

Олександр Мельничук¹, Михайло Лобур², Василь Іванина³

¹ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: oleksandr.s.melnichuk@lpnu.ua, ORCID 0009-0008-2385-1488

² Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-7516-1093

³ Кафедра систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, Львів, Україна, E-mail: vasyi.v.ivanyna@lpnu.ua, ORCID 0009-0007-6950-4783

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В НЕСПРАВНІЙ ЛІТІЙ-ІОННІЙ БАТАРЕЇ З ВТРАЧЕНОЮ КОМІРКОЮ

Отримано: Березень 12, 2025 / Переглянуто: Березень 20, 2025 / Прийнято: Березень 31, 2025

© Мельничук О., Лобур О., Іванина В., 2025

<https://doi.org/>

Анотація. Під час роботи літій-іонних акумуляторних батарей (АБ) може виникати цілий ряд несправностей, однак більшість існуючих досліджень зосереджені на виявленні внутрішнього короткого замикання та теплового розгону акумулятора. Це стосується і найбільш поширених методів відстеження робочих параметрів та попередження про несправності АБ. Тому такі методи можуть бути неспроможними виявити таку несправність як деградація або повна втрата електричного з'єднання з коміркою в батареї. Водночас, втрата з'єднання навіть з однією коміркою в АБ може призводити до значних змін в режимах роботи, що вплине на безпеку, ефективність та довговічність батареї в цілому. Моделювання цього виду несправностей є важливим кроком на шляху до розробки нових, більш ефективних методів діагностики акумуляторних батарей.

У роботі змодельовано батарею схеми 3s7p, що складається з літій-іонних комірок типу 18650 та має втрачене з'єднання з однією з цих комірок. Чисельне моделювання виконане засобами пакету COMSOL Multiphysics. Описано математичну модель термоелектричних процесів в батареї та використано метод кінцевих елементів для розрахунку теплового поля під час розряду батареї. Досліджено вплив втрати комірки на стан сусідніх комірок та АБ в цілому.

Результати моделювання підтверджують що втрата комірки створює дисбаланс розподілу струму між комірками батареї, що веде до прискореного нагріву та швидкого розряду комірок, які були з'єднані паралельно з втраченою. Хоча решта комірок розряджались повільніше, однак вони не змогли компенсувати втрату ступеня заряду АБ в цілому. Такі зміни збільшують ризик перегріву справних комірок та можуть спричинити їх швидку деградацію в подальшому. Проведено розрахунок теплового поля всередині батареї. Аналіз показує що воно містить характерні відмінності порівняно з полем справної батареї.

Одержані результати можуть бути використані для розробки вдосконалених методів проектування та температурного керування АБ. Запропонований підхід також може бути використаний для діагностики та раннього попередження про несправності у літій-іонних АБ, що сприятиме зменшенню ризиків їх використання та збільшенню тривалості їх життя.

Ключові слова: літій-іонна акумуляторна батарея, термоелектрична модель, чисельне моделювання, несправність батареї, втрата електричного контакту, розбалансування батареї.

Вступ

У сучасному світі літій-іонні акумуляторні батареї (ЛАБ) відіграють ключову роль у забезпеченні енергонезалежності та технологічному поступі людства. Завдяки високій питомій

енергоємності, тривалому терміну служби, стабільності показників та екологічності, ЛАБ стали незамінними в багатьох сферах життя — від портативної електроніки до електромобілів [1] та систем зберігання енергії [2]. Стрімкий розвиток відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової енергетики, також підсилює попит на ефективні та надійні технології акумулювання енергії, де ЛАБ займають провідні позиції [3].

Попри значні переваги, широке використання літій-іонних батарей супроводжується низкою викликів, серед яких безпека експлуатації є найбільшим [4]. Основним недоліком ЛАБ є їх схильність до загоряння, оскільки вони містять електроди з високою енергоємністю, займистий сепаратор, займистий електроліт тощо. Одним зі шляхів зменшення безпекових ризиків сьогодні є розробка більш надійних, вдосконалених систем управління акумуляторними батареями (СУАБ).

Мета даної роботи — змоделювати термоелектричні процеси які відбуваються всередині несправної ЛАБ, а саме, батареї з втраченим електричним з'єднанням до однієї з комірок. Моделювання такого виду несправностей є першим кроком на шляху до розробки нових, більш ефективних методів діагностики та управління акумуляторними батареями.

Огляд сучасних джерел інформації за тематикою публікації

Важливим чинником що впливає на безпеку використання батарей є умови їх експлуатації. Аномальні умови експлуатації спричиняють вихід режимів роботи ЛАБ за межі проєктних рамок, збільшують ймовірність виникнення аварійних ситуацій. До особливо небезпечних для ЛАБ умов належать:

Механічні впливи, такі як стиснення, падіння, проколювання та вібрації.

Електричні впливи, зокрема перезаряд, надмірний розряд, коротке замикання тощо.

Теплові впливи, включаючи перегрів, займання та тепловий розгін.

Коли ці несприятливі фактори перевищують допустимі межі, відбувається її деградація чи навіть руйнація, що може спричинити подальше займання або вибух [5].

Існує багато робіт, присвячених дослідженню, виявленню та запобіганню таких аномальних впливів як внутрішнє коротке замикання [6] чи тепловий розгін [7], [8]. Водночас, така несправність як деградація чи втрата електричного з'єднання між комірками ЛАБ, хоча і згадується в наукових дослідженнях [9], [10], але висвітлена значно гірше.

Несправність з'єднання батареї або комірки виникає через поганий електричний контакт між клемми комірок та електропровідними шинами батареї, оскільки з часом провідники можуть роз'єднатись через вібрацію або ж зазнати корозії. Внаслідок такої несправності опір комірки може різко зрости, що призводить до дисбалансу через нерівномірність струмів та може призвести до перегріву несправної комірки. Це становить значну проблему, оскільки навіть невелика відмінність в параметрах комірок може призвести до значного зменшення довговічності батареї [10].

Вважається що втрату електричного контакту можна легко виявити за допомогою сенсорів напруги та температури [11], однак ця методика є неефективною у випадку батарей з високим ступенем паралелізму. Натомість були запропоновані альтернативні підходи, наприклад вимірювання струму що проходить через кожен комірці [12]. Однак подібні методи діагностики передбачають суттєву переробку конструкції самої батареї, тому їх складно застосувати до вже вироблених батарей, які перебувають в експлуатації.

Виклад основного матеріалу

В якості середовища для моделювання був обраний програмний пакет COMSOL Multiphysics. COMSOL — це числовий інструмент, призначений для розв'язання широкого спектра наукових і інженерних задач, особливо міждисциплінарних. Він містить різні базові модулі та інтерфейси для розв'язання диференціальне рівнянь з частинними похідними за допомогою методу скінченних елементів. COMSOL широко використовується для аналізу електрохімічної та теплової поведінки ЛАБ, а отримані результати розрахунків добре узгоджуються як з альтернативними моделями так і з експериментальними спостереженнями [13-15].

В якості об'єкта для моделювання було обрано батарею схеми 3s7p, що складається з літій-іонних комірок типу 18650 та має втрачене з'єднання з коміркою, як показано на рис. 1. Комірки в батареї з'єднані сталевими електричними шинами як показано на рис. 2 та утримуються пластиковими тримачами. Повністю зібрані комірки з шинами та тримачами зображені на рис. 3.

Для захисту від зовнішніх впливів вміст батареї захищений пластиковим корпусом, зображеним на рис. 4. Геометричні параметри побудованої моделі наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Геометричні параметри моделі

Параметр	Значення	Опис
d_{batt}	0.018 м	Діаметр комірки
h_{batt}	0.065 м	Висота комірки АБ
h_{holder}	0.01 м	Висота тримача комірки
gap	0.002 м	Відстань між сусідніми комірками
N_s	3	Кількість комірок, з'єднаних послідовно
N_p	7	Кількість комірок, з'єднаних паралельно
d_{term}	0.006 м	Діаметр контакту комірки
h_{batt}	0.001 м	Висота контакту комірки
w_{conn}	0.008 м	Ширина одинарної шини що з'єднує комірки
h_{conn}	0.0004 м	Товщина одинарної шини що з'єднує комірки
h_{free}	0.01 м	Відстань від шин АБ до кришки АБ

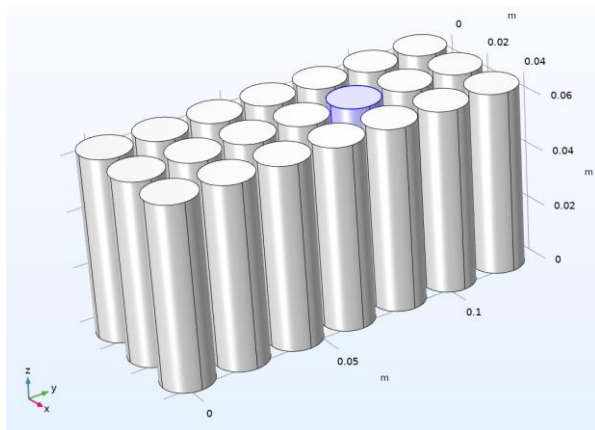


Рис.1. Модель комірок батареї. Дефектна комірка виділена кольором

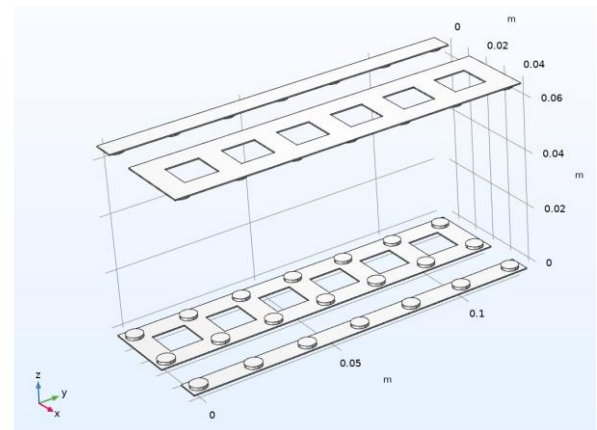


Рис.2. Електричні шини та контакти полюсів комірок

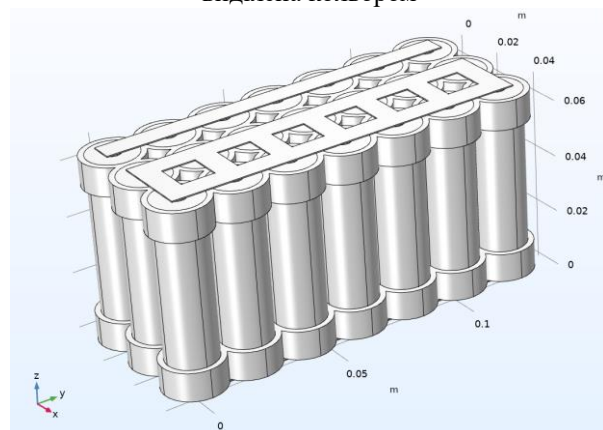


Рис.3. Комірки з шинами та тримачами

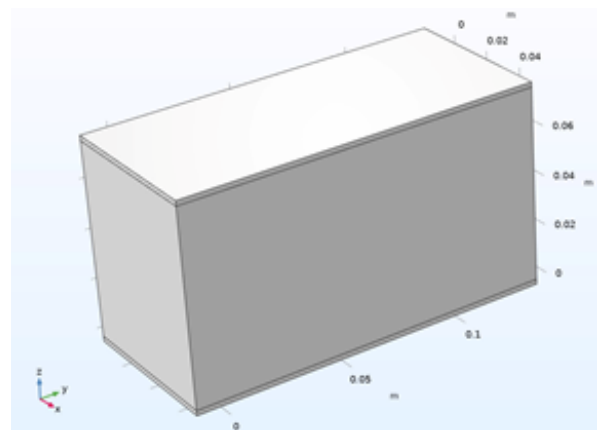


Рис.4. Корпус батареї

Фізичні параметри змодельованих матеріалів наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Фізичні параметри матеріалів

Матеріал	Параметр	Значення	Опис
Акриловий пластик	C_p	1470 Дж/(кг·К)	Питома теплоємність
Акриловий пластик	ρ	1190 кг/м ³	Густина
Акриловий пластик	k	0.18 Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплопровідності
Сталь AISI 4340	C_p	475 Дж/(кг·К)	Питома теплоємність
Сталь AISI 4340	ρ	4850 кг/м ³	Густина
Сталь AISI 4340	k	44.5 Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплопровідності
Сталь AISI 4340	σ	$4.032 \cdot 10^6$ См/м	Питома електропровідність

Вважаємо що батарея наповнена і оточена зовні ідеальним газом з молярною масою $M=0.02897$ кг/моль, під тиском $p=1$ атм та температурою $T_{ext}=301.15$ К, а умови теплопередачі конвективні:

$$-\bar{n} \cdot \bar{q} = h_{ext}(T_{ext} - T), \quad (1)$$

де $\bar{n}$ – зовнішня нормаль до поверхні АБ, $\bar{q}$ – вектор теплового потоку, h_{ext} - коефіцієнт тепловіддачі на поверхні АБ. Використані значення цього та решти фізичних параметрів моделі наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Фізичні параметри моделі

Параметр	Значення	Опис
$Q_{cell,0}$	12600 С	Номінальна ємність комірки
C_{rate}	2	Швидкість розряду АБ
$I_{1C,pack}$	24.5 А	Сумарний 1С струм АБ
$SOC_{pack,0}$	1	Початковий ступінь заряду АБ
$E_a-\eta_{1C}$	24000 Дж/моль	Енергія активації для η_{1C}
E_a-J_0	-59000 Дж/моль	Енергія активації для J_0
$E_a-\tau$	24000 Дж/моль	Енергія активації для τ
$J_{0,0}$	0.85	Безрозмірний струм обміну зарядом за контрольної температури
τ_0	1000 с	Характерний час дифузії за контрольної температури
η_{1C}	0.0045 В	Омічна перенапруга при 1С за контрольної температури
T_{ref}	293.15 К	Контрольна температура
$k_{batt,il}$	30 Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплопровідності комірки АБ вздовж шарів
$k_{batt,il}$	1 Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплопровідності комірки АБ між шарами
ρ_{batt}	2000 кг/м ³	Густина комірки АБ
$C_{p,batt}$	1400 Дж/(кг·К)	Питома теплоємність комірки АБ
h_{ext}	10 Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі на поверхні АБ
T_{init}, T_{ext}	301.15 К	Початкова та температура зовнішнього середовища

Будемо моделювати процес розряду батареї з швидкістю розряду $C_{rate} = 2$ в часовому проміжку $t = [0, 0.8/C_{rate}]$ с.

Математична модель, що описує процеси заряду та розряду АБ ґрунтується на

- 1) рівняннях збереження електричного заряду
- 2) рівняннях збереження енергії.

В загальному випадку, напруга на електродах комірки акумулятора визначається як

$$E_{cell} = E_{OCV}(SOC, T) + \eta_{IR} + \eta_{act} + \eta_{conc}, \quad (2)$$

де η_{IR} – омична перенапруга, η_{act} – перенапруга активації, η_{conc} – перенапруга концентрації. E_{OCV} – це напруга комірки в розімкненому електричному ланцюгу, залежність якої від ступеня заряду комірки SOC та температури T можна виразити як

$$E_{OCV}(SOC, T) = E_{OCV,ref}(SOC) + (T - T_{ref}) \frac{\partial E_{OCV}(SOC)}{\partial T}. \quad (3)$$

Тут $E_{OCV,ref}(SOC)$ – напруга на електродах комірки в розімкненому електричному ланцюгу за контрольної температури T_{ref} , задана аналітично на рис. 5.

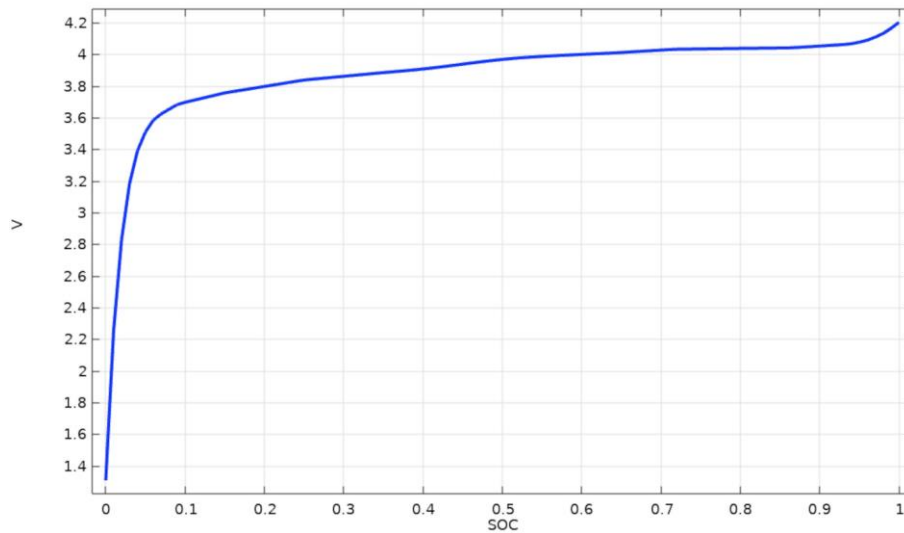


Рис. 5. Залежність напруги на електродах комірки від ступеня заряду комірки

Аналітично задана і похідна напруги за температурою $\frac{\partial E_{OCV}(SOC)}{\partial T}$, зображена на рис. 6:

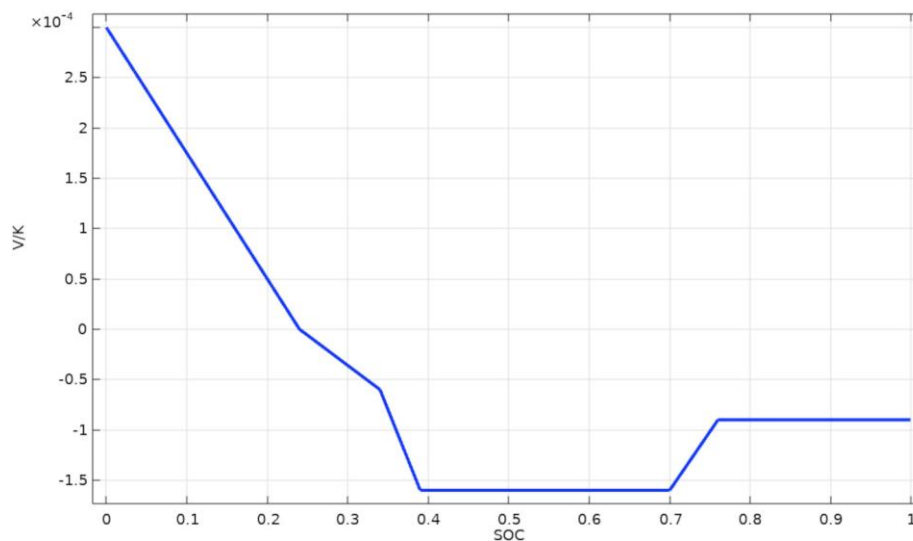


Рис. 6. Залежність похідної напруги комірки за температурою від ступеня заряду комірки

Зміна ступеня заряду комірки в часі визначається залежністю

$$\frac{\partial \text{SOC}}{\partial t} = \frac{I_{\text{cell}}}{Q_{\text{cell},0}}, \quad (4)$$

де I_{cell} - струм що проходить через комірку, $Q_{\text{cell},0}$ – початкова ємність комірки.

Омічні втрати напруги комірки враховані як

$$\eta_{\text{IR}} = \eta_{\text{IR},1\text{C}} \frac{I_{\text{cell}}}{I_{1\text{C}}}, \quad (5)$$

де $\eta_{\text{IR},1\text{C}}$ – омічна перенапруга при струмі 1C:

$$\eta_{\text{IR},1\text{C}} = \eta_{1\text{C}} \exp \left(\frac{E_a - \eta_{1\text{C}}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right), \quad (6)$$

$$I_{1\text{C}} = \frac{Q_{\text{cell},0}}{3600 \text{ с.}} \quad (7)$$

Втрати напруги пов'язані з перенапругою активації на поверхнях електродів виводяться з рівняння Батлера-Фольмера. Для випадку симетричної реакції, коли коефіцієнти переносу катодної та анодної реакцій приймаються рівними, тобто $\alpha_a = \alpha_c = 0.5$, рівняння Батлера-Фольмера можна записати у вигляді:

$$I = I_0 \left[e^{\frac{F\eta}{2RT}} - e^{-\frac{F\eta}{2RT}} \right] = 2I_0 \sinh \left(\frac{F\eta}{2RT} \right). \quad (8)$$

Застосувавши дане рівняння до моделі комірки акумулятора, отримаємо вираз для перенапруги активації:

$$\eta_{\text{act}} = \frac{2RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{I_{\text{cell}}}{2I_0 I_{1\text{C}}} \right), \quad (9)$$

де F - число Фарадея, R – універсальна газова стала, I_0 – безрозмірний струм обміну зарядами. Вплив перенапруги концентрації моделюється у вигляді одновимірної задачі дифузії безрозмірної величини SOC відносно безрозмірної просторової координати $X \in [0, 1]$:

$$\tau \frac{\partial \text{SOC}}{\partial t} + \nabla \cdot (-\nabla \text{SOC}) = 0, \quad (10)$$

де τ - константа що характеризує час дифузії. Оскільки в нашому випадку були вибрані частинки сферичної форми, то крайові умови мають вигляд:

$$\nabla \text{SOC}|_{X=1} = \frac{\tau I_{\text{cell}}}{3Q_{\text{cell}}}; \nabla \text{SOC}|_{X=0} = 0. \quad (11)$$

Також задаємо початкове значення ступеня заряду:

$$\text{SOC}|_{t=0} = \text{SOC}_{\text{cell},0}. \quad (12)$$

Середнє значення ступеня заряду можна отримати як інтеграл

$$\overline{\text{SOC}} = 3 \int_{X=0}^1 \text{SOC} X^2 dX. \quad (13)$$

В підсумку, отримуємо перенапругу концентрації як:

$$\eta_{\text{conc}} = E_{\text{ocv}}(\text{SOC}|_{X=1}, T) - E_{\text{ocv}}(\overline{\text{SOC}}, T). \quad (14)$$

Рівняння що описує поширення тепла в системі:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_h. \quad (15)$$

Тут ρ - густина матеріалу, C_p - питома теплоємність, k – коефіцієнт теплопровідності.

Все тепло, виділене джерелами тепла в системі:

$$Q_h = Q_{\text{batt}} + Q_{\text{ccnd}}, \quad (16)$$

складається з тепла що утворюється внаслідок електрохімічних перетворень в комірках:

$$Q_{\text{batt}} = \left(\eta_{\text{IR}} + \eta_{\text{act}} + T \frac{\partial E_{\text{OCV}}(\text{SOC}|_{X=1}, T)}{\partial T} \right) I_{\text{cell}} + Q_{\text{mix}}, \quad (17)$$

та тепла створеного проходженням струму через провідники згідно закону Джоуля-Ленца:

$$Q_{\text{ccnd}} = -\mathbf{i}_s \cdot \nabla \phi_s. \quad (18)$$

Тепло що утворюється внаслідок різниці концентрації іонів літію в пористих електродах для частинок сферичної форми, враховано у рівнянні

$$Q_{\text{mix}} = \frac{3Q_{\text{cell}}}{\tau} \int_{X=0}^1 \frac{\partial E_{\text{OCV, therm}}}{\partial \text{SOC}} \frac{\partial \text{SOC}}{\partial X} \frac{\partial \text{SOC}}{\partial X} X^2 dX, \quad (19)$$

де $X \in [0, 1]$ – безрозмірна просторова координата, Q_{cell} - загальна теплова потужність комірки, τ - константа що характеризує час дифузії,

Для розв'язання сформульованої системи рівнянь геометричну область моделі було розбито на тривимірні скінченні елементи. Чисельний розв'язок був отриманий застосуванням алгоритму MUMPS до сформульованої комплексної моделі.

Результати та обговорення

Як видно з графіків на рис. 7, 8, температурні показники та напруга на контактах батареї відрізняються незначно.

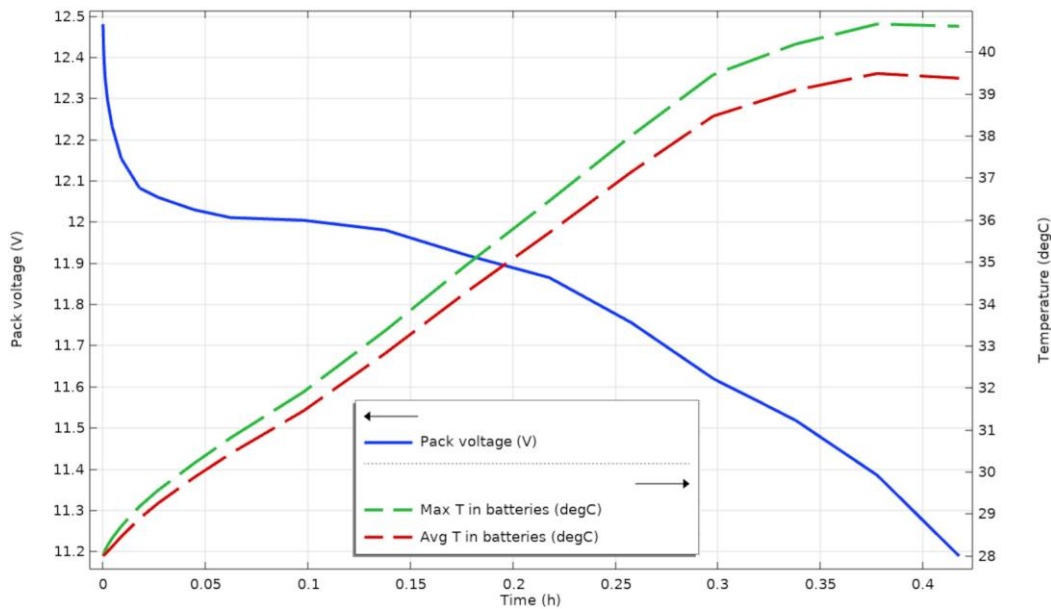


Рис. 7. Напруга та температура справної батареї

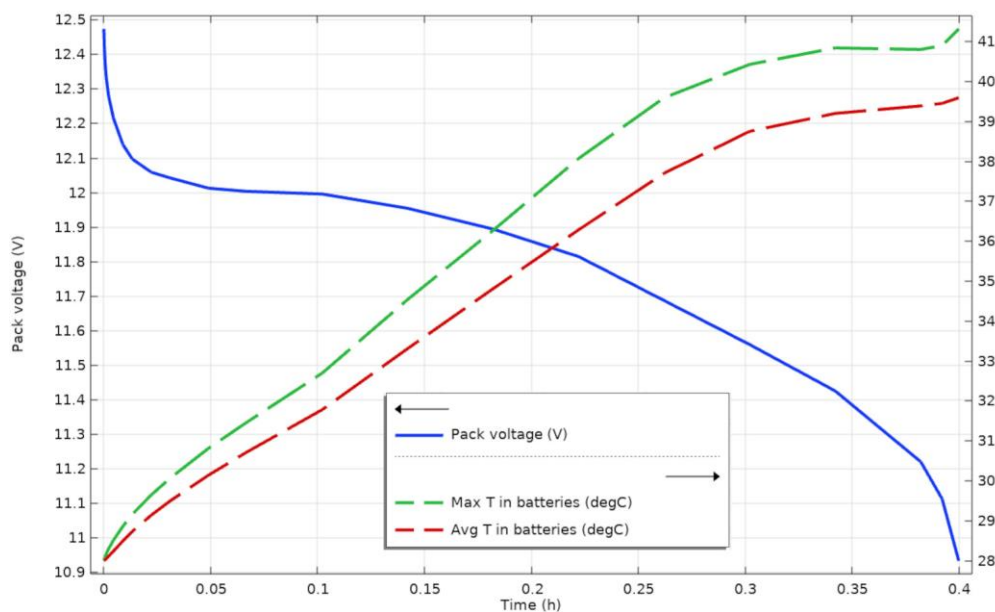


Рис. 8. Напруга та температура несправної батареї

На відміну від цих агрегованих величин, розподіл температурного градієнту має значні відмінності. У справній батареї на рис. 9 розподіл рівномірний, більший нагрів внутрішніх елементів є типовим за умов пасивного охолодження батареї. У несправній батареї розподіл температури нерівномірний: несправний елемент нагрівся найменше, а температурний максимум змістився з центра мас батареї.

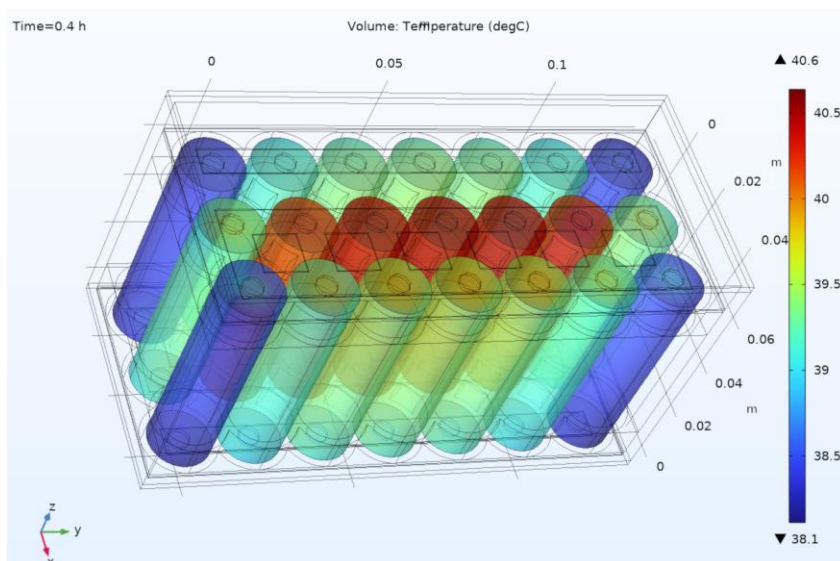


Рис. 9. Розподіл температури у справній батареї

Причину такого розподілу бачимо на рис. 11, де наведений розподіл струму в точці $t=0.2h$. Втрата комірки призвела до значного дисбалансу струму який проходить через комірки. Через найбільш навантажену комірку тепер проходить на приблизно 20% більший струм порівняно з найменш навантаженою.

Як наслідок, після завершення процесу розряду найбільш навантажені комірки розрядилися значно сильніше, до $SOC=0.065$ порівняно з $SOC=0.205$ у найменш навантажених. Подальший розряд батареї привів би до надмірного розряду найбільш навантажених комірок.

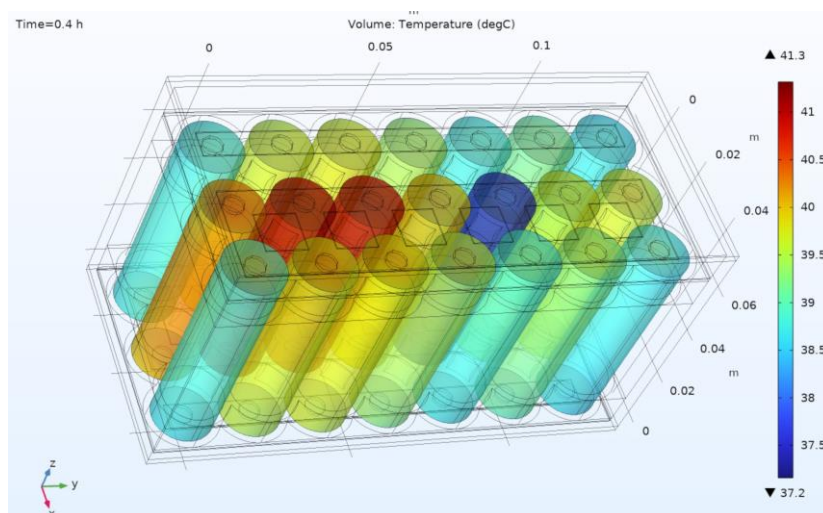


Рис. 10. Розподіл температури у несправній батареї

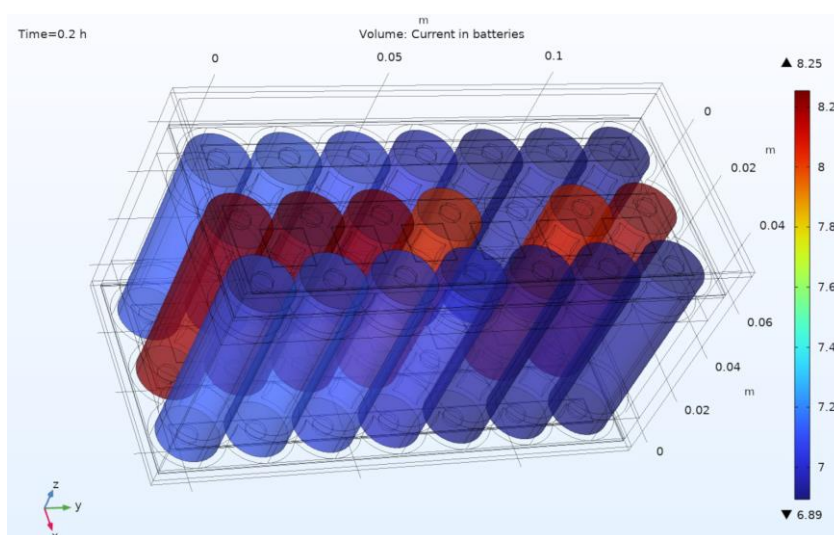


Рис. 11. Розподіл струму між комірками несправної батареї

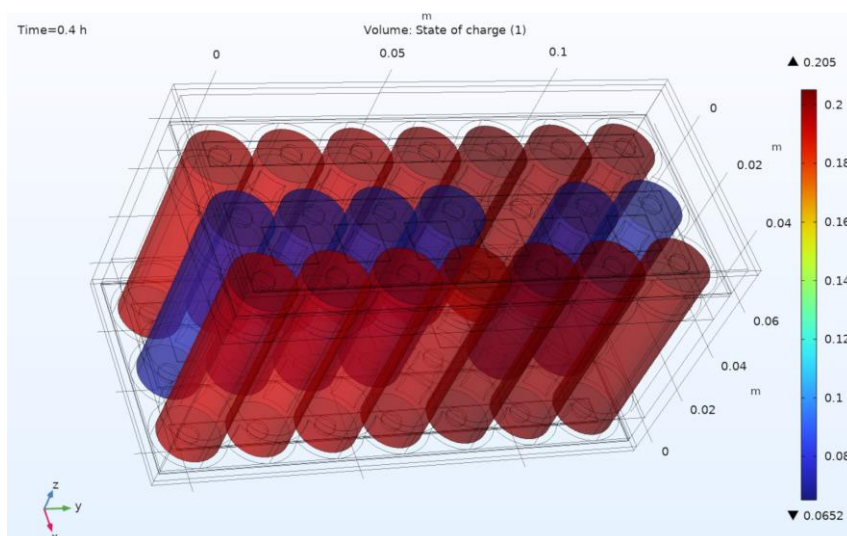


Рис. 12. Дисбаланс ступеня заряду комірок несправної батареї

Висновки

У роботі представлено числову модель ЛАБ схеми 3s7p, що складається з літій-іонних комірок типу 18650 та має втрачене електричне з'єднання з однією з цих комірок. Описано математичну модель термоелектричних процесів в батареї та використано метод кінцевих елементів для розрахунку теплового поля, струму, стану заряду всередині батареї.

Результати моделювання свідчать що втрата навіть однієї комірки створює значний дисбаланс розподілу струму між комірками батареї, що веде до прискореного нагріву та швидкого розряду комірок, які були з'єднані паралельно з втраченою. Хоча решта комірок розряджались повільніше, однак вони не змогли компенсувати втрату ступеня заряду АБ в цілому. Такі зміни збільшують ризику перегріву справних комірок та можуть спричинити їх швидку деградацію в подальшому.

Проведено розрахунок теплового поля всередині батареї. Показано що воно містить характерні відмінності порівняно з полем справної батареї. Дана модель може бути використана для розробки методів діагностики стану акумуляторних батарей за їх тепловим полем.

В цілому отримані результати виглядають вірогідними, однак дана модель потребує перевірки шляхом порівняння з експериментальними вимірюваннями.

Перелік використаних джерел

- [1] 1. S. Rangarajan, Shriram, et al. "Lithium-ion batteries-The crux of electric vehicles with opportunities and challenges." *Clean Technologies* 4.4 (2022): 908-930. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040056>
- [2] Elalfy, Dina A., et al. "Comprehensive review of energy storage systems technologies, objectives, challenges, and future trends." *Energy Strategy Reviews* 54 (2024): 101482. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101482>
- [3] Yang, Yue, et al. "On the sustainability of lithium ion battery industry-A review and perspective." *Energy Storage Materials* 36 (2021): 186-212. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.12.019>
- [4] Rana, Suraj, Rajan Kumar, and Rabinder Singh Bharj. "Current trends, challenges, and prospects in material advances for improving the overall safety of lithium-ion battery pack." *Chemical Engineering Journal* 463 (2023): 142336. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142336>
- [5] Qiu, Yishu, and Fangming Jiang. "A review on passive and active strategies of enhancing the safety of lithium-ion batteries." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 184 (2022): 122288. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122288>
- [6] Luo, Wei, et al. "Review of mechanisms and detection methods of internal short circuits in lithium-ion batteries." *Ionics* (2025): 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11581-025-06211-6>
- [7] Shahid, Seham, and Martin Agelin-Chaab. "A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries." *Energy Conversion and Management: X* 16 (2022): 100310. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>
- [8] Kong, Depeng, et al. "A review of early warning methods of thermal runaway of lithium ion batteries." *Journal of Energy Storage* 64 (2023): 107073. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107073>
- [9] Lu, Languang, et al. "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles." *Journal of power sources* 226 (2013): 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>
- [10] Diao, Weiping, Michael Pecht, and Tao Liu. "Management of imbalances in parallel-connected lithium-ion battery packs." *Journal of Energy Storage* 24 (2019): 100781. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100781>
- [11] Tran, Manh-Kien, and Michael Fowler. "A review of lithium-ion battery fault diagnostic algorithms: Current progress and future challenges." *Algorithms* 13.3 (2020): 62. <https://doi.org/10.3390/a13030062>
- [12] Ding, Xinchao, et al. "Diagnosis of connection fault for parallel-connected lithium-ion batteries based on long short-term memory networks." *Journal of Energy Storage* 55 (2022): 105552. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105552>
- [13] Hu, Zhenwen, et al. "Benchmarking between COMSOL and GPYRO in predicting self-heating ignition of lithium-ion batteries." *Fire Technology* 59.3 (2023): 1319-1339. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01335-x>
- [14] Geng, Zeyang, et al. "Bridging physics-based and equivalent circuit models for lithium-ion batteries." *Electrochimica Acta* 372 (2021): 137829. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137829>
- [15] Crawford, Alasdair J., et al. "Lithium-ion battery physics and statistics-based state of health model."

Oleksandr Melnychuk¹, Mykhaylo Lobur², Vasyl Ivanyna³

¹ Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: oleksandr.s.melnichuk@lpnu.ua, ORCID 0009-0008-2385-1488

² Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: mykhaylo.v.lobur@lpnu.ua, ORCID 0000-0001-7516-1093

³ Computer Design Systems Department, Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv, S. Bandery street 12, E-mail: vasyl.v.ivanyna@lpnu.ua, ORCID 0009-0007-6950-4783

MODELING OF THERMOELECTRIC PROCESSES IN A FAULTY LITHIUM-ION BATTERY WITH A LOST CELL

Received: March 12, 2025 / Revised: March 20, 2025 / Accepted: March 31, 2025

© Melnychuk O., Lobur M., Ivanyna V., 2025

Abstract. Wide range of malfunctions can occur during the operation of lithium-ion battery packs (BPs). However, most existing studies focus on internal short circuits and thermal runaway of the battery detection. The same statement also applies to the most common monitoring methods of BP operating parameters and their faults detection. Therefore, such methods may be incapable of identifying a malfunction such as degradation or a complete loss of electrical connection to a cell within the battery. At the same time, losing a connection to even a single cell in the BP can lead to significant changes in operating modes, affecting the overall safety, efficiency, and longevity of the battery. Modeling this type of failure is an essential step in developing new and more effective diagnostic methods for BPs.

This study models a 3s7p battery pack consisting of lithium-ion 18650 cells with a lost connection to one of the cells. Numerical modelling is conducted utilizing COMSOL Multiphysics software. A mathematical model of the thermoelectric processes in the battery is described. The finite element method is used to calculate the thermal field during battery discharge. The impact of the lost cell on neighbouring cells and the overall BP is examined.

The modeling results confirm that the loss of a cell creates an imbalance in current distribution among the battery cells, leading to accelerated heating and rapid discharge of the cells connected in parallel with the lost one. Although the remaining cells discharged more slowly, they cannot compensate for the overall loss of battery state of charge. These changes increase the risk of overheating the functional cells and may contribute to their rapid degradation in the future. The thermal field inside the battery is calculated. Its analysis shows distinct differences when compared to a healthy battery.

The results may be useful for further development of improved BP design and thermal management methods. The recommended method can be utilized for diagnostics and early fault detection in lithium-ion battery packs, thereby decreasing operational risks and enhancing battery longevity.

Keywords: lithium-ion batteries, thermal-electrical model, numerical modeling, battery fault, lost connection, battery disbalance.