

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ LI-ІОН АКУМУЛЯТОРА
В РЕЖИМАХ ЗАРЯДУ І РОЗРЯДУ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-42
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Бордун О.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Голотенко О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« _____ » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Бордуну Олегу Романовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Ефективність роботи Li-іон акумулятора в режимах заряду і розряду

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» грудня 2025 року № 4/7-1163.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Li-іон акумулятор типу 18650 працює в режимі заряду/розряду

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Характеристики та порівняння літій-іонних акумуляторів

2. Методика вивчення характеристик акумуляторів

3. Установка для проведення вимірювання

4. Моделювання процесів зарядки та розрядки акумулятора

5. Валідація та порівняння моделей

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

1. Характеристики акумуляторів за типами

2. Методика вивчення характеристик акумуляторів

3. Установка для проведення вимірювання

4. Результати випробування

5. Моделювання процесів зарядки та розрядки акумулятора

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ET-42. – Т. : ТНТУ, 2026.

Стор. 69; рис. 28; табл. 12; креслень (презентацій) 17; джерел 28.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Ефективність роботи Li-ion акумулятора в режимах заряду і розряду».

Метою роботи є дослідження ефективності роботи літій-іонного акумулятора в режимах заряду та розряду шляхом розробки математичних моделей, проведення експериментального тестування та верифікації результатів моделювання.

У роботі розроблено методикау вивчення характеристик акумуляторів, яка об'єднує три взаємопов'язані етапи: вибір та математичне моделювання моделі акумулятора; експериментальна робота з платформою Arduino; імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Проаналізовано та математично описано три моделі акумулятора на основі топології еквівалентної схеми RV: просту модель, модель з нульовим гістерезисом та комбіновану модель. Розроблено та реалізовано експериментальну установку на базі плати Arduino UNO для проведення тестів заряджання та розряджання акумулятора ICR18650. Встановлено, що ефективність досліджуваного акумулятора ICR18650 в режимі імпульсного заряджання-розряджання становить 89,836 %, що відповідає характеристикам типових літій-іонних акумуляторів. Комбінована модель визнана найбільш точною та адекватною для моделювання роботи акумулятора в досліджуваних режимах.

Ключові слова: Li-ion АКУМУЛЯТОР, ЕФЕКТИВНІСТЬ, МОДЕЛЬ.

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Акумулятори та накопичувачі енергії.....	8
1.2 Електрохімія літій-іонних акумуляторів	10
1.3 Характеристики та порівняння літій-іонних акумуляторів	13
1.4 Моделювання акумуляторів.....	15
1.5 Методи оцінки SoC	18
1.6 Висновки до розділу	20
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	23
2.1 Методика вивчення характеристик акумуляторів	23
2.2 Вибір моделі акумулятора.....	24
2.3 Установка для проведення вимірювання.....	28
2.3.1 Опис конструкції	28
2.3.2 Технічні характеристики	31
2.3.3 Результати вимірювань.....	36
2.4 Висновки до розділу	40
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	43
3.1 Моделювання процесів зарядки та розрядки акумулятора.....	43
3.2 Валідація та порівняння моделей	51
3.3 Висновки до розділу	55
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	51
4.1 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок	58
4.2 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	65

ВСТУП

Актуальність теми. Сьогодні світ стоїть перед викликами енергетичного переходу та необхідністю декарбонізації економіки. Ключовою ланкою цього переходу є електричний транспорт та системи відновлюваної енергетики, які потребують ефективних, надійних та безпечних систем накопичення енергії. Літій-іонні акумулятори (Li-ion) стали домінуючою технологією в цій галузі завдяки своїм унікальним характеристикам: високій енергетичній щільності (479–837 Вт·год/кг), низькому саморозряду (<5 % щомісяця), тривалому терміну служби (2500–6000 циклів) та високому коефіцієнту корисної дії (>92 %). Вони широко застосовуються в електромобілях, портативній електроніці, системах зберігання енергії (BESS) та інших сферах, що робить їхнє дослідження надзвичайно актуальним.

Ефективність роботи літій-іонного акумулятора суттєво залежить від режимів заряду та розряду. Неправильне керування цими процесами призводить до прискореної деградації елемента, зниження його ємності, скорочення терміну служби та навіть до небезпечних ситуацій, пов'язаних з перегрівом або виходом з ладу. Тому розробка точних математичних моделей, які дозволяють прогнозувати поведінку акумулятора в різних режимах експлуатації, та створення ефективних алгоритмів оцінювання стану заряду (SoC) є важливими завданнями для забезпечення безпечної та ефективної роботи акумуляторних систем.

В Україні питання ефективного використання акумуляторних технологій набуває особливої актуальності в контексті розвитку систем накопичення енергії для інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергосистему, а також забезпечення енергонезалежності. Розробка та впровадження власних методик дослідження характеристик акумуляторів, адаптованих до вітчизняних умов та доступного обладнання, є важливим напрямком підготовки фахівців у галузі електроенергетики та електротехніки.

Існуючі підходи до моделювання акумуляторів охоплюють широкий спектр методів — від складних електрохімічних моделей, що базуються на рівняннях у частинних похідних, до спрощених моделей еквівалентних схем, які є компромісом між точністю та обчислювальною складністю.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових робіт у цій галузі, залишається потреба в дослідженнях, які поєднують теоретичне моделювання з експериментальною перевіркою на реальному обладнанні.. Платформа Arduino, яка є відносно дешевим та простим у використанні інструментом, відкриває широкі можливості для проведення таких досліджень і може слугувати основою для створення відтворюваних методик тестування акумуляторів.

Таким чином, дослідження ефективності роботи Li-ion акумулятора в режимах заряду та розряду з використанням математичного моделювання та експериментальної верифікації є **актуальним** науково-технічним завданням, що має як теоретичне, так і практичне значення для розвитку акумуляторних технологій в Україні та підготовки висококваліфікованих фахівців у галузі електричної інженерії.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження ефективності роботи літій-іонного акумулятора в режимах заряду та розряду шляхом розробки математичних моделей, проведення експериментального тестування та верифікації результатів моделювання.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналітичний огляд сучасного стану проблеми ефективності роботи літій-іонних акумуляторів.

1. Розробити методику вивчення характеристик акумуляторів, що поєднує математичне моделювання, експериментальну роботу з Arduino та імітаційне моделювання в Matlab/Simulink.

2. Математично описати три моделі акумулятора (просту, з нульовим гістерезисом та комбіновану).

3. Розробити експериментальну установку на базі Arduino UNO для імпульсного тестування акумулятора ICR18650 та отримати дані щодо напруги, струму та стану заряду.

4. Реалізувати моделі в Matlab/Simulink, ідентифікувати їхні параметри та провести моделювання процесів зарядки та розрядки.

5. Виконати порівняльний аналіз точності моделей та ефективністю та визначити найбільш адекватну модель.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань.

Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 69 арк. формату А4, графічна частина – 17 аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Акумулятори та накопичувачі енергії

Перше покоління акумуляторів започаткувала так звана «вольтаїчна батарея», винайдена Алессандро Вольтою в 1800 році. Використовуючи два різних метали (цинк і мідь) та солону воду, Вольта зміг виміряти різницю напруги між металевими елементами. На той час електрика ще не була відкрита, тому на початковому етапі це відкриття розглядалося як джерело постійної напруги. Через кілька років, завдяки роботі Вольти, Андре-Марі Ампер відкрив електричний струм, що стало початком електродинаміки. Модель та структура акумулятора поступово вдосконалювалися вченими, що призвело до створення перших акумуляторних елементів.

Як правило, батарейні елементи базуються на реакціях відновлення та окиснення (редокс). У цих реакціях одна речовина відновлюється (набирає електрони), а інша окиснюється (втрачає електрони). Вони складаються з двох кіл: внутрішнього та зовнішнього. Внутрішнє коло — це шлях, яким повинні протікати іони, утворені в реакціях редокс, тоді як зовнішнє коло складається з елементів, що транспортують електрони. Основними компонентами елемента батареї є:

- Електроди: металеві деталі, на яких відбуваються реакції окиснення-відновлення. Від’ємний електрод (анод) надає електрони навантаженню та окиснюється під час електрохімічної реакції. І навпаки, додатній електрод (катод) приймає електрони та відновлюється під час реакції.

- Електрохімічно активні речовини: речовини в зонах аноду та катоду, які реагують з речовинами електродів, генеруючи реакцію окиснення-відновлення.

- Електроліт: тверда або рідка ізолююча речовина, яка врівноважує заряд як катодової, так і анодovої зон шляхом обміну іонів між ними.

- Сепаратор: запобігає прямому контакту між електрохімічно

активними речовинами в анодовій та катодовій зонах.

Загальна структура елемента зображена на рисунку 1.1. Два електроди складаються з двох матеріалів, які називаються Y_0 (для анода) та X_0 (для катода). Анод оточений речовиною або компонентом Y_1 , тоді як катод оточений компонентом X_1 . І катод, і анод також оточені електролітом Z . Матеріали X_0 - X_1 та Y_0 - Y_1 визначають дві пари електрохімічно активних речовин, що мають різницю потенціалів. При підключенні зовнішнього навантаження між електродами електричне коло замикається і батарея розряджається, що означає початок окисно-відновних реакцій, які генерують електричний струм через навантаження [2,3]. Електрони та додатні іони Y^{2+} утворюються в результаті реакції окиснення між речовинами Y_0 та Y_1 . Електрони збираються катодом, що призводить до реакції відновлення між речовинами X_0 та X_1 , яка, у свою чергу, утворює іон X^{2-} . Внутрішнє коло забезпечує іонний обмін. У цьому процесі активні речовини розкладаються, тому електричний потенціал між ними зменшується.

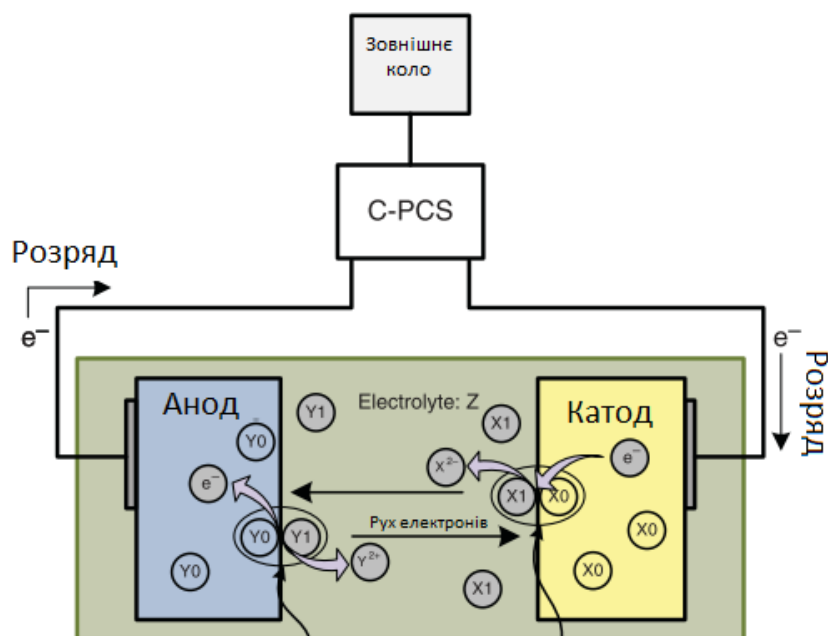


Рисунок 1.1 – Загальна будова елемента батареї

Існує два типи батарей: первинні та вторинні. Первинні батареї — це ті, які можна використовувати лише один раз. Електрохімічні активні речовини мають максимальну різницю потенціалів, яка зменшується під час процесу

розрядження, аж до повного їх розкладу.

У вторинних батареях або акумуляторах різниця електричних потенціалів може бути відновлена шляхом підключення зовнішнього джерела електроенергії, яке змінює напрямок електричного струму для зарядження батареї. Цей тип батарей є основою сучасних систем акумулювання електроенергії (BESS), які зберігають електричну енергію для використання її пізніше. Першою технологією вторинних батарей була свинцево-кислотна батарея, винайдена в 1859 році Гастоном Планте [4].

Застосування вторинних акумуляторів за останні роки набуло величезного поширення: вони використовуються у транспорті, телефонних станціях, портативних електронних пристроях або аварійному освітленні, і становлять одну з основних технологій, що використовуються для накопичення енергії у великих масштабах. Класифікація вторинних акумуляторів може ґрунтуватися на їхній конструкції (герметичні або вентильовані), електроліті (кислотному або лужному), кінцевому призначенні (стаціонарні або портативні) або активних речовинах.

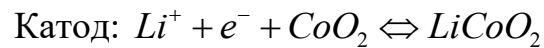
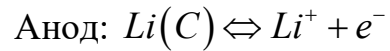
В останні роки літій-іонні акумулятори стали найбільш поширеною та розвиненою технологією для багатьох різних застосувань (електромобілі, великомасштабне зберігання енергії, портативні пристрої...) [5-8]. Оскільки літій-іонна технологія є основною технологією, що досліджується в цій роботі, вона буде детально описана пізніше. У наступному розділі представлені основні технології вторинних акумуляторів (крім літій-іонних) з урахуванням їх активних речовин.

1.2 Електрохімія літій-іонних акумуляторів

Матеріалом катода є оксид літію, найпоширенішим з яких є кобалат літію (LCO). Від'ємний електрод в основному складається з атомів вуглецю (C) та літію. Що стосується електроліту, то найпоширенішою формою є органічний розчин розчинених солей на основі літію (LiPF_6 , LiClO_4 ...). Щодо сепаратора, то

раніше ним був пористий матеріал на основі поліетилену або поліпропілену. Схематичне зображення типового процесу розрядження літій-іонного акумулятора представлено на рисунку 1.2.

Загальну окисно-відновну реакцію типового літій-іонного акумулятора на основі металу можна записати так:



Загалом:

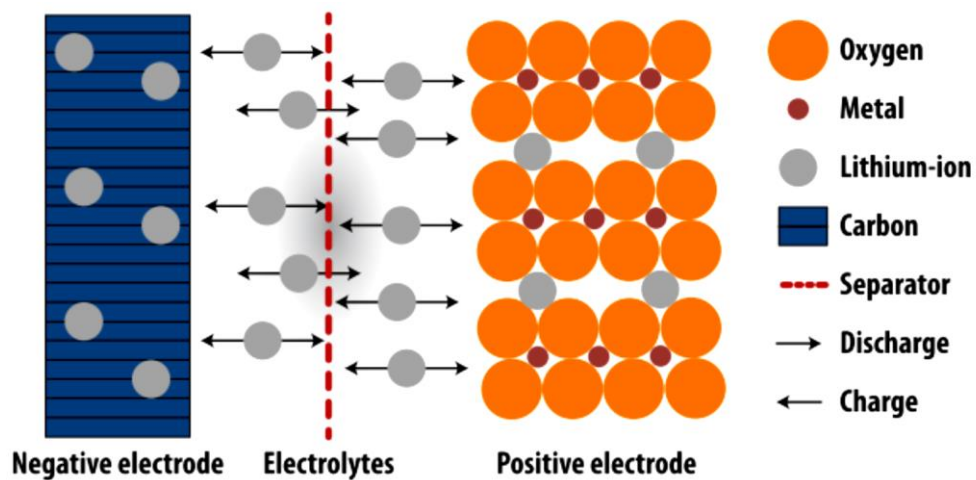


Рисунок 1.2 – Схема процесу розрядження літій-іонного акумулятора

Під час заряджання іони літію виходять з катода і вбудовуються в графітовий електрод. Вільні електрони протікають по зовнішньому контуру, замикаючи коло. У цих реакціях різниця напруг між електродами досягає 3,7 В, що є найвищим потенціалом, який на сьогодні генерує будь-яка технологія акумуляторів [9].

Як зазначалося, існує кілька технологій літійових акумуляторів, що відрізняються між собою активними матеріалами (в основному катодом) та електролітом.

Оксид літію-кобальту (LCO) та нікель-кобальт-алюміній (NCA)

Оксид літію-кобальту був першою технологією, комерціалізованою в галузі літійових батарей. Він має вищу енергетичну щільність порівняно з іншими типами літій-іонних батарей. Однак цей тип елементів має кілька

недоліків або мінусів, які витіснили ці батареї з ринку: короткий термін служби, обмежені швидкості заряджання та низька термічна стабільність. Через це їхнє застосування обмежується ринком електроніки та комунікацій, але вони не підходять для стаціонарних застосувань.

Покращення LCO відбулося з появою нікелю, який використовується замість кобальту з додаванням атомів алюмінію, що також називається літій-кобальт-алюміній (NCA). Ці нові матеріали вирішують деякі проблеми попередніх LCO, такі як вища енергетична щільність та нижча вартість, а також краща термічна стабільність завдяки легуванню алюмінієм. Покращення NCA призвели до їх використання в електромобілях (наприклад, електромобілі Tesla Motors).

Літій-нікель-марганець-кобальт (NMC)/літій-оксид марганцю (LMO)

Елементи нікель-марганець-кобальт (NMC) з'явилися в результаті пошуку дешевших елементів для акумуляторних батарей через високу вартість кобальту. Пропорція цих трьох матеріалів не є стандартною, і було досліджено та реалізовано кілька варіантів від 1/1/1 (що означає однакове співвідношення Ni, Mn і Co) до 5/3/2 або 4/4/1, що забезпечує різні характеристики та роботу. NMC зазвичай використовуються в стаціонарних системах та електромобілях.

Що стосується літієво-марганцевих оксидних батарей (LMO), то вони забезпечують вищі швидкості заряджання/розряджання. Головною перевагою LMO є те, що марганець дуже дешевий (приблизно в п'ять разів дешевше за кобальт). Однак їхня енергетична щільність та циклічність є низькими. Основним застосуванням цього типу хімічного складу є тягові системи.

Цікавою стратегією є поєднання NMC-LMO-елементів, що забезпечують збалансовані характеристики та вартість.

Літій-залізо-фосфат (LFP)

Кристалічна структура атомів LFP забезпечує кращу термічну стабільність порівняно з іншими хімічними складами, що робить їх найбезпечнішим варіантом на сучасному ринку. Фосфатний катод нетоксичний, тому вони є більш екологічними. Щодо експлуатаційних характеристик, LFP

пропонує відносно високу потужність та циклічність. Крім того, широкий діапазон швидкості розряджання робить їх придатними для стаціонарних застосувань і, зокрема, для електромобілів.

Негативна сторона цього хімічного складу полягає в низькій номінальній напрузі елемента, що призводить до нижчої енергетичної щільності. Ця проблема є предметом досліджень, і додавання атомів ванадію або титану, або зменшення розміру частинок до нанорозмірів, здається дуже перспективними альтернативами.

Літій-титанат (LTO)

Хоча графіт є найпоширенішим матеріалом для анодів у літій-іонних батареях, останнім часом титанат літію викликає все більший інтерес, особливо для стаціонарних застосувань. Переваги титану над графітом пов'язані з потужністю та хімічною стабільністю. Крім того, структура LTO забезпечує швидший потік іонів, що дозволяє швидше заряджати батарею.

Напруга елемента в LTO значно нижча, ніж у інших літій-іонних батареях (2–2,5 В), але все ж вища, ніж у свинцево-кислотних або нікель-кадмієвих. З усіх переваг найважливішою є безпека експлуатації LTO. Високий потенціал титанату запобігає розкладанню електроліту, що пов'язано з перегріванням та втратою ємності всередині елемента. За оцінками, LTO має найвищі показники циклічності — до 20 000 циклів і більше. Наразі обмежений обсяг виробництва зумовлює занадто високі витрати для широкомасштабного впровадження.

1.3 Характеристики та порівняння літій-іонних акумуляторів

У виробництві акумуляторів використовуються різні речовини та їх комбінації з метою поступового підвищення характеристик акумуляторів. Сьогодні літій-іонні акумулятори посіли провідні позиції на ринку для більшості застосувань, але інші технології, такі як свинцево-кислотні або розплавлені солі, все ще використовуються. Жодна з представлених тут хімічних систем не є повністю застарілою, і в кожній категорії акумуляторів

проводяться глибокі дослідження.

Далі наведено зведену таблицю основних типів вторинних акумуляторів, в якій зібрано найважливіші характеристики кожного з них щодо напруги, застосування, ефективності та терміну служби.

Дані, використані в таблиці 1.1, є орієнтовними та взяті з огляду літератури, який вже було представлено та прокоментовано попередньо. Конкретні значення цих характеристик можуть відрізнятися від однієї моделі акумуляторів до іншої та залежати від виробничого процесу, матеріалів та форм.

Таблиця 1.1 – Характеристики акумуляторів за типами

Тип	Підтип/Хімічний склад	Робоча напруга (В)	Номінальна напруга (В)	Робоча температура (°C)	Кількість циклів заряджання-розряджання	Енергетична щільність (Вт год/кг)	Щомісячний саморозряд	ККД	Максимальна швидкість розряджання
Свинцево-кислотні	Pb-H ₂ SO ₄	1,75-2,27	2	(-40,50)	1200(80% DoD, C/8)	170	2-4%	70-80%	1С ном.
Лужні	Ni-Cd	0,9-1,5	1,3	(-20,60)	800 (80% DoD, C/8)	213	10%	60-80%	10С конт.
На розплавлених солях	NaS	2,31-1,63	2,1	(-300,350)	4500 (80% DoD, 1С)	783	0%	89%	1С ном./5С пік
Літій-іонні	LCO	4,2-3,0	3,6	(-20,55)	3000 (80% DoD, C/8)	709	<5%	>92%	1С ном./30С пульс
	NMC	4,1-3	3,7	(-20,55)	2500 (100% DoD, C/2)	837	<5%	>92%	5С ном./30С пульс 35С
	LMO	4,2-3	3,37	(-20,55)	>2000 (100% DoD, 1С)	625	<5%	>92%	10С ном./40 С пульс
	LFP	3,6-2,5	3,3	(-30,55)	>3000(100% DoD, 1С)	479	<3%	>92%	35С ном./30С пульс
	LTO	2-2,5	2,4	(-40,55)	6000(90% DoD, 5С)	30-110	2-5%	98%	1С ном./25С (40А пульс)

1.4 Моделювання Li-ion акумуляторів

Моделі акумуляторів важливі для тестування, аналізу та вивчення поведінки акумуляторів у різних сценаріях та середовищах. Оскільки зазвичай важко проводити ці дослідження в режимі реального часу, оперативні та точні моделі мають вирішальне значення для правильного впровадження BMS, виявлення помилок та слабких місць систем, а також для визначення важливих параметрів, що впливають на поведінку, термін служби та безпеку акумулятора. У літературі існує безліч моделей, що відрізняються за точністю, складністю, зусиллями з параметризації та явищами, які вони відтворюють. Відповідно, вибір відповідної моделі зазвичай є компромісом між цими аспектами.

У літературі можна знайти різноманітні класифікації моделей акумуляторів. Діаз та ін. [9] виділили чотири різні групи моделей акумуляторів залежно від їхнього підходу: електрохімічні, аналітичні, стохастичні та моделі електричних кіл. Більш сучасні роботи, такі як Saidani et. al. [10] та Barcellona et. al. [11], представляють дещо інші категорії на основі конкретного фізичного аспекту, що відтворюється (електричні, фізичні, моделі старіння...), або методології, яку вони використовують (математичні, фізичні, підходи на основі кіл). На основі перехресних посилань на всі джерела, що були проаналізовані, основні моделі описано нижче.

Електрохімічні моделі.

Електрохімічні моделі, фізичні моделі або «білі коробки» базуються на рівняннях у частинних похідних (PDE) і мають на меті відтворити ефекти електрохімічних реакцій. Вони пов'язують фізичні параметри з внутрішньою електрохімічною динамікою елемента, тому досягають високої точності, але їхня складність та необхідна обчислювальна потужність також є високими. Через велику кількість параметрів їхнє застосування в середовищах динамічного моделювання є обмеженим [9].

Аналітичні та стохастичні моделі.

Аналітичні та стохастичні моделі, або «чорні ящики», базуються на

математичному підході. Вони описуються простими рівняннями, аналітичними або стохастичними функціями, і намагаються відтворити зовнішню поведінку системи, не заглиблюючись у хімію елемента [11]. Стохастичні моделі, як і електрохімічні, практично неможливо реалізувати в середовищах динамічного моделювання. Що стосується аналітичних моделей, їх можна використовувати для оцінки рівня заряду (SoC), але вони не підходять для відтворення динамічної поведінки акумулятора.

Для аналітичного підходу закон Пеукерта є однією з найпростіших і найпоширеніших моделей, що прогнозує ємність акумулятора. Іншими поширеними моделями є кінетична модель акумулятора та дифузійна модель.

Стохастичні моделі базуються на колі Маркова, що дозволяє передбачити наступний крок системи, знаючи лише її поточний стан (процес без пам'яті). Чіассеріні та Рао запропонували кілька стохастичних моделей у цьому напрямку.

Моделі еквівалентних схем.

Моделі еквівалентних схем акумуляторів були розроблені спеціально для управління потужністю електромобілів та систем управління батареями (BMS) у енергетичних системах. Вони характеризуються використанням концентричних моделей і підходять для відтворення I-V характеристик та динамічних відгуків. Ці моделі є хорошим компромісом між математичними та фізичними моделями, оскільки вони менш складні, але достатньо точні для своїх цілей [9]. Однак вони мають обмеження щодо надання інформації про електрохімію елементів, тому їх не можна використовувати для вивчення таких ефектів, як деградація або втрата ємності.

У цій категорії існує два основних типи моделей: електричні та імпедансні моделі. Ідеальна електрична модель утворена джерелом напруги, яке відтворює OCV рисунок 1.3а. Звідси модель можна вдосконалити шляхом додавання резистора, що імітує внутрішній опір батареї рисунок 1.3б, та декількох паралельних RC-блоків, які відтворюють різні динамічні характеристики батареї рисунок 1.3б. Останній варіант називається моделлю

Тевеніна у випадку однієї RC-гілки та розширеною моделлю Тевеніна для двох до n RC-гілок.

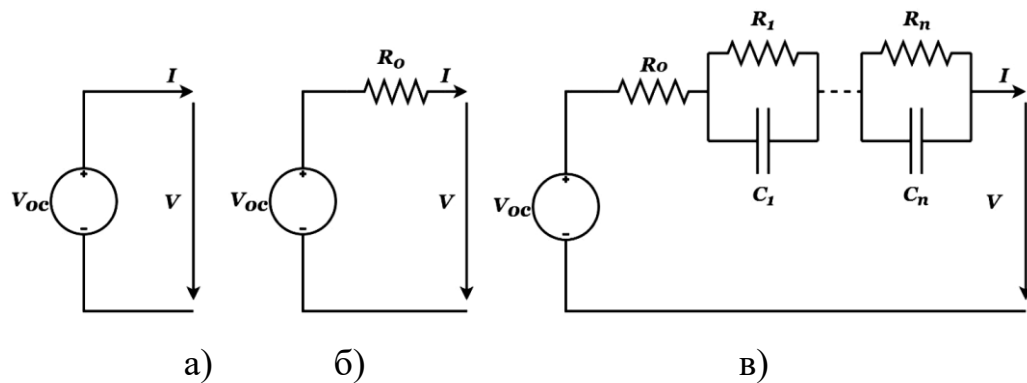


Рисунок 1.3 – Електричні моделі батарей

Відомою роботою з моделювання батарей на основі цієї топології електричних кіл є робота Плетта 2004 року [12]. У своїй роботі Плетт виходив з топології, що складається з джерела напруги, з'єднаного послідовно з опором рисунок 1.3б, і запропонував кілька зосереджених моделей, включаючи фільтри Калмана, для аналізу також ефекту гістерезису:

- Проста модель
- Комбінована модель
- Модель з нульовим станом гістерезису
- Модель з одним станом гістерезису
- Модель з розширеним самокорегуванням (ESC) (двостадійний фільтр нижніх частот)
- Модель з розширеним самокорегуванням (ESC) (чотирістадійний фільтр нижніх частот)

Моделі на основі RC-гілок також детально досліджувалися в багатьох роботах. Ну та ін. [13] провели порівняльне дослідження дванадцяти найпоширеніших схемних моделей та порівняли їх практичність за критеріями складності, точності та узагальнюваності. Настійно рекомендуємо ознайомитися з їхньою зведеною таблицею, щоб перевірити різні рівняння моделей та опис кожного методу.

1.5 Методи оцінки SoC

Рівень заряду акумулятора (SoC), який використовується для опису його залишкової ємності, є ключовим параметром для стратегії управління, правильного розподілу енергії та забезпечення безпечного використання системи шляхом запобігання випадкам перезарядження, що можуть спричинити постійні пошкодження. З цієї причини вчені та технічні фахівці галузі докладають значних зусиль для його точного визначення.

Визначення SoC не є тривіальним питанням. Найбільш фундаментальне вираження можна записати наступним чином:

(1.1)

де $Q(t)$ представляє поточну ємність, а Q_n — номінальну ємність акумулятора. Остання вказується виробником і представляє максимальний обсяг заряду, який можна накопичити в акумуляторі. І навпаки, миттєвий SoC під час реальної роботи акумулятора не можна виміряти безпосередньо. Акумулятори є складними електрохімічними системами, і на їхню роботу впливають численні змінні та ефекти, такі як сила струму, температура або історія використання (SoH). Тому цей SoC потрібно оцінювати, а отже, необхідно розробити надійні та гнучкі оцінювачі SoC.

На сьогоднішній день досліджено та застосовано багато методів, але ідеального методу не існує, як і стандартного критерію для їхньої класифікації. Придатність кожного методу залежить від застосування, бажаного рівня точності та необхідної обчислювальної потужності. Щоб зрозуміти існуючі оцінювачі та оцінити їхнє застосування, було проаналізовано кілька попередніх робіт.

Рахімі та ін. [14] дослідили різні підходи, доступні на той час для оцінки SoC, та обговорили їхні переваги та недоліки. Вони поділили методи на п'ять категорій: електрохімічний підхід, підрахунок кулонів, вимірювання напруги розімкнутого кола, фільтри Калмана та спостережувачі ковзного режиму. Електрохімічні підходи базуються на детальних електрохімічних рівняннях,

тому вони є точними, але їх важко реалізувати на місці. Підрахунок кулонів є простим у реалізації, але залежить від початкового рівня заряду (SoC), і його застосування є обмеженим. Підхід на основі вимірювання напруги розімкнутого кола (OCV) також легко реалізується, але виникає ефект релаксації, що знову обмежує його використання в режимі реального часу. Розширені фільтри Калмана та спостережувачі в режимі ковзання вирішують більшість попередніх проблем, забезпечуючи при цьому високу точність оцінок. Однак вони вимагають більш складних алгоритмів та обчислень.

У 2013 році Чанг [15] розробив класифікацію на основі методології, що використовується для оцінки SoC: прямі вимірювання, облік, адаптивні системи та гібриди. У кожній категорії він зібрав і пояснив різні методи, а також прокоментував їхні можливості. Також у 2013 році Лу та ін. розробили класифікацію методів, цього разу з огляду на алгоритми, на яких вони базуються. У цьому дослідженні переваги та недоліки кожного методу, а також його вхідні змінні зібрано в зведеній таблиці.

Щоб навести ще один приклад дослідження, яке містить порівняння методів оцінки SoC, Калавунд розробив вичерпний огляд літератури попередніх робіт і в підсумку представив нову класифікацію оцінювачів з огляду на їхню концепцію, адаптивність та продуктивність у додатках реального часу. Таким чином автори прагнули визначити аспекти існуючих методів, що потребують вдосконалення, з метою пошуку ідеального методу. За допомогою цієї новаторської класифікації методи можна охарактеризувати за типом вхідних даних (онлайн, офлайн або оцінені), моделлю SoC (таблиця довідкових значень, фізична або статистична) та типом обробки результатів (з розімкнутим або замкнутим контуром).

Наведемо кілька прикладів: простий метод оцінки SoC на основі підрахунку $A \cdot \text{год}$ використовує онлайн-вимірювані величини, які обробляються в таблиці довідкових значень або за допомогою статистичних моделей, і вони надають оцінку SoC без будь-якої подальшої обробки.

У випадку методу оцінки напруги розімкнутого кола використовується

оцінений вхідний сигнал OCV, який може бути скорельований за допомогою таблиці довідкових значень або регресійної моделі зі станом заряду, а результати можуть оброблятися у відкритому або замкнутому контурі для мінімізації похибки.

Нарешті, приклад використання штучної нейронної мережі (ANN) для оцінки стану заряду можна охарактеризувати як використання онлайн-вимірюваних змінних, статистичних регресійних моделей на основі нелінійних рівнянь та обробки результатів у замкнутому контурі.

Цей огляд існуючих методів та класифікацій для оцінки стану заряду можна використовувати як орієнтир для оцінки різних методологій та пошуку найбільш підходящого підходу залежно від конкретної ситуації кожного проекту.

1.6 Висновки до розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналітичний огляд сучасного стану проблеми ефективності роботи літій-іонних акумуляторів у режимах заряду та розряду. Основні результати проведеного дослідження такі:

1. Проведено огляд історії розвитку акумуляторних технологій від перших батарей до сучасних систем накопичення енергії. Проаналізовано базові компоненти елемента батареї: електроди, електрохімічно активні речовини, електроліт та сепаратор, а також їхні функції у процесі окисно-відновних реакцій.

2. Детально розглянуто електрохімічні процеси в літій-іонних акумуляторах.

3. Проаналізовано основні хімічні склади катодів: LCO, NCA, NMC, LMO, LFP та LTO, кожен з яких має свої переваги та обмеження. З'ясовано, що вибір хімічного складу визначається сферою застосування: LCO переважно використовується в портативній електроніці, NCA — в електромобілях (Tesla), NMC — в стаціонарних системах та електротранспорті, LFP — у системах, де

критичною є безпека, а LTO — у застосуваннях, що потребують максимальної циклічності (до 20 000 циклів).

4. Встановлено, що літій-іонні акумулятори суттєво перевершують інші технології (свинцево-кислотні, лужні, на розплавлених солях) за енергетичною щільністю (479–837 Вт·год/кг), коефіцієнтом корисної дії (>92%) та кількістю циклів заряджання-розряджання (2500–6000 циклів). При цьому вони мають низький рівень саморозряду (<5% щомісяця) та широкий діапазон робочих температур. Найвищий ККД (98%) мають LTO-елементи, але їхня енергетична щільність є значно нижчою.

5. Проаналізовано підходи до моделювання акумуляторів: електрохімічні (висока точність, але складність реалізації), аналітичні та стохастичні (прості, але обмежені в динамічному моделюванні), моделі еквівалентних схем (компроміс між точністю та складністю). Встановлено, що моделі еквівалентних схем, зокрема модель Тевеніна та її розширені варіанти з RC-гілками, є найбільш придатними для використання в системах управління батареями (BMS) та динамічного моделювання завдяки збалансованості між обчислювальною складністю та точністю відтворення I-V характеристик.

6. Проведено аналіз методів оцінки рівня заряду (SoC), який є ключовим параметром для управління енергією та забезпечення безпечної експлуатації акумуляторних систем. Розглянуто основні підходи: підрахунок кулонів, вимірювання напруги розімкнутого кола (OCV), фільтри Калмана, спостерігачі ковзного режиму та штучні нейронні мережі. Встановлено, що кожен метод має свої переваги та обмеження, а вибір оптимального підходу залежить від конкретного застосування, необхідної точності та доступних обчислювальних ресурсів. Найбільш перспективними є гібридні методи, що поєднують кілька підходів для компенсації їхніх індивідуальних недоліків.

7. Результати проведеного аналітичного огляду свідчать, що ефективність роботи літій-іонного акумулятора в режимах заряду та розряду залежить від комплексу факторів: хімічного складу електродів, температури, сили струму, глибини розряду та історії експлуатації (SoH). Для оптимізації цих процесів

необхідне застосування адекватних математичних моделей та алгоритмів оцінки SoC, що дозволяють прогнозувати поведінку акумулятора та запобігати деградаційним процесам.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Методика вивчення характеристик акумуляторів

Методика, яка використовувалася в цій роботі, представлена на рисунку 2.1. Вона поділяється на три основні частини: перша (помаранчеві блоки на рисунку 2.1) охоплює вибір моделі акумулятора на основі огляду літератури, її математичне моделювання та визначення основних параметрів.

Другий етап проекту — це експериментальна робота з Arduino (зелені блоки на рисунку 2.1). У цьому розділі будується електронна схема, підключена до платформи Arduino, для виконання декількох тестів (заряджання/розряджання). Ці експерименти надають реальні дані про досліджувану літій-іонну батарею, даючи корисну інформацію про поведінку батареї, і ці дані будуть використані в наступному розділі для запуску моделі.

Після проведення експериментальних випробувань та обробки результатів проект переходить до етапу моделювання (сині блоки на рисунку 2.1). Реалізація моделей акумуляторів та їх моделювання буде здійснюватися за допомогою Matlab та Simulink. У цій заключній частині дані випробувань використовуються для характеристики моделей, визначених у першому розділі, та для запуску оцінювача SoC. Нарешті, результати моделювання порівнюються з реальними даними.

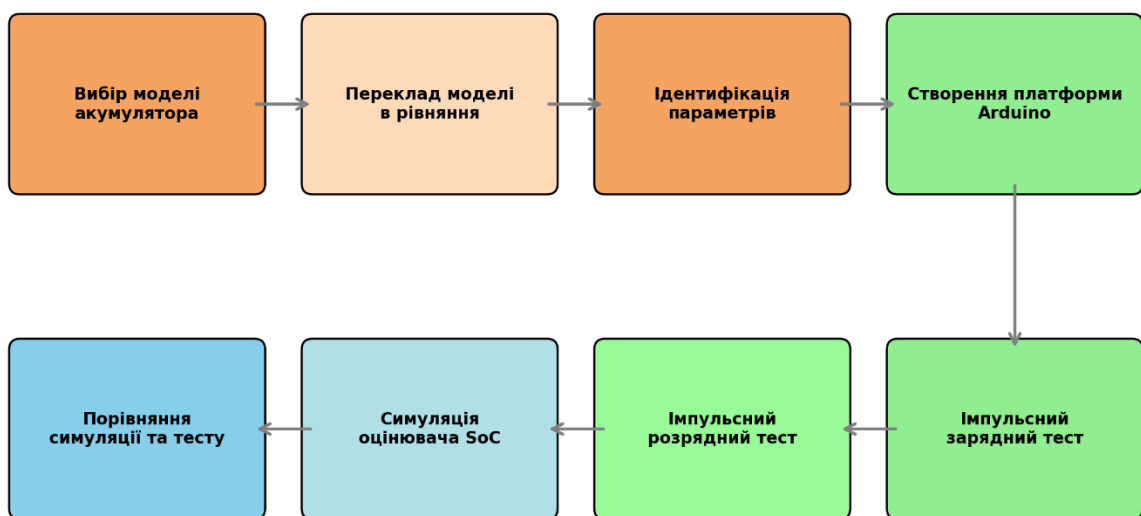


Рисунок 2.1 – Методика вивчення характеристик акумуляторів

Ця методика розроблена таким чином, щоб бути максимально відтворюваною, тобто можна використовувати різні моделі, оцінювачі SoC і навіть акумулятори, відмінні від тих, що досліджувалися в цій роботі.

У наступних розділах пояснюється кожен крок описаної тут методики та представлені результати експериментальної та імітаційної фаз.

2.2 Вибір моделі акумулятора

У цьому розділі представлено три різні моделі акумулятора: просту модель, модель з нульовим гістерезисом та комбіновану модель. Усі ці три моделі базуються на топології еквівалентної схеми, що відповідає тій, яка показана на рис. 1.3, б.

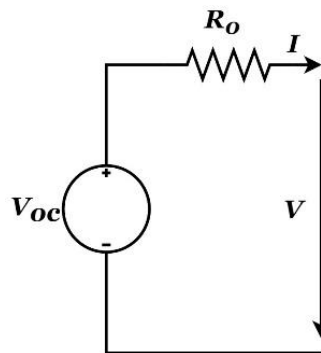


Рисунок 2.2 – Модель RV акумулятора

V_{oc} — напруга розімкнутого кола,

R_o — внутрішній опір акумулятора,

I — струм заряджання/розряджання,

V — вихідна напруга на клеммах акумулятора

Як ми визначили раніше, SoC — це відношення ємності в кожен момент часу до номінальної ємності (рівняння 1.1). Ємність елемента — це кількість ампер-годин, що зберігається в елементі. Отже, ця ємність фактично є інтегралом струму за часом у процесі заряджання або розряджання. З огляду на це та застосовуючи визначення SoC у (рівнянні 2.1), конкретний SoC можна виразити як:

$$z(t) = z(0) - \int_0^t \eta_i \frac{i(\tau)}{C_n} d\tau, \quad (2.1)$$

де $z(t)$ – SoC елемента в момент часу t ;

$i(\tau)$ – миттєвий струм елемента (додатній або від'ємний залежно від режиму роботи акумулятора);

$z(0)$ – SoC у початковому стані;

η_i – кулонівська ефективність елемента, яка дорівнює 1 у разі розрядження та менше або дорівнює одиниці під час зарядження.

У дискретизованому форматі та припускаючи період дискретизації Δt , рівняння 2.1 представлено так:

$$z_{k+1} = z_k - \left(\frac{\eta_i \Delta t}{C_n} \right) i_k. \quad (2.2)$$

Ці рівняння є спільним фактором для трьох моделей акумуляторів, що вивчаються в цьому розділі. У наступних підрозділах кожна з моделей характеризується своїм виразом для отримання напруги елемента та способом обчислення їхніх характеристичних параметрів.

У простій моделі, як і в більшості інших моделей еквівалентних схем, OCV моделюється як функція SoC. Висловлюючись математичною мовою, цю модель можна представити у вигляді:

$$y_k = OCV(z_k) - R_0 I_k, \quad (2.3)$$

де y_k , z_k та I_k — це відповідно напруга на клеммах батареї, SoC та струм.

На цьому етапі модель акумулятора характеризується рівняннями (2.2) і (2.3). Перше з них визначається як «рівняння стану», а друге — як «рівняння виходу». Ця модель є «лінійною за параметрами», тому для її впровадження в платформу та моделювання необхідно визначити характеристичні параметри. Для обчислення параметрів моделі можна легко застосувати метод офлайн-обробки:

Вектор вихідних даних можна визначити як:

$$Y = [y_1 - V_{OC}(z_1), y_2 - V_{OC}(z_2), \dots, y_N - V_{OC}(z_N)]^T. \quad (2.4)$$

А матриця H має вигляд:

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T. \quad (2.5)$$

Де рядки матриці H визначаються як:

$$h_j^T = [i_j^+, i_j^-], \quad (2.6)$$

де i_j^+ та i_j^- — струми заряджання та розряджання відповідно, що обчислюються як:

$$\begin{aligned} i_j^+ &= i_j \text{ якщо } i_j > 0 \\ i_j^- &= i_j \text{ якщо } i_j < 0 \\ \text{інакше } i_j^+ &= i_j^- = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Отже, матричне рівняння моделі можна виразити як:

$$Y = H\theta \quad (2.8)$$

де $\theta^T = [R^+, R^-]$ — вектор параметрів з невідомими елементами.

Враховуючи, що досліджувана проста модель є «лінійною за параметрами», ідентифікацію значень параметрів моделі можна легко здійснити за допомогою методу найменших квадратів (LSE), в результаті чого вектор невідомих елементів можна отримати за формулою:

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T Y. \quad (2.9)$$

Ця модель враховує ефект, який називається гістерезисом, що не враховується в простій моделі. Ефект гістерезису добре пояснено в [16]. В основному, це явище, при якому напруга відстає від очікуваного або оціненого OCV, коли змінюється напрямок струму (заряджання/розряджання).

У цій моделі ефект гістерезису вводиться у вигляді нового параметра у виразі для напруги:

$$y_k = OCV(z_k) - s_k M(z_k) - Ri_k, \quad (2.10)$$

де s_k — позначає знак струму.

За умови достатньо малого та додатного ε :

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{якщо } i_k < \varepsilon, \\ -1 & \text{якщо } i_k > \varepsilon \\ s_{k-1} & \text{якщо } |i_k| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (2.11)$$

$M(z_k)$ – це половина різниці між крайніми точками кривої заряджання-розряджання мінус втрати на внутрішній опір.

Ця модель також є «лінійною за параметрами», тому для отримання невідомих параметрів використовується метод офлайн-ідентифікації з використанням техніки LSE. Вектор виходу має вигляд:

$$Y = [y_1 - V_{OC}(z_1), y_2 - V_{OC}(z_2), \dots, y_N - V_{OC}(z_N)]^T.$$

Матриця:

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T,$$

Де рядки H визначаються як:

$$h_j^T = [i_j^+, i_j^-, s_j]. \quad (2.12)$$

І знову, $Y = H\theta$, де тепер вектор параметрів є $\theta^T = [R_0^+, R_0^-, M]$ і його можна отримати за формулою:

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T Y.$$

Комбінована модель отримала свою назву завдяки поєднанню різних способів прогнозування напруги на клеммах як функції рівня заряду (SoC), таких як «модель Шеперда», «універсальна модель Унневера» або «модель Нернста» [12]. Еквівалентна схема моделі є такою самою, як і у простій моделі (рисунок 2.2). Але в цьому випадку математичні вирази, що описують поведінку акумулятора, є іншими.

Вираз для напруги на клеммах, що залежить від внутрішнього опору R та ступеня заряду (SoC) z_k , тепер включає деякі нові константи, які покращують відповідність моделі. Ця формула має вигляд:

$$y_k = K_0 - R_0 i_k - \frac{K_1}{z_k} - K_2 z_k + K_3 \ln(z_k) + K_4 \ln(1 - z_k). \quad (2.13)$$

Невідомі параметри потім отримують за тією ж процедурою, що й раніше. Оскільки ця модель є «лінійною за параметрами», для отримання їхніх значень достатньо методу найменших квадратів (LSE). Вектор вихідних даних визначається як:

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T, \quad (2.14)$$

А матриця:

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T,$$

Де рядки H визначаються як:

$$h_j^T = \left[1, i_j^+, i_j^-, \frac{1}{z_j}, z_j, \ln(z_j), \ln(1 - z_j) \right], \quad (2.15)$$

І де i_j^+ та i_j^- відповідають тій самій логіці, що й раніше:

$$i_j^+ = i_j \text{ якщо } i_j > 0$$

$$i_j^- = i_j \text{ якщо } i_j < 0$$

$$\text{інакше } i_j^+ = i_j^- = 0$$

Отже, матричне рівняння моделі можна виразити як:

$$Y = H\theta,$$

де $\theta^T = [K_0, K_1, K_2, K_3, K_4, R_0^+, R_0^-]$ – вектор параметрів з невідомими елементами. Враховуючи, що комбінована модель також є «лінійною за параметрами», ідентифікацію значень параметрів моделі можна здійснити за допомогою методу найменших квадратів (LSE), а вектор невідомих елементів можна отримати за формулою:

$$\theta = (H^T H)^{-1} H^T Y.$$

2.3 Установка для проведення вимірювання

2.3.1 Опис конструкції

У цьому розділі реальна літій-іонна батарея тестується кількома

способами з метою отримання корисних даних та висновків щодо її поведінки. Ці тести були проведені експериментально в лабораторних умовах, при цьому використовувалися реальні електронні компоненти, інтегровані в протоплату. Конфігурація схеми буде змінюватися для кожного експерименту.

Для цього використовувалася плата Arduino для з'єднання електричної схеми та ПК. Arduino — це електронна платформа з відкритим кодом, заснована на простому у використанні апаратному та програмному забезпеченні. Це дуже дешевий і простий спосіб побудови електричних схем та отримання вихідних сигналів на основі набору вхідних даних, що керуються кодом [17-20]. Мова програмування Arduino базується на Wiring і є простою у вивченні навіть для початківців.

Загальна схема конфігурації плати Arduino, електронної схеми та ПК показана на рисунку 2.3.

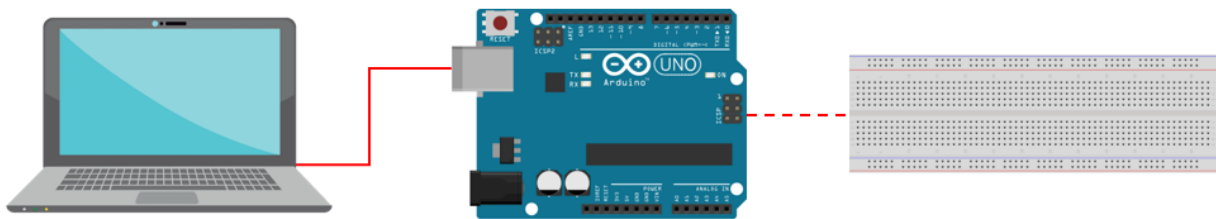


Рисунок 2.3 – Схема зв'язку Arduino з ноутбуком

Плата Arduino, яка використовується в цьому проекті, — це Arduino UNO. Це мікроконтролер, що має 14 цифрових вхідно-вихідних контактів (з яких 6 можна використовувати як PWM-виходи), 6 аналогових входів, USB-роз'єм, роз'єм живлення, роз'єм ICSP та кнопку скидання. Її можна використовувати як джерело напруги 3,3 В або 5 В.

Спочатку комерційний акумулятор, що використовується в цьому проекті, заряджається за допомогою імпульсного регулювання. Цей тест надасть інформацію про ємність елемента, швидкість заряджання та перехідні процеси зміни напруги під час заряджання. Електрична схема кола для цього експерименту представлена на рисунку 2.4.

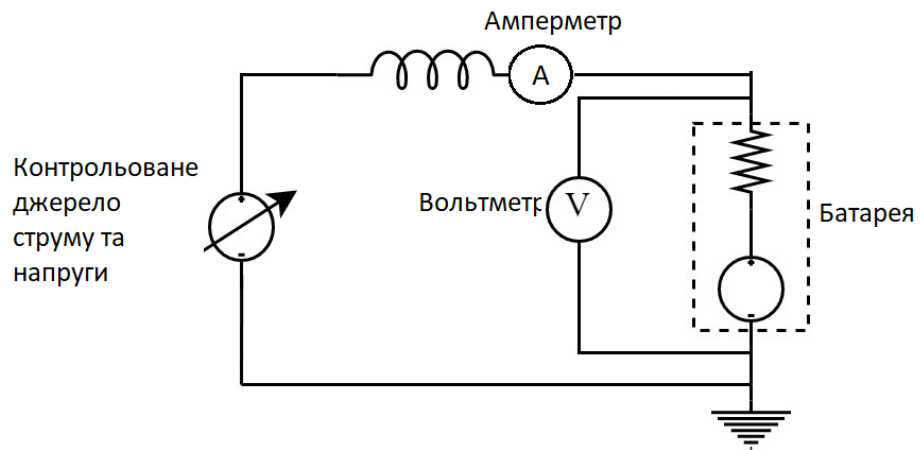


Рисунок 2.4 – Електрична схема кола заряджання

Фактична конфігурація кола представлена на рисунку 2.5.

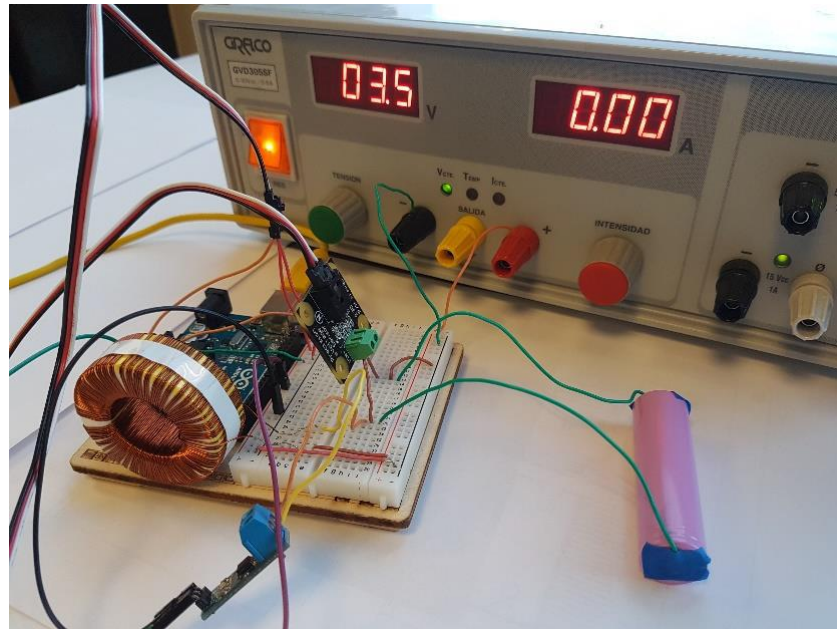


Рисунок 2.5 – Фактичне зображення платформи Arduino під час експерименту заряджання

Після повного заряджання батареї процес відбувається у зворотному напрямку, і проводиться контрольований тест розряджання. У цьому випадку електрична схема кола показана на рисунку 2.6.

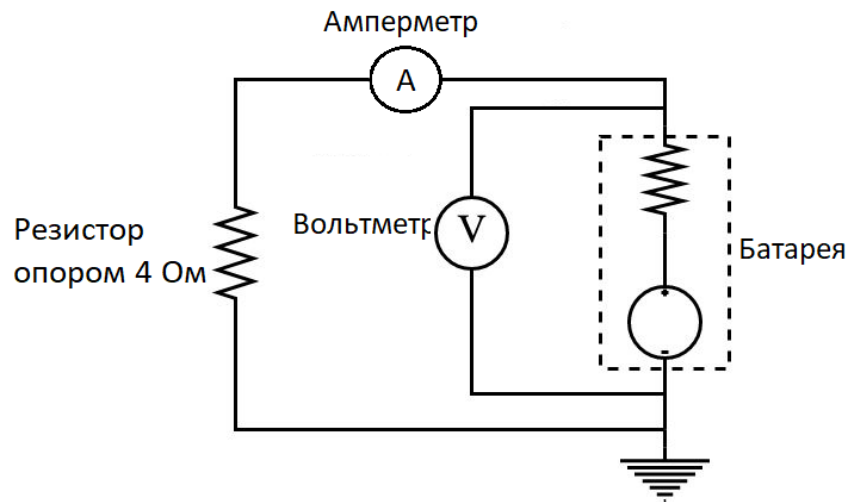


Рисунок 2.6 – Електрична схема кола розрядження

В основному, заряджений акумулятор підключається до резистора 4 Ом, який розсіює енергію, накопичену в акумуляторі, у вигляді тепла. На відміну від першого експерименту, де джерело живлення дозволяє підтримувати постійний струм під час процесу, тепер пасивний пристрій, що керує процесом розрядження, не може забезпечити постійний струм розрядження відповідно до закону Ома:

$$V = I \cdot R \quad (2.16)$$

Отже, оскільки напруга елемента постійно знижується, підключення постійного резистора призводить до зменшення струму розряду.

Результати цих випробувань нададуть корисну інформацію, як згадувалося раніше, а деякі з них дозволять отримати необхідні параметри для моделювання акумуляторних моделей.

2.3.2 Технічні характеристики

Основні пристрої, що використовуються в цій конфігурації, перелічені нижче, а їхні характеристики наведені в таблицях 2.1-2.6.

Технічні характеристики:

Плата Arduino UNO



Рисунок 2.7 – Arduino UNO

Таблиця 2.1 – Характеристики Arduino UNO

Параметр	Характеристика
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	7–12 В
Вхідна напруга (межі)	6–20 В
Цифрові виводи вводу/виводу	14 (6 PWM)
Аналогові вхідні виводи	6
Постійний струм на вивід вводу/виводу	40 мА
Постійний струм для 3,3 В виводу	50 мА
Флеш-пам'ять	32 кБ
SRAM	2 кБ
EEPROM	1 кБ
Тактова частота	16 МГц

Літій-іонний акумулятор



Рисунок 2.8 – Акумулятор ICR18650

Таблиця 2.2 – Характеристики акумулятора ICR18650

Параметр	Характеристика
Модель	ICR18650
Номінальна ємність	2600 мА·год (0,2С, 2,75 В розряд)
Напруга заряджання	4,2 ± 0,05 В
Номінальна напруга	3,7 В
Спосіб заряджання	СС-СV
Струм заряджання	Стандартний: 1300 мА Швидкий: 2600 мА
Час заряджання	Стандартний: 3 год Швидкий: 2,5 год
Макс. струм заряджання	2600 мА
Макс. струм розряджання	5200 мА
Напруга відключення розряджання	2,75 В
Початковий внутрішній опір	0,1 Ом



Рисунок 2.9 – Котушка індуктивності

Таблиця 2.3 – Характеристики котушки індуктивності

Параметр	Технічні характеристики
Модель	5724-RC
Індуктивність $\pm 15\%$ при 1 кГц	4000 мкГн
Макс. струм	1,75 А
Мінімальна індуктивність	2100 мкГн
Макс. внутрішній опір	1,16 Ом



Рисунок 2.10 -Давач напруги

Таблиця 2.4 – Характеристики давача напруги

Параметр	Технічні характеристики
Модель	Макс. різниця напруг 1135_0В
Макс. похибка вимірювання	± 30 В
Макс. час відгуку датчика	0,5 %
Макс. зміщення напруги живлення	Напруга 10 мс ± 100 мВ постійного струму
Макс. споживання струму	5 В постійного струму 3,6 мА

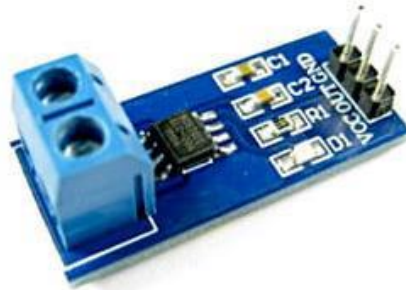


Рисунок 2.11 – Давач струму

Таблиця 2.5 – Характеристики датчика струму

Параметр	Технічні характеристики
Модель	ACS712
Діапазон вимірювання	± 5 А
Роздільна здатність	26 мА
Чутливість	185 мВ/А
Максимальне зміщення напруги живлення	2,5 В
Напруга живлення	5 В постійного струму



Рисунок 2.11 – Кероване джерело живлення

Таблиця 2.6 – Характеристики керованого джерела

Параметр	Технічні характеристики
Вихідна напруга	0–30 В постійного струму
Вихідний струм	0 – 5 А
Потужність	150 Вт

2.3.3 Результати вимірювань

Цей тест проводиться за контрольованою процедурою, де процес заряджання оцінюється за допомогою імпульсного сигналу струму з амплітудою 1 А. Імпульси налаштовані на тривалість 15 хв, а також необхідний період релаксації між імпульсами тривалістю 15 хв для стабілізації напруги на елементі. Під час фази розряджання зберігається час релаксації між імпульсами, а також тривалість імпульсу 15 хв. Однак амплітуда імпульсного струму тепер залежить від падіння напруги, спричиненого внутрішнім резистором та зовнішнім резистором, підключеним до кола. Результати випробування показано на рисунку 2.12.

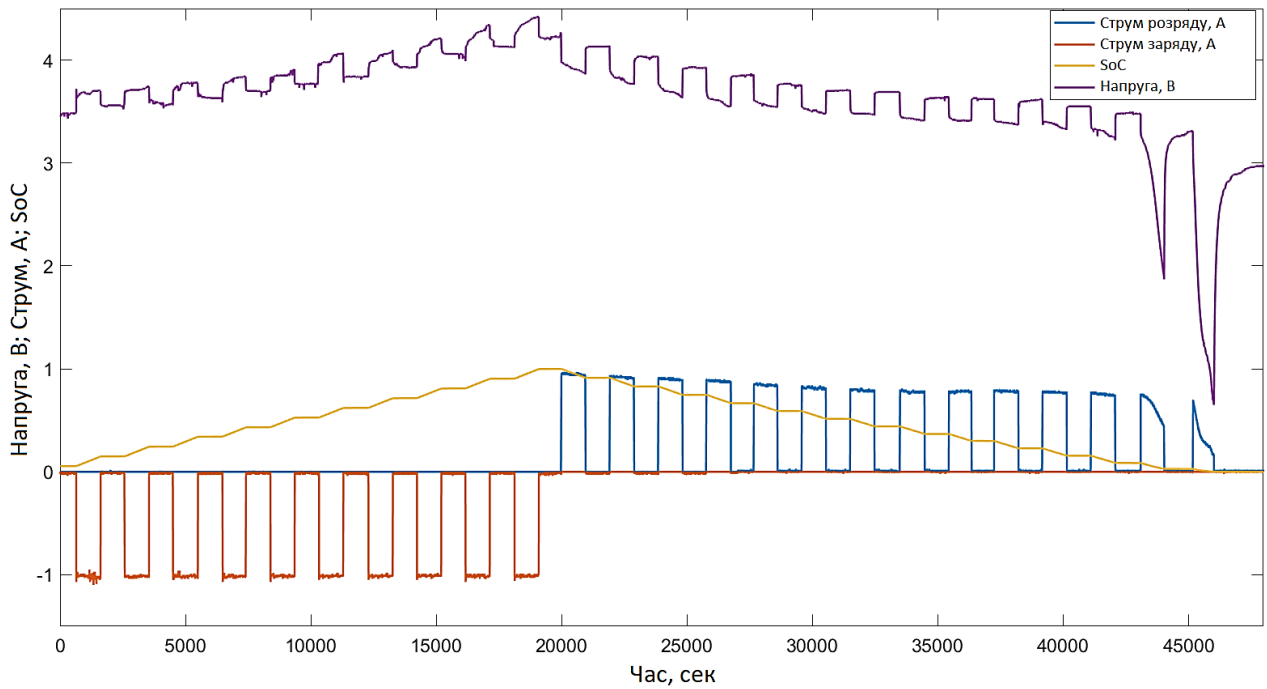


Рисунок 2.12 – Результати випробування на заряджання/розряджання

Як можна побачити на останньому рисунку, критерії знаку, прийняті для напрямку струму, є від'ємними під час заряджання акумулятора та додатними у процесі розряджання. Для збору даних про напругу та струм використовувалася плата Arduino. Результати щодо цих змінних наносяться на графік безпосередньо з показань відповідних датчиків; натомість стан заряджання отримується шляхом застосування рівняння 2.2.

Максимальна напруга, якої досягає акумулятор, перевищує 4 В, що є досить високим значенням згідно з таблицею 2.2. Такий рівень напруги елемента вказує на вищу енергетичну ємність порівняно з іншими хімічними складами акумуляторів, як зазначено в розділі 1, і пояснює, чому літій-іонні акумулятори є найпоширенішим і найпопулярнішим варіантом для електромобілів.

Якщо розглянути криву напруги більш детально, можна зробити висновок, що внутрішній опір тестованого акумулятора є низьким (середнє значення 0,1 Ом), що підтверджує значення внутрішнього опору, вказане в технічному описі продукту (див. розділ 2.3.1). Цей опір зумовлений електродами та електролітом, які намагаються протидіяти протіканню струму

всередині елемента [21-23]. Збільшивши масштаб напруги та виділивши певний імпульс (рисунок 2.13), можна легко спостерігати падіння напруги, спричинене цим опором, яке, як і очікувалося, має середнє значення 0,1 В, враховуючи імпульс 1 А та внутрішній опір 0,1 Ом (рівняння 2.9).

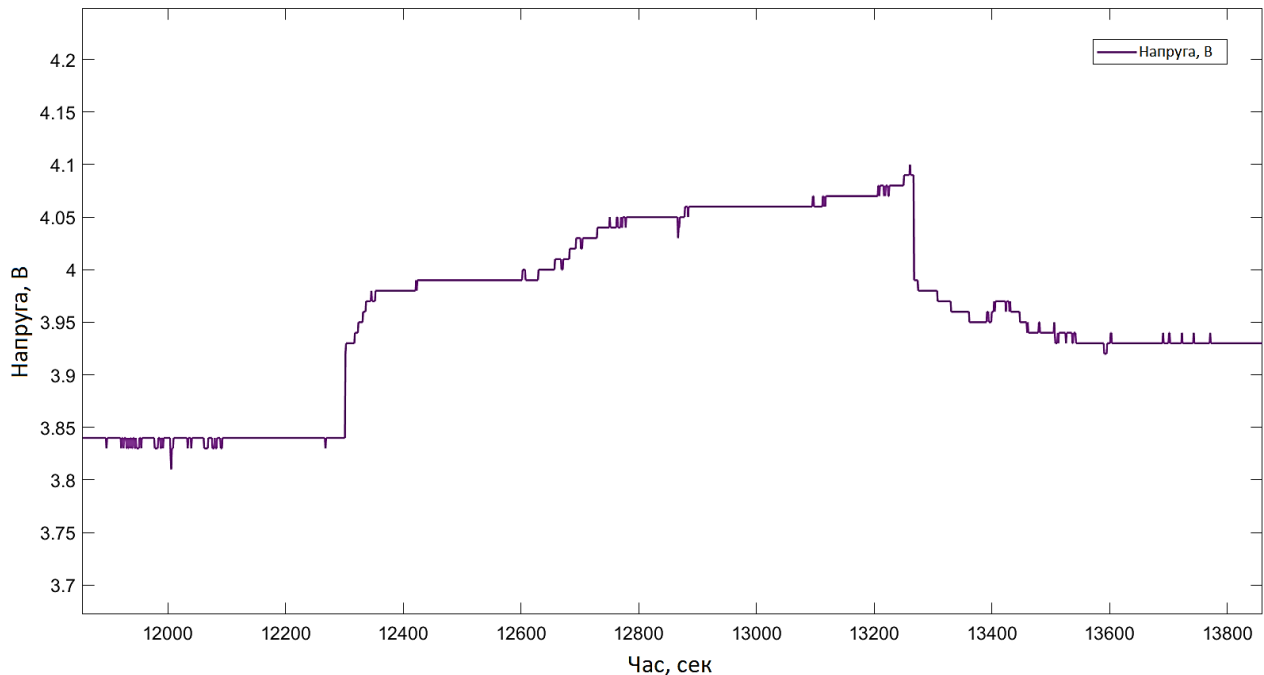


Рисунок 2.13 – Тестовий зарядний імпульс

Крім того, рисунок 2.13 доводить, чому необхідно забезпечити достатній період релаксації для стабілізації напруги та можливості зчитати й оцінити за нею стан заряду. Як можна помітити, коли імпульс закінчується (близько 13250 секунди), напруга демонструє перехідний процес до 13600 секунди, щоб чітко досягти стаціонарного стану, що означає, що батареї потрібно 5,8 хв для стабілізації.

Також помітно, що під час експерименту розрядження характер напруги раптово змінюється, коли досягає певного рівня. Коли рівень заряду становить приблизно 9 % (близько 3,5 В), напруга різко падає при подачі імпульсу. Це явище свідчить про те, що акумулятор був надмірно розряджений. Перевищення цього рівня може призвести до пошкодження внутрішньої хімічної структури елемента (він втратить ємність) і навіть до виходу пристрою

з ладу. Саме тому більшість електронних пристроїв, що використовують літій-іонні батареї, запрограмовані на вимкнення при досягненні цього рівня, щоб запобігти можливим пошкодженням.

Криву напруги розімкнутого кола (OCV) акумулятора також можна отримати в результаті тестування. Для цього необхідно зчитувати напругу під час періодів релаксації, а потім інтерполювати її за часом, щоб отримати суцільну криву. Отримана крива показана на рисунку 2.14. Спостерігаючи за зміною OCV, можна стверджувати, що вона значно коливається з часом під час процесу заряджання/розряджання. Цей факт ідеально підходить для оцінювачів SoC, що використовуються в BMS, тому можна точно визначити рівень заряду, зчитуючи напругу. У батареях з іншими хімічними складами, таких як LTO, зміна OCV у часі є плавнішою, а нахил кривої — більш пологим, тому в оцінці SoC існує більша невизначеність, і потрібні більш складні та точні моделі.

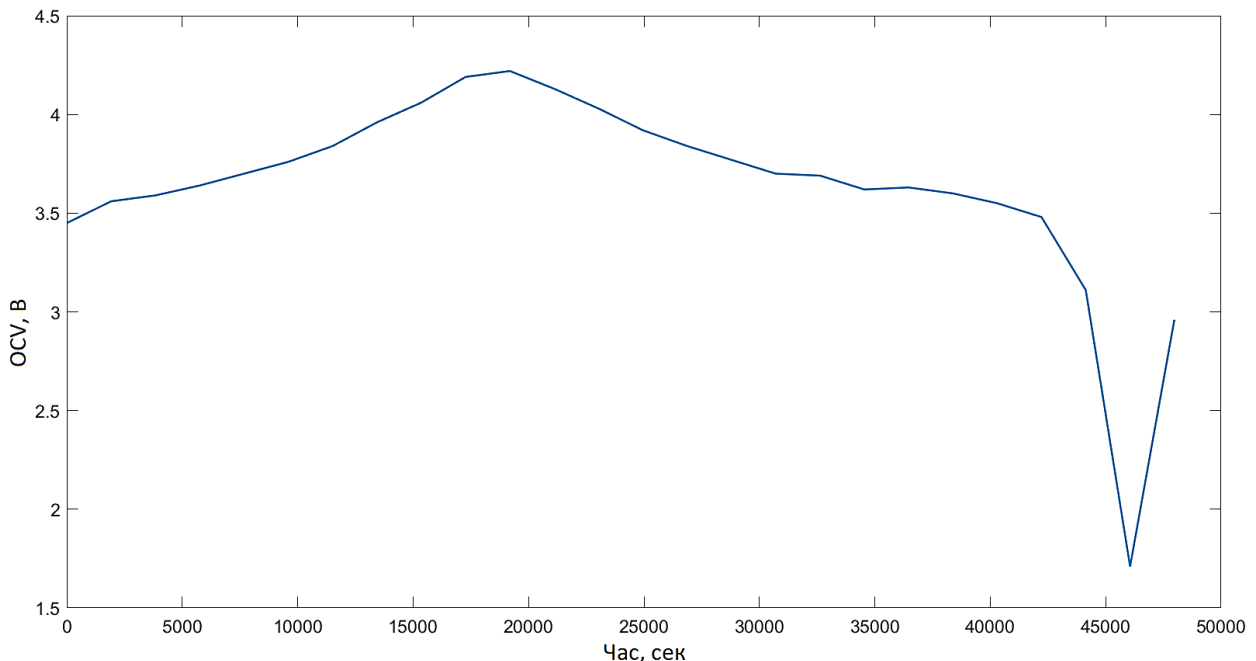


Рисунок 2.14 – OCV випробування

Нарешті, кореляція між OCV та SoC представлена на рисунку 2.15. Це головний результат експерименту, оскільки він дозволяє визначити стан заряду акумулятора за напругою елемента. Це, власне, той принцип, який BMS

використовують у своїх алгоритмах для оцінки SoC акумулятора будь-якого електронного пристрою.

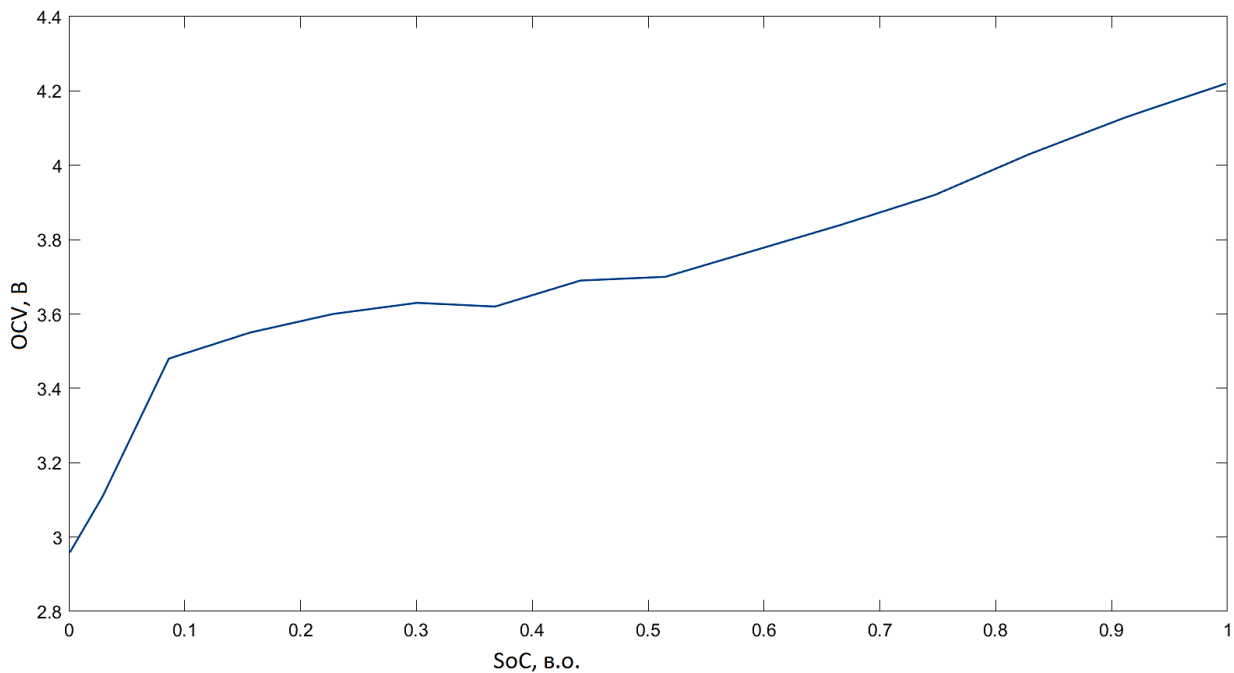


Рисунок 2.15 – Тестова крива OCV-SoC

На кривій OCV-SoC можна виділити дві різні характеристики: коли акумулятор повністю розряджений, нахил кривої різко зростає до 10% заряду. Це не що інше, як зворотна картина, вже проаналізована в попередніх результатах. У діапазоні від 0% до 10% SoC напруга на клеммах змінюється значно швидше, ніж у діапазоні від 10% до 100%.

2.4 Висновки до розділу

1. Розроблено методологію дослідження, яка складається з трьох взаємопов'язаних етапів: вибір моделі акумулятора та її математичне моделювання (помаранчеві блоки); експериментальна робота з платформою Arduino (зелені блоки); імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink (сині блоки). Запропонована методологія є відтворюваною та дозволяє

застосовувати різні моделі, оцінювачі SoC та акумулятори, відмінні від досліджуваних.

2. Проаналізовано три моделі акумулятора: просту модель, модель з нульовим гістерезисом та комбіновану модель. Усі моделі базуються на топології еквівалентної схеми RV та є «лінійними за параметрами», що дає можливість ідентифікувати їхні параметри методом найменших квадратів (LSE). Для кожної моделі отримано математичні вирази для розрахунку напруги на клеммах акумулятора та визначення характеристичних параметрів.

3. Розроблено експериментальну установку на базі плати Arduino UNO для проведення імпульсних тестів заряджання та розряджання акумулятора ICR18650. Сформовано електричні схеми кола заряджання та розряджання з використанням керованого джерела живлення, котушки індуктивності, датчиків напруги та струму. Представлено фактичну конфігурацію платформи Arduino під час експериментів.

4. Проведено імпульсне тестування з амплітудою струму 1 А, тривалістю імпульсу 15 хв та періодом релаксації 15 хв. Встановлено, що максимальна напруга акумулятора перевищує 4 В, що свідчить про високу енергетичну ємність досліджуваного елемента. Визначено середнє значення внутрішнього опору акумулятора — 0,1 Ом, що підтверджує дані технічного опису продукту.

5. Виявлено, що для стабілізації напруги після закінчення імпульсу акумулятору потрібно близько 5,8 хв. Це підтверджує необхідність забезпечення достатнього періоду релаксації для коректного визначення стану заряду за напругою розімкненого кола.

6. Встановлено критичний рівень розрядження акумулятора приблизно 9 % SoC (3,5 В), при досягненні якого напруга різко падає при подачі імпульсу струму. Перевищення цього рівня може призвести до пошкодження внутрішньої хімічної структури елемента та втрати ємності, що обґрунтовує необхідність програмного захисту в системах керування батареями (BMS).

7. Отримано експериментальну криву залежності напруги розімкнутого кола (OCV) від стану заряду (SoC), яка є ключовим результатом для подальшої розробки алгоритмів оцінювання SoC в системах BMS. Встановлено, що в діапазоні 0–10 % SoC напруга змінюється значно швидше, ніж у діапазоні 10–100 %, що потребує врахування при проектуванні оцінювачів стану заряду.

8. Зібрані експериментальні дані щодо напруги, струму та стану заряду акумулятора можуть бути використані для ідентифікації параметрів математичних моделей акумулятора та верифікації результатів імітаційного моделювання в середовищі Matlab/Simulink, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання процесів зарядки та розрядки акумулятора

Проста модель, була реалізована та змодельована з метою отримання профілю напруги в елементі під час заряджання та розряджання. Код в Matlab, створений для виконання цього моделювання. Відповідно до процедури, описаної в розділі 2.1, отримані параметри вектора θ наведено в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Результати параметрів простої моделі

Параметр	Значення
R_{charge}	0,1340 Ω
$R_{\text{discharge}}$	0,2738 Ω

Модель була реалізована в Matlab і змодельована за допомогою Simulink. Схема моделі представлена на рисунку 3.1.

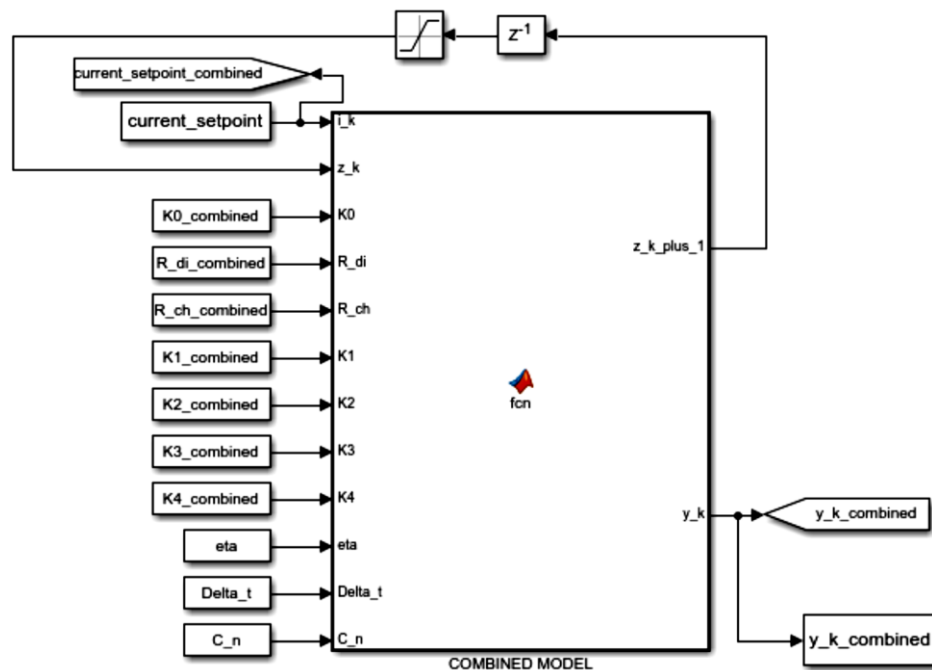


Рисунок 3.1 – Діаграма простої моделі в Simulink

Де вхідні дані функції простої моделі:

- I_k – сигнал струму з експериментального тесту.
- Z_k – SoC в останньому стані.
- R_{di} – параметр резистора під час розрядження.
- R_{ch} – параметр резистора під час заряджання.
- $Soc_ocv_lookuptable$ – вектор, що містить профіль SoC тесту.
- $Ocv_ocv_lookuptable$ – вектор, що містить профіль OCV тесту.
- Eta – кулонівська ефективність (=1 у цьому випадку).
- $Delta_t$ – крок часу моделювання.
- C_n – номінальна ємність елемента.

А вихідні дані:

- $Z_k_plus_1$ – поточний SoC.
- Y_k_simple – напруга елемента.

Використовуючи експериментальний тест як вхідний сигнал для струму та реалізуючи рівняння в моделі Simulink, результати моделювання напруги елемента за допомогою простої моделі батареї представлені на рисунку 3.2.

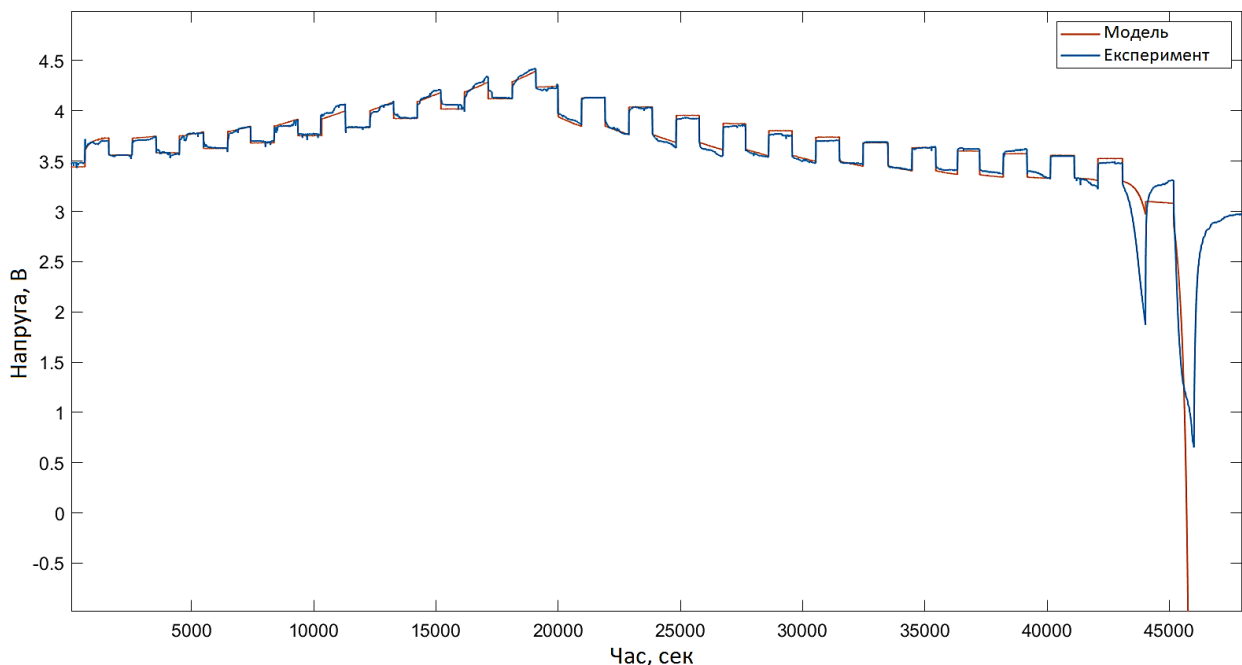


Рисунок 3.2 – Графік напруги, отриманий за допомогою простої моделі

Аналізуючи результати моделювання, можна зробити кілька перших зауважень. Порівнюючи фази заряджання та розрядження, стає очевидним, що

модель краще відповідає експериментальним даним у процесі розрядження. Проте під час двох останніх імпульсів, де напруга різко падає, модель не здатна відтворити реальну поведінку батареї.

У фазі заряджання перехідний процес у першому циклі в моделюванні відбувається повільніше, ніж у реальних даних. З цього моменту можна виділити деякі імпульси, де модель працює досить добре, з низькою похибкою між тестовою та модельованою кривими, та останні імпульси, де модель завжди залишається нижчою за реальні дані під час імпульсів та періодів релаксації.

На очевидну різницю між заряджанням та розрядженням щодо точності моделювання, ймовірно, впливає той факт, що імпульси заряджання з експерименту містять більше шуму, ніж у фазі розрядження. Поясненням цього факту є те, що датчик напруги, використаний у цьому експерименті, був настільки чутливим до будь-яких збурень або вібрацій, що різні умови навколишнього середовища явно впливали на нормальну поведінку акумулятора.

Загалом, модель виявляється достатньо точною, враховуючи рівень складності, якого вимагає її реалізація, та кількість параметрів і змінних, що враховуються.

Модель з нульовим гістерезисом також була реалізована в Matlab-Simulink відповідно до структури, визначеної в розділі 2.3. Отримані параметри вектора θ наведено в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Результати параметрів моделі з нульовим гістерезисом

Параметр	Значення
R_{charge}	0,1480 Ом
$R_{\text{discharge}}$	0,2907 Ом
M	-0,0140 В

А схема комбінованої моделі, реалізованої в Simulink, представлена на рисунку 3.3.

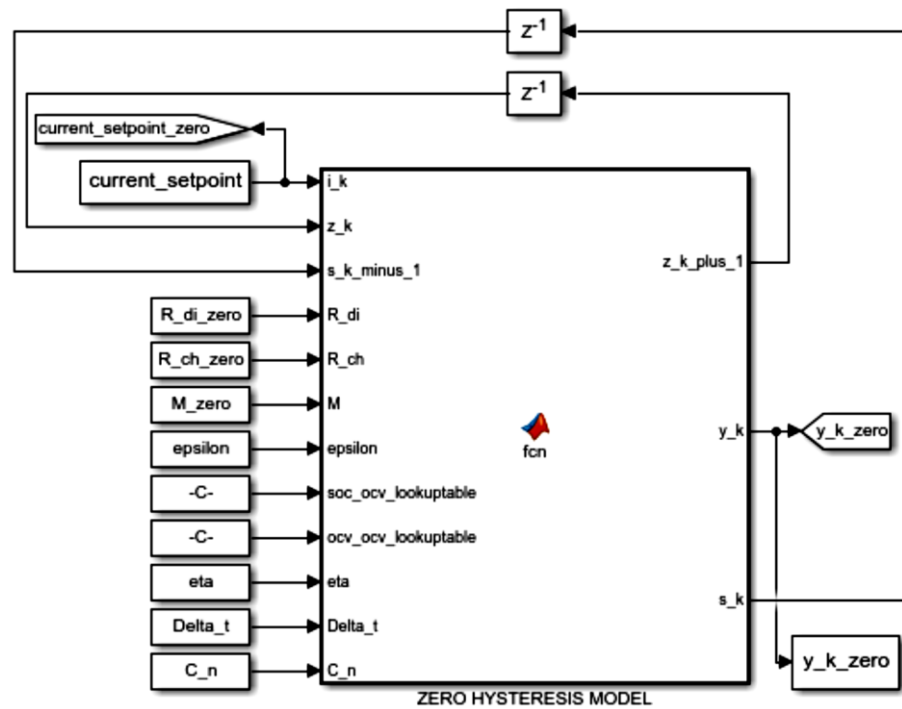


Рисунок 3.3 – Схема моделі Simulink з нульовим гістерезисом

Де вхідні дані функції простої моделі:

- I_k – сигнал струму з експериментального випробування.
- Z_k – SoC в останньому стані.
- $S_{k_minus_1}$ – попереднє значення параметра s_k (знак струму).
- R_{di} – параметр резистора під час розрядження.
- R_{ch} – параметр резистора під час зарядження.
- M – константа, що представляє рівень гістерезису.
- $Epsilon$ – додатна константа. У цьому випадку 0,1.
- $Soc_ocv_lookuptable$ – вектор, що містить профіль SoC тесту.
- $Ocv_ocv_lookuptable$ – вектор, що містить профіль OCV тесту.
- Eta – кулонівська ефективність (=1 у цьому випадку).
- $Delta_t$ – крок часу моделювання.
- C_n – номінальна ємність елемента.

А вихідні величини:

- $Z_{k_plus_1}$ – поточний SoC.
- Y_{k_zero} – напруга елемента.
- S_k – параметр, що представляє знак струму.

Використовуючи експериментальний тест як вхідний сигнал для струму та реалізуючи рівняння в моделі Simulink, результати моделювання напруги елемента за допомогою моделі батареї з нульовим гістерезисом представлені на рисунку 3.4.

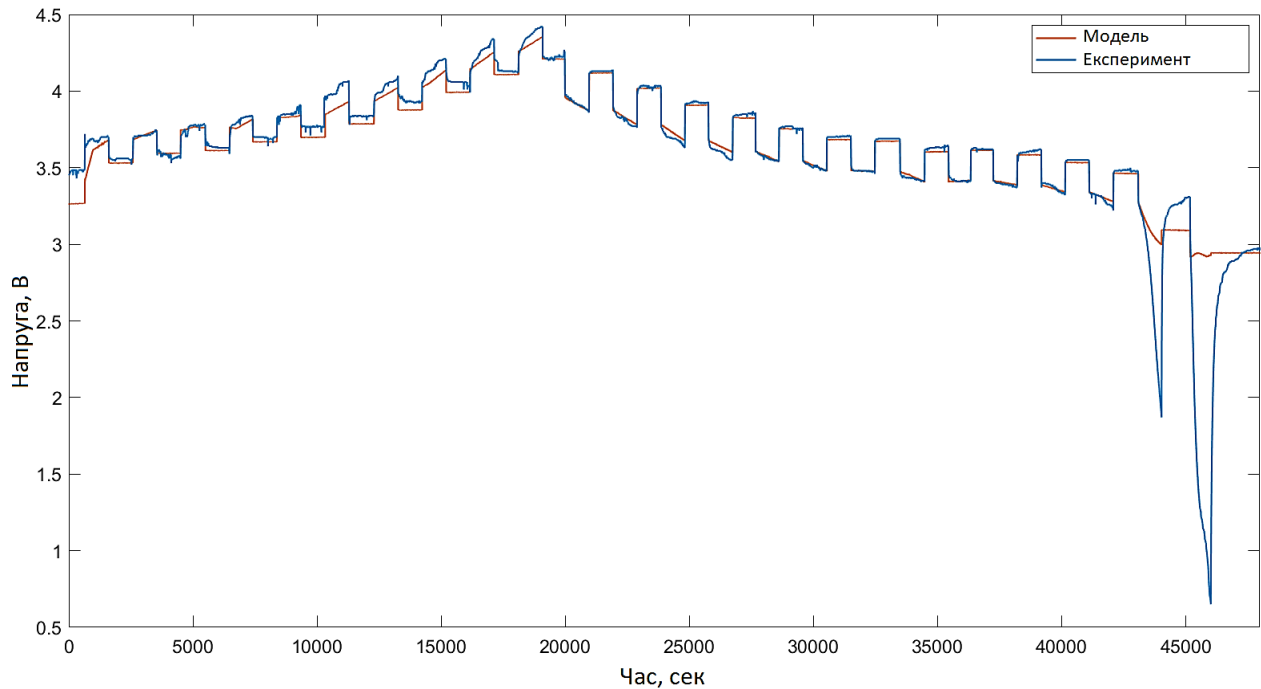


Рисунок 3.4 – Графік напруги, отриманий за допомогою моделі з нульовим гістерезисом

Ця модель дуже схожа за визначенням напруги на клеммах до простої моделі. Тут додано лише новий параметр, який покликаний відобразити ефект гістерезису. Відповідно, результат, отриманий у моделюванні, відображає майже таку саму картину та рівень точності, як і проста модель.

Як можна спостерігати на рисунку 3.4, модельована напруга залишається нижчою за реальну під час імпульсів у процесі заряджання. Під час розряджання значення модельованої напруги також не досягає реального. У першому імпульсі тесту моделювання дає повільну перехідну реакцію, яка починає краще відповідати наступним імпульсам. Починаючи з п'ятого імпульсу, помітно, що експериментальні дані не такі чіткі, і, відповідно, модель не може добре відтворити поведінку акумулятора. У випадку останніх двох імпульсів, коли напруга акумулятора нестабільна, моделювання дає більш

плавну реакцію, що відповідає характеру решти експерименту.

Дотримуючись тієї ж процедури, тепер комбінована модель реалізована в Matlab-Simulink відповідно до структури, визначеної в 2.2. Тут отримані параметри вектора θ наведено в таблиці 3.3:

Таблиця 3.3 – Значення параметрів комбінованої моделі

Параметр	Значення
K_0	2,7354 В
K_1	0,0363 В
K_2	-1,5167 В
K_3	-0,4413 В
K_4	-0,0029 В
R_{charge}	0,1662 Ом
$R_{discharge}$	0,3016 Ом

Схема комбінованої моделі, реалізованої в Simulink, представлена на рисунку 3.5.

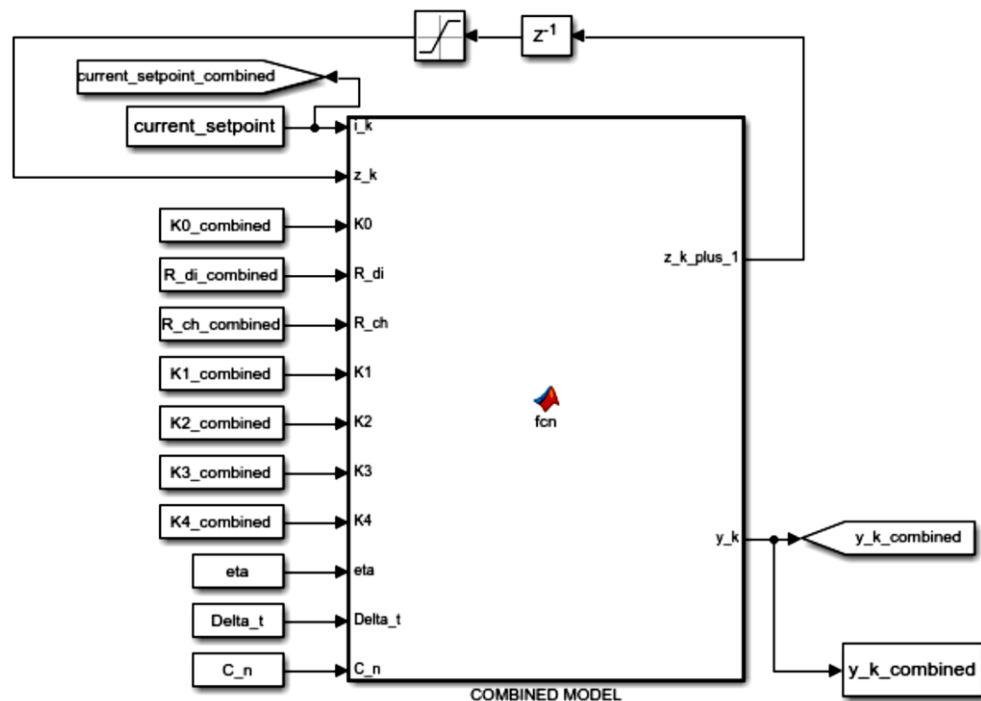


Рисунок 3.5 – Діаграма комбінованої моделі в Simulink

Де вхідні дані функції комбінованої моделі:

- I_k – сигнал струму з експериментального випробування.

- Z_k – стан заряду (SoC) в останньому стані.
- $K0_combined$ – параметр K0 моделі.
- R_di – параметр резистора під час розрядження.
- R_ch – параметр резистора під час заряджання.
- $K1_combined$ – параметр K1 моделі.
- $K2_combined$ – параметр K2 моделі.
- $K3_combined$ – параметр K3 моделі.
- $K4_combined$ – параметр K4 моделі.
- η – кулонівський ККД (=1 у цьому випадку).
- Δt – крок часу моделювання.
- C_n – номінальна ємність елемента.

А вихідні величини:

- $Z_k_plus_1$ – поточний рівень заряду (SoC).
- Y_k_simple – напруга елемента.

Використовуючи експериментальні дані як вхідні для сигналу струму та реалізуючи рівняння в моделі Simulink, результати моделювання напруги елемента за допомогою комбінованої моделі акумулятора представлені на рисунку 3.6.

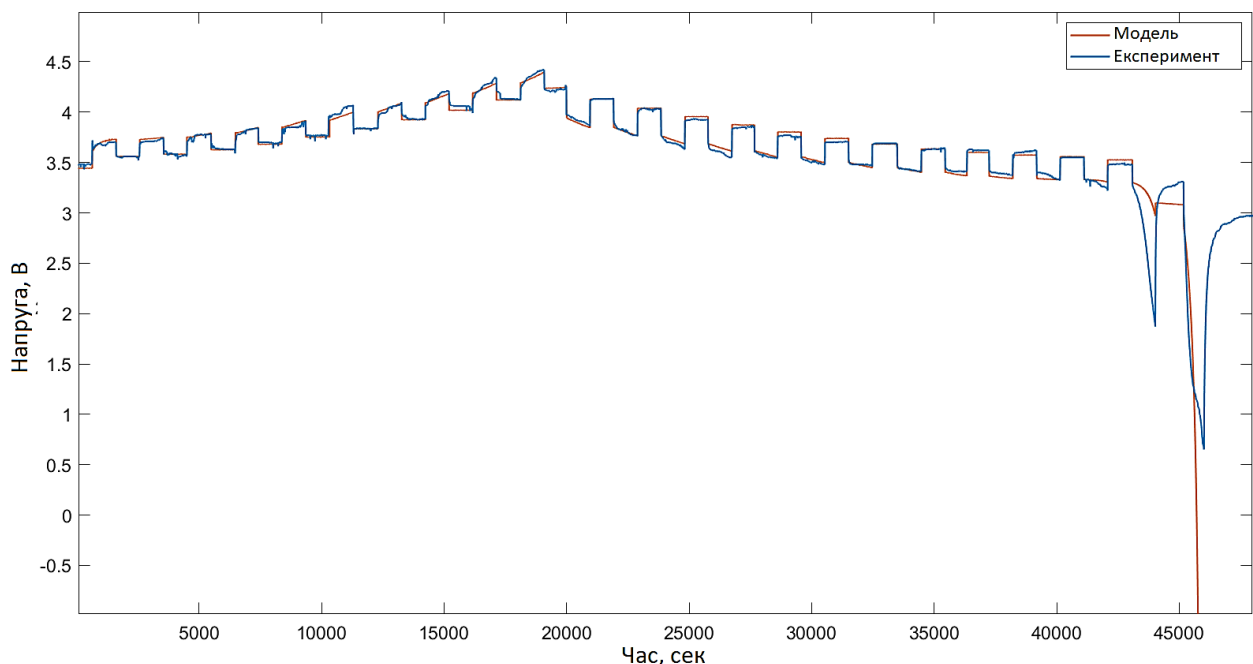


Рисунок 3.6 – Графік напруги, отриманий за допомогою комбінованої моделі

Аналізуючи результати комбінованої моделі, можна помітити, що вона краще відтворює експериментальні дані, ніж проста модель або модель з нульовою гістерезисом. У першому імпульсі експерименту значний розрив між моделюванням та вихідними даними в першій моделі тепер усунуто.

З іншого боку, останні імпульси експерименту під час фази розрядження демонструють інший результат. На рисунку 3.6 чітко видно, що комбінована модель не здатна відтворити поведінку акумулятора, коли рівень заряду (SoC) дуже низький. Щоб краще зрозуміти це явище, на рисунку 3.7 представлено збільшене зображення останнього імпульсу.

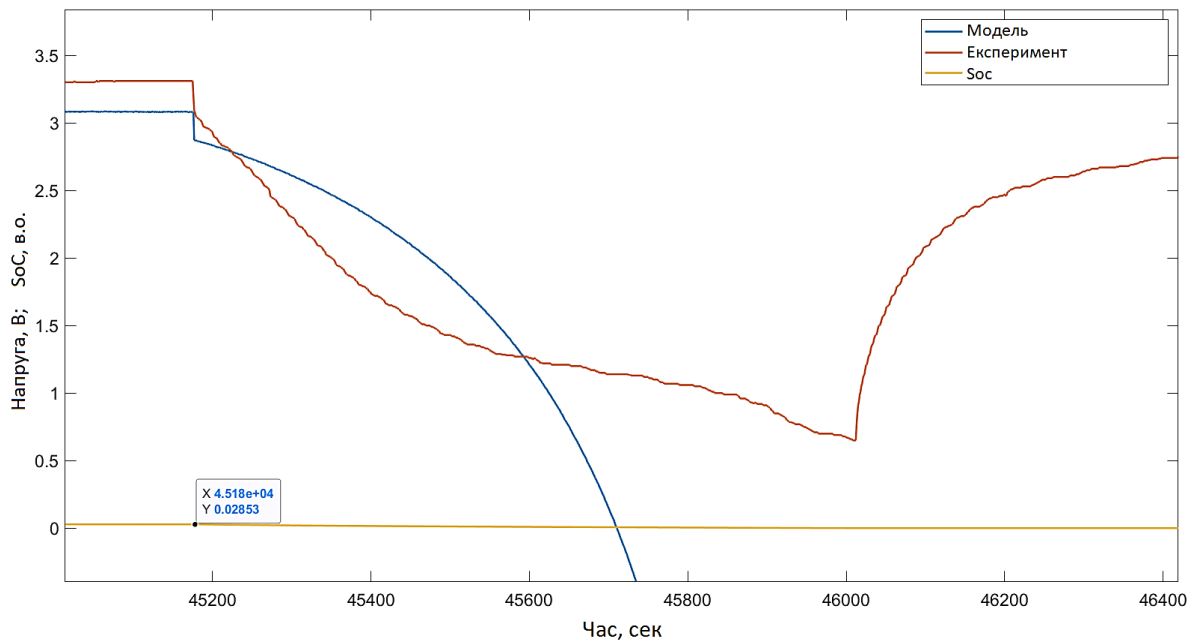


Рисунок 3.7 – Імпульс розрядження за результатами моделювання комбінованої моделі

Коли рівень заряду (SoC) нижчий за 2,85%, модельована напруга різко падає, не встигаючи за даними випробування. Якщо проаналізувати отримані значення параметрів моделювання та внесок кожного члена рівняння 17 у напругу на клеммах, можна визначити, що єдиними членами, які вводять від’ємну напругу, є $-R_0 j_k$ та $-\frac{K_1}{z_k}$. Перший член є функцією струму розрядження, який у цій частині експерименту є низьким (близько 0,6 А), тому його вплив є відносно невеликим. Навпаки, другий член (третій у рівнянні 2.13)

визначає результат моделі, оскільки він має SoC (z_k у знаменнику), тому цей член зростає, щойно SoC зменшується.

Результати моделювання можуть бути використані при проектуванні енергетичних систем [24-27]

3.2 Валідація та порівняння моделей

У цьому розділі розглядається порівняльний аналіз результатів трьох моделей акумуляторів. Останні два імпульси були виключені з аналізу похибок, оскільки рівень SoC є небажаним, а комбінована модель не здатна його відтворити, що призводить до виходу абсолютної та відносної похибок за межі шкали і, як наслідок, робить порівняння між моделями несправедливим.

Перш за все, три змодельовані напруги були представлені разом на рисунку 3.8, а також виміряна під час випробування напруга, щоб краще провести перше візуальне порівняння між ними.

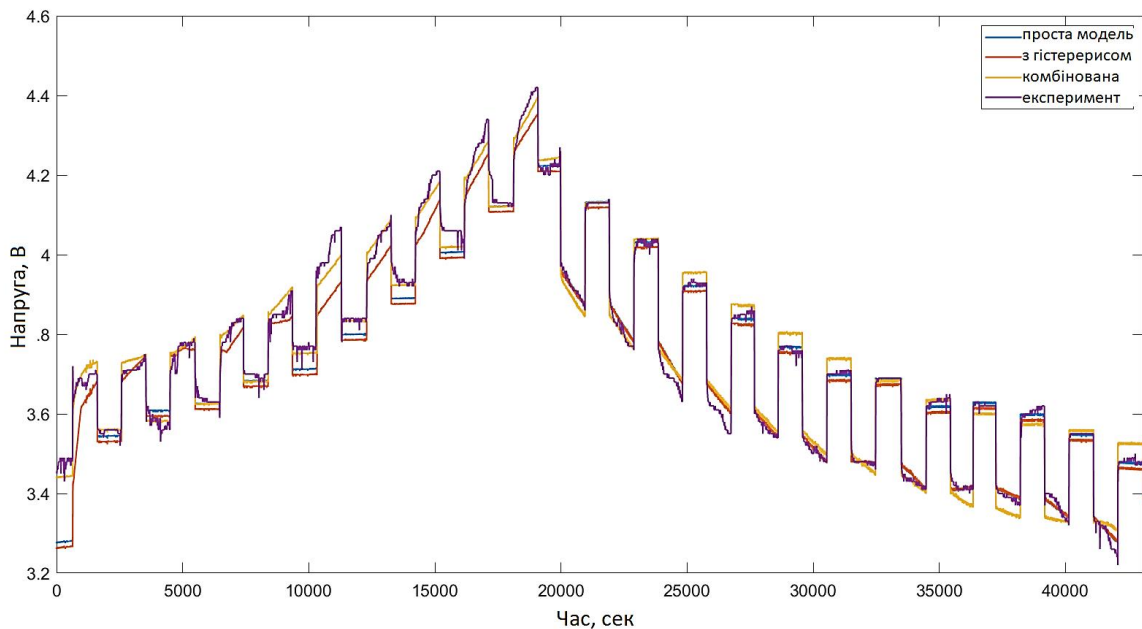


Рисунок 3.8 – Порівняння виміряного графіку напруги та модельованих кривих напруги

Аналізуючи рисунок 3.8, комбінована модель є тією, яка краще відтворює перший імпульс експерименту, тоді як інші дві моделі демонструють

повільнішу реакцію та похибку 0,2 В порівняно з тестом. Далі, протягом періоду заряджання, комбінована модель знову є найближчою до даних експерименту. Однак під час періоду розряджання здається, що прості моделі та моделі з нульовою гістерезисом відтворюють тест точніше, ніж комбінована модель.

Щоб порівняти результати кінцевої напруги акумулятора, тепер обчислюється ККД як для даних експерименту, так і для моделей. ККД акумулятора — це нетривіальне поняття, і в літературі існують різні вирази для його оцінки. Тут обчислюється «енергетична ефективність», яка визначається за формулою:

$$\eta_i = \frac{E_{i, \text{розряд}}}{E_{i, \text{заряд}}} = \frac{\int V_{i, \text{розряд}} \cdot I_{\text{розряд}}}{\int V_{i, \text{заряд}} \cdot I_{\text{заряд}}} \quad (3.1)$$

де i позначає конкретний випадок (випробування, проста модель, модель з нульовою гістерезисом, комбінована модель).

Результати застосування рівняння 3.1 до експерименту та моделей наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Ефективність різних випадків дослідження

Випадок дослідження	Ефективність %
Експеримент	89,836
Проста модель	91,279
Модель з нульовим гістерезисом	91,278
Комбінована модель	89,989

Ефективність, отримана в результаті тесту, становить 89,8 %. Це значення є досить близьким до ефективності звичайних літій-іонних акумуляторів, як показано в таблиці 1.1. Аналізуючи ефективність за результатами моделювання, підтверджується, що комбінована модель є найближчою до реальних даних (89,9 %), а прості моделі та моделі з нульовою гістерезисом дають практично однаковий результат.

По-друге, рисунок 3.9 ілюструє різницю між даними напруги з

випробування та модельованою напругою різних моделей, іншими словами:

$$\text{крива похибки}_{modeli} = \text{напруга}_{test} - \text{напруга}_{modeli} \quad (3.2)$$

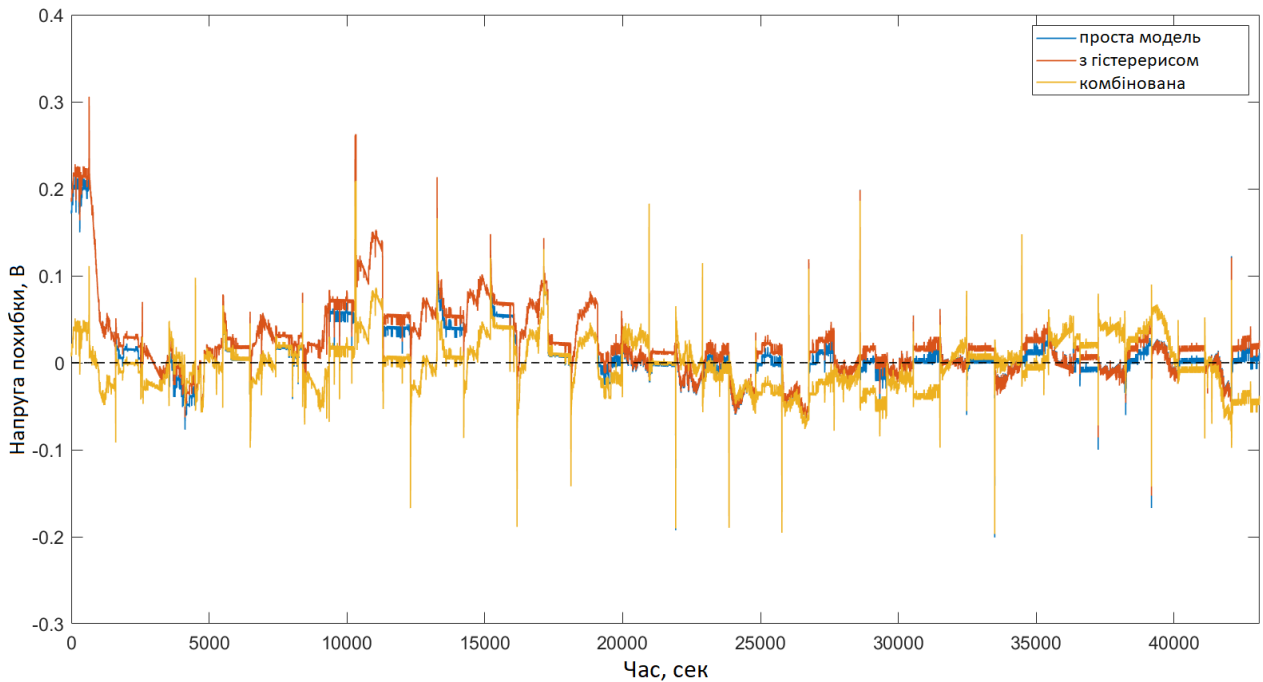


Рисунок 3.9 - Модельовані криві похибок

На останньому рисунку можна визначити, де моделі краще відтворюють дані випробування, а де — ні. Перше спостереження щодо цих графіків стосується регулярних піків похибки близько 0,10–0,20 В протягом усього випробування. Ці піки відповідають існуючій затримці між початком імпульсу та реакцією моделі. Щоб краще відобразити цей факт, на рисунку 3.10 було виділено певний імпульс. Розбіжність між випробуванням та моделюванням на рисунку позначено тінювим зафарбуванням.

Спостереження за результатами підтверджує, що проста модель та модель з нульовою гістерезисом дають дуже схожу криву напруги і що ці дві моделі поведуться протилежно до комбінованої моделі: коли комбінована модель демонструє низьку похибку щодо експерименту, інші дві моделі демонструють значну похибку; коли комбінована модель далека від тестових даних, прості та моделі з нульовою гістерезисом є точнішими.

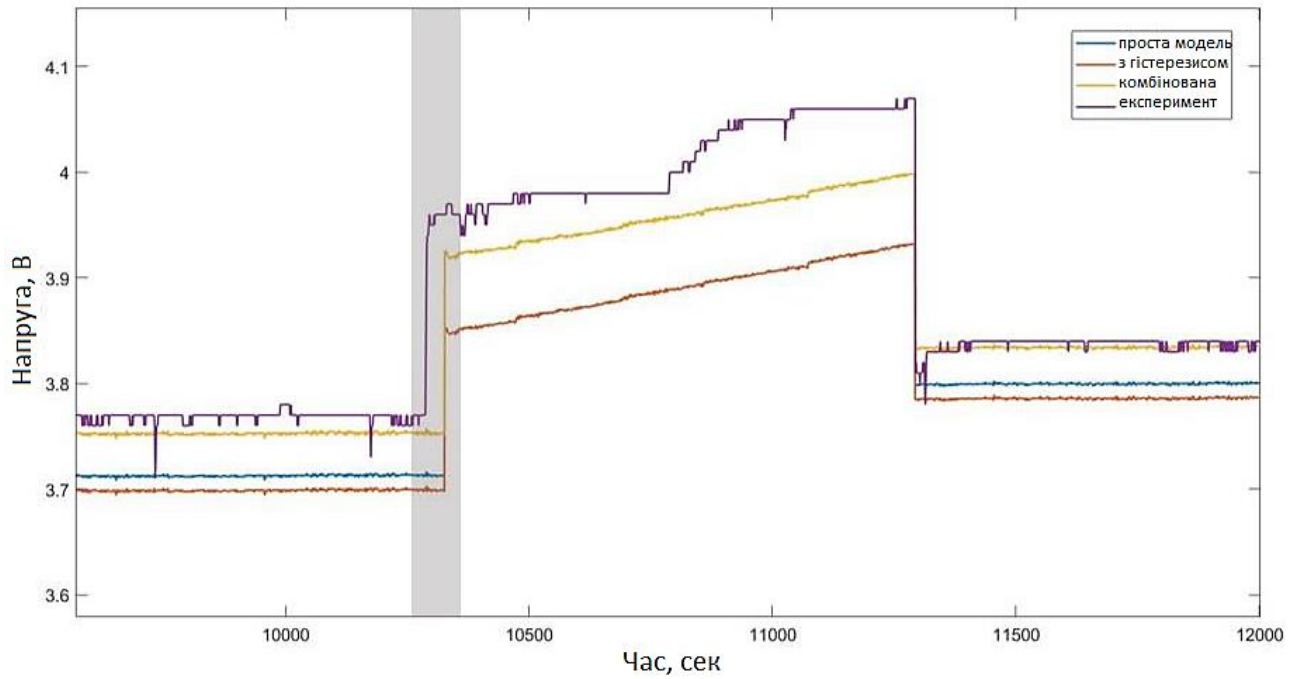


Рисунок 3.10 – Модельований імпульс заряджання

Для чисельної оцінки точності моделей обчислюється середньоквадратична похибка (RMSE) отриманої модельованої напруги. RMSE дає усереднену похибку з тим самим масштабом даних, тобто у вольтах, а квадратний корінь згладжує піки похибки, спричинені шумом у вимірюванні. Вираз для RMSE має вигляд:

$$RMSE_{model_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (voltage_{test_j} - voltage_{model_{ij}})^2} \quad (3.3)$$

де N — кількість вимірних даних. Результати наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Середньоквадратична похибка моделей, що моделюються

Модель	Середньоквадратична похибка
Проста	0,2150 В
з гістерезисом	0,2228 В
Комбінована	0,1879 В

Ще раз підтверджується, що комбінована модель має найнижчу середню похибку щодо експерименту, а саме 0,1879 В. Після неї проста модель демонструє середню похибку 0,2150 В, що дуже близько до похибки моделі з нульовою гістерезисом, яка становить 0,2228 В.

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи проведено моделювання процесів зарядки та розрядки Li-ion акумулятора в середовищі Matlab/Simulink, а також виконано валідацію та порівняльний аналіз трьох математичних моделей акумулятора.

1. Реалізовано просту модель акумулятора в середовищі Simulink. Ідентифіковано параметри моделі методом найменших квадратів: опір заряджання $R_{\text{charge}} = 0,1340$ Ом, опір розряджання $R_{\text{discharge}} = 0,2738$ Ом. Встановлено, що проста модель достатньо точно відтворює експериментальні дані під час розряджання, однак має обмежену точність у фазі заряджання через вплив шумів вимірювання та неврахування нелінійних ефектів. У зоні глибокого розряду (останні імпульси) модель не здатна відтворити різке падіння напруги, що свідчить про її обмежену придатність для роботи в критичних режимах.

2. Реалізовано модель з нульовим гістерезисом, яка враховує ефект гістерезису напруги при зміні напрямку струму. Ідентифіковано параметри: $R_{\text{charge}} = 0,1480$ Ом, $R_{\text{discharge}} = 0,2907$ Ом, константа гістерезису $M = -0,0140$ В. Встановлено, що врахування гістерезису не дає суттєвого покращення точності порівняно з простою моделлю, оскільки отримані результати моделювання демонструють майже ідентичну криву напруги та рівень похибки. Це пояснюється тим, що в досліджуваному режимі імпульсного тестування вплив гістерезису є незначним порівняно з іншими факторами.

3. Реалізовано комбіновану модель, яка поєднує переваги моделі Шеперда, універсальної моделі Унневера та моделі Нернста. Ідентифіковано

параметри: $K_0 = 2,7354 \text{ В}$, $K_1 = 0,0363 \text{ В}$, $K_2 = -1,5167 \text{ В}$, $K_3 = -0,4413 \text{ В}$, $K_4 = -0,0029 \text{ В}$, $R_{\text{charge}} = 0,1662 \text{ Ом}$, $R_{\text{discharge}} = 0,3016 \text{ Ом}$. Встановлено, що комбінована модель найкраще відтворює перехідні процеси в першому імпульсі експерименту та має найнижчу середньоквадратичну похибку ($\text{RMSE} = 0,1879 \text{ В}$) порівняно з простою моделлю ($\text{RMSE} = 0,2150 \text{ В}$) та моделлю з гістерезисом ($\text{RMSE} = 0,2228 \text{ В}$).

4. Проведено порівняльний аналіз ефективності трьох моделей. Визначено, що ефективність експерименту становить $89,836 \%$, тоді як комбінована модель дає найближче до реальності значення — $89,989 \%$. Прості моделі та моделі з нульовим гістерезисом демонструють завищену ефективність ($91,279 \%$ та $91,278 \%$ відповідно), що свідчить про їхню обмежену адекватність при оцінці енергетичних показників.

5. Проаналізовано криві похибок моделей та виявлено систематичну затримку реакції моделей на початку кожного імпульсу ($0,10\text{--}0,20 \text{ В}$), зумовлену інерційністю математичних моделей порівняно з реальним акумулятором. Встановлено, що прості моделі та модель з гістерезисом поведуться протилежно до комбінованої моделі: коли комбінована модель має низьку похибку, інші дві моделі демонструють значну похибку, і навпаки. Це свідчить про різну природу наближень, що використовуються в цих моделях.

6. Виявлено обмеження комбінованої моделі в зоні глибокого розряду ($\text{SoC} < 2,85 \%$): модельована напруга різко падає, не встигаючи за експериментальними даними. Проведено аналіз причин цього явища та встановлено, що домінуючий вплив має член рівняння зі ступенем заряду в знаменнику (K_3/z_k), який зростає при наближенні до повного розряду. Це обмеження необхідно враховувати при проектуванні систем керування батареями (BMS) для запобігання некоректним прогнозам в критичних режимах роботи.

7. Загалом, за результатами комплексного порівняльного аналізу комбінована модель визнана найбільш точною та адекватною для моделювання роботи Li-ion акумулятора ICR18650 в режимах заряду та розряду.

Рекомендовано її використання для подальшої розробки оцінювачів стану заряду (SoC) в системах BMS, з урахуванням необхідності корекції в зоні глибокого розряду. Отримані результати моделювання та ідентифіковані параметри моделей можуть бути використані як базові дані для проектування систем моніторингу та діагностики акумуляторних батарей електромобілів.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [28]: 1) зі зняттям напруги; 2) без зняття напруги на струмовідних частинах і поблизу них; 3) без зняття напруги не на струмовідних частинах, що знаходяться під напругою.

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:

- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;

- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;

- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізолюваний стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;

- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;

- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

4.2 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними

працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самодопомога) [28]. Найважливіше положення надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона надана, тим більше сподівань на сприятливий наслідок.

Послідовність надання першої допомоги:

— усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;

— визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;

— виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);

— підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;

— викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напруженою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або; будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірьовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою або перекусити їх інструментом з ізольованими ручками. Перерубувати або перекушувати проводи слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. Після звільнення потерпілого від дії електричного струму необхідно оцінити його стан. У всіх

випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та стійке дихання і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15—20 краплин настоянки валеріани і гарячого чаю.

Ні в якому разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не намацується пульсу необхідно відразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрожувати небезпека або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Якщо потерпілий знаходиться на висоті, необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі і на опорі.

Опустивши потерпілого на землю, необхідно відразу розпочати проведення штучного дихання та масажу серця і робити це до появи

самостійного дихання і відновлення діяльності серця або передачі потерпілого медичному персоналу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного аналітичного огляду встановлено, що літій-іонні акумулятори суттєво перевершують інші технології накопичення енергії (свинцево-кислотні, лужні, на розплавлених солях) за енергетичною щільністю (479–837 Вт·год/кг), коефіцієнтом корисної дії (>92 %) та кількістю циклів заряджання-розряджання (2500–6000 циклів).

2. Розроблено методику вивчення характеристик акумуляторів, яка об'єднує три взаємопов'язані етапи: вибір та математичне моделювання моделі акумулятора; експериментальна робота з платформою Arduino; імітаційне моделювання в середовищі Matlab/Simulink.

3. Проаналізовано та математично описано три моделі акумулятора на основі топології еквівалентної схеми: просту модель, модель з нульовим гістерезисом та комбіновану модель. Усі моделі є «лінійними за параметрами», що дає можливість ідентифікувати їхні параметри методом найменших квадратів. Для кожної моделі отримано рівняння стану та виходу, а також матричні рівняння для обчислення вектора невідомих параметрів.

4. Розроблено та реалізовано експериментальну установку на базі плати Arduino UNO для проведення тестів заряджання та розряджання акумулятора ICR18650. Проведено імпульсне тестування з амплітудою струму 1 А, тривалістю імпульсу 15 хв та періодом релаксації 15 хв. Встановлено, що максимальна напруга акумулятора перевищує 4 В, середнє значення внутрішнього опору становить 0,1 Ом, а для стабілізації напруги після імпульсу потрібно близько 5,8 хв. Визначено критичний рівень розрядження приблизно 9 % SoC (3,5 В), перевищення якого може призвести до пошкодження внутрішньої хімічної структури елемента.

5. Отримано експериментальну криву залежності напруги розімкнутого кола (OCV) від стану заряду (SoC), яка є ключовим результатом для розробки алгоритмів оцінювання SoC в системах BMS. Встановлено, що в діапазоні 0–10

% SoC напруга змінюється значно швидше, ніж у діапазоні 10–100 %, що потребує врахування при проектуванні оцінювачів стану заряду.

6. Реалізовано три моделі акумулятора в середовищі Matlab/Simulink та ідентифіковано їхні параметри. Проведено порівняльний аналіз точності моделей за середньоквадратичною похибкою (RMSE) та ективністю. Встановлено, що комбінована модель має найнижчу похибку (RMSE = 0,188 В) та найближчу до експерименту ефективність (89,9 %), тоді як прості моделі демонструють завищену ефективність (91,3 %). Виявлено обмеження комбінованої моделі в зоні глибокого розряду (SoC < 2,85 %), зумовлене особливостями математичного опису.

7. Встановлено, що ефективність досліджуваного акумулятора ICR18650 в режимі імпульсного заряджання-розряджання становить 89,8 %, що відповідає характеристикам типових літій-іонних акумуляторів. Комбінована модель визнана найбільш точною та адекватною для моделювання роботи акумулятора в досліджуваних режимах.

8. Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки оцінювачів стану заряду (SoC) в системах керування батареями (BMS), проектування систем моніторингу та діагностики акумуляторних батарей електромобілів, а також для оптимізації режимів заряджання та розряджання з метою підвищення терміну служби акумуляторів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Філюк Я. О. Автономне живлення зовнішнього освітлення з використанням світлодіодних джерел світла / Ярослав Філюк, Вадим Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 травня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С.191-192.
3. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.
4. Sarakonsri, T., & Vasant Kumar, R. (2023). Primary batteries. Rechargeable Ion Batteries: Materials, Design and Applications of Li-Ion Cells and Beyond, 21-47.
5. Акумуляування електроенергії у автономних освітлювальних установках / В.П.Коваль, В.А. Андрійчук, К.М.Козак// Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 23-27 лютого 2015 р., Тернопіль, Ярмче (УКРАЇНА) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2015.– С. 98-99.
6. Левчук П. П. Зарядка електричних транспортних засобів на основі безпроводної передачі енергії / П. П. Левчук, В. П. Коваль // Збірник тез

- доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — Том 2. — С. 117.
7. Bohdan Orobchuk, Oleh Buniak, Ivan Sysak, Serhii Babiuk, Ihor Bodnarchuk, Vadym Koval (2024) Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. 2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 12-14, Vol. 3742, Pages 316-336
 8. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С
 9. Díaz-González, F., Sumper, A., & Gomis-Bellmunt, O. (2016). Energy storage in power systems. John Wiley & Sons.
 10. Saidani, F., Hutter, F. X., Scurtu, R. G., Braunwarth, W., & Burghartz, J. N. (2017). Lithium-ion battery models: a comparative study and a model-based powerline communication. *Advances in Radio Science*, 15, 83-91.
 11. Barcellona, S., & Piegari, L. (2017). Lithium ion battery models and parameter identification techniques. *Energies*, 10(12), 2007.
 12. Plett, G. L. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation. *Journal of Power sources*, 134(2), 277-292.
 13. Hu, X., Li, S., & Peng, H. (2012). A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 198, 359-367.
 14. Rahimi-Eichi, H., & Chow, M. Y. (2012, October). Adaptive parameter identification and state-of-charge estimation of lithium-ion batteries. In *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 4012-4017). IEEE.

15. Chang, W. Y. (2013). The state of charge estimating methods for battery: A review. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 953792.
16. Srinivasan, V., Weidner, J. W., & Newman, J. (2001). Hysteresis during cycling of nickel hydroxide active material. *Journal of the electrochemical society*, 148(9), A969-A980.
17. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // *Scientific Journal of TNTU*. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.
18. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // *ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021*. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19.
19. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // *МММТЕС*, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.
20. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)
21. Малушенко А.С. Перспектива зарядки електромобілів від відновлювальних джерел енергії // А. С. Малушенко; М.Б. Горват; В. П. Коваль / *Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XII міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6-7 грудня 2023)* / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. – С. 225.
22. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / *Фундаментальні та прикладні*

- проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.
23. Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37.
24. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173
25. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
26. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.
27. Стельмах С.С. Енергоефективність гідроакумуючих установок малої потужності // С.С.Стельмах, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки

України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 71.

- 28.Гандзюк М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.