

**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

**магістр**

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНОЮ  
БАТАРЕЄЮ НА ОСНОВІ  $\text{LiFePO}_4$  ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ**

Виконав(ла): студент 6 курсу, групи ЕТм  
спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) **Кваковський Д.І.**  
(прізвище та ініціали)

Керівник (підпис) **Андрійчук В.А.**  
(прізвище та ініціали)

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

Завідувач кафедри (підпис) **Тарасенко М.Г.**  
(прізвище та ініціали)

Рецензент (підпис) **Шелестовський Б.Г.**  
(прізвище та ініціали)

Тернопіль 2022

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

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Тарасенко М. Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2022 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Кваковському Дмитру Івановичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи керування акумуляторною батареєю на основі LiFePO<sub>4</sub> елементів для фотоелектричних систем

Керівник роботи Андрійчук Володимир Андрійович, проф. д.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «09» листопада 2022 року № 4/7-883

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2022 року

3. Вихідні дані до роботи Провести огляд та порівняння схем та способів керування акумуляторною системою на основі літійових елементів для фотоелектричних систем. Розробити систему керування акумуляторною батареєю на основі LiFePO<sub>4</sub> елементів. Провести моделювання та натурні дослідження розробленою системою керування акумуляторною батареєю.

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

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Гурик О. Я. к.т.н., доцент		
	Клепчик В.М., старший викладач		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 10 листопада 2022 року**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	14.11.2022	
2	Аналітичний розділ	18.11.2022	
3	Розрахунково-дослідницький розділ	22.11.2022	
4	Проектно-конструкторський розділ	25.11.2022	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	29.11.2022	
6	Висновки	01.12.2022	
7	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2022	
8	Оформлення графічної частини	12.12.2022	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваковський Д.І.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Андрійчук В.А.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## Реферат

Кваковський Д.І. Розробка системи керування акумуляторною батареєю на основі  $\text{LiFePO}_4$  елементів для фотоелектричних систем.

Стор.67; рис.36; табл.1; креслень - ; джерел -17; додатків - 0.

Метою кваліфікаційної роботи було провести теоретичний огляд та порівняння обраних схем та способів керування акумуляторною батареєю на основі  $\text{LiFePO}_4$  елементів для фотоелектричних систем.

У першому розділі дається огляд літератури та теоретичної бази теми. Це також пояснює деякі концепції розуміння проблеми та деякі очікувані результати.

В другому розділі було обрано елементи для акумуляторної батареї, а також сконструйовано пристрій для циклічного заряду на основі реєстратора даних. Розроблено моделі в симуляторі схеми PSIM, яка використовується для оцінки різних схем керування резистивним балансиrom.

У третьому розділі було продемонстровано, що елементи з дисбалансом обмежені у своїй ємності на основі незбалансованості. Допуск до дисбалансу найбільше залежав від налаштувань зовнішнього зарядного пристрою у режимі зарядки. Представлено схему керування, що імітує природну поведінку самобалансування батареї. Це було реалізовано у фізичному апаратному забезпеченні на рівні 24 В, і протестовано в умовах, подібних до середовища моделювання, порівнюючи результати з натурними дослідженнями.

**Ключові слова:** Акумуляторна батарея, система керування, Літій-іоний елемент, фотоелектрична система.

## ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1. Типи акумуляторів для зберігання енергії	9
1.2 Електрифікація сільської місцевості на основі сонячних фотоелектричних установок	11
1.3 Вимоги до літєвих BMS (системи керування акумулятором)	13
1.4 Моделювання літєвих елементів	14
1.4.1 Моделі еквівалентних схем	15
1.4.2 Модель внутрішнього опору	15
1.4.3 Модель Тевена	16
1.4.4 Модель n-RC ланки	17
1.4.5 Емпіричні та електрохімічні моделі	17
1.5 Балансування елементів акумуляторної батареї	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	20
2.1 Концепція побудови системи балансування акумуляторних елементів	20
2.1.1 Побудови системи BMS	20
2.1.2 Методика захисту елементів	21
2.1.3 Методика контролю балансу	23
2.2 Моделювання схеми BMS з використанням засобів моделювання PSIM	24
2.2.1 Модель акумуляторної батареї в програмі PSIM	26
2.2.2 Модель керування увімкненням/вимкненням на один опір	26
2.2.3 Модель гістерезисного керування	28
2.3 Прототип системи BMS	29
2.3.1 Обмеження конструкції прототипу на основі одноелементної друкованої плати	31
2.4 Експериментальна установка для проведення дослідження акумуляторних елементів	32

2.4.1	Аналіз безпеки експлуатації акумуляторної батареї	35
2.4.2	Робота елемента за межами граничних значень напруги	36
2.4.3	Вимоги до баластного резистора	37
2.4.4	Штучне розбалансування акумуляторних батарей	38
2.4.5	Досягнення постійного дисбалансу	39
2.5	Методологія досліджень характеристик акумуляторних батарей	39
2.6	Висновки до розділу	41
3	НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	42
3.1.	Результати тестування штучного дисбалансу	42
3.1.1	Вплив дисбалансу на послідовно з'єднані елементи	43
3.1.2	Вплив значення напруги заряду на акумуляторну батарею	45
3.1.3	Дисбалансу декількох елементів акумуляторної батареї	48
3.1.4	Результати дослідження системи баластування	49
3.2	Оцінка впливу результатів досліджень на контроль заряду батареї	52
3.3	Порівняння результатів моделювання з експериментальними	55
3.4	Висновки до розділу	57
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
4.1.	ОХОРОНА ПРАЦІ	58
4.1.1	Безпека при виготовленні друкованих плат	58
4.1.2.	Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж	60
4.2.	БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	62
4.2.1.	Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій	62
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	65
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	66

## ВСТУП

**Актуальність теми роботи.** Літій-іонні акумулятори вважаються найсучаснішими з існуючих на сьогоднішній день акумуляторів і широко поширені на ринках, включаючи мобільні пристрої, електромобілі, електроінструменти та системи зберігання енергії великої потужності. Дані акумулятори можуть зберігати і віддавати електроенергію більш ефективно, надійно і швидко, ніж альтернативи, такі як свинцево-кислотні акумулятори. Літій-іонні батареї також мають кращі характеристики, ніж свинцево-кислотні, що призвело до їх використання в якості технології зберігання енергії в електромобілях. В результаті збільшення обсягів виробництва, покращення тривалості циклу, доступності матеріалів та масштабів виробництва, зараз існують декілька різновидів літій-іонних акумуляторів для комерційного або мережевого зберігання енергії. Оскільки суспільство рухається до низьковуглецевих, відновлюваних джерел енергії в умовах зміни клімату, недорогі акумуляторні батареї можуть сприяти збільшенню проникнення відновлюваних джерел енергії. Літій-іонні акумулятори з кожним роком становлять все більшу частку новостворених хімічних акумуляторних накопичувачів.

В автономних сонячних фотоелектричних та фотоелектричних гібридних системах, де раніше домінували свинцево-кислотні акумулятори, літій-іонні батареї зараз впроваджуються багатьма виробниками, як найбільш економічно ефективні хімічні акумуляторні батареї, виходячи з вартості, експлуатації та корисної ємності. Однак літієві елементи не здатні вирівнювати напругу на окремих елементах і потребують зовнішніх систем керування батареями (BMS) для безпечного функціонування з максимальною потужністю. Частково через повсюдне поширення свинцево-кислотних систем, існує цінність у створенні літієвих батарей, які можуть взаємодіяти з існуючими технологіями, побудованими на основі свинцево-кислотних акумуляторів. В даний час ринкові рішення не дозволяють встановлювати ці елементи в якості модернізації існуючих свинцевих батарей, і до недавнього часу вони не могли

працювати в послідовних схемах з іншими батареями. Для вирішення цієї проблеми підтримки збалансованості елементів були запропоновані та впроваджені у виробничі технології BMS різні топології схем на основі резистивного розсіювання, конденсаторної комутації, трансформаторної комутації, форсованого перетворення та резонансної комутації.

Свинцево-кислотні батареї залишаються фактичним рішенням для сонячних фотоелектричних мікромереж (невеликих ізольованих електричних мереж), які можуть бути приєднані до мережі або не приєднані до мережі, та інших застосувань для зберігання енергії, де вага та об'єм є менш важливими, з моменту створення мережевого інвертора. Ці батареї відносно легко підключати і управляти ними, працюючи тільки за допомогою знання зовнішньої напруги системи батарей, з'єднаних послідовно, паралельно або в комбінації обох способів. Дуже важливо, що вони можуть бути об'єднані в ці різні конфігурації. Літієві батареї не мають однакових характеристик, їх не можна комбінувати однаково, і ця додаткова складність вимагала додаткових компонентів, які б забезпечували безпеку і оптимальну роботу елементів.

**Мета і завдання роботи:** Провести теоретичний огляд та порівняння обраних схем та способів керування акумуляторною батареєю на основі  $\text{LiFePO}_4$  елементів для фотоелектричних систем

Для досягнення поставленої мети в даній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити систему керування акумуляторною батареєю на основі  $\text{LiFePO}_4$  елементів;
- Довести, що система керування батареями є
  - o Гнучкою за своїми вимогами до підключення;
  - o Модульна, оскільки дозволяє використовувати низьковольтні блокові батареї;
  - o Надійною завдяки високій доступності та швидкому балансуванню всіх елементів.

**Об'єкт дослідження:** Система керування акумуляторною батареєю на основі літій-залізо-фосфату (ЛЗФ), призначеної для застосування в сонячних



фотоелектричних системах.

**Предмет дослідження:** Техніко-енергетичні характеристики основних показників якості керування акумуляторною батареєю.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Проведено теоретичний та порівняльний аналіз систем керування зарядом в акумуляторних батареях.

2. Удосконалено модель системи керування зарядом, що включає датчик напруги, який вмикає балансування з постійним резистивним навантаженням, та проведено аналіз за результатами імітаційного моделювання.

**Практична цінність результатів дослідження:**

1. Запропоновано методику моделювання та розроблено автоматизовану систему вимірювання і запису зарядом кожного елемента акумуляторної батареї.

2. Розроблено систему для контролю параметрів акумуляторної батареї та пристрій балансування напруги на окремих літійових елементах.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні положення роботи і її результати доповідалися на XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (Тернопіль, 2022 р.)

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

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1. Типи акумуляторів для зберігання енергії

Хімічні акумулятори - це пристрої для зберігання енергії, які можуть постачати електричну енергію за допомогою хімічної реакції. Для передачі накопиченої енергії у вигляді електрики в акумуляторах використовується реакція окиснення-відновлення (редокс). Батареї поділяються на первинні та вторинні елементи. Первинні батареї виробляють енергію за допомогою незворотної хімічної реакції, яка поступово витрачає реагенти, поки напруга батареї не знизиться нижче корисного діапазону. Первинні батареї, як правило, мають вищу щільність енергії, ніж вторинні елементи, однак обмеження їх хімічного складу робить їх неефективними для застосування у відновлюваних джерелах енергії. Вторинні батареї реалізують оборотну реакцію, яка може дозволити зберігати енергію на вимогу, а не тільки при їх виробництві. Здатність зберігати електроенергію на вимогу є критично важливим компонентом інтеграції технологій відновлюваної енергетики, які за своєю природою є переривчастими, такими як вітрова та сонячна фотоелектрична енергетика, в надійне енергопостачання.

Серед вторинних хімічних акумуляторів однією з найстаріших і найбільш поширених хімічних батарей для ізольованих електричних систем, запуску двигунів, автопарків і джерел безперебійного живлення (ДБЖ), серед іншого, є свинцево-кислотна батарея. Ця технологія була винайдена понад 150 років тому французьким фізиком Гастоном Плантом [2]. Ці батареї були фактичним рішенням для нових позамережових сонячних фотоелектричних установок з накопичувачами завдяки їх доступності та ціні. Зовсім недавно нові та вдосконалені хімічні технології, засновані на літій-іонних реакціях, дозволили створити легші, дешевші та довговічніші батареї, сприяючи зусиллям з електрифікації транспортних засобів та поширенню мобільних пристроїв, що живляться від батарей. Ці батареї (на основі літій-іонних) зараз продаються як

більш дешевий варіант у порівнянні з існуючими свинцево-кислотними батареями для сонячних фотоелектричних установок [1].

В цілому, літій вважається цінним кандидатом для первинних і вторинних хімічних батарей як найлегший метал. Удосконалення хімічного складу компонентів і розуміння внутрішніх механізмів старіння в цих елементах продовжує розвиватися. Серед відомих хімічних речовин, названих, як правило, за їх позитивним електродом, є літій-залізо-фосфат (ЛЗФ), літій-нікель-марганець-кобальт-оксид (МКО), літій-нікель-кобальт-алюмінієвий оксид (НКА) і літій-кобальт-оксид (ЛКО), серед інших. В рамках цих категорій конкретні виробники будуть пропонувати різні хімічні склади анода, катода, електроліту, сепаратора тощо. Ці зміни означають, що літійові елементи різних хімічних складів продовжують покращувати свої показники щільності енергії (енергія на одиницю об'єму), питомої енергії (енергія на одиницю маси), питомої потужності (енергія на одиницю потужності) та тривалості циклу (загальна пропускна здатність енергії, яку може витримати батарея) [2] для широкого спектру застосувань.

У батареях є кілька показників, за якими вони оцінюються. Щільність енергії та питома енергія представляють кількість енергії, яка може бути збережена в акумуляторній технології на одиницю об'єму та одиницю маси, відповідно. Щільність енергії зазвичай вимірюється в Вт/м<sup>3</sup>, а питома енергія зазвичай вимірюється в Вт/кг, хоча можуть використовуватися і джоулі. Щільність енергії та питома потужність також використовуються для вимірювання максимальної вихідної потужності акумуляторної технології на одиницю об'єму та маси, що вимірюється у Вт/м<sup>3</sup> та Вт/кг відповідно. Що стосується термінів служби акумуляторів, то зазвичай вони поділяються на дві категорії: термін служби, або календарний термін служби, та термін служби циклу. Календарний термін служби - це термін служби акумулятора незалежно від того, як він використовується, кількість часу, який він пропрацює, якщо його не використовувати, при певному рівні заряду (РЗ) або в режимі їзди на велосипеді. Термін служби - це кількість енергії, яку батарея може витримати до того, як її ємність зменшиться. Наприклад, батарея може витримати 2 000

циклів до закінчення терміну служби, якщо вона розряджена на 80% від початкової ємності (ці 80% називаються глибиною розряду (DoD)). Термін служби акумулятора збільшується, якщо його розряджати з меншою глибиною розряду.

Інші аспекти використовуваної термінології включають послідовні ланцюжки батарей, що відносяться до елементів батареї, які з'єднані послідовно, де тільки один елемент з'єднаний паралельно. Послідовно-паралельні ланцюжки представляють собою комбінацію елементів, з'єднаних послідовно і паралельно. Ці послідовно-паралельні ланцюжки скорочено позначаються як nSnP. Наприклад, конфігурація 2S15P являє собою два послідовно з'єднані блоки з п'ятнадцяти елементів, які в свою чергу з'єднані паралельно. Різними рівнями системи є елемент; окремий циліндричний елемент або свинцево-кислотний елемент, батарея; комбінація паралельних і послідовних елементів в одному корпусі, пакет; розташування автономних батарей в послідовному і паралельному розташуванні. Пакет може складатися з батарей або елементів.

## **1.2 Електрифікація сільської місцевості на основі сонячних фотоелектричних установок**

Нещодавно падіння цін на сонячні фотоелектричні установки, вітрові турбіни та допоміжні технології означало, що докладаються зусилля для впровадження цих відновлюваних джерел енергії у сільській місцевості Канади, де раніше вони не були так легко прийняті [2]-[7]. Крім того, масштабованість технології сонячних фотоелектричних установок дозволила острівним житловим об'єктам перейти від демонстраційних [8] до комерційно життєздатних систем [2] в межах однієї громади. Впровадження відновлюваної енергетики приносить додаткові переваги віддаленим громадам; децентралізовані системи підвищують енергетичну безпеку за рахунок диверсифікації пропозиції та зменшення попиту на передачу, зменшення негативного впливу викопного палива на навколишнє середовище та здоров'я, а

також є більш швидкими у встановленні та розвитку, пропонуючи дешевшу генерацію та сприяючи створенню нових робочих місць. Ринок побутових сонячних фотоелектричних установок також перейшов у сферу споживчих технологій, де де-факто рішенням є свинцево-кислотні акумулятори, затоплені та регульовані клапанами свинцево-кислотні акумулятори (VRLA). Базова система для сонячної фотоелектричної системи з накопичувачем для обслуговування навантаження змінного струму показана на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Блок-схема сонячної фотоелектричної установки.

Сонячна панель може управлятися контролером з відстеженням точки максимальної потужності (MPPT) або більш простим контролером з широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ). Вони можуть бути інтегрованими або окремими від інвертора/зарядного пристрою; разом вони представляють собою перетворювач потужності і підключають сонячну панель або послідовний ряд панелей і намагаються витягти з панелей максимальну потужність, в залежності від освітленості. Мережа просто підключається до виходу змінного струму силового перетворювача. Те ж саме стосується акумуляторів, які з'єднуються послідовно, як правило, до максимальної напруги 48 В і підключаються до силового перетворювача через струмопровідний провідник, як і інші компоненти.

Це одна з основних переваг свинцево-кислотних батарей, яка буде розглянута в 2.5. Нещодавно, однак, були випущені літієві батареї [10]-[12], які позиціонуються як такі, що кидають виклик свинцево-кислотним технологіям у позамережевому просторі відновлюваної енергетики, прив'язаному до електромережі. Вони виходять на цей ринок завдяки зменшенню капітальних витрат на літієві батареї, а також збільшенню тривалості циклу та деяким

притаманним їм покращенням експлуатаційних характеристик порівняно зі свинцево-кислотними батареями. Однак літій-іонна батарея не може бути інтегрована в енергосистему, як показано на Рисунку 2-1, через напругу, характерну для літій-іонної батареї, та підвищені проблеми безпеки, пов'язані з різними хімічними речовинами літію, порівняно зі свинцево-кислотними батареями [3]-[6]. У цих системах свинцево-кислотні батареї з'єднуються послідовно, щоб зменшити необхідний розмір провідника, при цьому вони не потребують керування. Літійові батареї, однак, вимагають певного управлінського рішення, системи керування батареєю (BMS), яка регулює поведінку елементів, утримуючи їх в безпечних робочих діапазонах і в однаковому стані заряду. Ця та інші проблеми заміни свинцево-кислотних акумуляторів на літійові батареї в цьому додатку обговорювалися раніше в 2.11.1.

### **1.3 Вимоги до літійових BMS (системи керування акумулятором)**

Літійова система BMS, в залежності від її застосування, може знадобитися для контролю характеристик батареї, моніторингу характеристик навколишнього середовища або керування зовнішніми системами, якщо вони присутні [3], [4].

1. **Захист елементів:** Елементи підтримуються в діапазонах, які є безпечними та сприяють тривалому терміну служби
  - a. Вимірювання струму;
  - b. Температура - рівень температури в акумуляторі;
  - c. Напруга елемента - кожна комірка серії повинна контролюватися.
2. **Баланс елемента:** Збалансовані елементи забезпечують максимально можливе зберігання енергії і знижують ризик виникнення небезпечних умов.
3. **Зв'язок:** Зв'язок може бути між елементами або з інфраструктурою зарядного пристрою.
4. **Системи охолодження:** Рідинне або повітряне охолодження може бути засноване на вхідній температурі.

5. Стан заряду (SOH): Показник, що описує зміну ємності та продуктивності батареї.

#### **1.4 Моделювання літєвих елементів**

Моделювання літєвих елементів є важливою частиною розуміння того, як вони функціонують.

Моделювання дозволило краще зрозуміти старіння і режими відмов, які негативно впливають на термін служби, безпеку і продуктивність акумуляторів за багатьма різними дуже специфічними критеріями. У контексті застосування акумуляторних батарей механізм деградації, як правило, менш важливий, і деградацію можна розглядати як єдину метрику; суму всіх фізичних погіршень. Більш прості моделі, засновані виключно на пропускній здатності та ефективності, є корисними в середовищі моделювання сонячних фотоелектричних систем, особливо для моделювання продуктивності батарей в мікромережах в інтересах швидкості, або більш складні моделі, коли перевага надається точності. Наприклад, HOMER Microgrid Simulator використовує як базову модель акумулятора, яка встановлює обмеження на струм, глибину розряду (DoD) і термін служби, так і більш просунуту модель, що враховує старіння в залежності від використання. Передбачається, що напруга залишається постійною (розумною для літій-іонного акумулятора) протягом тривалості кривих заряду і розряду, модель РЗ є простим вхідним виходом, а пропускна здатність протягом терміну служби моделюється як просте інтегрування пропускну здатності [7,8]. Більш складна кінетична модель акумулятора (KiBaM) у Advanced Storage Model. Більш складна KiBaM реалізує модель, описану в [7], [8], яка включає календарні ефекти старіння і ємність як функцію температури, і моделює батарею як серію резервуарів, перший з яких є доступною енергією, а другий - енергією, яка повинна бути вивільнена в результаті хімічного процесу; окислювально-відновної реакції, і, таким чином, затримується, моделюється як ємність. Потім резервуари моделюються за допомогою послідовного опору і включають тепловий компонент, заснований

на втратах  $I^2R$ , що підвищує точність у порівнянні з більш простим розрахунком, заснованим на ефективності. HOMER моделює деградацію батареї з точки зору календарного та циклічного старіння [1]. Вони накопичуються протягом терміну служби батареї, поки вона не досягне призначеного терміну служби, зазвичай 80% від початкової ємності.

Більш складна модель, реалізована HOMER, може мати вирішальне значення при оцінці загальної продуктивності мікромережевої системи, особливо коли використовуються багаторічні дані, однак при розгляді вимог пропонованої BMS; баланс елементів і захист елементів, перевага віддається менш складній моделі. У цьому контексті BMS не стосується загального стану здоров'я батареї, вона вимагає лише того, щоб батареї працювали при постійному стані заряду і щоб жоден елемент не досягав небезпечного стану напруги. З огляду на ці вимоги, перевага надається більш простим моделям еквівалентних схем. Ці та більш складні варіанти моделювання представлені нижче.

#### **1.4.1 Моделі еквівалентних схем**

Для моделювання технології літійових батарей широко використовуються декілька еквівалентних схем.

Більшість з них включають термін напруга холостого ходу та внутрішній опір, які залежать від РЗ акумулятора. Вони можуть бути застосовні тільки при заряді, розряді або при обох цих процесах; включати один або більше членів, заснованих на динаміці акумулятора, ефектах старіння тощо.

#### **1.4.2 Модель внутрішнього опору**

Модель внутрішнього опору ( $R_{int}$ ) моделюється просто як джерело напруги та послідовний опір. Цей послідовний опір, внутрішній імпеданс елемента, може бути використаний для швидкого наближення РЗ елемента. З точки зору BMS, точне вимірювання струму має вирішальне значення для визначення значення опору елемента ( $R_{Cell}$ ), а значення  $R_{Cell}$  залежить в основному від РЗ батареї, від зовнішньої температури і від того, чи знаходиться батарея в стані заряду або розряду. Модель  $R_{int}$  представлена нижче, на рисунку 1.2.



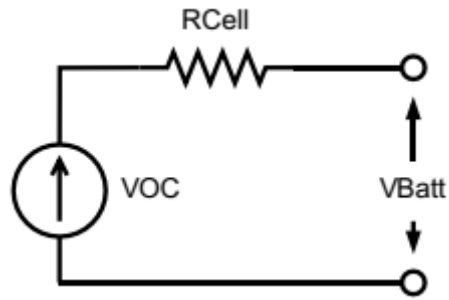


Рисунок 1.2 – Модель акумулятора із  $R_{int}$ , НАПРУГА ХОЛОСТОГО ХОДУ та  $R_{Cell}$  в залежності від РЗ акумулятора.

Через різні характеристики при заряді та розряді,  $R_{Cell}$  може бути замінений на

$R_{Charge}$  і  $R_{Discharge}$ , щоб відобразити цю різницю. Можливе рівняння для  $V_{Batt}$  показано у формулі 1.1, нижче, як функція часу. Послідовний опір означає зниження ефективності в порівнянні з ідеалізованим джерелом напруги або моделлю джерела напруги, що залежить від РЗ.

$$V_{Batt} = VOC(SOC) - i \cdot R_{Cell} \quad (1.1)$$

### 1.4.3 Модель Тевена

З додаванням пари RC послідовно з опором RСелемента, модель тепер здатна описувати релаксацію напруги і деяку динаміку елемента.

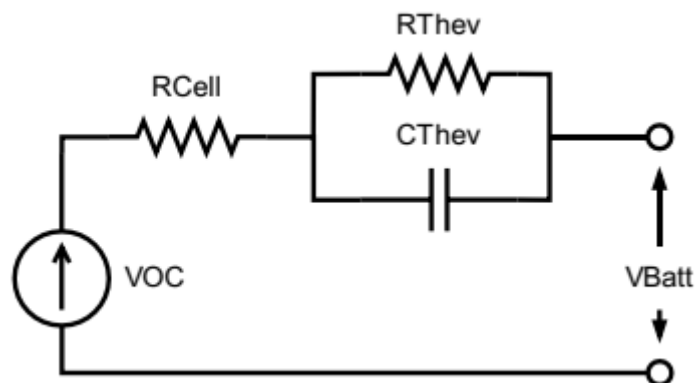


Рисунок 1.3 – Режим Тевена , напруга холостого ходу залежить від РЗ батареї, інші RC-елементи аналогічно залежать від РЗ.

Додавання пари RC до цієї моделі призводить до того, що батарея вирішується рівнянням 1.2. Для визначення значень резисторів і конденсаторів

для даного елемента необхідно провести тестування при різних зовнішніх умовах.

$$V_{Batt} = VOC(SOC) - \int \left[ -\frac{V_{Batt} - i \cdot R_{Cell}}{R_{Thev} \cdot C_{Thev}} + \frac{i}{C_{Thev}} \right] dt - i \cdot R_{Cell} \quad (1.2)$$

#### 1.4.4 Модель n-RC ланки

Модель n-RC є подальшим розширенням моделі Тевеніна, яка спрямована на подальше включення динаміки батареї, старіння, температури та впливу струму, навіть характер навантаження може бути врахований. Ці моделі продовжують вдосконалюватися і адаптуватися до більш сучасних елементів, різної хімії електролітів і більш повного розуміння характеристик старіння акумуляторів. Ці моделі з додатковими парами RC є як більш точними, так і більш складними для визначення.

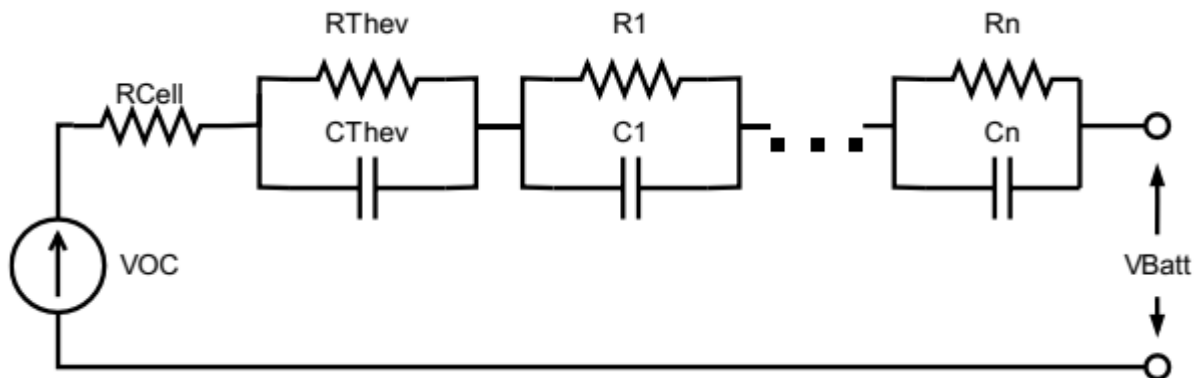


Рисунок 1.4 – Модель n-RC, що показує n пар RC, кожна з яких залежить від PЗ, температури і різних ефектів старіння елемента.

#### 1.4.5 Емпіричні та електрохімічні моделі

Електрохімічні моделі намагаються моделювати фізичну хімію батареї. Ці моделі [10-15] можуть бути більш точними, ніж моделі еквівалентної схеми, у визначенні стану заряду і стану справ батареї, однак вони зазвичай використовують складні диференціальні рівняння, які можуть бути трудомісткими в обчисленнях і є надмірними для цього застосування. Тим не менш, зусилля по зменшенню складності моделі та часу обчислень тривають

[16]. Час, необхідний для розробки BMS, яка реалізує одну або декілька складних емпіричних моделей, виходить за рамки цього проекту. Крім того, ці моделі, як правило, пропонують більше поліпшень продуктивності та безпеки для роботи з високими струмами, характерними для батарей електромобілів. У цих додатках більш поширені вторинні реакції і проблеми безпеки, пов'язані з більш високими струмами.

## **1.5 Балансування елементів акумуляторної батареї**

Через допуски при виробництві, різну історію зберігання або інші практичні проблеми, окремі елементи, виготовлені на заводі, працюють по-різному. Вони можуть мати різний внутрішній опір або різну ємність порівняно з заводськими, або ці відмінності можуть розвиватися з часом. В результаті цього, а також характеристики напруги, обговорюваної в 2.7, проблеми безпеки, пов'язані з підвищеною або зниженою напругою, обговорювані в 2.10.4 і 2.10.5, відповідно, BMS повинна підтримувати елементи в їх безпечних межах, одночасно витягуючи максимальну можливу потужність з збірки. Ми можемо класифікувати балансування на три різні методи: верхнє балансування, нижнє балансування та балансування на основі РЗ та SOH [17]. Найвідомішою теорією балансування в споживчих пристроях є "верхнє балансування", при якому елементи балансуються в міру наближення до повного заряду (РЗ). Цей метод простіше реалізувати, ніж альтернативи, особливо ті, що базуються на РЗ та SOH, оскільки ці показники, що змінюються, залежать від багатьох внутрішніх та зовнішніх факторів. Найвідомішою архітектурою схеми з верхнім балансуванням у споживчих технологіях сьогодні є відносно простий шунтуючий дисипатор. Дисипативний елемент є практично єдиним класом балансуєчих схем, який може використовуватися в збірках, з'єднаних тільки через один струмопровідний провід. На малюнку 2-10, нижче, показано три послідовно з'єднані елементи, що заряджаються, кожен з яких має різну ємність. Верхній елемент має "номінальну" ємність, середній елемент має меншу ємність, ніж передбачалося, а нижній елемент має більшу ємність. Якщо

всі елементи заряджати однаковим струмом, ми побачимо, що якщо перший елемент повністю заряджений, то маленький елемент був перезаряджений, що, можливо, призведе до подальшої деградації, а нижній елемент не був повністю заряджений. Потрібно щось зробити, щоб запобігти перезарядці середнього елемента. Саме тут вступає в дію балансування, приймаючи заряд від цієї елемента і або розсіюючи енергію, або переміщуючи її в іншу елементіву. Якщо елементи страждають від постійного дисбалансу, це буде повторюватися кожен цикл, але якщо ефект дисбалансу є тимчасовим, елементи відновлять свою ємність після повторного балансування.

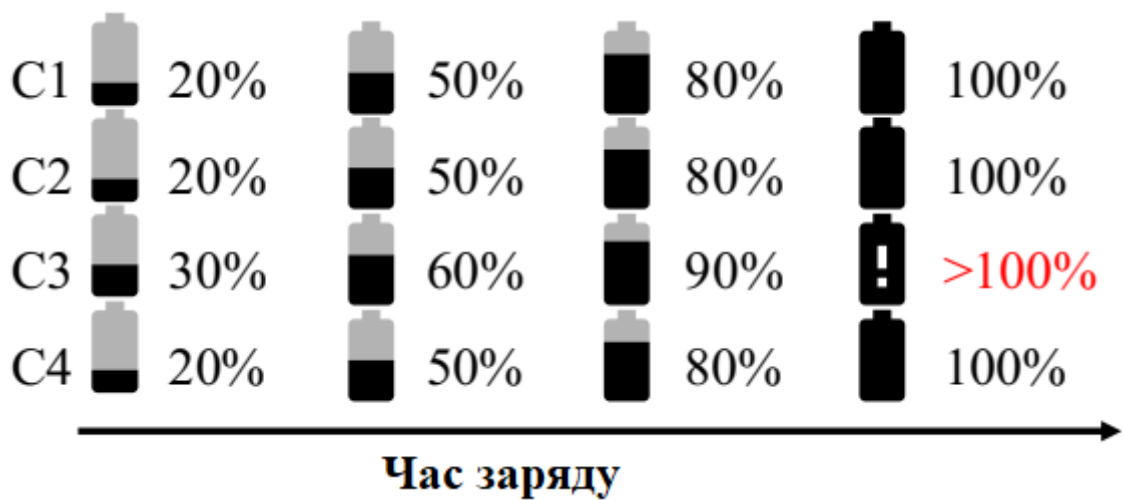


Рисунок 1.5 – Візуалізація "верхнього балансування" Без належного керування елемент C1 під час заряду увійде в стан перезарядження, створюючи ризик для безпеки, оскільки він починає працювати з більш високим значенням РЗ, ніж інші елементи.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Концепція побудови системи балансування акумуляторних елементів

Як зазначалося раніше, балансувальні пристрої намагаються вирішити проблему, описану в Розділі 1, але їхні рішення є дорогими, вони повільно балансують, не можуть бути з'єднані послідовно або вимагають певного виду зв'язку між послідовно з'єднаними елементами. Моделювання LiFePO<sub>4</sub> BMS призначена для поліпшення цих характеристик наступними способами:

- Покращена швидкість балансування елементів і схема керування
- Недорога конструкція захисту схеми
- Відсутність зв'язку між окремими послідовно з'єднаними "блоками батарей"

Обрана система керування акумуляторною батареєю повинна відповідати двом вимогам:

1. Захист елементів: Елементи підтримуються в діапазонах, які є безпечними і сприяють тривалому терміну служби, необхідними вимірювальними параметрами є

- a. Струм
- b. Температура - рівень упаковки або елемента
- c. Напруга елемента - кожний елемент повинний контролюватися.

2. Баланс елементів: Збалансовані елементи забезпечують максимально можливе зберігання енергії для даного розташування елементів і знижують ризик виникнення небезпечних умов.

#### 2.1.1 Побудови системи BMS

Попередня блок-схема та принципова схема елемента показані вище на Рисунку 2.1. Запропонована BMS буде здатна розсіювати постійну потужність 20 Вт від кожного елемента 1S110P, з можливістю забезпечення підвищеної шунтуючої потужності на короткі проміжки часу. Для цього знадобиться три входи: температура елемента і транзистора, а також напруга елемента, і лише два виходи: перемикач, що керує автоматичним вимикачем ВЕРХНЬОГО

РІВНЯ НАПРУГИ, і транзистор, що відповідає за розсіювання. Рекомендується оснастити FET датчиком температури, якщо він буде використовуватися для підвищеного розсіювання протягом коротких періодів часу.

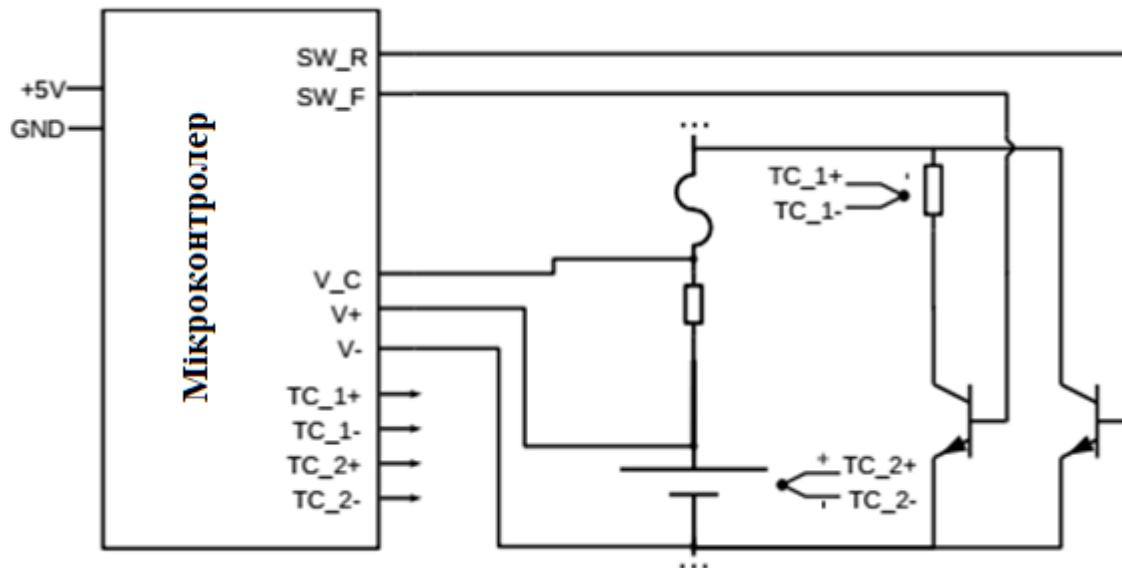


Рисунок 2.1 – Початково запропонована схема BMS

### 2.1.2 Методика захисту елементів

Випробування, проведені раніше, не мали на меті виявити вплив елементів, які були розбалансовані з точки зору фактичної ємності, а лише з точки зору РЗ. Воно не продемонструвало дисбаланс, що виникає під час нормального використання елементів, що відбувається через невеликі зміни у виробничому процесі. Дисбаланс, що спонтанно розвивається, не є сценарієм, який можна було б продемонструвати з елементами в типовому циклічному застосуванні. Таким чином, вихід елементів з рівноваги був заснований більше на штучному стані дисбалансу. У цьому стані основним фактором, що спричиняв перенапругу в розбалансованих елементах, було зовнішнє задане значення сталої напруги (СН). Таким чином, якщо уставка контролюється, елементи не будуть входити в стан, що вимагає активації захисту елементів, якщо їх дисбаланс не перевищує 20%, що було межею оцінок.

У зв'язку з очікуваною нечастотою використання захисту елемента, можливе використання механізму захисту елемента, який відповідає вимогам

даного проекту, але не реалізований в жодному споживчому рішенні. Відключення на основі запобіжника використовує запобіжник, який повинні мати всі існуючі споживчі батареї, і використовує його в якості механізму відключення елементів. Елементи можуть бути короткозамкнені, розвиваючи струм, необхідний для перегорання запобіжника, в результаті чого батарея (і блок) відключається. Струм, що розвивається, повинен бути меншим за граничний струм елементів, але при цьому швидко активувати захист запобіжника. Цей метод досить простий у реалізації і показаний нижче на рисунку 2.2.

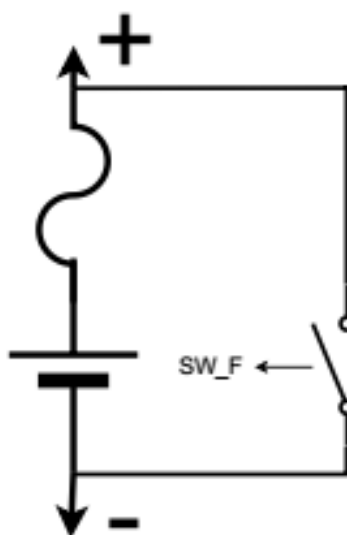


Рисунок 2.2 – Спрощена схема BMS з виділенням частини короткого замикання з перегоранням запобіжника.

Вимикач використовується для короткого замикання елемента через коло з опором, необхідним для того, щоб змусити запобіжник відключити елемент. Таке відключення запобіжником порівнюється з двома існуючими, широко впровадженими методами відключення, які зазвичай використовуються в побутових батареях та BMS: бістабільним вимикачем та транзисторним вимикачем.

Залежно від застосування, розряд елементів знаходяться в діапазоні 20%, що пов'язано з розміром батареї, необхідним для сонячної фотоелектричної установки. Однак елементи ЛЗФ можуть розряджатися при температурі понад

10°C, особливо при коротких сплесках, залишаючись при цьому в безпечних межах. Тому більш високий струм перегорання запобіжника не потрібен для типової роботи батареї, і, таким чином, батарея матиме номінальну потужність нижче сумарної здатності видачі струму елементами.

### 2.1.3 Методика контролю балансу

Акумуляторна модель двоступеневої дисипативної моделі, реалізована за допомогою переключення на резистор. Резистор перемикається або за допомогою ШІМ-сигналу під час моделювання, або повністю увімкнений у стані високої потужності.

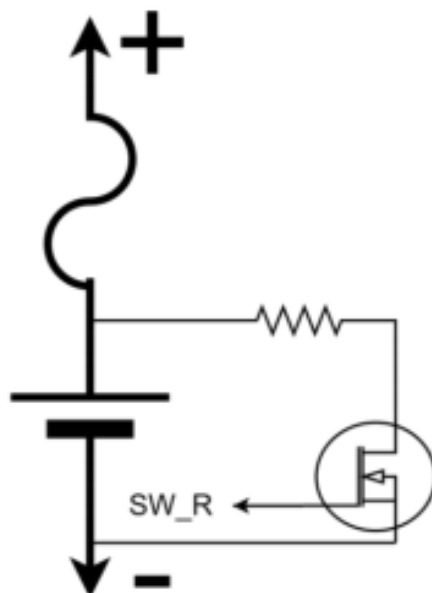


Рисунок 2.3 – Спрощена принципова схема BMS з резистивним балансуванням елемента.

Принципова схема початкового прототипу балансувального контуру показана на рисунку 2.4. Ця схема була використана для виготовлення прототипів друкованих плат.



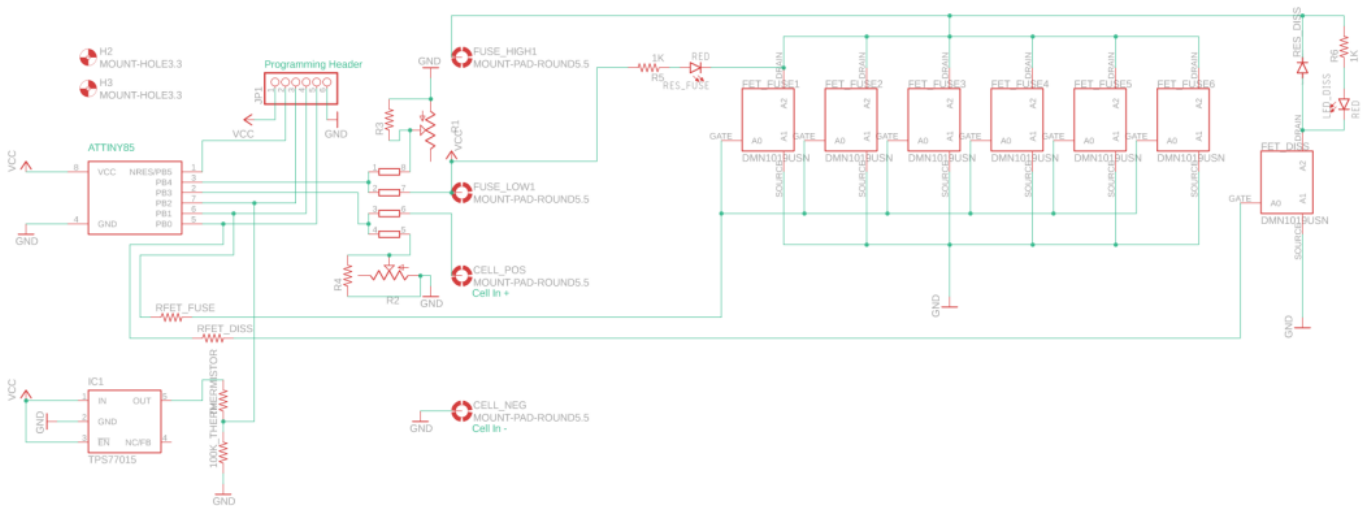


Рисунок 2.4 - Схема прототипа системи балансира.

Спочатку розглядалася можливість використання декількох FET для короткого замикання елементів, з використанням напівпровідників для перегорання запобіжників, але згодом була переглянута через декілька недоліків

## 2.2 Моделювання схеми BMS з використанням засобів моделювання PSIM

Для більш швидкої оцінки різних кривих балансу була проведена оцінка PSIM, реконструювавши блок 24 В, який буде використовуватися для тестування, і застосувавши окремі, не пов'язані між собою резистори балансу, як показано на рисунку 2.1, які можна швидко змінювати і повторювати. Крім того, використовуючи модель літій-іонної батареї в програмі PSIM, можна точно настроїти на продуктивність реальних елементів. Схема PSIM показана на рисунку 2.5.

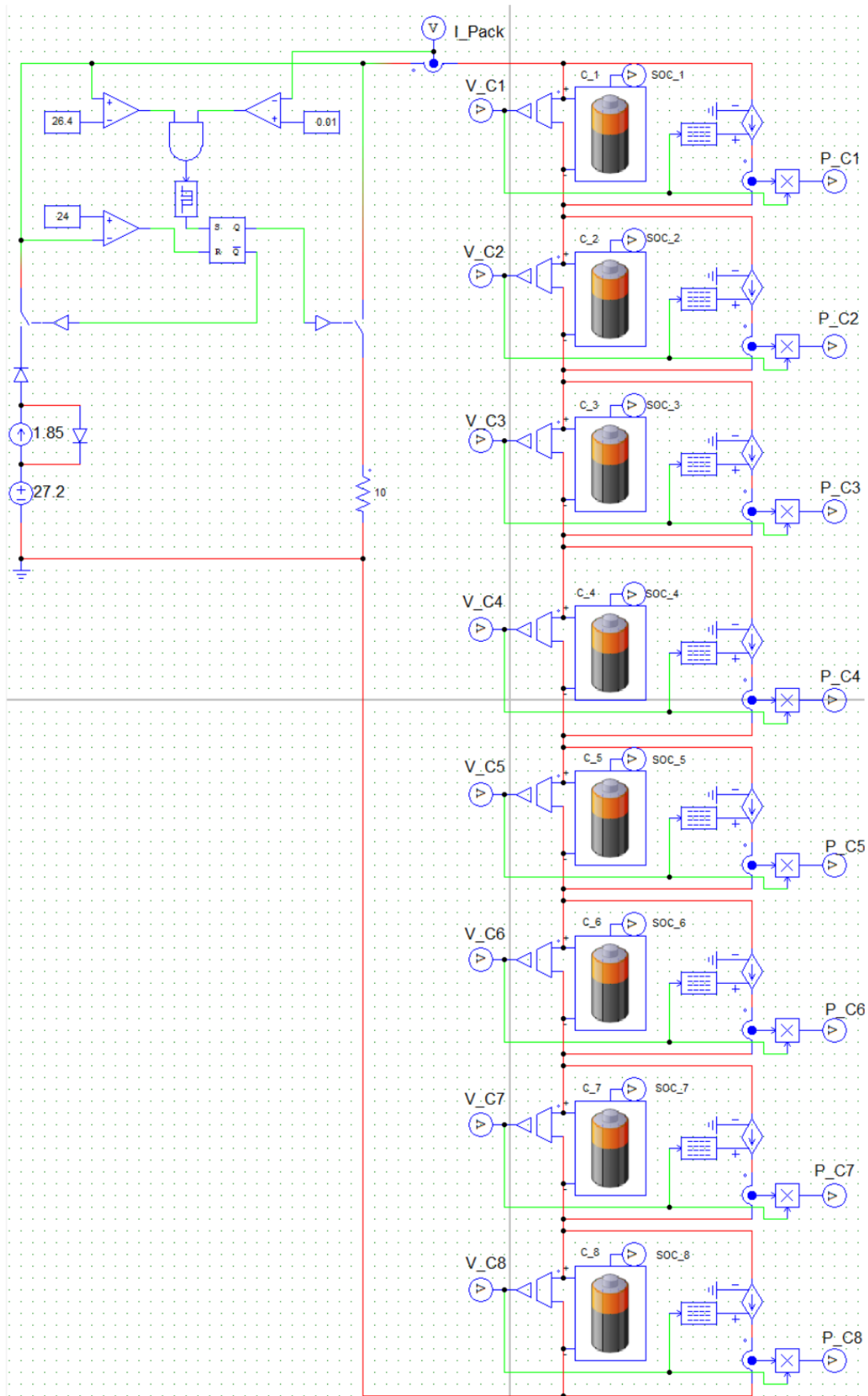


Рисунок 2.5 – Схеми моделі BMS у програмі PSIM, для оцінки різних стратегій керування.

## 2.2.1 Модель акумуляторної батареї в програмі PSIM

Оцінка продуктивності акумуляторної батареї проводилася в програмі PSIM, дана модель порівнювалася з реальними елементами, що працюють за прямолінійною кривою розряду. Оскільки це є режим заряду/розряду для протестованих схем контролю балансу. Порівняння оціненої моделі батареї з реальним елементом представлено на рисунку 2.6.

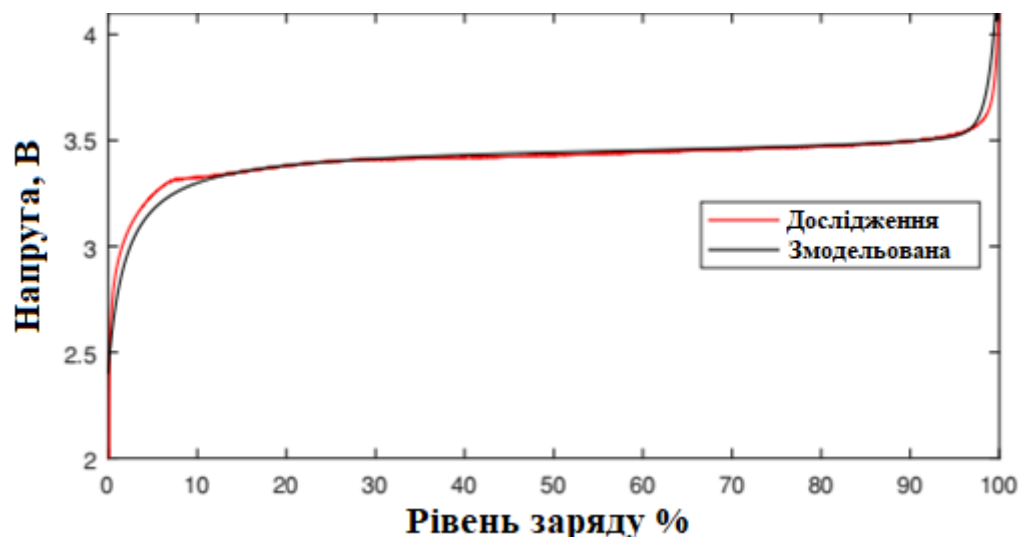
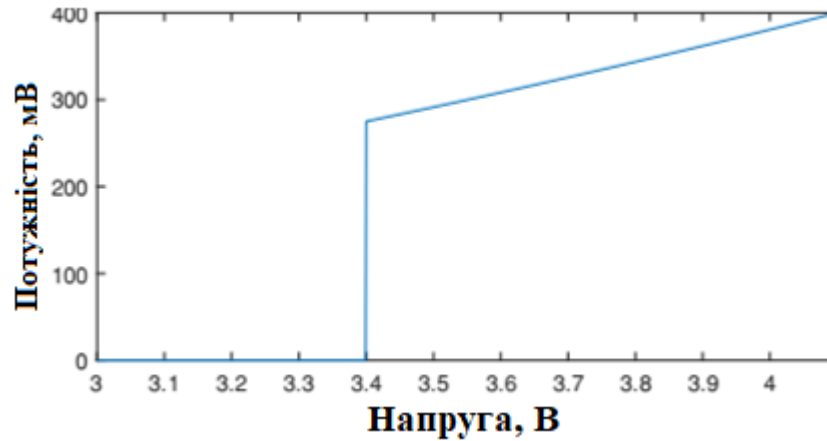


Рисунок 2.6 – Змодельована крива заряду в порівнянні з реальною кривою заряду і розряду (взято як середнє значення з конфігурації 8S1P).

В моделі присутні деякі відхилення в екстремальних значеннях продуктивності елемента, проте вони вважаються прийнятними. Модель досягає більш високих напруг раніше, ніж реальний елемент, що призводить до дещо складнішої для керування ситуації.

## 2.2.2 Модель керування увімкненням/вимкненням на один опір

Ця система включає в себе датчик напруги, який вмикає балансування з постійним резистивним навантаженням. Цей метод вирівнює елементи при заданій напрузі; показано 1/8 від нижньої межі передбачуваного діапазону напруги. Залежність потужності від напруги для цієї системи показана на рисунку 2.7 нижче.



Малюнок 2.7 – Розсіювання потужності при простому увімкненні/вимкненні як функція напруги (на елемент 3,7 Ач).

У цьому сценарії зробити балансування надійним та врахувати будь-які зміни в елементах складно, оскільки система враховує лише одне значення резистора. Ця система дуже чутлива до низької ефективності, оскільки необхідно враховувати компроміс між можливістю компенсувати розбалансовані елементи, а також розсіюванням низької потужності на холостому ходу. Всі елементи досягатимуть стаціонарного стану самостійно при заданому значенні, трохи вище заданої напруги. Однак, всі елементи залишатимуться при повній балансовій потужності, коли вони досягнуть сталого стану, через занадто високу напругу, що перевищує напругу на елемент, яка активує балансування, витрачаючи енергію даремно. Якщо напруга "увімкнення" для схеми керування буде вище сталої напруги, щоб уникнути непотрібного розсіювання потужності, вироблення тепла і проблем з ефективністю, будь-які елементи вище середньої напруги акумулятора будуть збалансовані, але елементи нижче цього значення ніколи не досягнуть необхідної напруги для балансування, як показано на рис. 2.8. Це призведе до значних втрат потужності, оскільки найнижча комірка РЗ буде диктувати ємність всього акумулятора.

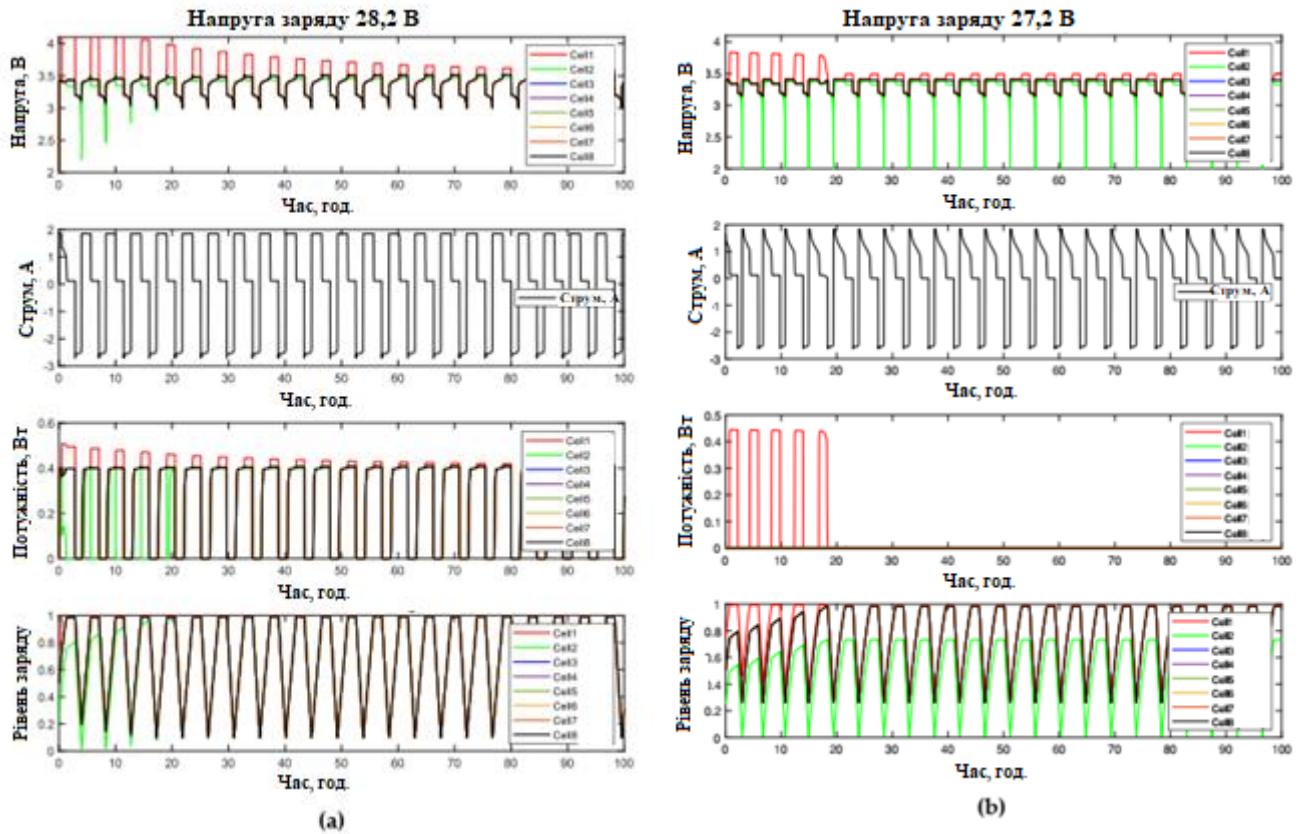


Рисунок 2.8 – (а) Підвищена межа напруги (28,2 В) вище рекомендованої напруги, призводить до підвищеного енергоспоживання на холостому ходу; (б) напруга батареї нижче рівня балансу (27,2), призводить до того, що незаряджений елемент не буде збалансований.

### 2.2.3 Модель гістерезисного керування

Метод керування з гістерезисом також був введений для тестування, але зіткнувся з проблемами, подібними до простого керування увімкненням/вимкненням. Ефективність для елементів нижче стану заряду укумулятора була особливо низькою, оскільки ці елементи часто не були збалансовані в симуляції. Крім того, цей метод керування не покращив відносно повільне балансування раніше розглянутих методів керування. Проблеми керування елементами, що призводили до подальшого виходу елементів з рівноваги, також були пов'язані з використанням надзвичайно потужних дисипативних резисторів.

## 2.3 Прототип системи BMS

Схема, рисунок 2.10, була створена в якості початкового прототипу. Вона базується на мікроконтролері ATTINY85-20PU. Основні технічні характеристики цього компонента наведені в Таблиці 2.1 нижче.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики, що вплинули на вибір мікроконтролера ATTINY85-20PU для створення прототипу.

<b>Специфікація</b>	<b>Значення</b>	<b>коментар</b>
<b>Напруга живлення</b>	1,8-5,5 В	Широкий діапазон напруг охоплює безпечний діапазон напруги акумулятора
<b>Доступний вхід/вихід Шпильки</b>	5 (6, якщо використовується RESET)	I/O використовується для: температури комірки, напруги, струму; запобіжники та балансові перемикачі
<b>АЦП роздільна здатність</b>	10-біт (вимірювання перевантаження по струму через 20-кратне посилення)	10-розрядний АЦП; 1024 кроки напруги, що використовуються через поділ напруги 4:1, повна шкала 4,4 В, що призводить до 4,4 мВ/діл.
<b>потужність Споживання</b>	30 мА @ 1,8 В	Низьке енергоспоживання

Початкові прототипи показані на рисунку 2.10 (а), де представлений початковий прототип, який був здатний грубо перевірити балансування і запропонував можливість випробувати програмування мікроконтролера і його роботу, зчитуючи постійну напругу і струм. Цей прототип, хоча він був здатний підтвердити перегорання запобіжника через стендове джерело живлення, був недостатнім для тестування на основі батареї при застосовних більших струмах. У ньому також відсутній температурний зонд. Наступний прототип, рисунок 2.10 (b), реалізує комутування на основі транзистора для захисту елементів, має температурний датчик, а також вимірювання напруги та струму, як і попередній прототип. Цей прототип використовувався для тестування і був успішним у балансуванні на основі напруги, що зчитується мікроконтролером, та реалізації

захисту елементів в ситуаціях перевантаження по струму та перегріву. Ці прототипи були призначені для підтвердження концепції та тестування. Проведене випробування мало на меті лише перевірку основної функціональності з використанням єдиного зовнішнього джерела напруги.

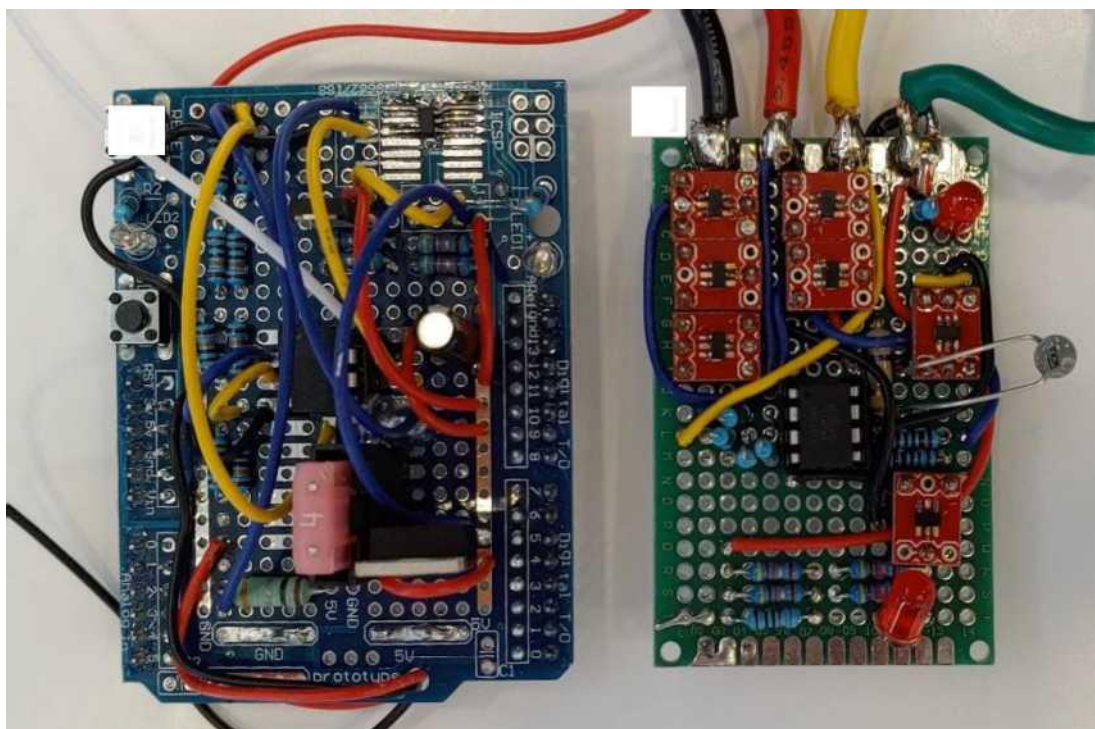


Рисунок 2.10 – (а) Початковий прототип BMS на базі мікроконтролера ATtiny85A, регулювання балансу на основі резисторів. (б) Друга тип для оцінки комутації на основі транзистора при більшому струмі. Обидва рішення реалізують дорогий драйвер FET

Після цих прототипів було зроблено декілька змін. Першим було видалення драйвера високого рівня LTC1982-ES6, показаного на схемі рисунок 2.4, який був занадто дорогим. У майбутніх модифікаціях N-канальні транзистори будуть керуватися низькою стороною. Тому раніше показані FET були замінені на реле для цілей прототипування. Ці зміни стали підставою для переходу на релейну технологію і більш дешевого рішення з використанням FET для резистивного балансувального елемента, який тепер підключається перед запобіжником.

### **2.3.1 Обмеження конструкції прототипу на основі одноелементної друкованої плати**

Дві основні цілі при переході до прототипу на основі друкованої плати полягали в тому, щоб скористатися перевагами більш дешевих SMD-компонентів, пріоритетно відмовившись від спеціальних ІС, і швидко виготовити достатню кількість балансувальних пристроїв для експериментів в середовищі 24 В. Тестування практичних характеристик апаратного забезпечення розподіленого балансувальника батареї базується на наступній схемі, рис. 2.11, яка призначена для забезпечення відповідної балансової потужності для кожного елемента в штучно розбалансованому сценарії, а також для ефективного балансування елементів за короткий проміжок часу. З метою тестування ця схема (Рис. 2.11) і плата не включають необхідне обладнання для виконання захисту елементів за допомогою перегорання запобіжників, що дозволяє зосередитися на виконанні балансування і скоротити витрати і час на виробництво кратних елементів для повної послідовності серії. Однак, він може бути ефективно модернізований для додавання функції перегорання запобіжників за допомогою дочірньої плати (підключеної через FUSE\_HEADER\_1 на рис. 2.11). Для того, щоб перевірити надійність цієї схеми управління, були включені потенціометри для зміни калібрування датчика напруги елемента для швидкого тестування з різними помилками калібрування, щоб визначити сумісність системи з різними допусками на компоненти. Були досліджені подальші проблеми, пов'язані з надійністю щодо перенапруги елементів, і був реалізований максимальний дисбаланс для різних напруг заряду. Крім того, швидкість роботи системи, зменшеної до 8S1P, була протестована з аналогічно зменшеною балансувальною потужністю.



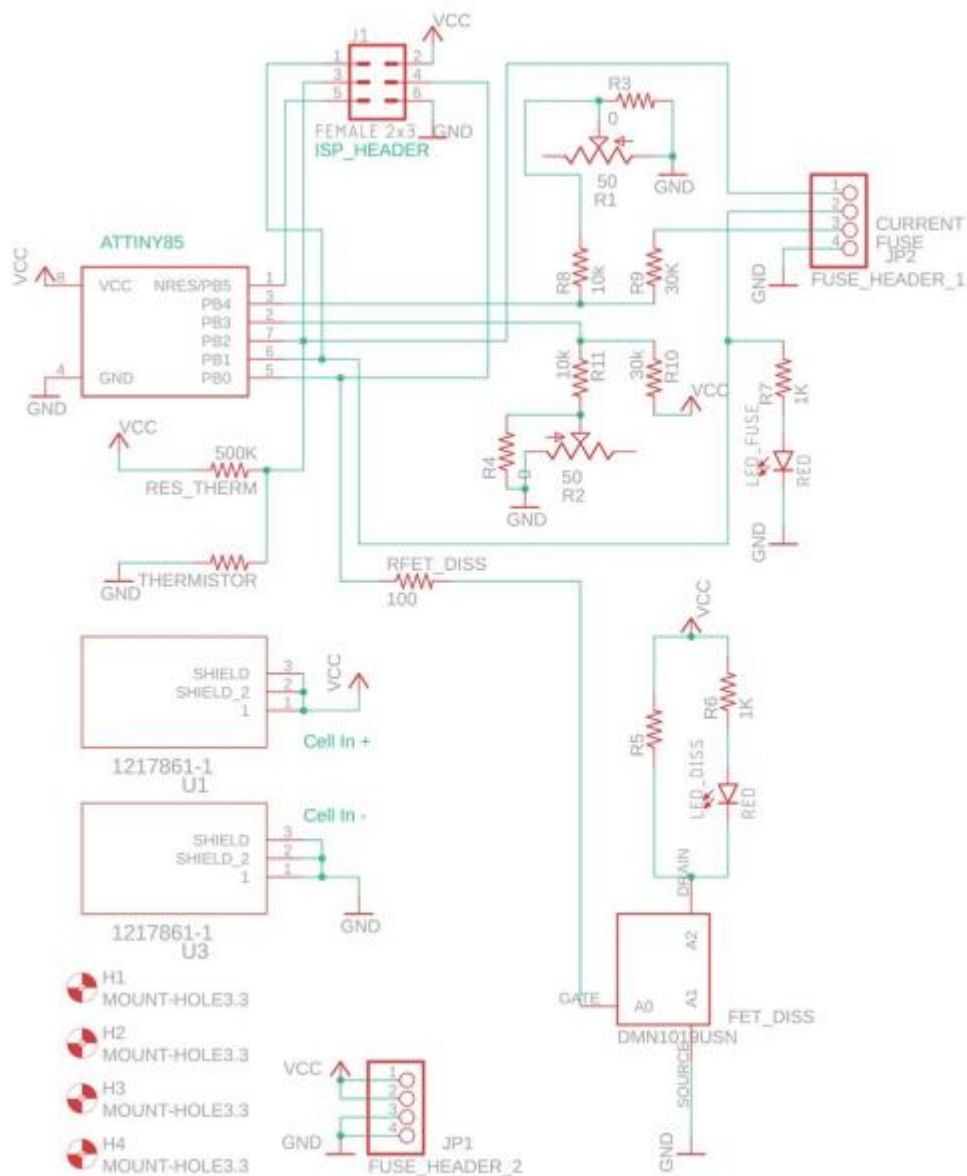


Рисунок 2.11 – Початковий прототип на основі друкованої плати (версія 0.3) Призначений лише як контролер балансу для оцінки роботи апаратного забезпечення балансу окремо від роботи запобіжника-роз'єднувача. Використовується в циклічному режимі 24 В.

## 2.4 Експериментальна установка для проведення дослідження акумуляторних елементів

Елементи з'єднані послідовно з пластиковим корпусом, що дозволяє легко отримати доступ до кожного елемента окремо та замінити їх у разі потреби. Електричні з'єднання з плавким запобіжником для вимірювання напруги під'єднані до клем цих тримачів елементів. Заряджання батареї здійснюється за

допомогою джерела живлення ВК Precision 9115, яке здатне заряджати батарею постійним струмом/постійною напругою (ПС/ПН) до граничної потужності 1200 Вт. Елементи розряджаються за допомогою змінного навантаження 10/20 Ом, яке розряджає елементи приблизно на 2/3Сіхньої ємності. Завдяки відносно плоскій кривій розряду ЛЗФ-елементів, це забезпечує досить стабільний струм, що споживається з батареї. Збалансований розряд батареї показаний на рисунку 2.12.

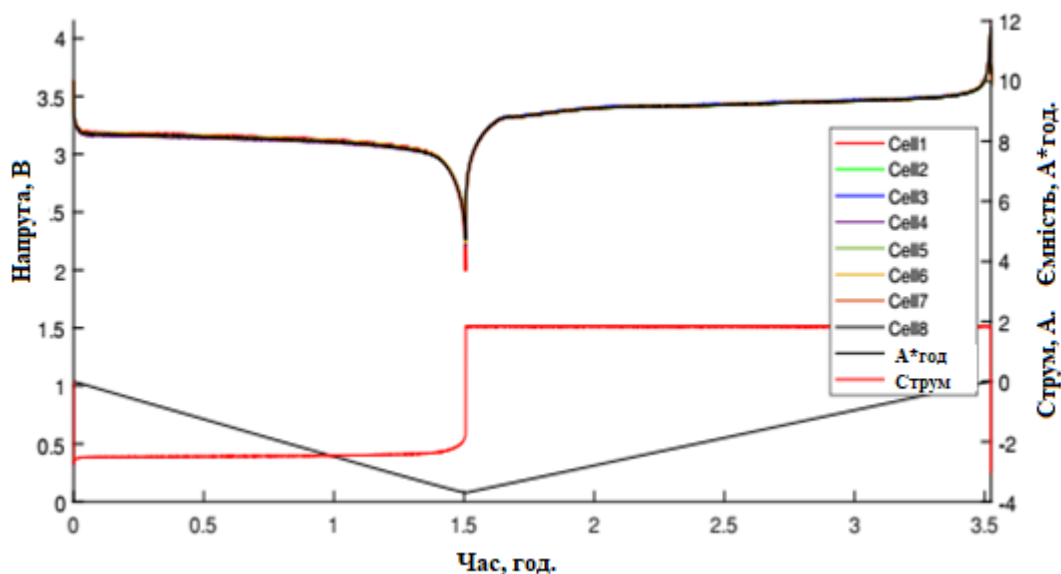


Рисунок 2.12 –: Графік балансування батареї при зарядці 1,85 А постійним струмом і напругою 32,8 В

Потім вони оснащуються датчиками напруги на землі, а також 10 В 16-розрядним аналогово-цифровим перетворювачем, для вимірювання напруги кожного елемента через дільник напруги 4:1 (рисунок 2.13). З'єднання датчиків напруги мають індивідуальний плавкий запобіжник і припаяні на з'єднувальній проводці між кожним елементом, що мінімізує струм через датчик напруги. На позитивному з'єднанні з батареєю використовувався шунтуючий резистор 1 мкОм для вимірювання струму за допомогою 16-розрядного датчика диференціальної напруги  $\pm 200$  мВ. Всі показання знімалися приладом **National Instruments CRIO 9045**, налаштованого з частотою дискретизації 1 Гц для всіх контрольних точок і можливістю перемикання значення напруги. Напруга вимірювалася за допомогою модуля NI 9206. Температуру вимірювали за допомогою термопар типу К, показання якої зчитувалися модулем термопар

NI 9213, що забезпечує 24-бітну роздільну здатність і прийнятну точність до -50 °С. Кожна комірка була оснащена термопарою, а також вимірювалася температура навколишнього середовища, як для характеристики цієї поведінки, так і в цілях безпеки. Температура навколишнього середовища підтримувалася в межах необхідного діапазону для кожного випробування за допомогою примусового охолодження повітря в корпусі. Вирівнювання температури з температурою в лабораторії гарантує, що коливання температури елементів викликані внутрішніми причинами, а не нагріванням від розташованих поруч дисипативних елементів. Випробувальну установку було розміщено в серверній шафі висотою 6U, що замикається. Випробувальну установку, розкладену на стенді для зручності огляду, показано на рисунку 2.13.

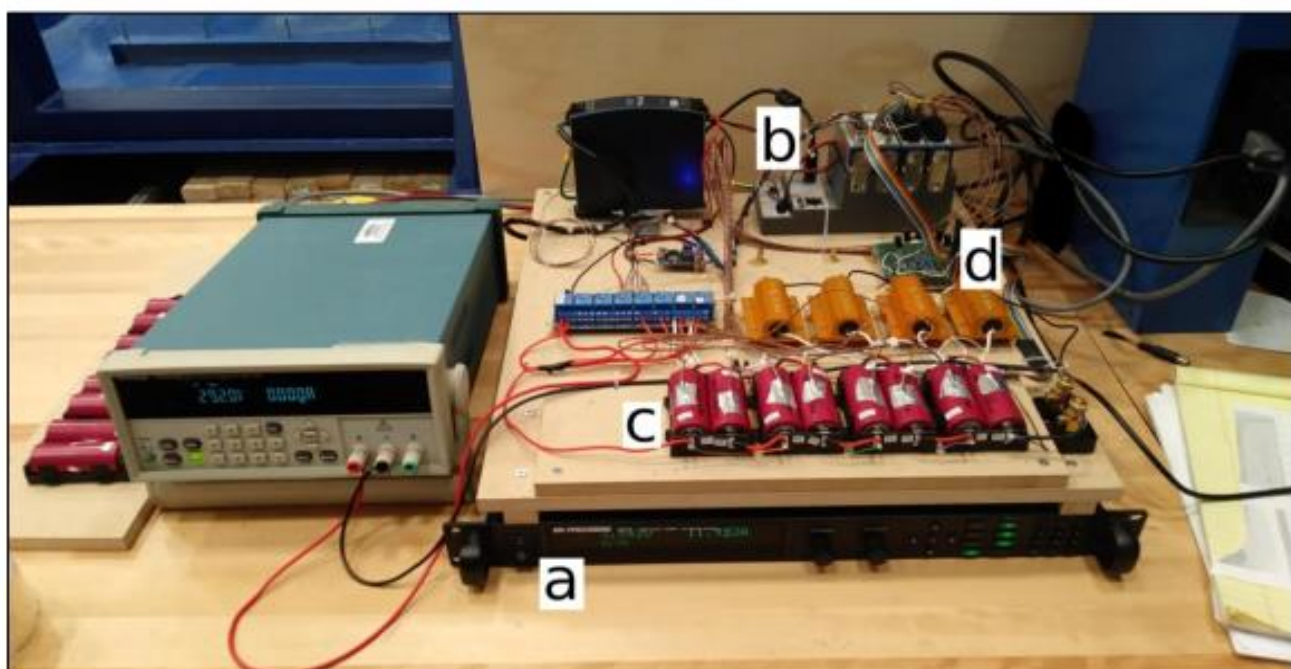


Рисунок 2.13 – Циклічний зарядний пристрій ЛЗФ, (а) прецизійне джерело живлення ВК, (б) NI CRIO зі встановленими модулями, (с) елементи в тримачах, термопари, приклеєні до корпусів елементів, (д) плата розподілу напруги

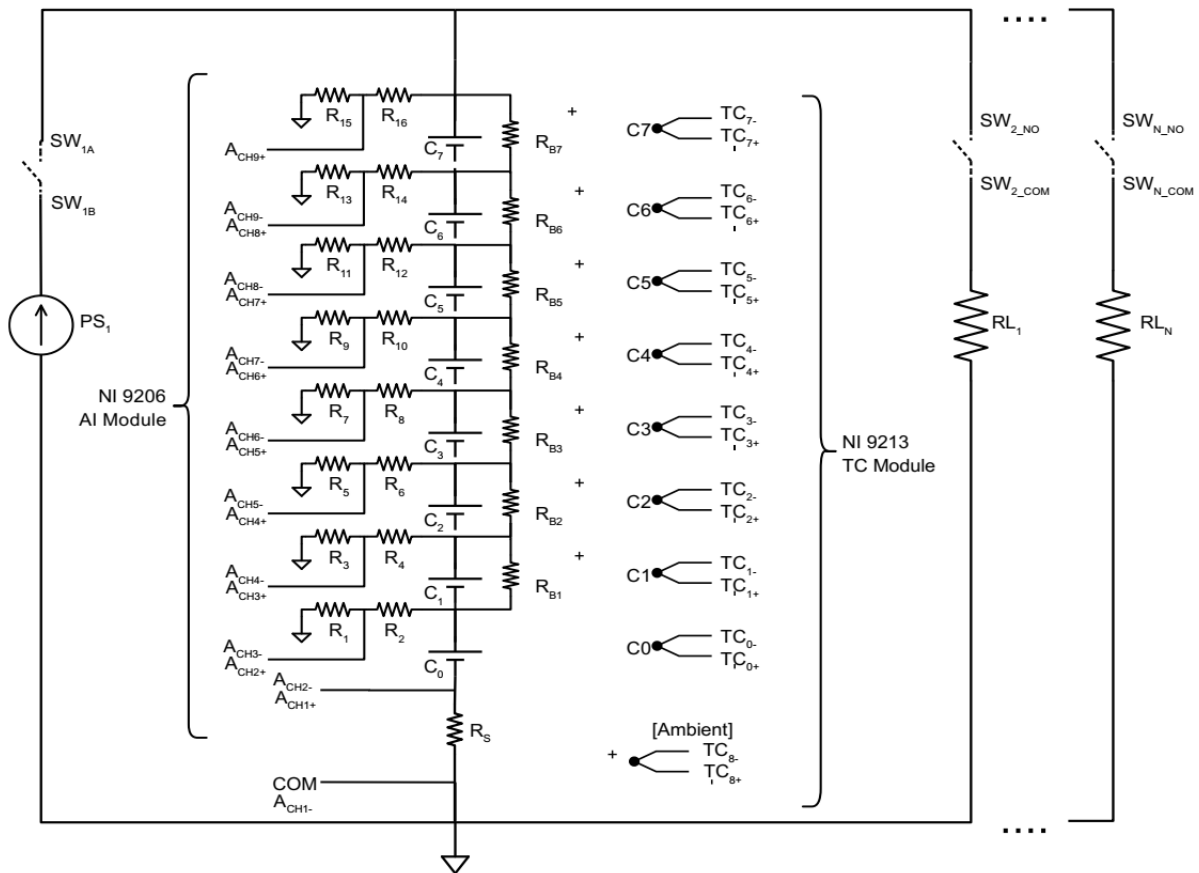


Рисунок 2.14 – Принципова схема для випробування елементів.

#### 2.4.1 Аналіз безпеки експлуатації акумуляторної батареї

Тримачі елементів забезпечують достатній простір для достатнього охолодження елементів і перебування в рекомендованих температурних діапазонах для безпечної експлуатації. При циклічному використанні в межах рекомендованих значень можна уникнути багатьох більш катастрофічних режимів відмови, особливо з комірками ЛЗФ. Однак дослідження показали, що навіть циклічна робота в рекомендованих діапазонах температури і напруги може призвести до виходу з ладу, якщо елементи раніше експлуатувалися в неідеальних умовах, особливо при екстремальному перерозряді.

Було впроваджено систему відстеження елементів, щоб гарантувати, що якщо будь-які елементи були піддані випробуванням за межами безпечних діапазонів, особливо в умовах зниженої напруги, ці елементи згодом позначаються і забороняються до неконтрольованих випробувань.

Вся проводка для вимірювання напруги захищена запобіжниками, щоб не допустити пошкодження вимірювального обладнання. Всі тримачі елементів і

струни елементів також мають плавкі запобіжники, що забезпечує безпеку у випадку короткого замикання. Чітке маркування позитивних і негативних контактів використовується для запобігання підключенню зворотної полярності. При підготовці елементів і використанні приладу завжди дотримувалися обережності відповідно до стандартних операційних процедур, як для лабораторного середовища, так і для випробувального обладнання.

#### **2.4.2 Робота елемента за межами граничних значень напруги**

Криві напруги елементів ЛЗФ характеризуються різким "піком" або "коліном" на кривій напруги при повному заряді (що наближається до 100 %), а також при розряді. Цей профіль заряду показаний на рисунку 2.15 для збалансованої батареї (показано як середнє значення), що демонструє один цикл, між 2,0 В і 4,1 В для збалансованої батареї, при струмі 1,85 А. При роботі в межах максимальних значень напруги, встановлених виробником, батарея не може вийти за межі коліна, в значно нижчі або вищі напруги. Ці екстремальні значення призводять до швидкої деградації ємності, а також можуть призвести до виходу з ладу елемента або до однієї з декількох проблем безпеки.

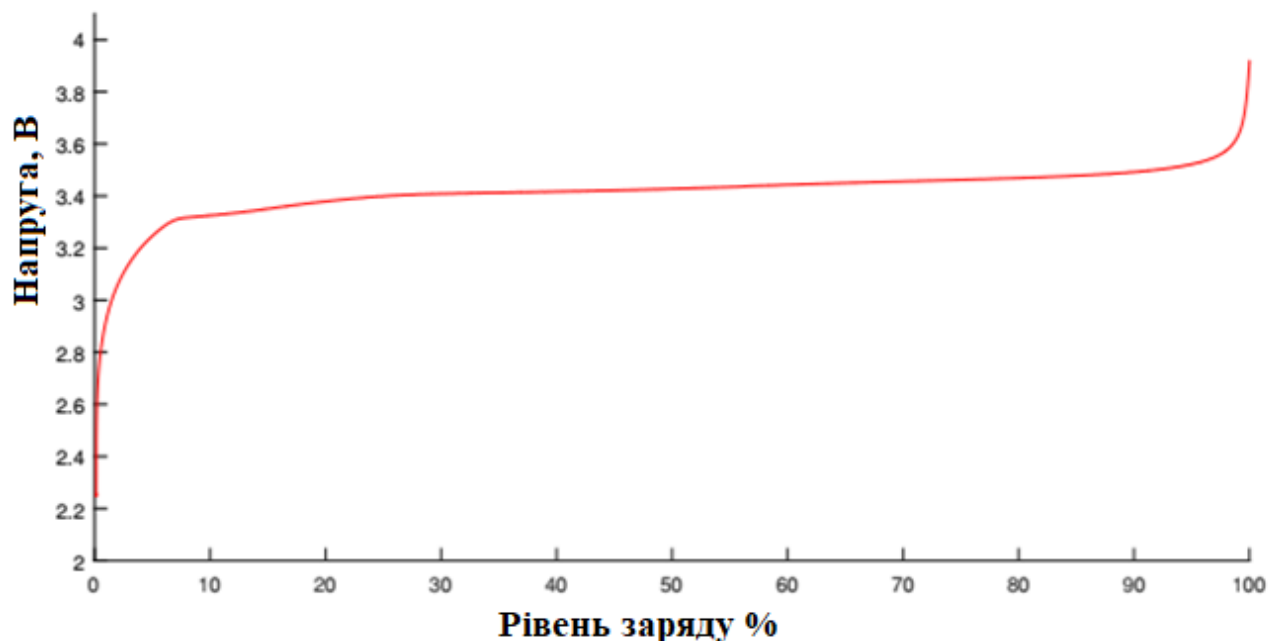


Рисунок 2.15 – Експериментальний графік заряду ЛЗФ.

### 2.4.3 Вимоги до баластного резистора

Через обмеження напруги модуля NI 9206, наявного в лабораторії, для проведення випробувань при нарузі 24 В потрібен був розподільник напруги. Для забезпечення послідовного та збалансованого навантаження на кожен елемент паралельно кожному колу ділянка напруги було додано баластний резистор (RB1 - RB7). Вхідний опір у вимірювальному обладнанні був зареєстрований на рівні  $>10$  ГКОм, що відповідає середній потужності розсіювання при 3,2 В 10 нВт і, таким чином, був проігнорований.

Потужність, що розсіюється ділянкою напруги, становить 7,7 LIW, і є незначною лише для одного елемента. На відміну від вхідного опору, ця потужність розсіювання не є постійною від елемента до елемента. Кожна додаткова комірка відповідає збільшенню струму, що спостерігається в першій комірці послідовності. Ця нерівномірність розсіювання потужності на кожній комірці може посилити або створити проблеми з балансуванням елементів при тривалому тестуванні.

Значення баластного опору, необхідного для кожної елемента, за умови, що кожна комірка, C0, C1, C2 і т.д. знаходиться під однаковою напругою, розраховується за наступною формулою, де  $n$  - номер елемента.

$$R_{Bn} = (R_{VD} \frac{2}{n(n+1)}) \quad (2.1)$$

Результати цього розрахунку наведені в Додатку С. Для розрахунку була використана наступна електрична схема, рисунок 2.16. Схема з розділенням напруги за допомогою операційного підсилювача могла б досягти такого ж результату з незначною різницею в розсіюванні від елемента до елемента.

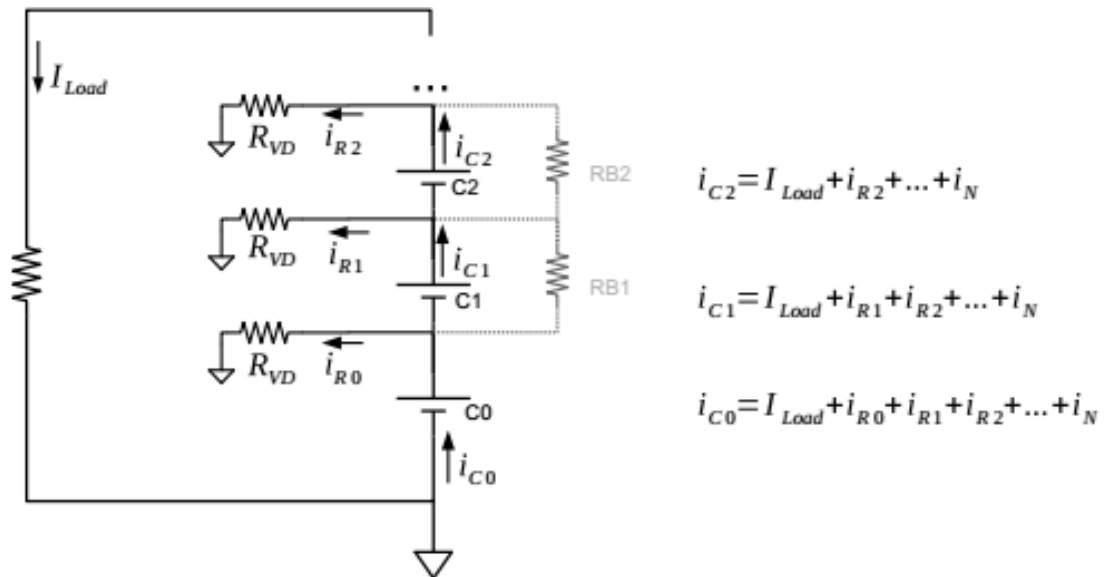


Рисунок 2.16 – Розрахунок баластного опору

#### 2.4.4 Штучне розбалансування акумуляторних батарей

Як зазначалося, елементи можуть надходити з заводу з різним рівнем заряду. Таким чином, частина конструкції упаковки включає в себе початковий етап балансування всіх елементів. З цього моменту підтримка цього балансу є відповідальністю BMS. Тестуючи елементи з деяким початковим дисбалансом, ми сподіваємося краще охарактеризувати поведінку елементів в збірці і відповісти на кілька запитань:

- Як підвищені і знижені напруги, яким піддається елемент, вплинуть на продуктивність?
- Як різні напруги заряду вплинуть на ємність при різних рівнях дисбалансу, а також як це вплине на час заряду, оскільки напруга ПН буде вводитися швидше?
- Скільки існує можливостей для виявлення і компенсації розбалансованих елементів при різних зовнішніх уставках ПС і ПН?
- В який момент ми можемо виявити дисбаланс РЗ і активувати балансування?
- Яке обмеження є найбільш важливим, коли BMS не в змозі компенсувати дисбаланс і комірка виходить з безпечних умов експлуатації?

## **2.4.5 Досягнення постійного дисбалансу**

Для досягнення постійного дисбалансу елементів для кожного тесту, елементи спочатку приводяться в збалансований стан. Спочатку використовується стандартний метод досягнення збалансованої збірки, тобто зарядка конфігурації 1S8P при 1,85 А стабілізованим струмом та стабілізованою напругою 3,65 В, що дозволяє знизити струм до менш ніж 5 мА на елемент. Потім ті ж самі елементи збиралися в конфігурацію 8S1P у випробувальній установці. У LabVIEW була створена проста програма, яка використовує лічильник ампер-годин для відстеження потужності, що виходить з акумулятора. Це вручну встановлено для розсіювання вдвічі більшого дисбалансу, ніж передбачалося. Після того, як потужність була розсіяна, елементи, які будуть виведені з балансу, беруться окремо і заряджаються струмом 1,85 А протягом встановленого часу, щоб досягти дисбалансу, необхідного за рахунок додаткового часу розряду, без ризику того, що ці елементи досягнуть граничної напруги.

## **2.5 Методологія досліджень характеристик акумуляторних батарей**

Для тестування базових характеристик елементів було обрано блок на 24 В, виходячи зі стандартних рівнів напруги елементів для сонячних фотоелектричних систем. Для маломасштабного тесту, щоб зменшити розмір компонентів і потужність заряду і розряду, з наявних елементів був сконструйований найменший за розміром блок. Найменший за розміром блок складається з одного паралельного елемента і восьми послідовно з'єднаних елементів для досягнення необхідного рівня напруги. Ця послідовність з восьми елементів також відома як пакет 8S1P (для восьми послідовних і одного паралельного елемента). Ці елементи також можуть бути застосовані в запланованому 6 В модулі, виходячи з їх фізичного розміру і форм-фактора; їх масштабованість і простий процес виробництва призвели до того, що вони стали популярними для створення пакетів як серед аматорів, так і серед промислових виробників. Під час тестування елементи, що представляли собою номінальну батарею 24 В ємністю 3,7 А\*год (94,72 Вт\*год), були оснащені



індивідуальними датчиками напруги і температури, а також вимірниками струму для батареї через послідовно підключений шунтуючий резистор. Батареї заряджалися за стандартною схемою заряджання постійним струмом/постійною напругою (ПС/ПН) при граничному струмі 1,85 А, що відповідає коефіцієнту  $C/2$  для елементів, та абсолютному граничному значенні напруги 4,1 В, що відповідає рекомендованим значенням. Тестування проводилося з використанням елементів Energy (ЛЗФ26650Е-3700-ТВ), ємністю 3,7 А\*год (11,84 Вт\*год) (пізніше оновлених до моделі ЛЗФ 26650Е-3800-21, ємністю 3,8 А\*год для остаточного прототипу).

Для того, щоб краще охарактеризувати продуктивність батареї в нерегульованому циклічному режимі, а також під час моніторингу запланованої BMS, дуже важливо розробити план випробувань, який би повторювався і був застосовний до запланованого 6 В модуля (заміна свинцево-кислотних батарей). Виходячи з початкових очікувань щодо продуктивності батареї, цей план випробувань мав на меті продемонструвати, що елементи будуть суттєво відрізнятися один від одного, якщо ними не керувати, що негативно вплине на доступну ємність батареї та довгостроковий стан елементів. При циклічній зміні заданих значень також передбачалося точно вказати, як саме розходяться батареї, можливо, виявити варіації залежно від положення батареї або факторів навколишнього середовища, з наміром врахувати цю поведінку в запланованій системі BMS. Однак поведінка елементів виявилася набагато більш послідовною, ніж очікувалося, і майже не було виявлено початкового дисбалансу або різниці в доступній ємності в елементах, отриманих з заводу. Випробування елементів з вичерпаним терміном служби та більш тривалі випробування можуть виявити справжній масштаб будь-яких виробничих невідповідностей, оскільки найменші відхилення у старінні ускладнюються протягом усього терміну служби батареї. Однак цей аналіз виходить за рамки цього проекту. Якщо не вказано інше, елементи спочатку піддавалися циклу балансування при отриманні від виробника. Цей цикл заряду постійною напругою привів елементи в конфігурації 1S8P до 3,65 В, що дозволило знизити

струм до менш ніж 5 мА/елемент. Це гарантує, що всі елементи починають тестування з однаковим рівнем заряду.

## **2.6 Висновки до розділу**

Розуміння характеристик елемента має вирішальне значення для розробки ефективної стратегії як для балансування, так і для захисту елемента. В даному розділі було обрано елементи для укумуляторної батареї, а також сконструйовано пристрій для циклічного заряду на основі реєстратора даних NI-cRIO. Завдяки узгодженості елементів при циклуванні, відносно один одного, зміни рівня заряду від елемента до елемента не спостерігалися. Крім того, розуміння поведінки елемента використовується для розробки моделі в симуляторі схеми PSIM, яка використовується для оцінки різних схем керування резистивним балансиром. Цей резистивний балансир керується лише інформацією про напругу від елемента, до якої він приєднаний, після чого він може розсіювати енергію у вигляді тепла для підтримки балансу елементів в середовищі моделювання.

### 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1. Результати тестування штучного дисбалансу

Початкове тестування було проведено для збалансованої збірки шляхом першого заряду при 1,85 А постійного струму і 29,2 В змінного струму, що дозволило зменшити струм до менш ніж 5 мА/елемент. Це початкове тестування (Рис. 3.1) показало вражаючі результати щодо стабільності виробничого процесу. На більшій частині кривої заряду напруга залишалася в межах 10 мВ, і лише на кінцях кривої почала суттєво розходитися, розподіляючись між 3,64 В і 3,67 В на висоті РЗ, і 2 В і 2,48 В на нижньому кінці РЗ. Це навіть більш вражаюче, ніж початкові очікування щодо консистентності цих елементів. Це підтверджує, що реальна проблема виникає на більш пізніх етапах життєвого циклу елементів, коли один елемент може зменшити ємність, прийняти менший заряд або знизити ефективність раніше, ніж інші, і, таким чином, створити дисбаланс. Все більш послідовні і точні технології виробництва, можливо, зменшили тяжкість початкового дисбалансу, однак через малу кількість протестованих на сьогоднішній день елементів, поширеність початкової різниці в ємності цих елементів не може бути точно визначена.

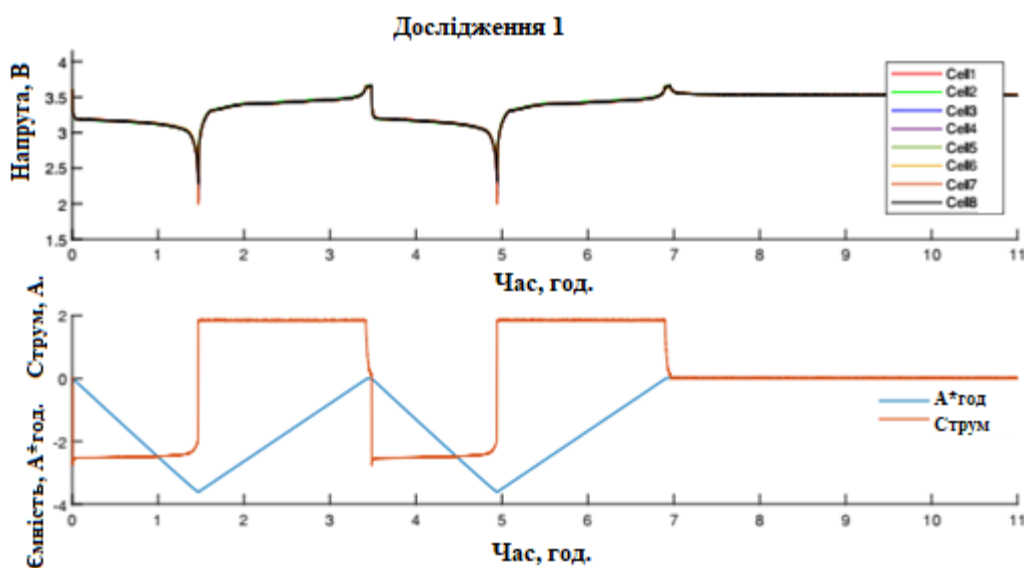


Рисунок 3.1 – Графік дослідження 1: Збалансована батарея, два цикли, струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 27,2 В, відключення при 0,1 А під час ПН.

### 3.1.1 Вплив дисбалансу на послідовно з'єднані елементи

Подальші випробування призначені для визначення впливу дисбалансу елементів на батарею без апаратного забезпечення для відновлення балансу. Це виконується при різних дисбалансах і різних напругах заряду, щоб краще зрозуміти кілька факторів: балансна потужність, необхідна для надійної роботи батареї, кількість ємності, втраченої при більш низьких напругах, і додатковий час заряду, необхідний для досягнення 100% доступного рівня заряду, який є нижчим для незбалансованих батарей, через зменшену в результаті цього ємність. Початкове тестування дисбалансу +2,5% може розрядити 3,52 А\*год після зарядки до 29,2 В, з вихідним струмом 0,1 А.

Це порівняно зі збалансованим блоком при 29,2 В і 0,1 А на виході, який зміг витягнути 3,62 А\*год.. Подальше тестування при 0,1 А на виході, 28,2 В і 27,2 В, яке показало 3,54 А\*год. і 3,51 А\*год. відповідно. Результати цих тестів показані графічно на рисунках 3.1 – 3.4 нижче.

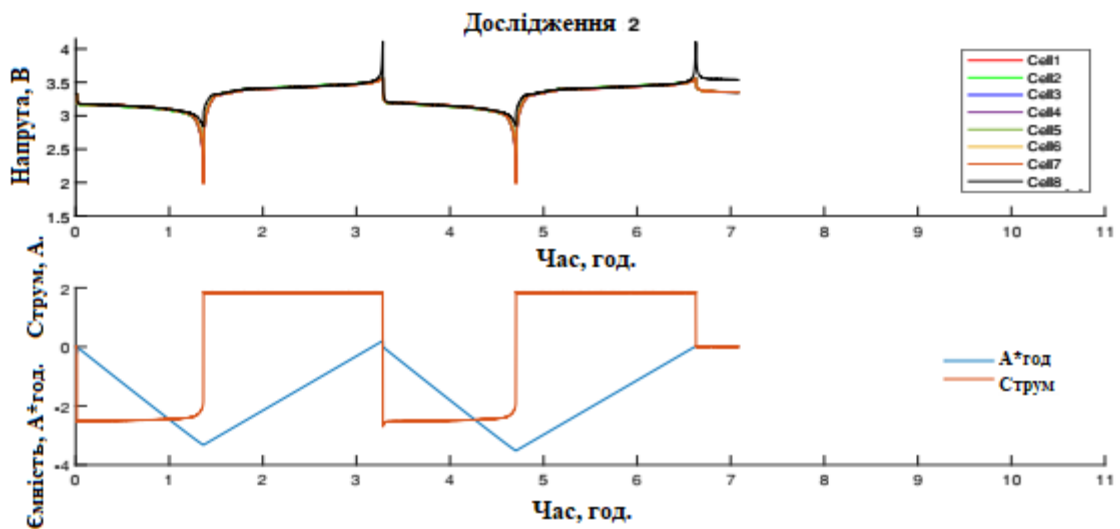


Рисунок 3.2 – Дослідження 2: Елемент штучно розбалансований на 2,5%(+) (92,5 мА\*год), струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 29,2 В, цикл завершується достроково, коли розбалансований елемент досягає верхнього рівня напруги.

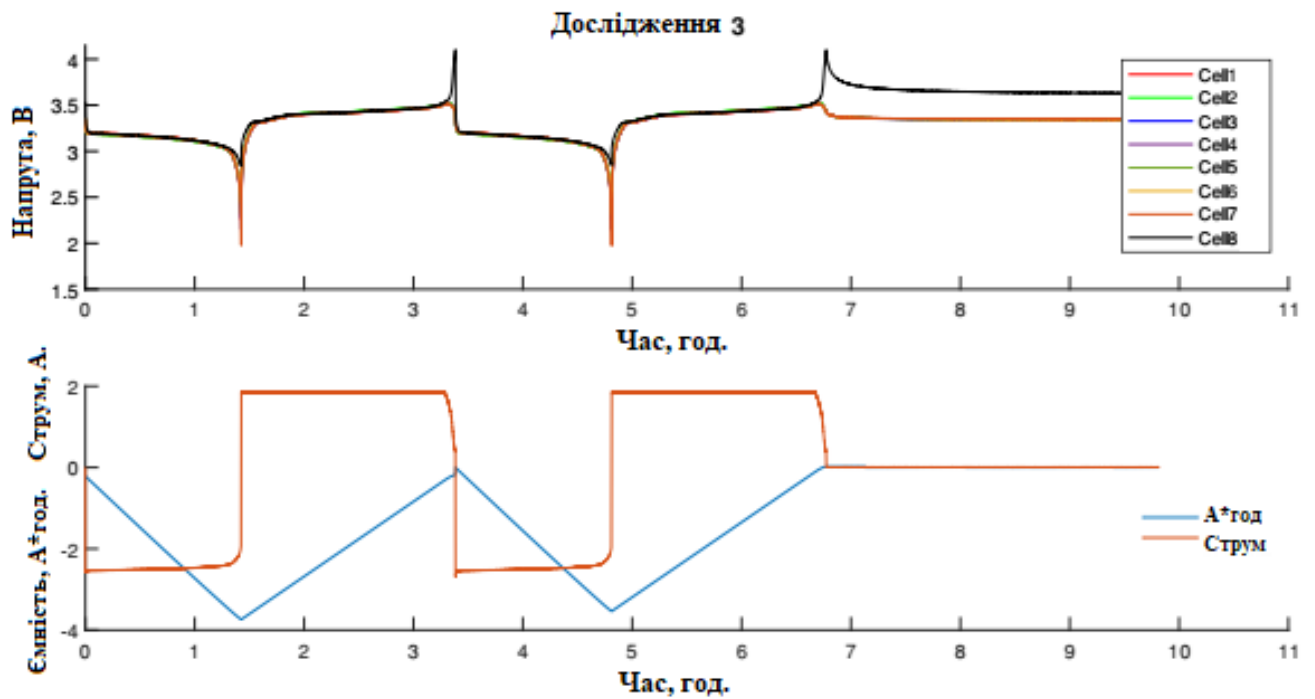


Рисунок 3.3 – Дослідження 3: Елемент штучно виведений з рівноваги на 2,5%(+) (92,5 мА\*год), струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 28,2 В, цикл припиняється раніше, ніж окремий елемент досягає верхнього рівня напруги.

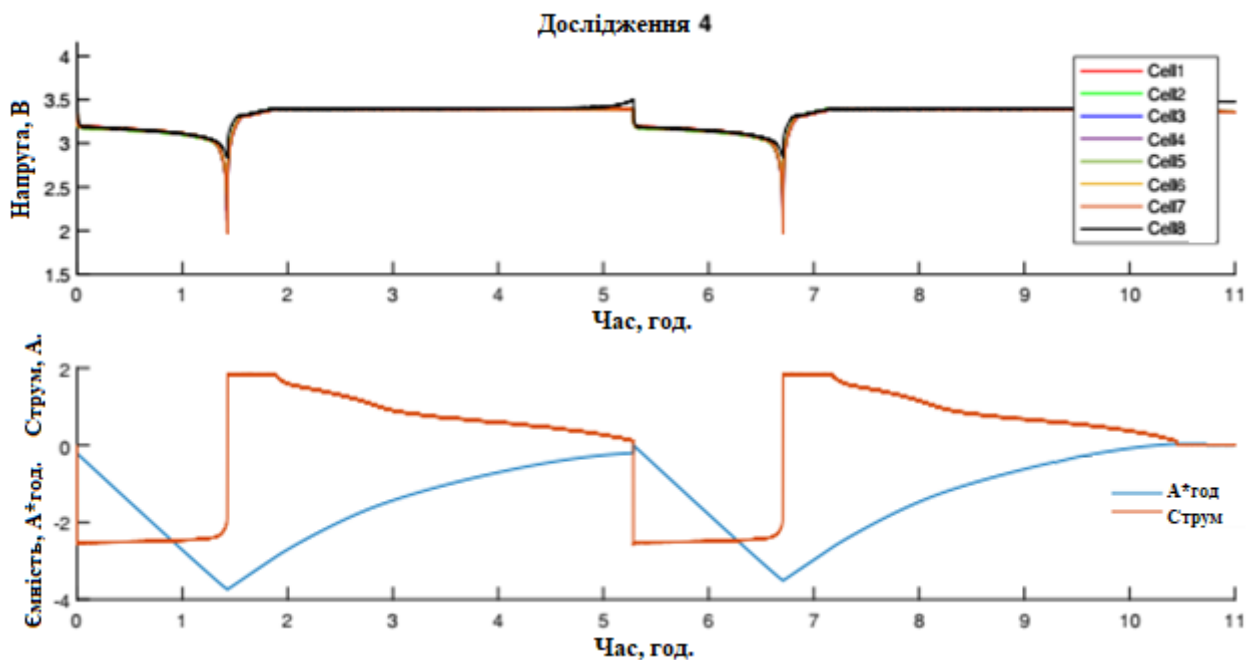


Рисунок 3.4 – Дослідження 4: Елемент штучно виведений з рівноваги на 2,5%(+) (92,5 мА\*год), струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 27,2 В, циклічно повторюється, коли струм досягає 0,1 А до верхньої межі заряду

Виходячи з цих початкових тестів, здається, що ємність акумуляторів зменшується тільки через пов'язаний з цим дисбаланс, а не через значення заряду напруги. Однак, слід зазначити, що нижчі напруги заряду означають, що елементи потребують більше часу для заряду; у 2,00 рази більше для значення напруги 27,2 В, порівняно із значенням 29,2 В. Крім того, це демонструє, що більша тривалість заряду не є ефективною для збільшення доступної ємності акумуляторів, і не спостерігається значної різниці між заданими значеннями напруги. Однак є додаткова перевага нижчої напруги заряду: більше часу для виявлення дисбалансу під час заряду і подальшого балансування елементів. У схемах заряду з більш високою напругою заряду, що використовують тільки напругу і струм елемента в якості індикаторів, розбалансований елемент показує однакову напругу протягом більшої частини свого стану заряду, а потім швидко відхиляється і входить в коліно. Це призвело до того, що ці елементи досягли верхнього рівня напруги як в умовах заряду 28,2 В, так і в умовах заряду при 29,2 В.

### **3.1.2 Вплив значення напруги заряду на акумуляторну батарею**

Подальші випробування проводилися при найнижчій початковій напрузі заряду, щоб визначити, чи вплине більш низька напруга на ефективну ємність. Тестування одного елемента з 5% (не показано) і 10% розбалансуванням показало зниження ємності батареї до 3,43 А/год і 3,33 А/год, відповідно. Воно також продемонструвало, що при значенні заряду 27,2 В елементи не досягають значення верхнього рівня напруги, навіть якщо один елемент розбалансований на 10% і без керування акумулятором. Випробування для 10% розбалансованого елемента показано нижче, на рисунку 3.5.

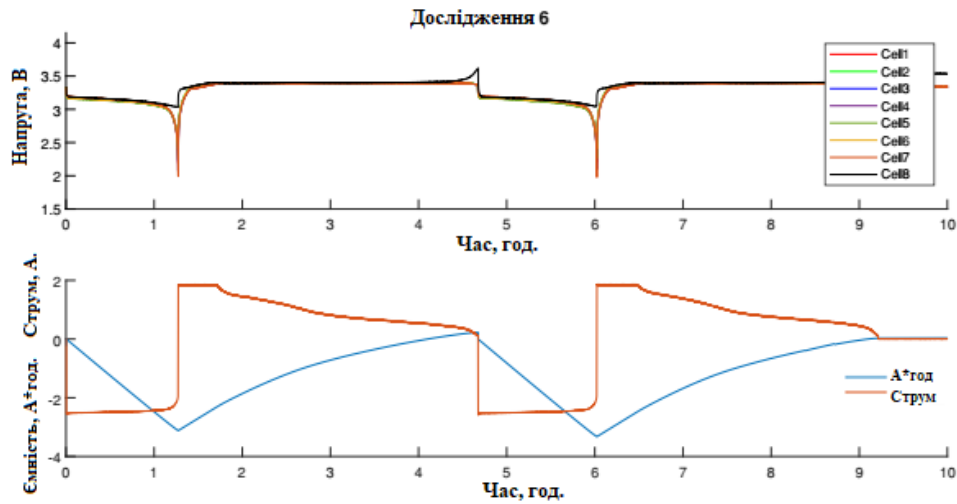


Рисунок 3.5 – Дослідження 6: Елемент розбалансований на 10%(+) (370 мА\*год), струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 27,2 В, циклічно, циклічно повторюється, коли струм досягає 0,1 А до верхньої межі заряду

Потім тести були повторені, досягнувши аналогічних результатів при різних рівнях дисбалансу для елементів, що були нижчими за середній показник у збірці. У тесті 7 одна комірка має дисбаланс на 2,5% нижче середнього показника рівня заряду у збірці, як показано на рисунку 3.6. Варто також відзначити, що дисбаланс на 2,5%, як нижче, так і вище середнього значення, призвів до ефективної ємності 3,51 А\*год у кожному тесті, що ще раз підтверджує, що ефективна ємність залежить від дисбалансу.

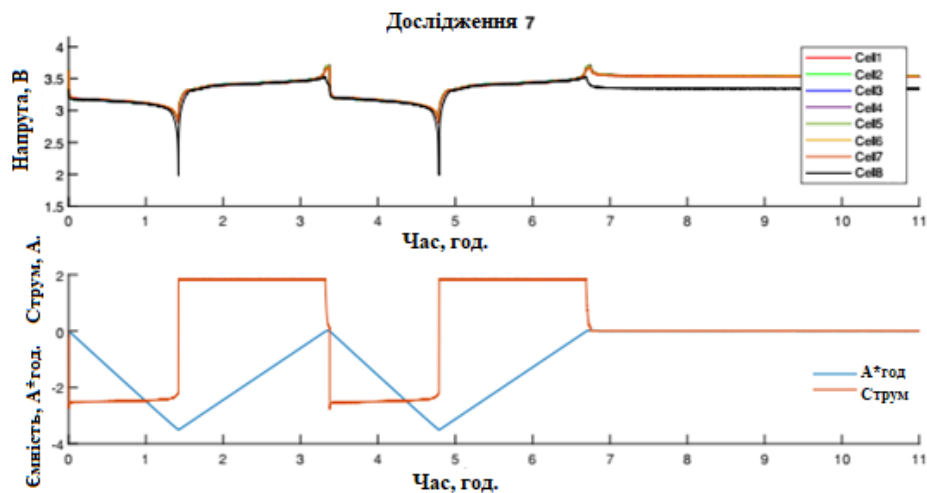


Рисунок 3.6 – Дослідження 7: Елемент 2,5% (-) (92,5 мА\*год) розбалансований, струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 29,2 В, циклічно повторюється, коли струм досягає 0,1 А до верхньої межі заряду.

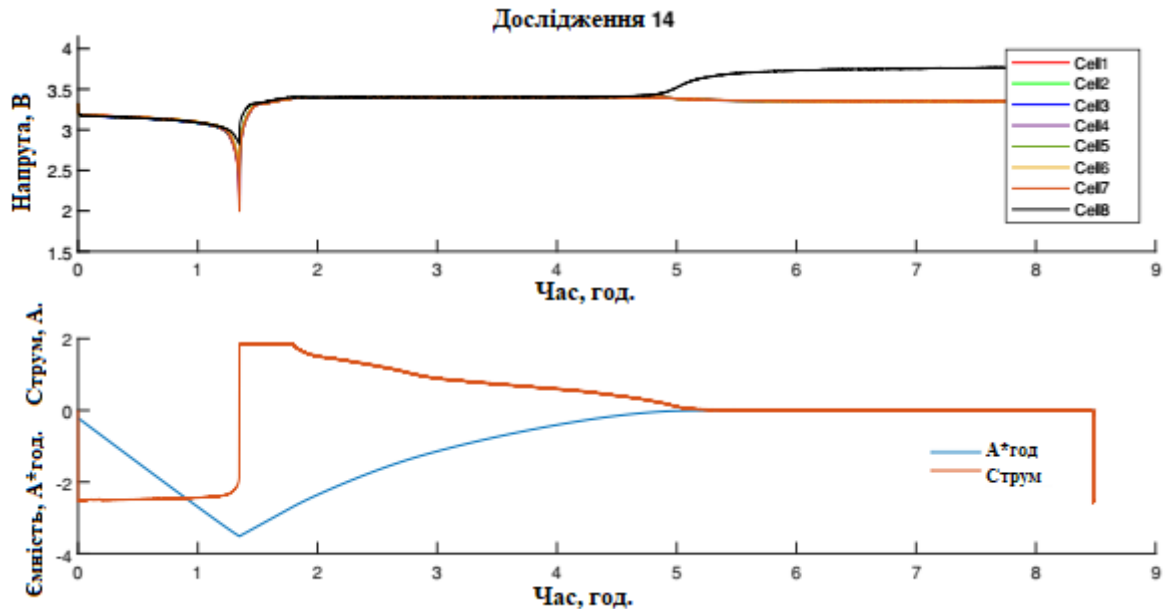


Рисунок 3.7 – Дисбаланс одного елемента 2,5%(+), струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 27,2 В, зарядка до верхньої межі напруги (6 годин, показано один цикл)

Подальші випробування були проведені з тимчасовим звуженням струму під час заряджання постійною напругою, щоб визначити, чи зможуть елементи збільшити свою ефективну ємність за рахунок додаткового часу заряджання. Це не вплинуло на випробування при 29,2 В і 28,2 В (випробування 12 і 13), оскільки ці збірки досягли верхнього рівня напруги для елемента, що вийшла з рівноваги, до завершення заряджання. Випробування 14 при напрузі 27,2 В показало мінімальне збільшення ємності збірки за додатковий час 3,52 А\*год для випробування протягом певного періоду проти 3,51 А\*год для скороченого випробування, як показано на попередній сторінці на рисунку 3.7. Подальші випробування для різних рівнів дисбалансу показали аналогічні результати: збільшення часу заряду без збільшення ефективної ємності при 5% і 10% дисбалансі (випробування 15, 16).

У тестах 16-20 один елемент був розбалансований на 10% по відношенню до решти. Тестування проводилося з однаковим дисбалансом для ряду напруг, порівнюючи час заряду і ємність в ампер-годинах батареї після заряду. Порівняння ємності та часу заряду для різних значень напруги показано на рисунку 3.8.



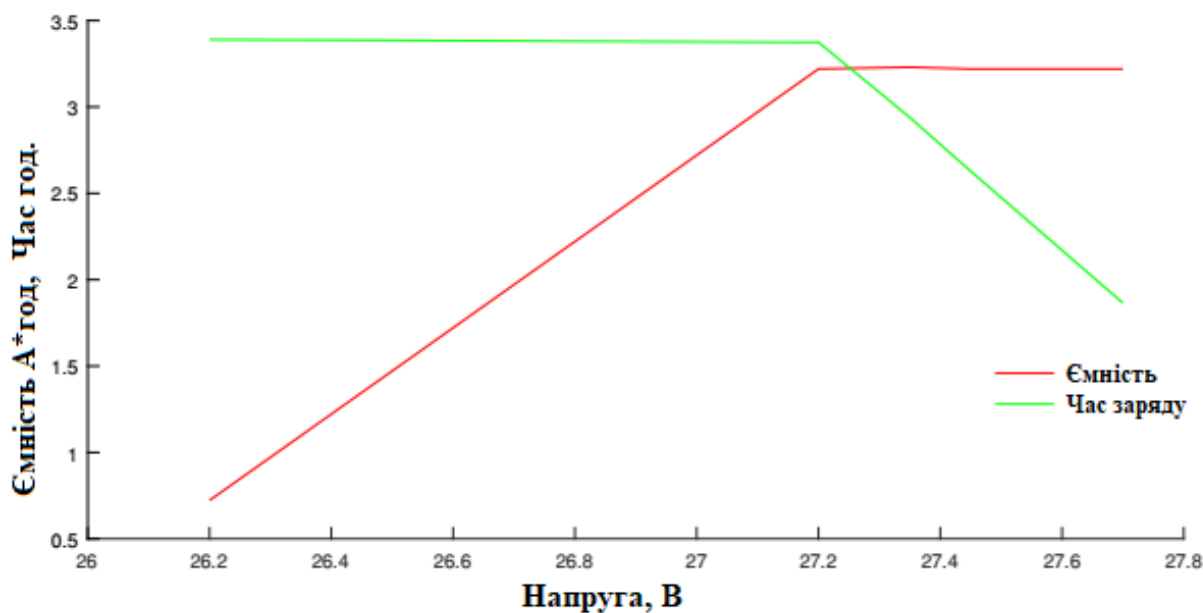


Рисунок 3.8. – Час заряду і подальша розрядна ємність елементів, заряджених при 1,85 А (С/2) і розряджених приблизно 2,5 А, використовувалися різні напруги верхньої межі і підтримувався 10%-ний дисбаланс одного елемента.

Це тестування продемонструвало стабільну зарядку ємності збірки при більш високих напругах (які вважаються обґрунтованими на основі номінальної напруги елемента), а також подальше скорочення часу заряду. Виявляється, що ці обмеження напруги не мають суттєвого негативного впливу на ємність акумулятора, доки не буде обрано достатньо низьку напругу, яка спричиняє зменшення ефективної ємності.

### 3.1.3 Дисбалансу декількох елементів акумуляторної батареї

Очікувалося, що найвищий ризик спрацьовування верхнього рівня напруги елемента був під час заряджання лише з одним елементом, що вийшов з рівноваги у збірці. Подальше тестування (тести 21-31) з двома та чотирма елементами, що вийшли з рівноваги, підтвердило цю підозру. Ці тести були більш толерантними до дисбалансу, ніж збірки з одним елементом, що вийшов з рівноваги. Ці результати можна побачити нижче на рисунку 3.9 та рисунку 3.10, з двома та чотирма розбалансованими на 2,5% батареями, зарядженими при напрузі 29,2 В, тести 21 та 24, відповідно.

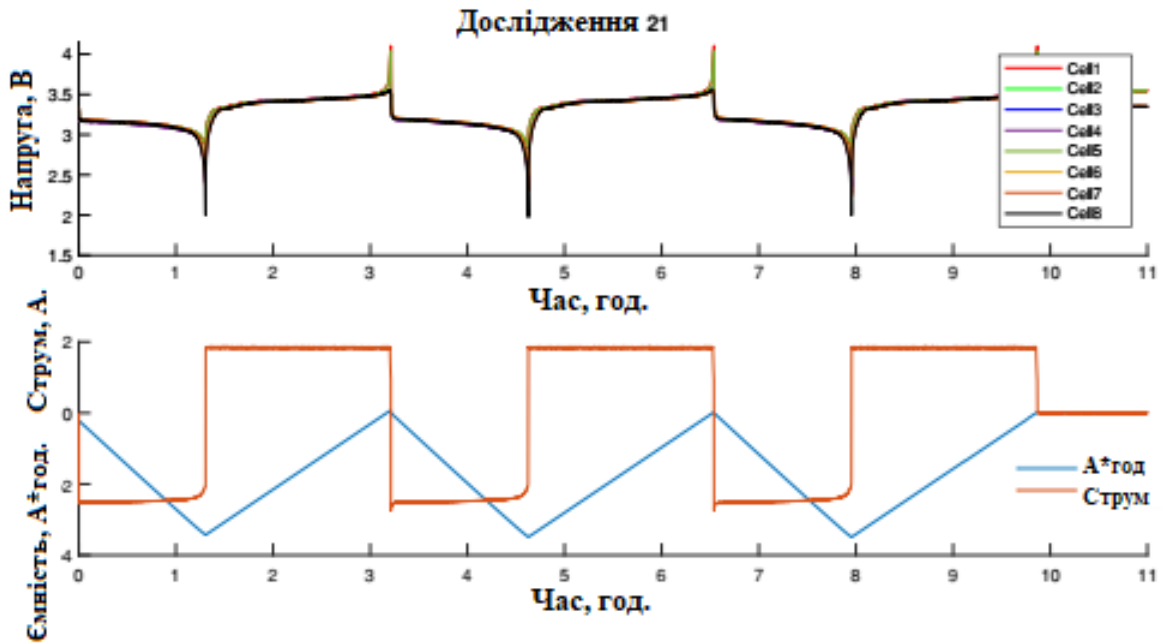


Рисунок 3.9 – Дослідження 21: Двоелементна батарея 10% (370 мА\*год) розбалансована, струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 29,2 В, часовий ПН.

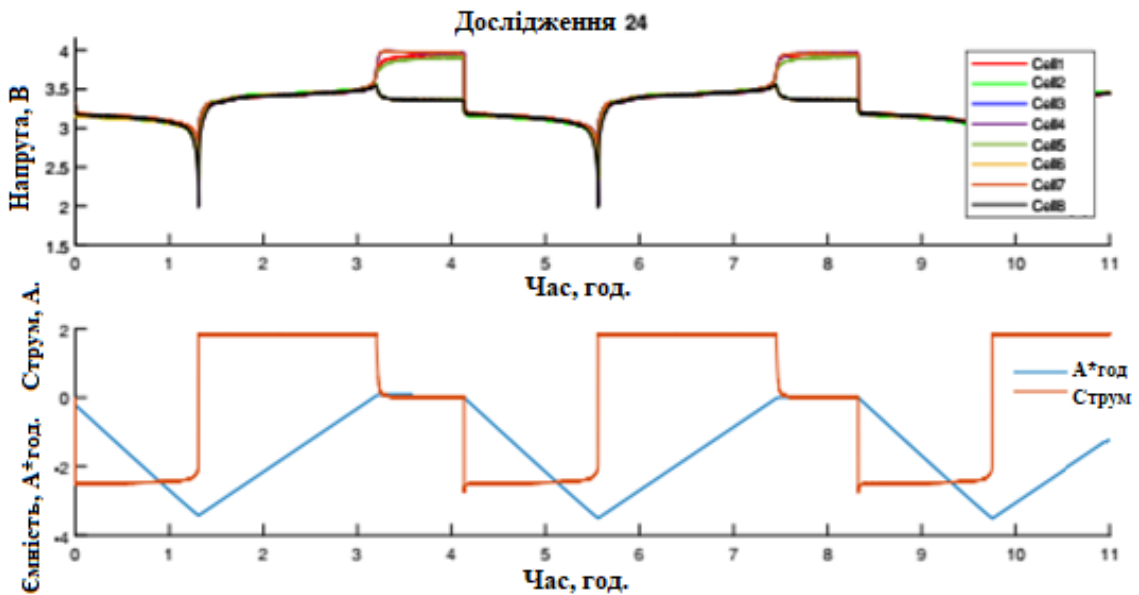


Рисунок 3.10 – Дослідження 24: Чотириелементна батарея 10% (370 мА\*год) розбалансована, струм заряду: 1,85 А, напруга заряду: 29,2 В, часовий ПН.

### 3.1.4 Результати дослідження системи баластування

Після тестування цих конфігурацій без балансування було побудовано просту установку, яка імітує метод активного балансування за допомогою

шунтуючого резистора. Під керуванням LabVIEW одна комірка була підключена паралельно з резистором 68 Ом, який розсіює 53 мА при 3,6 В. Це значення було обрано, оскільки воно буде точно масштабуватися до конфігурації 2S110P, застосовної до майбутньої конструкції 6 В, яка включає в себе 20 Вт балансуєчої потужності на кожний "елемент" 2S110P. Конфігурація 2S110P пізніше була змінена на 2S59P через зміну форм-фактора з L-16 на GC-2. Пізніше вона була замінена на 1S59P; проте, підтвердження принципу залишається корисним для цього меншого розміру батареї. Схема керування використовує прямий датчик напруги, який зчитує напругу елемента, і застосовує шунтовий опір, коли напруга елемента перевищує 3,48 В, обраний на основі того, що є початком колінної поведінки елемента. Обраний дисбаланс склав 20%; обраний, оскільки він відповідає 80% початкової ємності батареї, що означає кінець терміну служби для багатьох застосувань. Результати першого циклу (Рис. 3.10) показали, що резистор може компенсувати більшу частину дисбалансу елемента, шунтуючи струм заряду в повному обсязі, як тільки досягається межа напруги, як і передбачалося. При цьому відносно низькому рівні потужності і високому рівні дисбалансу процес тривав приблизно 13 годин.

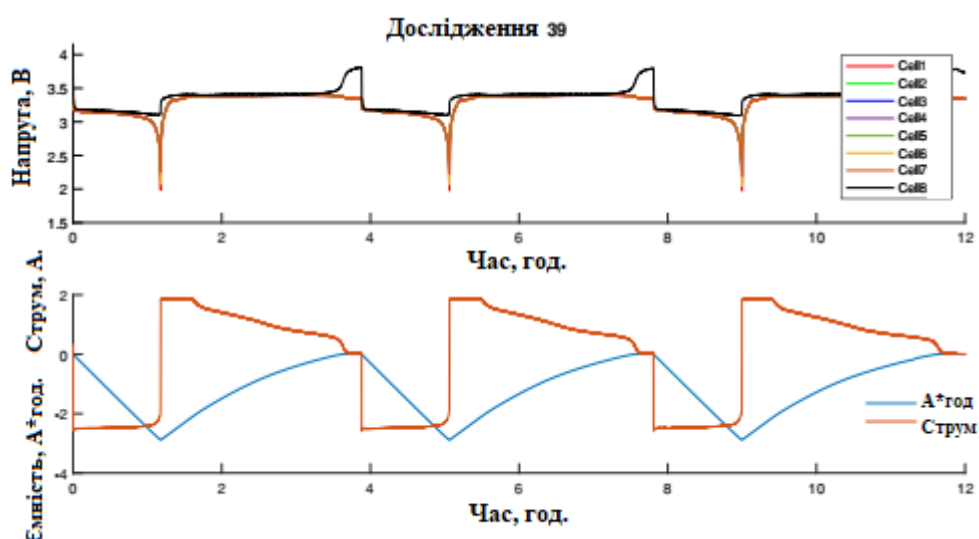


Рисунок 3.10 – Дослідження 39: Результати характеристики елемента з одним штучно розбалансованим елементом на 20%(+), 10-хвилинний заряд постійною напругою з таймером, шунтуючий опір 32 кОм, активний, якщо

напруга елемента перевищує 3,4 В., елемент не досягає верхнього рівня напруги, незважаючи на значний дисбаланс.

Випробування 36 супроводжувалося невеликою зміною значення напруги шунтування до 3,4 В, що становить 12,5% від запланованої напруги заряду; 27,2 В, що продемонструвало аналогічні результати. Тільки перший цикл цього випробування, номер 37, показаний на рисунку 3.11, нижче.

Ці результати демонструють теоретичну толерантність шунтуючого опору такого розміру до розбалансованого елемента; він зможе усунути пов'язаний з цим дисбаланс протягом приблизно 13 годин балансування. Крім того, напруга не буде ризикувати спрацьовуванням високовольтного вимикача для встановленої напруги. Це дало уявлення про балансувальне обладнання, необхідне для утримання елементів у стабільних межах у найгіршому випадку дисбалансу однієї елемента для збірки.

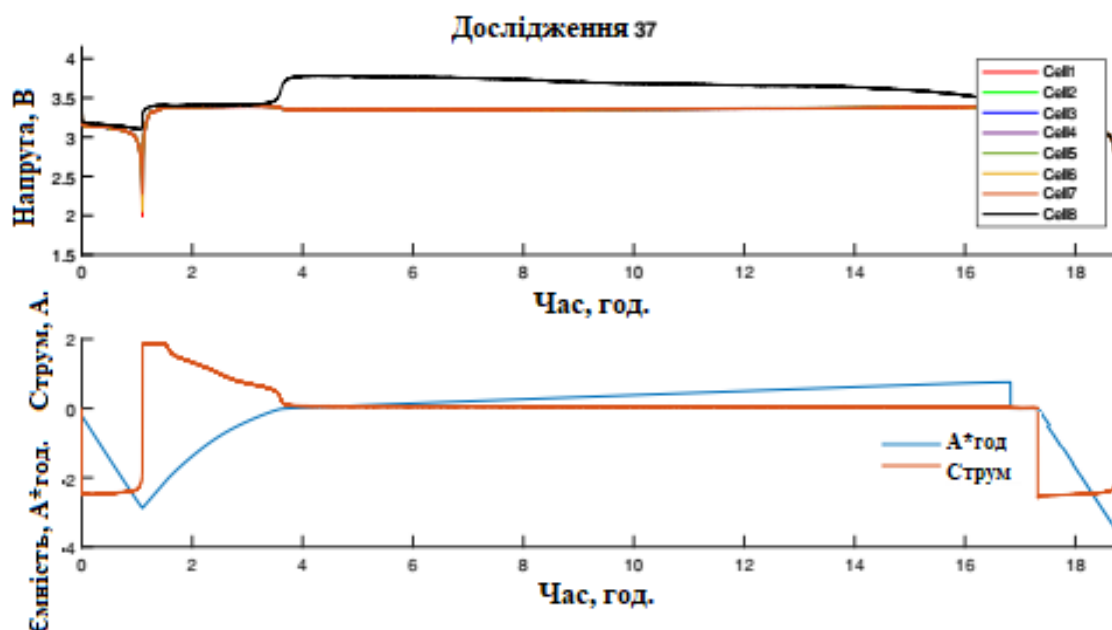


Рисунок 3.11 – Дослідження 37: Результати характеристики елемента з одним елементом, що на 20% вийшов з рівноваги, заряд за часом постійною напругою, з опором шунта 68 кОм, активний, якщо напруга елемента перевищує 3,4 В

### 3.2 Оцінка впливу результатів досліджень на контроль заряду батареї

У попередньому тестуванні з використанням конфігурації 8S1P початкові характеристики виявили характерну поведінку елементів ЛЗФ. Найбільш корисною інформацією з цієї характеристики є поведінка напруги в екстремальних точках рівня заряду. Елементи ЛЗФ входять в криву, де напруга починає швидко зменшуватися (в розряді) і збільшуватися (в заряді). У цій поведінці крива збільшення при високих значеннях рівня заряду є більш сильним, ніж при низьких значеннях рівня заряду. Елементи не відчувають істотної зміни напруги для середніх значень їх рівня заряду, як показано на рисунку 2.12. Також було визначено, що вплив різних напруг полягав лише в загальному часі заряду і толерантності до дисбалансу. Зміна цієї змінної не мала суттєвого впливу на ефективну ємність збірки, доки не було використано значно нижчу уставку напруги, що різко зменшило ємність. Було підтверджено, що один елемент, що вийшов з рівноваги (з більш високим рівнем заряду, ніж решта), представляє найгірший сценарій, коли для оцінки завершення заряду використовуються значення зовнішньої напруги.

Через відносно плоску криву напруги як при розряді, так і при заряді елементів ЛЗФ (невелика різниця між напругою елемента при високому і низькому РЗ), для BMS важко оцінити РЗ в діапазоні 20-80% РЗ на основі індивідуального вимірювання напруги елемента. Це обмеження на апаратне забезпечення для вимірювання означає, що критично важливо розробити або надійний метод оцінки РЗ для елементів *in situ*, або розглядати тільки РЗ в діапазоні, який легко вимірюється на основі напруги. Для того, щоб впровадити міру РЗ, яка може точно оцінити РЗ від 20-80%, необхідно використовувати такий метод, як інтеграція ампер-годин, який може точно врахувати фактори старіння елементів у надійний спосіб на основі складного режиму роботи елементів, що обговорюється далі нижче. В якості альтернативи, розгляд тільки екстремальних значень напруги елемента вимагає тільки методу балансування елемента, який є достатньо швидким для відновлення балансу елементів, що вийшли з рівноваги, до того, як вони досягнуть верхнього рівня напруги.

Враховуючи, що одноелементівна BMS не може взаємодіяти з іншими в ланцюзі, немає необхідності вимірювати РЗ за винятком цих екстремальних значень.

З точки зору надійної оцінки РЗ, різні автори запропонували методи, засновані на кореляції між напруга холостого ходу елемента та її станом заряду, часто додаючи інші параметри, щоб спробувати досягти надійного вимірювання. Однак, труднощі виникають при вимірюванні напруга холостого ходу для практичних цілей через гістерезис при вимірюванні, коли навантаження знімається з елемента. Елементові може знадобитися більше 30 хвилин, щоб отримати точне значення напруга холостого ходу, коли вона виведена з режиму заряду або розряду. Ці та інші проблеми повинні бути компенсовані в обраному алгоритмі оцінки РЗ. Складність розробки такої системи описана в роботі Huria та ін.

Вищевказані рішення, однак, не дуже добре підходять для батареї, призначеної для роботи зі свинцево-кислотними акумуляторами, оскільки вона буде піддаватися струмам заряду, що застосовуються до цих акумуляторів. Крім того, додаткова складність цих методів виявлення є небажаною з міркувань складності, тому BMS повинна мати можливість функціонувати на основі напруги на клеммах елемента. З метою імітації газовиділення свинцево-кислотного елемента, це може бути зроблено на верхньому кінці РЗ шляхом витікання додаткової ємності елемента, що вийшов з рівноваги, як було продемонстровано попередніми результатами випробувань, зокрема, випробуваннями 36 і 37.

Зовнішня уставка 27,2 В являє собою напругу заряду, яка не призведе до того, що 20% розбалансованих окремих елементів перевищать межу відключення високої напруги 4,1 В у некерованому пакеті. Це значення ґрунтується на тому, що термін служби елементів "закінчується" на рівні 80% від початкової ємності. Таким чином, якщо елемент, що відпрацював свій ресурс, об'єднати з іншими елементами, це компенсує всі дисбаланси елементів до кінця терміну служби збірки. У випадку з батареєю Rolls/Surrette S-290 6 В [58], діапазон напруги вирівнювання, виміряний у вольтах на елемент (ВНЕ),

становить 2,58 Вольт на элемент - 2,67 Вольт на элемент для триелементної батареї з номінальною напругою 6 В, що відповідає 3,87 - 4,005 Вольт на элемент для двоелементного еквівалента ЛЗФ. Маючи ці знання, ланцюжок батарей можна налаштувати двома способами. По-перше, на основі простого розрахунку, пов'язаного з кількістю літєвих елементів в ланцюжку з кількістю свинцево-кислотних елементів. Користувач може зменшити їх вирівнюючу напругу, якщо додасть літєву батарею, і вона буде розсіювати струм при більш низькій напрузі, розсіюючи меншу потужність. Слід рекомендувати, щоб значення зовнішнього зарядного пристрою для напруги були змінені при додаванні літєвої заміни. По-друге, вони можуть залишити задані значення як є, і літєва батарея повинна буде враховувати додаткову потужність при більш високій напрузі батареї, щоб не пошкодити інші елементи, підштовхуючи їх до більш високої напруги.

Низьковольтне відсікання повинно бути встановлене на 21 В, 3 В/елемент в еквіваленті. Це повинно запобігти спрацьовуванню відключення при низькій напрузі окремого елемента при дисбалансі до -10%, при цьому втрачається лише 150 мАг ємності при дисбалансі 2,5%, або приблизно 60 мА\*год при збалансованому акумуляторі. Це також покращує продуктивність низьковольтного роз'єднувача.

З результатів характеристики елементів, кілька атрибутів незбалансованої батареї є найбільш важливими. По-перше, основним негативним впливом, окрім ризику надлишкового або недостатнього заряду (який повинен окремо контролюватися апаратними засобами захисту), є втрата ємності незбалансованого блоку. По-друге, основним фактором, що визначає, чи перейде елемент в небезпечний стан, є значення напруги, як на заряді, так і на розряді, які визначають, наскільки сильно напруга елемента здатна відхилитися. По-третє, зменшення значення напруги елемента збільшує час заряду, хоча і не радикально.

### 3.3 Порівняння результатів моделювання з експериментальними

У "найгіршому" сценарії балансу (одна комірка на РЗ вище решти пачки) BMS працює як очікувалося, за винятком пилкоподібної форми, що присутня. На рис. 3.12 показані результати експерименту, а на рис. 3.13 - змодельовані криві заряду і розряду. Хоча знижена швидкість через пилкоподібну форму очевидна, загальна форма подібна до змодельованих результатів. При тестуванні з послідовним виходом було виявлено, що пилкоподібна форма балансу була активна половину часу для цього тесту, оскільки вона коливалася від високої потужності до низької (10% від високої потужності) кожного разу. Це можна порівняти з двома малюнками нижче, які показують змодельовані результати, що завершують фазу балансу високої потужності за 2 цикли замість 4 циклів для практичного випробування.

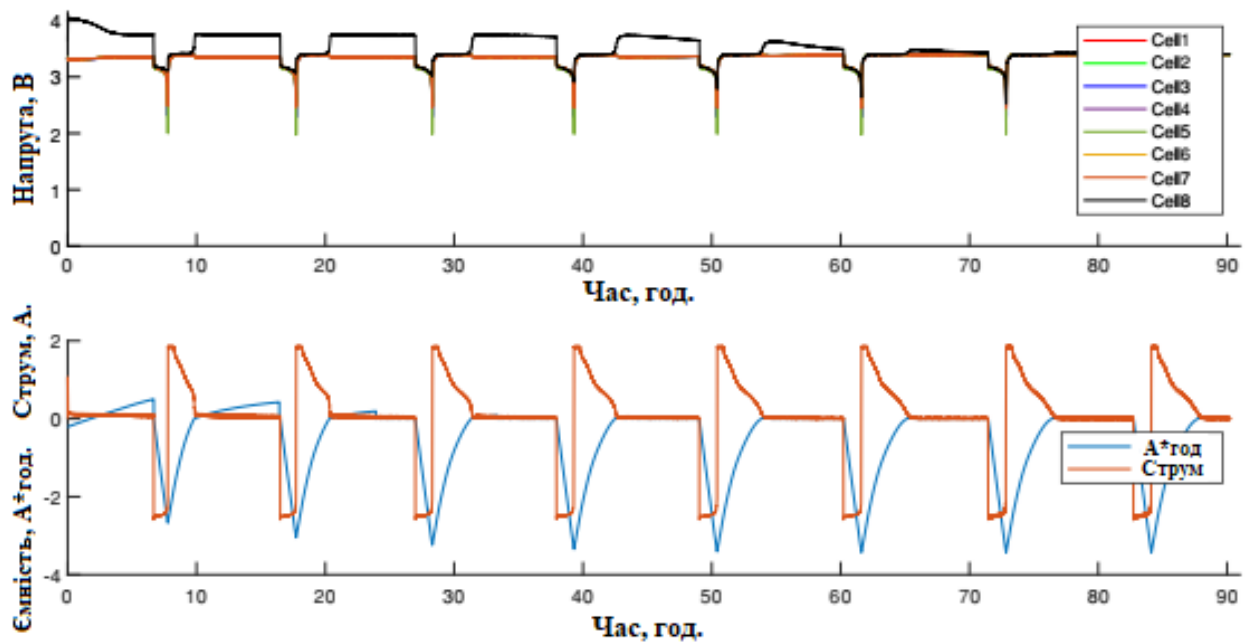


Рисунок 3.12 – Експериментальні результати одного елемента, що на 40% вийшла з рівноваги, яку було збалансовано за допомогою апаратури резистивного балансування LAE, пакет 24 В з незалежним контролером балансування BMS на основі друкованої плати.



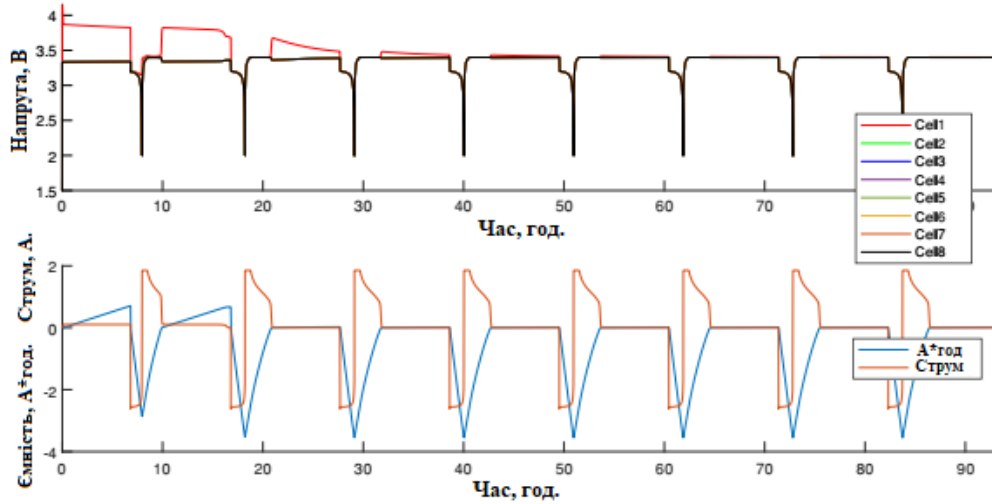


Рисунок 3.13 – Результати моделювання одного елемента, що на 40% розбалансована, яка була збалансована резистивним балансиром LAE, пакет 24 В з незалежним контролером, що балансує BMS на основі друкованої плати.

Однак, зменшивши задане значення, ми можемо зменшити вплив цієї характеристики елемента, одночасно зменшуючи розсіювання потужності на холостому ходу. На Рисунку 3.14 показані результати цього оновленого випробування, а на Рисунку 3.15 повторюються результати моделювання з Рисунку 3.13 з синхронізацією VAX, що відповідає апаратному випробуванню (15 000 секунд). За винятком деяких незначних впливів на динаміку елемента, це порівняння набагато краще узгоджується з результатами моделювання завдяки зменшенню поширеності пилкоподібного балансування.

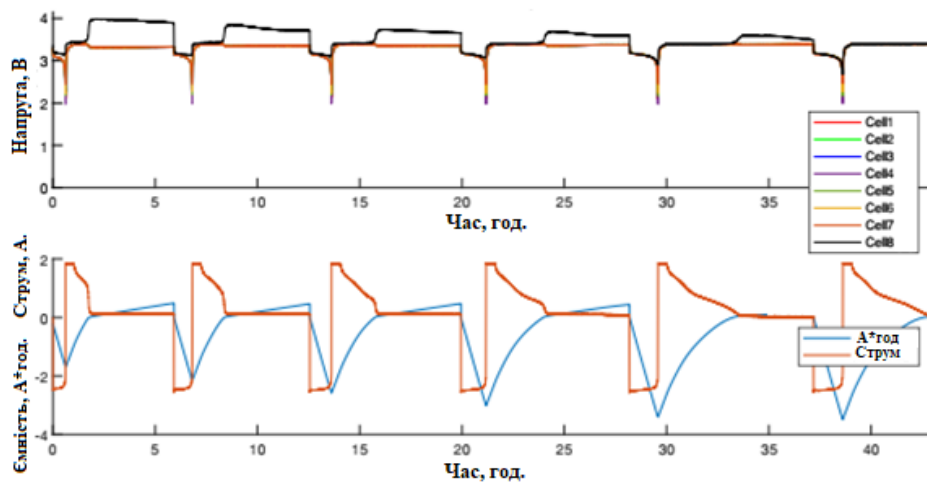


Рисунок 3.14 – Експериментальні результати одного елемента, що на 50% розбалансована, яка була збалансована за допомогою апаратури резистивного балансування LAE, пакет 24 В з незалежним контролером балансування BMS

на основі друкованої плати. Зниження значення балансу повної потужності до 3,55 В

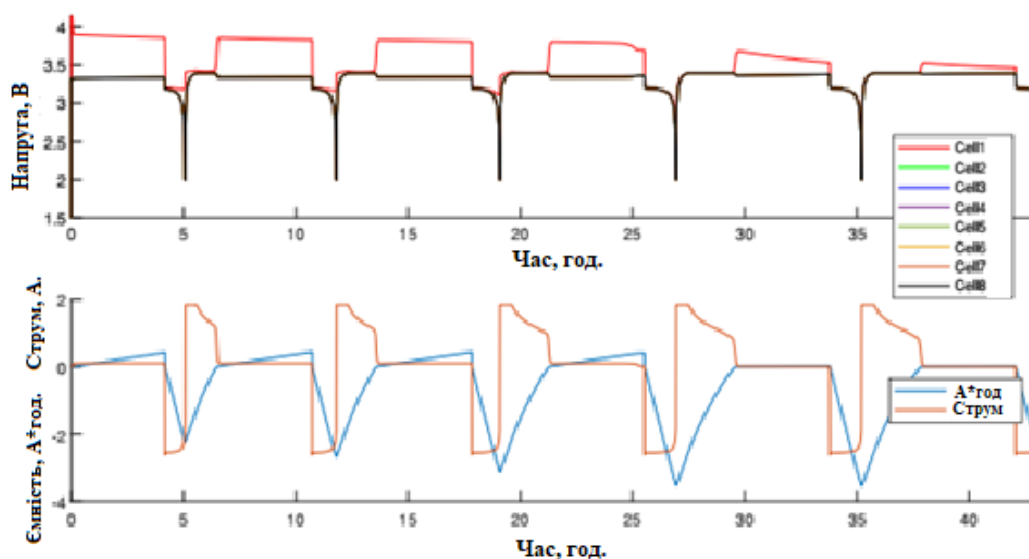


Рисунок 3.15 – Результати моделювання одного елемента, що на 50% розбалансована, яка була збалансована резистивним балансиrom LAE, пакет 24 В з незалежним контролером, що балансує BMS на основі друкованої плати.

### 3.4 Висновки до роздлу

Для створення умов дисбалансу між елементами, елементи штучно розбалансовували, заряджаючи та розряджаючи їх окремо таким чином, щоб можна було штучно досягти дисбалансу. Різні рівні дисбалансу оцінюються до 20% відхилення (в ампер-годинах) для збірки, щоб визначити вплив розбалансованого елемента (або декількох). Порівнювалися зовнішні параметри заряду, особливо параметри напруги і струму при заряді постійним струмом/постійною напругою. У цьому режимі струм залишається постійним протягом усього періоду заряду, поки не буде досягнута верхня межа напруги, після чого напруга залишається постійною на цьому рівні. Потім струм може зменшуватися до тих пір, поки не буде виконано кінцеву умову, таку як обмеження часу, струму. Розуміння реакції послідовного ряду елементів на дисбаланс має вирішальне значення для розробки ефективного механізму балансування елементів. Після того, як елемента були оцінені, результати тестування в умовах штучного дисбалансу використовуються для інформування про деякі проектні рішення, пов'язані з системою BMS.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Охорона праці

#### 4.1.1 Безпека при виготовленні друкованих плат

При розробці системи автоматичного повороту фотоелектричних модулів першим етапом виготовлення пристрою є витравлювання друкованих плат.

Сучасна технологія виготовлення друкованих плат складається з великої кількості різних механічних, фотохімічних і хімічних операцій.

При виконанні технологічних процесів виготовлення друкованих плат можуть виникнути наступні небезпеки і шкідливості: ураження електричним струмом, вибухо- і пожежонебезпека, термічний опіки, хімічний опік, небезпека травмування механічними пристроями, ураження шкірних покривів і отруєння, шум, вібрація, світловий вплив газорозрядних ламп.

Більшість матеріалів і речовин, що застосовуються при виготовленні друкованих плат, є небезпечними для здоров'я і життя людини. Шкідливі речовини та їх пари можуть проникати в організм людини через органи дихання, шкіру і травний тракт.

Вдихання хімічних речовин у будь-якому агрегатному стані (газ, пари, пил) призводить до ураження верхніх дихальних шляхів і до загальнотоксичного ефекту при всмоктуванні речовин в кров. У травний тракт шкідливі речовини потрапляють при вживанні води, їжі та курінні на ділянках виготовлення друкованих плат.

Нагрівання розчинів веде до інтенсивного паротворення і виділенню газів, що несуть з собою частинки розчину, а це призводить до збільшення забруднення атмосфери виробничих приміщень. Так, хлоровані вуглеводні (трихлоретилен, тетрахлоретан) при дії на них сонячного світла або відкритих джерел полум'я утворюють нову речовину – газ фосген (надзвичайно небезпечний), а при реагентному методі очищення відпрацьованих вод від сполук ціану може утворитися хлорціан. Попадання кислоти в лужний ціаністий електроліт, змішування кислих і ціаністих стоків або вентиляційних

викидів може призвести до утворення ціаністого водню. Процеси знежирення, травлення, електрохімічної обробки і хімічного фрезерування супроводжуються виділенням парів кислот і лугів і надходженням їх в зону дихання.

Багато шкідливих речовини потрапляють в організм через шкіру, особливо небезпечні хромові композиції, концентровані кислоти, луги та розчинники.

У відділеннях приготування електролітів завжди має місце висока концентрація пилу і парів токсичних речовин, особливо під час розтарування матеріалів, дозування, приготування розчинів, змішування сипучих компонентів і транспортних операцій.

При ціаністому мідненні і срібленні утворюється ціанистий водень, який надходить в атмосферу, в цих випадках відчувається запах мигдалю. Поява ціанідів у повітрі над ваннами – результат виносу дрібних крапельок електроліту бульбашками газів (водню і кисню), що виділяються на електродах при електролітичній дисоціації, а також випаровування розчинів. Ціанистий водень утворюється в результаті контакту ціаністого розчину з вуглекислою. У ванн оксидування виявляються пари лугу, у ванн декапірування – пари соляної кислоти, у ванн освітлення алюмінію азотною кислотою – оксиди азоту, у ванн кадміювання – оксиди кадмію; при нікелювання – ціанистий водень, при хромуванні – хромовий ангідрид, при очищенні свинцевих анодів – пил свинцю.

Однією з умов забезпечення безпеки праці є потоковість виробництва у відповідності з технологічною послідовністю окремих операцій, передбачаючи автоматизацію і механізацію процесів, а також централізація приготування електроліту. Пульти оператора автоматичних ліній з програмним керуванням повинні бути віддалені від ванн на певну відстань, що виключає вплив на працюючих небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

При неможливості автоматизації процесів повинна бути забезпечена комплексна механізація окремих операцій – підготовчих, транспортних, фінішних, зокрема, завантаження плат у ванни та їх вивантаження.

Особлива увага приділяється заміні токсичних речовин менш токсичними або нетоксичними, заміні шкідливих операцій менш шкідливими. Всі робочі

місця обладнуються витяжною вентиляцією, а працюючі застосовувати засоби індивідуального захисту органів дихання, очей і шкірних покривів.

#### **4.1.2. Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж**

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням.

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи.

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядженню, але з обов'язковим записом в журналі можуть виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за

колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливі випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене.

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, кріпильних елементів; справність введів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що кріплять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електрик повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального захисту. Таке відключення проводиться при: сильному

нерівномірному шумі і потрiскування всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

## **4.2. БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.2.1. Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій**

Екологічна обстановка у світі останніми роками погіршилась і вважається несприятливою. Засоби масової інформації майже щодня повідомляють про надзвичайні ситуації, що відбуваються у світі: лісові пожежі, повені, цунамі, землетруси, обвали, зсуви, селеві потоки, виверження вулканів, урагани, смерчі, снігові й пилові бурі та інші стихійні лиха, аварії і катастрофи на підприємствах і транспорті, що супроводжуються загибеллю людей, руйнуванням населених пунктів і об'єктів господарювання, у тому числі й у сільському господарстві, а часто забрудненням і зараженням довкілля.

Щорічно в нашій країні виникають надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, що призводить до загибелі багатьох людей і значних матеріальних збитків.

Масштаби, характер руйнувань і кількість постраждалих людей залежать від типу, масштабу і місця аварії, катастрофи або стихійного лиха, від швидкості розвитку надзвичайної ситуації, особливостей регіону, об'єктів господарювання і населених пунктів, що опинилися в районі надзвичайної ситуації. Таку ситуацію можна порівнювати з воєнними діями. Для проведення

рятувальних робіт потрібне залучення великої кількості людей і матеріальних ресурсів, а несподіваний розвиток подій скорочує час на підготовку і проведення таких заходів.

Зниження масштабів людських втрат та матеріальних збитків, запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного і природного характеру, ліквідація їх наслідків є важливою загальнодержавною проблемою і одним з найважливіших завдань органів виконавчої влади, всіх органів управління цивільної оборони, управління всіх рівнів, спеціалістів і населення. Кардинальне вирішення проблем захисту населення і територій України від НС, зменшення їх соціально-економічних і екологічних наслідків можливе лише шляхом проведення цілого комплексу заходів.

У значній мірі досягнення цієї мети залежить від уміння керівників усіх рівнів (від об'єктового до урядового), спрогнозувати усі можливі наслідки НС, чітко спланувати заходи щодо їх запобігання та ліквідації, організувати управління під час їх виконання, високого стану готовності до дій у НС органів управління, сил і населення [Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 №5403-VI, ст. 130]. Виконання всіх умінь, завдань, перш за все, буде залежати від якості планування та повноти виконання запланованих заходів на об'єктовому рівні.

Суть планування заходів ЦЗ, на випадок НС полягає в аналізі стану ЦЗ;

- оцінка обстановки, яка може скластися при виникненні аварій, катастроф і стихійних лих та застосування противником сучасних засобів ураження;
- розробка заходів, спрямованих на захист населення та підвищення стійкості функціонування в мирний час та в особливий період;
- установлення послідовності, строків, способів здійснення намічених заходів і виконавців та визначенні необхідних ресурсів для їх проведення.

Головною метою планування заходів ЦЗ є створення умов для:

- організованого і своєчасного проведення заходів захисту робітників, службовців, їх сімей і населення, яке мешкає в зоні можливого ураження;
- забезпечення успішного проведення рятувальних і невідкладних робіт (РiНР) при ліквідації наслідків НС техногенного та природного характеру;



– участі в територіальній обороні та антитерористичній діяльності в особливий період.

Планування має бути також спрямоване на те, щоб запобігти або максимально знизити людські та матеріальні втрати, а також забезпечити життєдіяльність галузі, регіону підпорядкованих їм об'єктів і населення у разі виникнення вищезазначених ситуацій.

При плануванні заходів ЦЗ на особливий період повинно забезпечуватися взаємне узгодження і ув'язка їх із заходами мобілізаційного розгортання народного господарства та заходами, які проводять військове командування та органи управління ЦЗ.

Планування повинно бути реальним, цілеспрямованим, конкретним, точним, гнучким, перспективним, базуватися на глибоко продуманих рішеннях, обґрунтованих розрахунках та враховувати специфіку і особливості діяльності. Воно повинно здійснюватися завчасно та забезпечувати своєчасний ввід планів ЦЗ в дію, особливо під час раптового виникнення НС техногенного та природного характеру і в особливий період.

Документами для планування є укази Президента України, законодавчі акти ВРУ, постанови та розпорядження КМУ, «План реагування на НС державного рівня», витяги з рішення начальника ЦЗ області, району по організації та веденню ЦЗ на території області або району, витяг з «Плану організації евакозаходів та визначення місць розміщення евакуйованого населення».

На об'єктах господарювання повинні бути розроблені два плани, а саме:

- дій з попередження та ліквідування НС (на мирний час);
- цивільного захисту (на воєнний час).

Головна мета цих планів – максимальне зниження людських та матеріальних втрат у будь-яких умовах обстановки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

З проведених досліджень можна зробити наступні висновок. Було обрано елементи для укумуляторної батареї, а також сконструйовано пристрій для циклічного заряду на основі реєстратора даних. Завдяки узгодженості елементів при циклуванні, відносно один одного, зміни рівня заряду від елемента до елемента не спостерігалися. Крім того, розуміння поведінки елемента використовується для розробки моделі в симуляторі схеми PSIM, яка використовується для оцінки різних схем керування резистивним балансиrom. Цей резистивний балансир керується лише інформацією про напругу від елемента, до якої він приєднаний, після чого він може розсіювати енергію у вигляді тепла для підтримки балансу елементів в середовищі моделювання.

Було продемонстровано, що елементи з дисбалансом обмежені у своїй ємності на основі незбалансованості. Допуск до дисбалансу найбільше залежав від налаштувань зовнішнього зарядного пристрою у режимі зарядки. Високий дисбаланс можна було б допустити при вищих напругах, але тільки якщо апаратне забезпечення балансу могло шунтувати весь струм від елемента. Схема керування, була обрана такою, що імітує природну поведінку самобалансування батареї. Це було реалізовано у фізичному апаратному забезпеченні на рівні 24 В, і протестовано в умовах, подібних до середовища моделювання, порівнюючи результати.

Доведено, що BMS ефективний у досягненні своїх початкових цілей: бути недорогим, ефективним у балансуванні різних дисбалансів елементів. Комп'ютерне моделювання та експериментальне тестування елементів ЛЗФ на 24 В із кривою балансу потужності, що імітує поведінку самобалансування батареї до максимальної потужності  $\sim 0,5$  Вт на елемент, показало допуск для понад 50% одноелементного дисбалансу, а також швидке зниження рівня дисбалансу при вищій напрузі, при заряді 1,85 А постійним струмом на елемент та 27,2 В (3,4 В на елемент).

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. Yenduri and O. Sumant, "Lithium Ion Battery Market by Component (Cathode, Anode, Electrolytic Solution, and Others) and End-Use Industry (Electrical & Electronics, Automotive, and Industrial): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 - 2025," 2018. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/lithium-ion-battery-market>. [Accessed: 20-Dec-2019].
- [2] АНДРІЙЧУК, В. А.; ФІЛЮК, Я. О. Акумуляючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок. Технічна електродинаміка, 2017.
- [3] G. Albright, J. Edie, and S. Al-Hallaj, "A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications Contributors :," *AllCell Technol. LLC*, no. March, p. 14, 2012.
- [4] Lazard, "Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis - Version 5.0," 2019.
- [5] ANDRIYCHUK, V. A.; FILYUK, Y. O. Система автономного живлення зовнішнього освітлення. *Lighting Engineering & Power Engineering*, 2017, 1: 17-22.
- [6] IRENA, "Utility-Scale Batteries," 201 .
- [7] EPRI, "Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits," *Epri*, pp. 1-170, 2010.
- [8] S. Dhundhara, Y. P. Verma, and A. Williams, "Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems," *Energy Convers. Manag.*, vol. 177, no. May, pp. 122-142, 2018.
- [9] S. Paul Ayeng'o, T. Schirmer, K. P. Kairies, H. Axelsen, and D. Uwe Sauer, "Comparison of off-grid power supply systems using lead-acid and lithium-ion batteries," *Sol. Energy*, vol. 162, no. November 2017, pp. 140-152, 2018.
- [10] Trojan Battery Company LLC., "TR 12.8-110 Li-ion Datasheet," 2018. [Online]. Available: [https://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/27\\_Lithium\\_12.8-110.pdf](https://www.trojanbattery.com/pdf/datasheets/27_Lithium_12.8-110.pdf). [Accessed: 01-Dec-2018].

- [11] Discover Energy Corp., “Discover Advanced Energy Lithium Ion Battery Operating Manual,” Richmond, BC.
- [12] SIMPLIPHI POWER, “PHI 3.8<sup>TM</sup>, Phi 2.9<sup>TM</sup>, PHI 1.4<sup>TM</sup> & PHI 730<sup>TM</sup> Battery Models Installation Manual,” 201 .
- [13] P. Kurzweil, “Gaston Plante and his invention of the lead-acid battery- The genesis of the first practical rechargeable battery,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 14, pp. 4424-4434, 2010.
- [14] RELiON Batteries, “Lithium vs. lead-acid batteries,” 2020. [Online]. Available: <https://reliionbattery.com/technology/lithium-vs-lead-acid>. [Accessed: 11-Mar- 2020].
- [15] J. E. Harlow *et al.*, “A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 166, no. 13, pp. A3031-A3044, 2019.
- [16] The World Bank Group, “Access to Electricity, rural ( of rural population) - Canada,” 2017. [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.RU.ZS?locations=CA>. [Accessed: 19-Dec-2019].
- [17] Government of Canada, “Status of remote/off-grid communities in Canada,” Natural Resources Canada, 2011.