Bossche, A. (2019). An Efficient Equalizing Method for Lithium-Ion Batteries Based on Coupled Inductor Balancing. *Electronics*, 8(2), 136. doi:10.3390/electronics8020136.
32. *Lithium Batteries and Battery Management Systems*. Gianfranco Pistoia / Springer, 2014. – 400 p.
33. *Battery Management Systems: Design by Modelling*. H.J. Bergveld, W.S. Kruijt, P.H.L. Notten / Springer, 2002. – 295 p.
34. *Fundamentals of Kalman Filtering: A Practical Approach*. Paul Zarchan / American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005. – 608 p.
35. Махней О.В. Математичне моделювання: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2015. – 372 с.
36. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
37. S.J. Chapman. *MATLAB Programming for Engineers*. Thomson, 2004. – 592 p.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

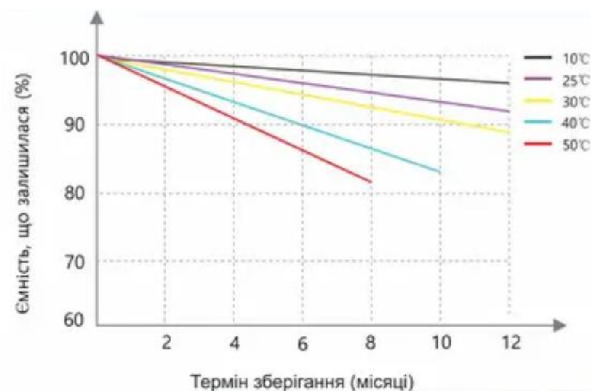
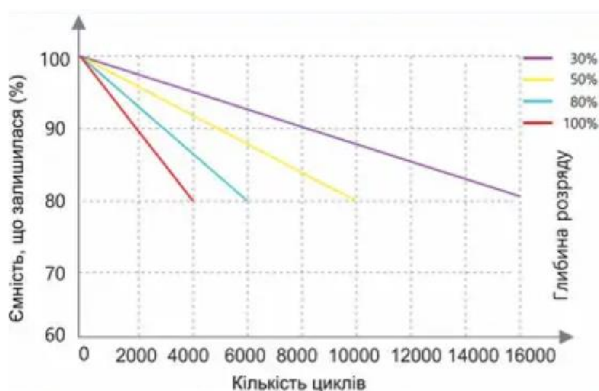


а)

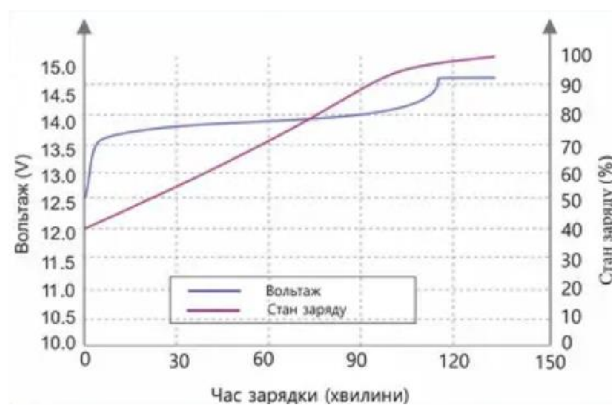


б)

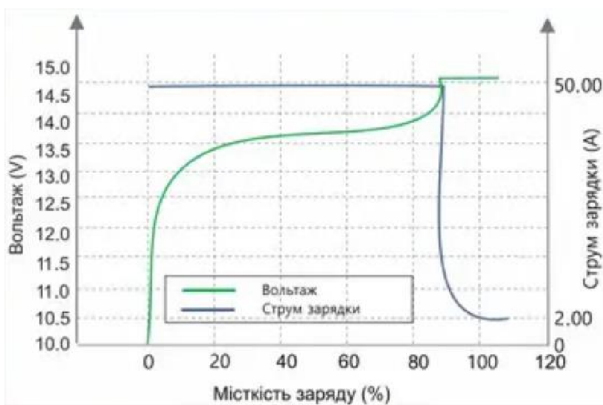
Криві розряду: *а* – під різним навантаженням (струмом) при температурі 25 °C, *б* – при різних температурах (при навантаженні/струмі 1C)



Характеристики розрядження: *а* – залишкова ємність при розряді струмом 0,5C при температурі 25 °C, *б* – саморозряд при різній температурі зберігання

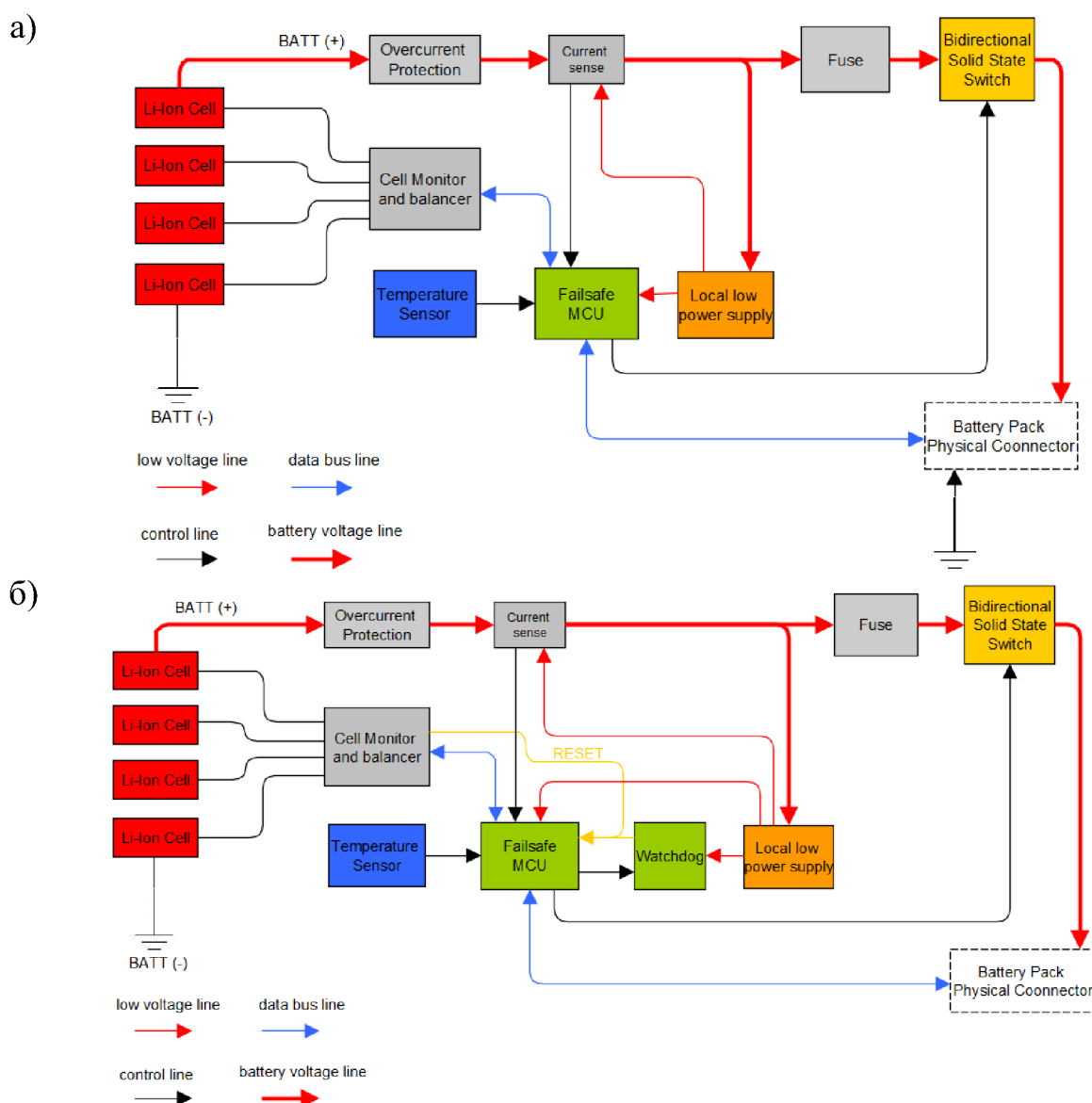
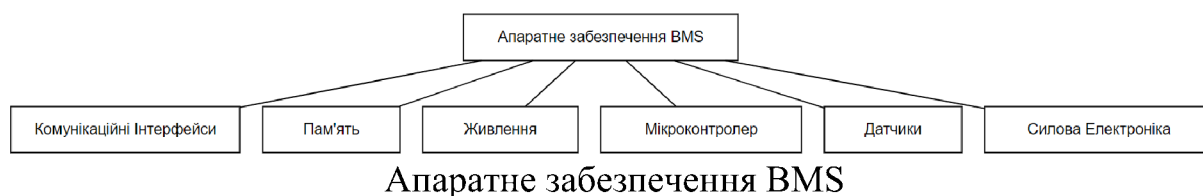


а)



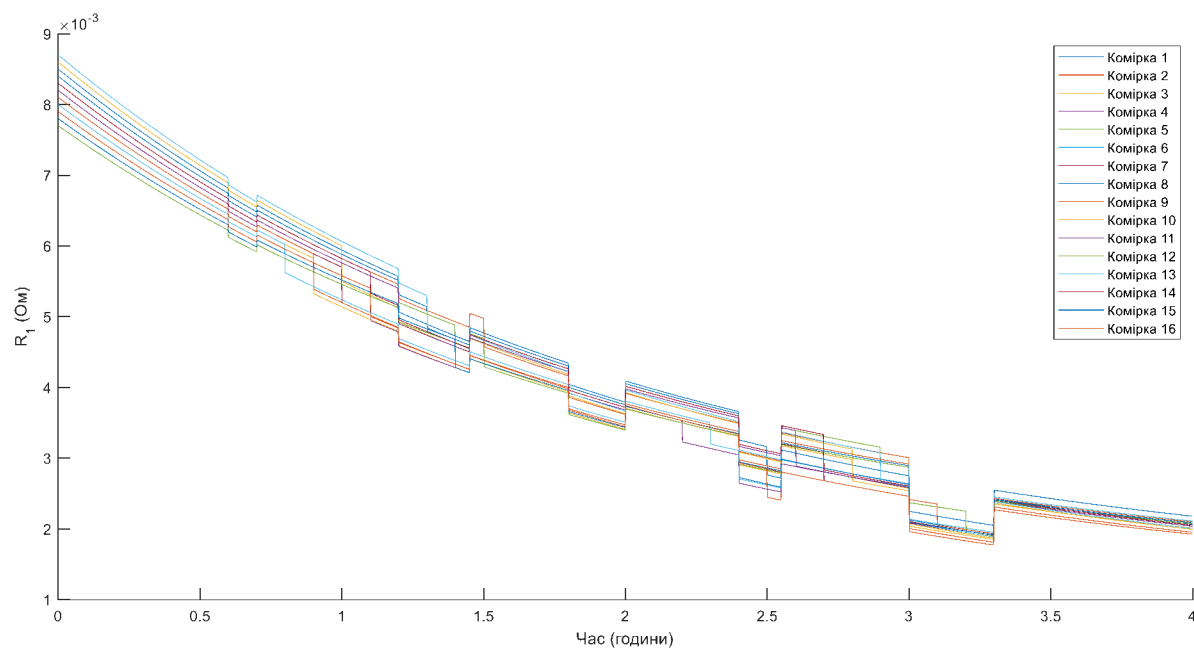
б)

Крива стану зарядження при зарядці при температурі 25 °C: *а* – струмом 0,2C, *б* – струмом 0,5C

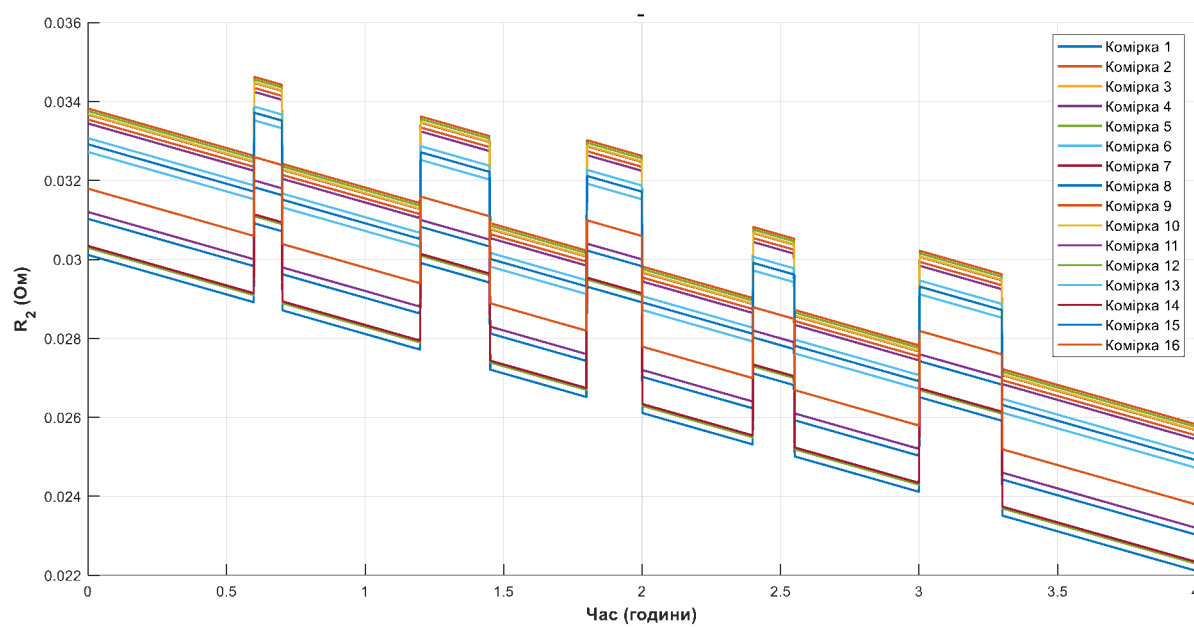


Типові блок-схеми BMS: а – із застосуванням безпекового таймера MCU, б – з повною реалізацією переваг безпекового таймера: «Li-Ion Cell» – літій-іонний елемент, «Overcurrent Protection» – захист від перевантаження струмом, «Current sense» – вимірювання струму, «Cell Monitor and balancer» – моніторинг та балансування елементів, «Temperature Sensor» – датчик температури, «Failsafe MCU» – контролер безпеки, «Watchdog» – безпековий таймер, «Local low power supply» – низьковольтне джерело живлення, «Fuse» – запобіжник, «Bidirectional Solid State Switch» – двонаправлений твердотільний перемикач, «Battery Pack Physical Connector» – фізичний вимикач батарейного пакета, «low voltage line» – лінії низької напруги, «data bus line» – лінії передачі даних, «control line» – лінії управління, «battery voltage line» – лінії живлення від акумулятора

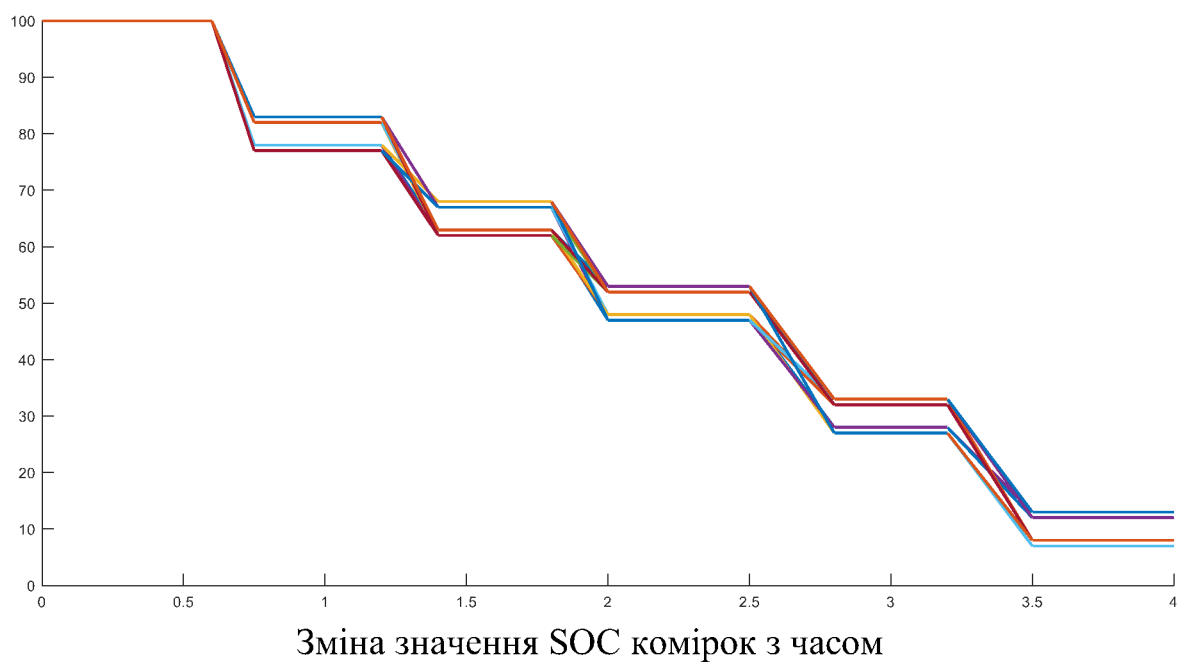
Схема захисту багатомодульних батарей: Ось усі переклади в одному рядку за заданим шаблоном: «Pack» – пакет, «Module» – модуль, «Block» – блок, «Cell» – акумуляторна комірка, «CMC» – центральний модуль управління (ЦМУ), «Current isolation and monitoring» – ізоляція і моніторинг струму, «HV switch/battery protection» – високовольтний перемикач/захист батареї, «Auxiliary Power Supply» – додаткове живлення, «Safe Power Supply» – аварійне живлення, «Battery Management Controller» – контролер управління акумулятором, «CMC isolated Com Control» – ізольоване керування комунікацією ЦМУ, «Com Interface» – інтерфейс комунікації, «Condition sensing» – відстеження стану, «Identification and Security» – ідентифікація та безпека, «Motor Control/Thermal Mgmt.» – керування двигуном/теплове управління, «Electrical Isolation» – електрична ізоляція, «Power Line» – силова лінія живлення, «Communication Line» – лінія зв'язку, «Supply Line» – лінія живлення, «DC+» – постійний струм +, «DC-» – постійний струм -, «12V» – 12В.



Зміна опору комірок з часом у процесі розрядження



Зміна поляризаційного опору комірок з часом у процесі розрядження



ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____