

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка автоматизованої системи тестування літій-іонної
акумуляторної батареї**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-41
спеціальнос
ті 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Романчук М.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Філюк Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

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

Рецензент Козбур І. Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці			
Нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання 23 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	26.02.2024	
2	Аналітичний розділ	29.03.2024	
3	Проектно-конструкторський розділ	16.04.2024	
4	Розрахунковий розділ	30.04.2024	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	14.05.2024	
6	Висновки	31.05.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2024	
8	Оформлення графічної частини	14.06.2024	

Студент

_____ (підпис)

Романчук М.Р.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Філюк Я.О.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних технологій. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. - Т. : ТНТУ, 2024.

Стор.69; рис. 34; табл. 8; джерел 16; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка автоматизованої системи тестування літій-іонної акумуляторної батареї».

Метою кваліфікаційної роботи є розробка працездатних методів, алгоритмів, засобів і методик, які б задовільняли сучасні потреби в вирішенні питань автоматизованого тестування літій-іонного АКБ.

Виконано детальний огляд та наведено оцінку проблем які виникають при роботі з акумуляторами даного типу та проведено аналіз можливих способів реалізації та підвищення ефективності тестувальної системи.

Розроблено методику та отримано особливості , які дозволяють в процесі автоматизації мобільніше змінювати характеристики різних моделей АКБ виконувати їхнє тестування без матеріальних затрат та з мінімальними втратами, що дозволяє швидко отримувати результати дослідження.

Ключові слова: Li-іон акумуляторна батарея, автоматизована система тестування, імітатор.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1. Аналіз структури автоматизованої системи тестування літій-іонної акумуляторної батареї за допомогою імітатора	8
1.2 Вимоги до функціонального наповнення імітатора літій-іонної акумуляторної батареї	15
1.3 Висновок по розділу.	17
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Математична модель розрахунку літій-іонного акумулятора	19
2.2 Проектування імітаційної моделі літій-іонного акумулятора	24
2.3 Основні технічні вимоги та функціональне наповнення імітатора літій-іонного акумулятора в режимах заряду та дозаряду	28
2.4 Опис структурно-функціональної схеми імітатора літій-іонного акумулятора	31
2.5 Схемотехнічні рішення елементів імітатора літій-іонного Акумулятора	33
2.6 Алгоритми визначення параметрів динамічної моделі літій-іонного акумулятора для реалізації на мікроконтролері	36
2.7 Дослідження характеристик імітатора літій-іонного акумулятора в режимах заряду і дозаряду	39
2.8 Висновки до розділу	43
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	44
3.1 Структурна схема стенда для дослідження характеристик імітатора літій-іонної акумуляторної батареї у режимах заряду та дозаряду	44
3.2 Побудова імітаційної моделі літій-іонної акумуляторної батареї та перевірка її адекватності.	47
3.3 Результати дослідження та порівняння з реальним аналогом	56
3.4 Висновки по розділу.	60

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ	61
4.1 Інструктажі з охорони праці	61
4.2 Захист від статичної електрики	63
4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Актуальність теми. Літій-іонний акумулятор - це один з основних типів літієвих акумуляторів, в даний момент є найпоширенишим в розвитку та використанні в електричних системах двадцять першого століття.

Його хімічний склад та наявні технічні характеристики, також його вартість та способи експлуатації, надали такої важливості в теперішніх реаліях. Особливість таких акумуляторів суттєво відрізняється в залежності від типу наповнення літій-іонних акумуляторів.

Найбільш поширеним у пристроях переносного типу є АКБ, що мають катод на основі оксиду-кобальту (LiCoO_2), слід відзначити, що такі акумулятори мають доволі високу енергетичну густину. Не слід забувати про недолік такого акумулятора, що з точки зору безпечного використання, а саме при фізичному пошкодженні – при пробитті оболонки батареї відбувається активне вивільнення тепла, що може загрожувати здоров'ю людини та ускладнювати спосіб їхнього використання.

Звичайно є більш безпечніші замітники але й вони мають перелік недоліків в порівнянні з попередніми, а саме Літій-ферум-фосфатні (LiFePO_4), а також, літій-манган-оксидні (LiMn_2O_4 , Li_2MnO_3), перелічені акумулятори мають основний недолік, а саме нижчий рівень їхньої енергетичної густини, але вони забезпечують триваліший життєвий цикл і є кращими з точки зору хімічної безпеки. Саме через вище перелічені фактори було прийнято рішення використати Li-ion АКБ для розробки автоматизованої системи тестування. Таке рішення надає декілька незамінних переваг, які б неможливо було досягти на теперішній рівень розвитку та модернізації сучасних літій-іонних акумуляторних батарей, а саме використання імітатора унеможливує отримання шкоди від хімічної складової вище-перелічених типів акумуляторів. Надає можливість міняти тип акумулятора та аналізуючого пристрою чи системи, без чисельних економічних витрат, що збільшує варіативність комбінування різних пристроїв між собою.

Особливістю такого методу розв'язування заданого завдання є розуміння

принципів роботи ПК та використаного в процесі розробки системи програмного забезпечення, що на даний момент технологічного розвитку не можна назвати недоліком.

Оскільки вплив програмного розвитку та комп'ютерної техніки в 21 ст. є настільки значущим - актуальність використання імітатора літій-іонної акумуляторної батареї є доволі високою та не втратить своїх переваг в найближчі роки.

Метою кваліфікаційної роботи є: розробка автоматизованої системи тестування літій-іонної акумуляторної батареї.

Тому для реалізації даної мети слід виконати такі завдання:

1. Провести детальний аналіз декількох відмінних між собою способів та методик розрахунку імітування процесів Li-ion АКБ.
2. Обрати та сформулювати способи та моделі математичного розрахунку, та спроектувати модель автоматизованої системи тестування.
3. Розробити структуру технічної реалізації автоматизованої системи тестування.
4. Визначити та розрахувати всі необхідні залежності, провести порівняння імітатора з реальними аналогами по наявним характеристикам існуючих акумуляторів.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1. Аналіз структури автоматизованої системи тестування літій-іонної акумуляторної батареї за допомогою імітатора

У цьому розділі дано короткий огляд наявних методів та автоматизованого тестування Li-Ion АКБ, наведено їхні основні характеристики, недоліки та переваги. Розглянуто алгоритми визначення параметрів моделі батареї [1] на основі агрегування моделей li-ion. Визначено вимоги до алгоритмів обчислення параметрів моделей Li-Ion та Li-Ion АКБ і метрологічні вимоги, що висуваються при тестуванні блоку електроніки з функціями контролю та захисту Li-Ion АКБ.

Для проведення випробувань системи живлення з використанням апаратно-програмних комплексів і автоматизацією процесів вимірювання інформаційних сигналів було взято наступну модель (рис. 1.1), що передбачає контроль її характеристик .

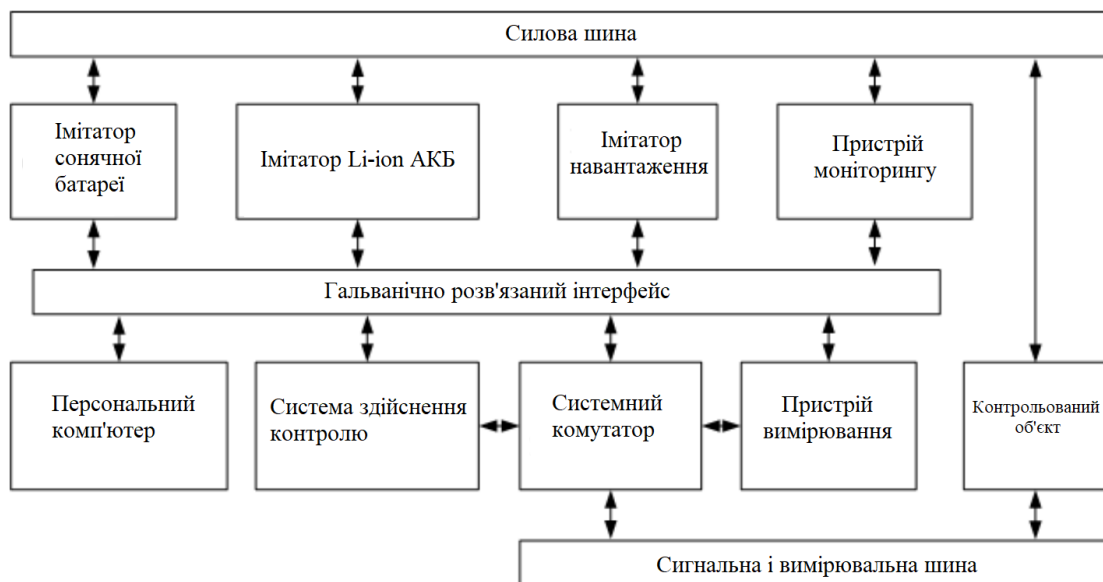


Рисунок 1.1 - Апаратно-програмний комплекс для випробувань системи живлення

Комплекс для випробувань зазвичай містить силові та інформаційно-вимірювальні модулі з гальванічно розв'язаним інтерфейсом, які забезпечують

робочі режими та алгоритми функціонування складових частин системи живлення [2].

Імітатор навантажень дає змогу відтворювати навантаження різного характеру: активне постійне, імпульсне або резистивно-ємнісне, частотне із синусоїдальною формою протікаючого струму, постійного струму з плавним регулюванням. Системний комутатор призначений для під'єднання до об'єкта контролю вимірювальних приладів, аналізаторів стану контактів реле і датчиків. Пристрій вимірювання забезпечує підтримку зв'язку з вбудованими приладами за інтерфейсом, а також передання і приймання інформації з персонального комп'ютера для керування приладами. Пристрій моніторингу дає змогу автоматично і синхронно вимірювати та реєструвати необхідні сигнали. Імітатор акумуляторної батареї призначений для відтворення всіх режимів її роботи під час заряду та розряду [3]. Крім того, цей модуль відтворює значення напруги та температури на кожному акумуляторі.

Відомо також використання в імітаторах навантаження комутованих кремнієвих керованих діодних випрямлячів, керованих комутатором, для створення пульсацій змінного струму джерела живлення. Під час роботи в таких пристроях забезпечуються пульсації, що імітують зміну навантаження з обмеженням струму комутуючою схемою. Недоліком таких пристроїв, як і раніше, залишається імітація тільки активного навантаження і неповна інформація, одержувана в процесі випробувань.

Кожен пристрій дискретного введення-виведення оснащено релейними виходами і гальванічно ізольованими цифровими входами, призначеними для приймання команд і їх видачі джерелам вторинного електроживлення, блоку комутації та джерелу безперебійного живлення. Функціонування імітатора відбувається як у режимі місцевого керування, так і дистанційно за алгоритмом споживачів електроживлення.

Незважаючи на те, що є спеціальне розроблене програмне забезпечення, в ньому відсутній алгоритм визначення параметрів акумуляторів.

Силовий канал що дає змогу відтворювати режим заряду-розряду за попередньо встановленими параметрами [4]. Імітація акумуляторних елементів

здійснюється на кожному з послідовно ввімкнених регульованих джерел напруги в діапазоні від 1,5 до 4,2 В із дискретністю 0,005В.

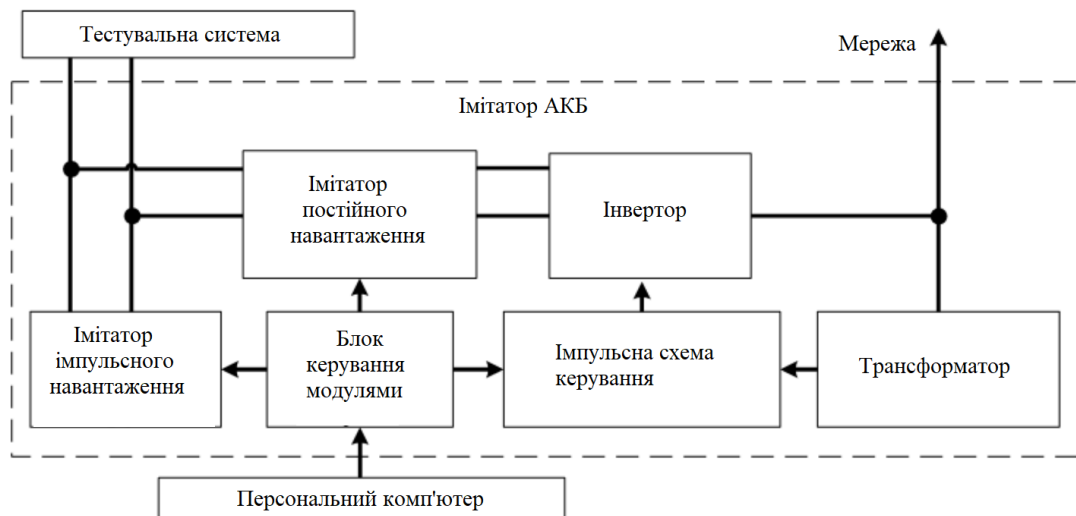


Рисунок 1.2 - Структурна схема Імітатор Li-Ion АКБ

Даний Імітатор Li-Ion АКБ складається з декількох навантажувальних модулів, під'єднаних паралельно до тестованої системи живлення, у кожному з яких є модулі постійного, імпульсного та комплексного навантаження. При цьому модуль постійного навантаження виконано у вигляді підвищувального перетворювача на основі керованих ключів, з'єднаного з тестованою системою живлення через вхідний фільтр.

Також Імітатор Li-Ion АКБ має у своєму складі модуль керування з послідовно ввімкненими регульованими джерелами напруги.

В іншому варіанті (рис. 1.3) Імітатор Li-Ion АКБ блок імітації заряду-розряду являє собою закінчений силовий модуль, що складається з окремих каналів, які імітують заряд і розряд батареї [5].

Підключення Імітатора Li-Ion АКБ до тестованої системи живлення здійснюється автоматично за допомогою комутатора, що містить силові контактори, які розмикаються в разі виникнення аварійної ситуації. Керування та діагностика датчиків імітатора, а також протоколювання перебігу випробувань здійснюються за допомогою блока керування і персонального

комп'ютера.

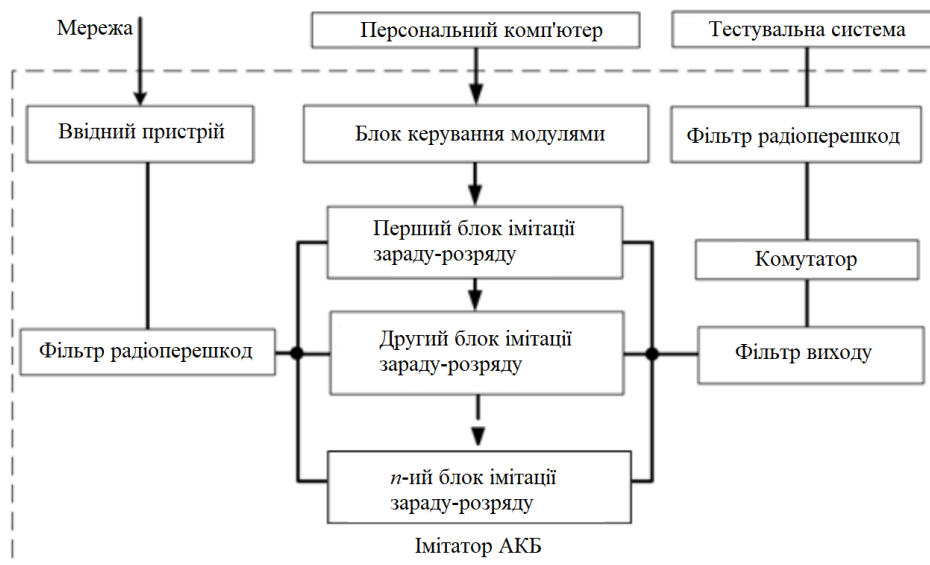


Рисунок 1.3 - Структурна схема блоку імітації заряду-розряду Li-Ion АКБ

Підключення до силової мережі здійснюється пристроєм введення. Силовий канал Імітатора Li-Ion АКБ відокремлений від силової трифазної мережі та тестованої системи живлення фільтрами радіоперешкод з метою поліпшення електромагнітної сумісності.

Ця структура імітатора дає змогу проводити дослідження системи живлення пристрою в безперервному режимі з можливістю заміни аварійного модуля, автоматизовані випробування тестованої системи живлення з отриманням будь-якої точки вольт-амперної характеристики, яка відповідає одному з численних станів реальної Li-Ion АКБ, а також здійснювати енергозбереження в режимі заряду батареї [6].

При цьому, незважаючи на наявність блоку управління модулями, відсутній алгоритм визначення параметрів акумуляторів. Також у функціях цього Імітатора Li-Ion АКБ не передбачено імітацію резервного перемикача комутаційного типу, імітацію режимів дозарядження і балансування.

Проведений огляд запропонованих структур імітаторів Li-Ion АКБ виявив їхній загальний недолік - відсутність повноцінної реалізації імітаторів Li-Ion та алгоритмів визначення їхніх параметрів.

Найважливішим параметром АКБ є її ємність Q_{Max} , яка визначається як максимальна кількість електричної енергії, що батарея віддає на навантаження, від моменту повної зарядки до стану розрядження, який не призводить до передчасної деградації акумуляторів [7]. Стан заряду батареї (state of charge) відображає показник, що характеризує ступінь її зарядженості:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_{Max}}, \quad (1.1)$$

де $Q(t)$ - залишкова ємність батареї.

Поширеним способом вимірювання залишкової ємності $Q(t)$ є використання лічильника ампер-годин, що дає змогу визначити ємність, прийняту під час заряду або віддану під час розряду батареї, за певний $(t - t_0)$ час [8]:

$$Q(t) = \int_{t_0}^t I(t) dt, \quad (1.2)$$

де $I(t)$ - зарядний або розрядний струм.

Цей спосіб є основою багатьох алгоритмів оцінювання параметрів Li-Ion та Li-Ion АКБ загалом. Перевага лічильника ампер-годин полягає в простоті його реалізації, проте наявна велика похибка визначення залишкової ємності, що досягає 20%. Це пов'язано з відсутністю алгоритму визначення параметрів Li-Ion в режимі реального часу та особливостями експлуатації Li-Ion АКБ.

Для дослідження режимів штатної експлуатації можливий варіант апроксимації залежностей $Q(t)$, $E(t)$ Li-Ion або Li-Ion АКБ від струму $I(t)$ за дискретними даними. Одним із класичних варіантів апроксимації $E(t)$ акумулятора є рівняння Шеферда, адаптоване для Li-Ion [9].

Так, $E(t)$ акумулятора під час його заряду розраховується за рівнянням

$$E(t) = E_0 - K \frac{Q}{it - 0.0. Q} i' - K \frac{Q}{Q - it} + Ae^{-Bit} \quad (1.3)$$

де E_0 , K , Q , it , i' , A , B - відповідно початкова напруга, коефіцієнт поляризації, значення ємності, значення лічильника ампер-годин, низькочастотна поточна динаміка, емпіричні коефіцієнти.

Своєю чергою, $E(t)$ при розряді Li-Ion визначається за виразом

$$E(t) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} (it + i') + Ae^{-Bit} \quad (1.4)$$

Емпіричні коефіцієнти A , B у рівняннях (1.3), (1.4) підбирають практичним шляхом за зарядною (розрядною) характеристикою Li-Ion або на основі даних, наданих виробником Li-Ion, Li-Ion АКБ.

Оскільки рівняння Шеферда відображає тільки статичні режими роботи Li-Ion, і похибка $E(t)$ зазвичай становить не більше 10 %. То обчислювальний алгоритм визначення $E(t)$ істотно залежить від точності виміряного струму $I(t)$. Перевага цього методу проявляється за статичних режимах роботи Li-Ion з фіксованим струмом розряду (заряду). Точність результатів можна підвищити за допомогою алгоритму визначення параметрів Li-Ion та врахування особливостей Li-Ion під час експлуатації. Недолік полягає в необхідності опрацювання великого обсягу експериментальних даних для визначення потрібних коефіцієнтів і високої похибки за динамічних режимів роботи Li-Ion.

Для апроксимації $E(t)$ Li-Ion за дискретними значеннями можна використовувати кубічний сплайн, що забезпечує задовільну точність [10]:

$$E(t) = k_0 + k_1 SOC + k_2 SOC^2 + k_3 SOC^3 + k_4 e^{k_5 SOC} \quad (1.5)$$

Інші варіанти апроксимації дискретних значень $E(t)$ досить докладно розглянуто.

Слід відзначити такі перспективні варіанти поліпшення характеристик емпіричних співвідношень при апроксимації дискретних даних, як технології нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.

Так, відомий приклад самонавчальної системи з нечіткою логікою, яка коригує показання лічильника ампер-годин у разі зміни параметрів Li-Ion [11]. Інший варіант пов'язаний із зарядом Li-Ion змінним струмом. Цей прийом дає змогу не тільки заповнити ємність акумулятора, а й зменшити вплив деградації параметрів Li-Ion. До недоліків такого рішення можна віднести необхідність колосального обсягу експериментальних даних для отримання адекватного результату.

Таблиця 1.1 - Методи, що застосовуються для визначення параметрів Li-Ion

Метод	Переваги	Недолік	Додаткові відомості
Лічильник ампер-годин	Простота реалізації. Можливість використання як основи для інших методів	Точність результатів може сягати від 10 до 20 %	-
Аппроксимація	Простота реалізації. Можливість використання як основи для інших методів. Можливість дослідження процесів у статичному режимі заряду-розряду Li-Ion з точністю результатів не гірше 10 %.	Відсутня можливість дослідження процесів у динамічному режимі роботи Li-Ion . Чутливість до точності вимірюваного струму	Відсутність алгоритму визначення параметрів Li-Ion . Необхідність у великій кількості експериментальних даних
Фільтр Калмана	Гнучкість при налаштуванні. Можливість використання як основи для інших методів. Можливість дослідження процесів у динамічному режимі заряду-розряду Li-Ion , точність результатів може досягати від 3 до 5 %	Кількість операцій з плаваючою точкою на одну ітерацію - близько 10^4	Відсутність алгоритму визначення параметрів Li-Ion . Необхідність у великій кількості експериментальних даних
Нейронна мережа	Реалізація алгоритму визначення параметрів Li-Ion . Можливість дослідження процесів у динамічних режимах роботи Li-Ion , точність результатів може досягати до 1 %	Кількість операцій з плаваючою точкою на одну ітерацію - близько 10^5	Необхідність у великому обсязі експериментальних даних

Своєю чергою, нейронні мережі здатні досліджувати складні нелінійні системи, що відкриває нові можливості для імітації Li-Ion за допомогою алгоритмів визначення параметрів. Але невизначеність кількості персептронів на етапі навчання шарів мережі та її схильність до перенавчання ускладнюють на сьогодні застосування нейротехнологій.

Іншим ефективним розв'язанням задачі визначення параметрів моделі Li-Ion є використання сучасної теорії керування, зокрема застосування фільтра Калмана [12]. Таке рішення для моделей Li-Ion з подвійною поляризацією і

вище дає змогу отримати необхідну точність оцінювання параметрів .

Результати порівняльної оцінки основних методів, використовуваних для моделювання та визначення параметрів Li-Ion, наведено в таблиці 1.2.

У підсумку можна зазначити, що розглянуті методи не дають змоги повною мірою забезпечити виконання основних вимог для визначення параметрів моделі Li-Ion під час їхнього використання у складі спеціалізованих імітаторів Li-Ion АКБ.

1.2 Вимоги до функціонального наповнення імітатора літій-іонної акумуляторної батареї

Існуючі на сьогоднішній день промислові імітатори Li-ion АКБ, що використовують програмовані джерела постійного струму, не дають змоги проводити повноцінне тестування. Сформулюємо основні вимоги до нового покоління імітаторів Li-ion АКБ:

1. Модульний принцип побудови пристроїв імітатора на єдиній конструктивній основі.

2. Імітатор акумулятора має бути виконаний у вигляді окремого завершеного пристрою, що містить імітатори датчика температури і байпасного перемикача.

3. Використання моделі Li-ion АКБ (рис. 1.4), до складу якої включено моделі акумулятора, датчика температури, байпасного перемикача. Імітація датчиків температури, байпасного перемикача та вихідної напруги акумулятора забезпечується на підставі динамічного або статичного струму в режимах заряду, розряду, дозаряду та балансування батареї.

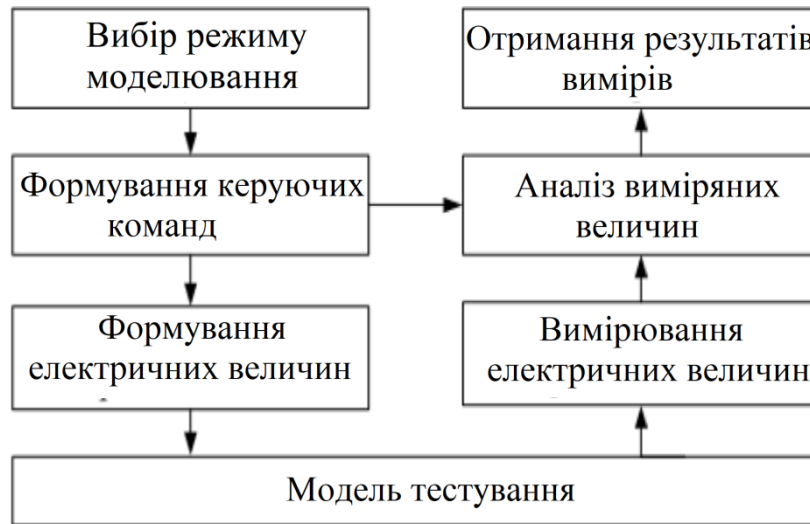


Рисунок 1.4 - Блок-схема алгоритму формування моделі Li-ion АКБ

З наведеного раніше огляду методик і алгоритмів визначення параметрів моделі Li-ion необхідно акцентувати увагу на таких вимогах:

- мінімальний обсяг експериментальних даних при визначенні параметрів моделі Li-ion ;
- визначення параметрів моделі Li-ion , Li-ion АКБ у процесі експлуатації;
- мінімальна помилка при накопиченні систематичної похибки вимірювальних пристроїв
- можливість прогнозування змін параметрів Li-ion , Li-ion АКБ на підставі отриманих результатів тестування.

Для оцінювання похибок вимірювань і логіки роботи блоків електроніки, призначених для контролю і захисту Li-ion АКБ, необхідне виконання таких кількісних вимог:

- формування напруги постійного струму від 2 до 4,5 В з кроком установки не більше 0,2 мВ;
- регулювання за зовнішніми командами швидкості зміни напруги від 0,2 до 1 мВ/с;
- вимірювання встановленої напруги з похибкою не більше ніж ± 1 мВ;
- імітація роботи датчика температури Li-ion з опором від 80 до 120 Ом і похибкою не більше $\pm 0,1$ Ом;
- імітація роботи комутатора байпасного перемикача, що виключає

несправний акумулятор із загальної схеми батареї Li-ion АКБ;

– вимірювання струму дозаряду Li-ion , який здійснює вирівнювання напруги акумуляторів у складі Li-ion АКБ, не більше ніж на 1 А. Похибка вимірювання струму дозаряду має бути не більше $\pm 0,5\%$.

Для створення імітатора Li-ion АКБ потрібно, щоб імітатор Li-ion дозволив здійснити:

– послідовне з'єднання кількох імітаторів Li-ion ;
– рекуперацію енергії, що виділяється за рахунок протікання струму заряду до

30 А, у джерело енергії з напругою від 27 до 100 В.

Під час реалізації імітатора Li-ion АКБ для розробки системи з різними схемами керування і контролю параметрів (напруги, температури, струму дозаряду) необхідно, щоб усі схеми мали гальванічну розв'язку від первинного джерела живлення.

1.3 Висновок по розділу.

У результаті аналізу структур і варіантів , встановлено осовні недоліки та переваги тестування Li-Ion АКБ за допомогою імітатора, такий варіант виконання завдання показав , що відомі структури та спеціалізовані імітатори Li-Ion АКБ, що випускаються промисловим виробництвом, мають загальний недолік - відсутність повноцінної імітації Li-Ion та алгоритмів, визначення його параметрів. Також відсутня можливість відтворення характеристик і параметрів кожного акумулятора в складі імітатора Li-Ion АКБ. Усунення цих недоліків дасть змогу краще імітувати акумулятори , що в свою чергу покращить термін служби АКБ та покращить живлення електрообладнання при використанні в ньому Li-Ion АКБ.

У результаті розглядання методик, визначення параметрів Li-Ion, встановлено, що ці методики не дають змоги повною мірою забезпечити необхідну точність або мають вкрай високу обчислювальну складність.

Проведений аналіз дає змогу сформулювати завдання, які необхідно

розв'язати для вдосконалення або створення імітатора Li-Ion АКБ, з урахуванням визначення параметрів Li-Ion, Li-Ion АКБ у режимі реального часу:

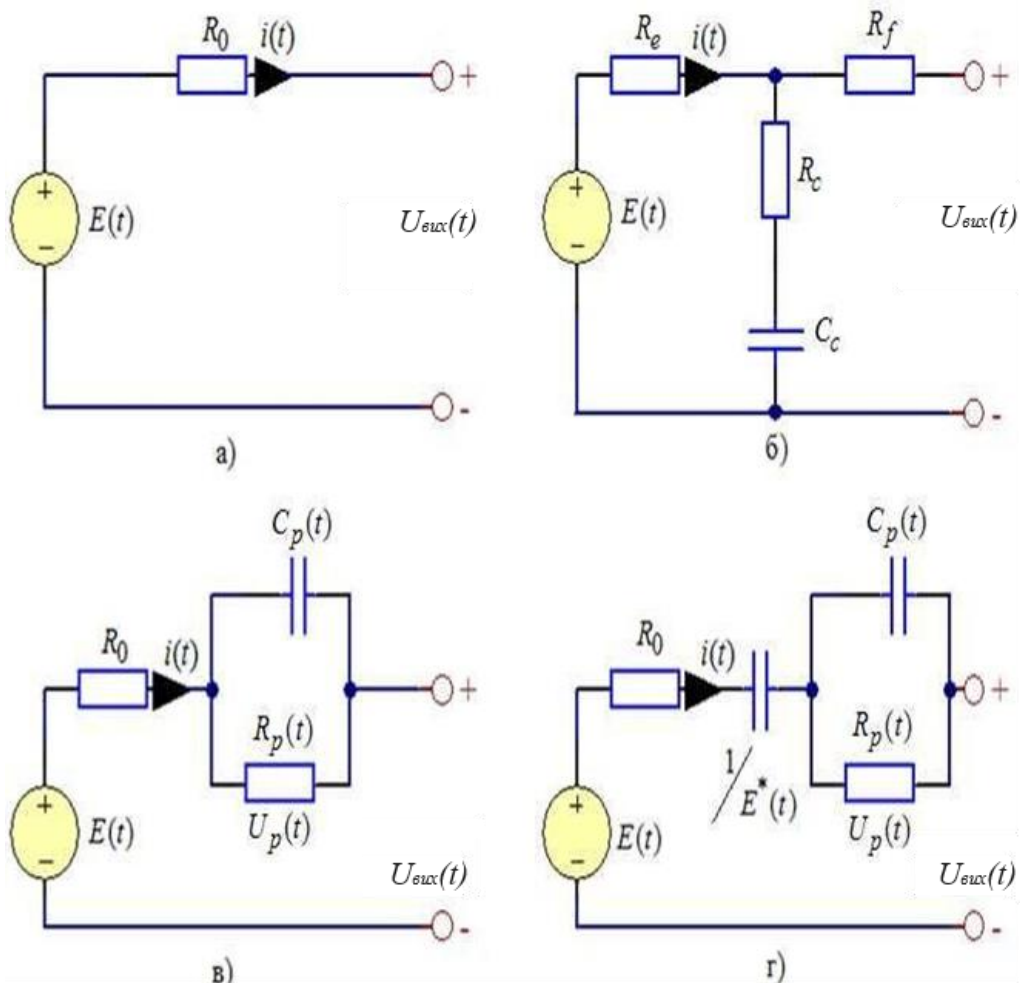
- 1) використовувати математичну модель Li-Ion та Li-Ion АКБ на основі електричних схем заміщення в процесі тестування імітатора в реальному часі;
- 2) розробити методи та алгоритм визначення параметрів моделі Li-Ion;
- 3) виконати дослідження та верифікацію розробленого алгоритму Li-Ion за допомогою математичного моделювання та експериментальної установки;

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Математична модель розрахунку літій-іонного акумулятора

Під час розглядання технічних і програмних рішень для системи тестування Li-ion АКБ виникає необхідність у використанні математичної або імітаційної моделі Li-ion АКБ. Один із варіантів математичного опису Li-ion базується на еквівалентних схемах заміщення акумулятора. Такі ж моделі активно застосовуються під час аналізу процесів у Li-ion та впровадження їх енергії в різне промислове обладнання. До складу імітаційної моделі Li-ion АКБ входять також моделі наступних додаткових елементів, датчик температури і байпасний перемикач комутаційної будови .

Еквівалентні електричні схеми заміщення Li-ion являють собою такі математичні моделі Li-ion (рис. 2.1) [13].



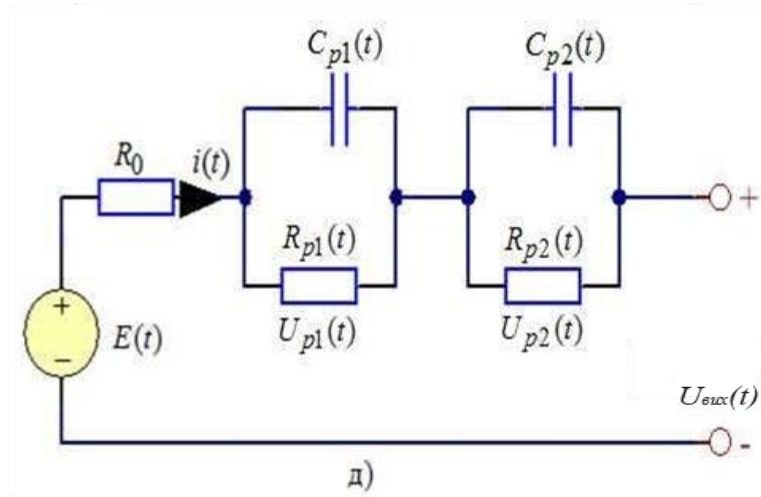


Рисунок 2.1 - Еквівалентні електричні схеми заміщення Li-ion: а) - модель R; б) - модель RC; в) - модель Тевеніна; г) - модель PNGV; д) - модель DP

Моделі Li-ion завше поділяють на динамічні та статичні, що показують зміни струмів і напруг для вище наведених схем заміщення. З усіх моделей статичною є модель R, а решта динамічні що пов'язані з внутрішнім імпедансом Li-ion.

Однак ці всі моделі мають спільний недолік у звичайному виконанні, а саме акумулятора під час процесів віддачі або приймання енергії не відображають зміни ЕРС.

Розглянемо математичні основні співвідношення задля побудови статичної моделі Li-ion. Вихідна $U_{вих}(t)$ напруга схеми заміщення (див. рис. 2.1, а) статичної моделі розраховується за рівнянням .

$$U_{вих}(t) = E(t) \pm R_0 i(t) \quad (2.1)$$

де $E(t)$, R_0 , $i(t)$ - відповідно ЕРС, постійний опір акумулятора та зарядно-розрядний струм.

Для визначення $E(t)$ у рівнянні (2.1) скористаємося моделлю Шеферда

$$E(t) = E_0 - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(BQ_{\Sigma}(t))} \quad (2.2)$$

де E_0 , K , Q_{Max} , $Q_{\Sigma}(t)$, A , B - відповідно напруга, поляризаційна складова внутрішнього опору акумулятора, повна ємність, ємність, отримана або віддана за час t , експоненціальна складова та інверсна експоненціальна складова процесу заряду/розряду акумулятора.

Рівняння вихідної $U_{вих}(t)$ напруги (2.1) у режимі заряду акумулятора з урахуванням виразу (2.2) запишемо так:

$$U_{вих}(t) = E_0 - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} + Ae^{(BQ_{\Sigma}(t))} + R_0 i(t) \quad (2.3)$$

Перевага статичної моделі вихідної напруги $U_{вих}(t)$, наведеної до вигляду (2.3), полягає в можливості відображення зміни ЕРС акумулятора в процесі віддачі або приймання енергії. Але недолік цієї моделі полягає у відсутності можливості відображення зміни поляризаційної складової внутрішнього опору акумулятора в процесі віддавання або приймання енергії, тобто одержати адекватний результат можливо тільки за фіксованого струму заряду або розряду.

Коефіцієнти у виразі (2.3) визначають із нормативних документів виробника Li-ion, Li-ion АКБ або в результаті експериментальних досліджень, що дають змогу отримати залежність напруги акумулятора від його місткості (рис. 2.2):

$$A = U_{Full} - U_{Exp} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{3}{Q_{Exp}} \quad (2.5)$$

$$K = \frac{(U_{Full} - U_{Nom} + A(\exp(-BQ_{Nom}) - 1))(Q_{Max} - Q_{Nom})}{Q_{Nom}} \quad (2.6)$$

$$R_0 = U_{Nom} \frac{1 - \eta}{0,2Q_{Nom}} \quad (2.7)$$

$$E_0 = U_{Full} + K - A + R_0 i^* \quad (2.8)$$

$$Q_{\Sigma}(t) = Q_{Exp} - \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (2.9)$$

де $U_{full}, U_{Exp}, Q_{Exp}, U_{Nom}, Q_{Nom}, \eta, i^*$ - відповідно максимальна допустима напруга, експоненціальна напруга, експоненціальна ємність, номінальна напруга, номінальна ємність, ККД і середній струм за цикл заряду або розряду акумулятора.

Далі розглянемо динамічні моделі вихідної напруги $U_{вих}(t)$. Вихідна

напряга $U_{вих}(t)$ динамічної моделі Li-іон можна визначити на основі схеми заміщення Тевеніна (див. рис. 2.1, в)

$$\begin{cases} \frac{dU_p(t)}{dt} = \frac{i(t)}{C_p(t)} - \frac{U_p(t)}{R_p(t)C_p(t)}; \\ U_{Вих}(t) = E(t) \pm R_0 i(t) - U_p(t), \end{cases} \quad (2.10)$$

де $U_p(t), C_p(t), R_p(t)$ - відповідно поляризаційна напруга, поляризаційна ємність і поляризаційний опір акумулятора.

Використовуючи рівняння (2.10), можна скласти систему рівнянь

$$U_p(t) = \int_{t_0}^t \left[\frac{1}{C_p(t)} i(t) - \frac{1}{\tau_{(it)}(t)} U_p(t) \right] dt; \quad (2.11)$$

$$\tau_{(it)}(t) = \frac{E_0 - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-BQ_{\Sigma}(t)})}{\frac{dU_p(t)}{dt}} - \frac{U_{Вих}(t)}{\frac{dU_p(t)}{dt}}; \quad (2.12)$$

$$\tau_{(it)}(t) = R_p(t) C_p(t); \quad (2.13)$$

$$C_p(t) = \frac{\tau_{(it)}(t)}{R_p(t)}; \quad (2.14)$$

$$R_p(t) = \frac{R_0(t)}{2}, \quad (2.15)$$

де $\tau_{(it)}(t)$ - постійна часу, с.

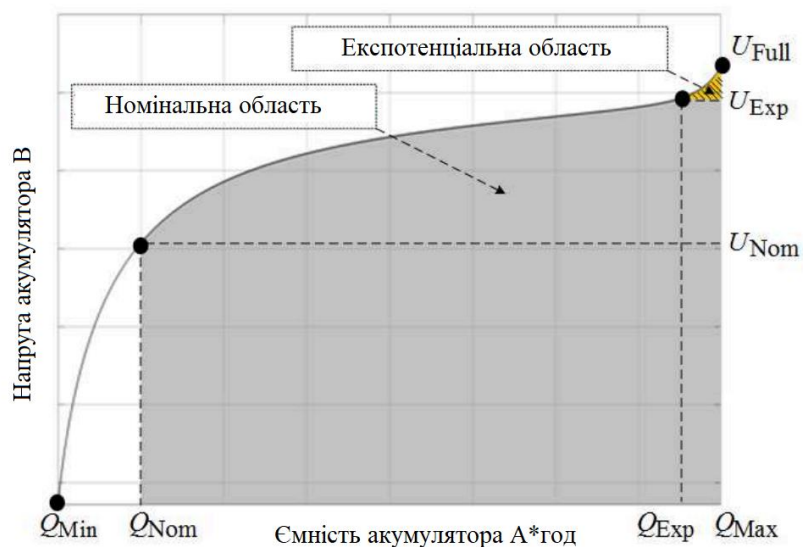


Рисунок 2.2 - Залежність напруги акумулятора від ємності в режимі заряду (Q_{Min} - мінімальна ємність)

Перевага динамічної моделі вихідної напруги (2.10) полягає в можливості відображення зміни поляризаційної складової внутрішнього опору акумулятора в процесі віддачі або приймання енергії, що дає змогу отримувати адекватний результат під час дослідження статичним і динамічним струмом.

Також слід зазначити необхідність щонайменше сорока коефіцієнтів для реалізації вихідної напруги $U_{Bux}(t)$, що значною мірою ускладнює побудову в реальному часі динамічної моделі Li-ion АКБ, яка складається з десяти і більше акумуляторів.

У результаті досліджень процесів у Li-ion, Li-ion АКБ встановлено, що значення $R_p(t)$ і $C_p(t)$ незначно змінюються на всьому діапазоні циклу заряду та розряду акумулятора.

У зв'язку з цим можна скласти систему рівнянь

$$\tau_{(it)}^* = R_p^* C_p^*; \quad (2.16)$$

$$C_p^* = \frac{\tau_{(it)}^*}{R_p^*}; \quad (2.17)$$

$$R_p^* = \frac{R_0}{2}, \quad (2.18)$$

де $\tau_{(it)}^*, R_p^*, C_p^*$ - відповідно стаціонарне еквівалентне значення постійної часу, поляризаційні опір і ємність.

Об'єднуючи вирази (2.3) і (2.10), запишемо систему рівнянь, що описують динамічні процеси в Li-ion:

$$\begin{cases} \frac{dU_p(t)}{dt} = \frac{i(t)}{C_p^*} - \frac{U_p(t)}{R_p^* C_p^*}; \\ U_{Bux}(t) = E_0 - K \frac{Q_{Max}}{Q_{Max} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-BQ_{\Sigma}(t))} \end{cases} \quad (2.19)$$

Це рішення дає змогу отримати нову модифіковану модель Li-ion, що має можливість:

- відображення зміни ЕРС і поляризаційної складової внутрішнього опору акумулятора в процесі віддачі або приймання енергії;
- використання вже наявних даних Li-ion, Li-ion АКБ або результатів експериментальних досліджень для визначення не більше ніж п'яти

коефіцієнтів моделі, що дають змогу отримати залежність напруги акумулятора від його ємності

Для визначення параметрів динамічної моделі літій-іонного акумулятора використаємо схему заміщень Шеферда і Тевеніна[14].

2.2 Проектування імітаційної моделі літій-іонного акумулятора

Структуру та характеристики експериментальної установки, призначеної для проведення експериментальних досліджень Li-ion типу Samsung INR18650-15M. Експериментальна модель зроблена з 8 батареєю Samsung INR18650-15M і має виконувати такі функції:

- 1) вимірювання напруги акумуляторів батареї;
- 2) вимірювання поточного струму батареї;
- 3) заряд батареї струмом не більше 7,5 А;
- 4) розряд батареї струмом не більше 15 А.

На підставі отриманих даних розроблено імітаційну модель Li-ion батареї 8Samsung INR18650-15M у програмному середовищі Matlab Simulink і перевірено адекватність алгоритму визначення параметрів динамічної моделі Li-ion.

Для побудови структури з експериментальних даних акумулятора батареї 8Samsung INR18650-15M, імітаційної моделі акумулятора батареї 8Samsung INR18650-15M, системи діагностування та системи візуалізації (рис. 2.3) використовуються компоненти пакета Simulink Library Browser.

Систему рівнянь (2.19) задає блок № 1 у вигляді відповідних моделювальних компонентів. Задання профілю струму, що протікає, $i(t)$ і напруги акумулятора батареї 8Samsung INR18650-15M здійснюється блоком №2.

Після визначення параметрів моделі Li-ion перевіряється її адекватність у результаті порівняння блоком № 3 відповідних характеристик, отриманих з експериментальної установки (блок № 2) імітаційною моделлю (блок № 1). Результати візуалізуються блоком № 4.

У блоці № 2 використовується компонент From Workspace, що дає змогу

працювати з масивом експериментальних даних:

- From Workspace - для відображення струму $i(t)$;
- From Workspace1 - для відображення вихідної напруги акумулятора на підставі струму $i(t)$.

Блок № 1 - реалізація моделі акумулятора; блок № 2 - експериментальні дані 8Samsung INR18650-15M; блок № 3 - перевірка на адекватність; блок № 4 - візуалізація результатів моделювання

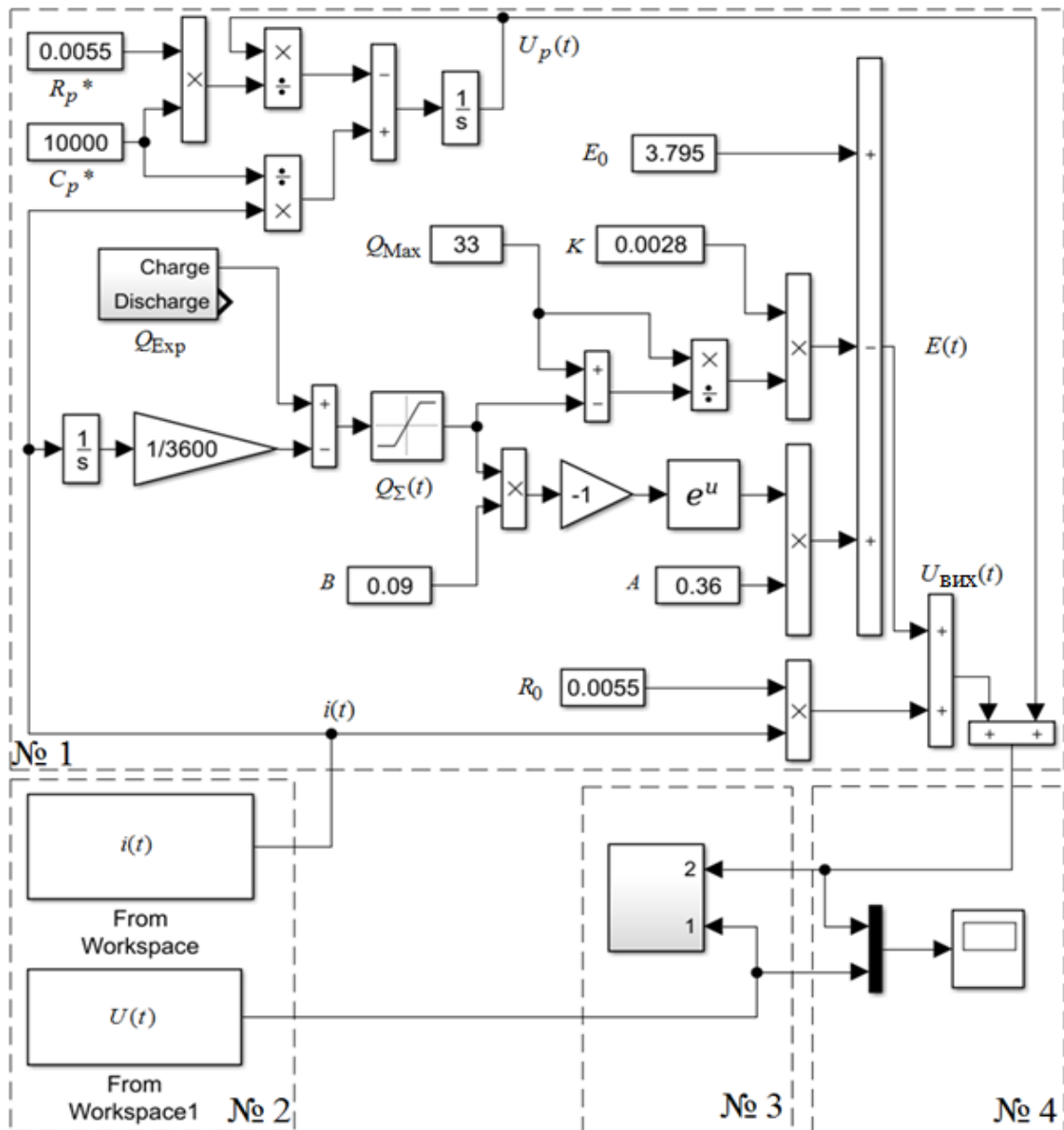


Рисунок 2.3 - Імітаційна модель Li-ion та експериментальні дані Li-ion 8Samsung INR18650-15M у середовищі Matlab Simulink

Блок № 3 (рис. 2.4) реалізує рівняння для обчислення максимальної відносної похибки вихідної напруги. Після визначення параметрів динамічної

моделі Li-ion перевіряється її адекватність за результатами порівняння з експериментальними даними.

Протягом семи циклів було проведено 36 541 вимір, у кожній точці визначено максимальну похибку $U_{вих}(t)$, приведену до шкали $\Delta U_{вих}(t)$.

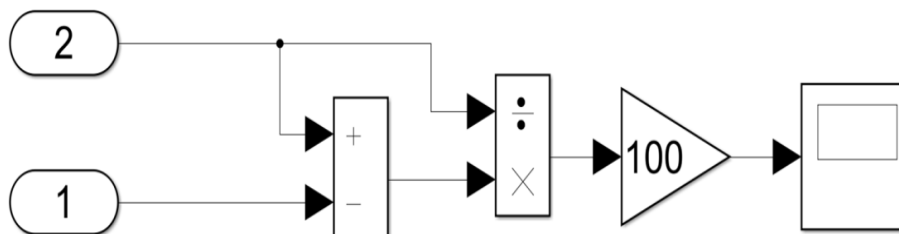


Рисунок 2.4 - Реалізація порівняння експериментальних (1) і змодельованих (2) даних у Matlab Simulink

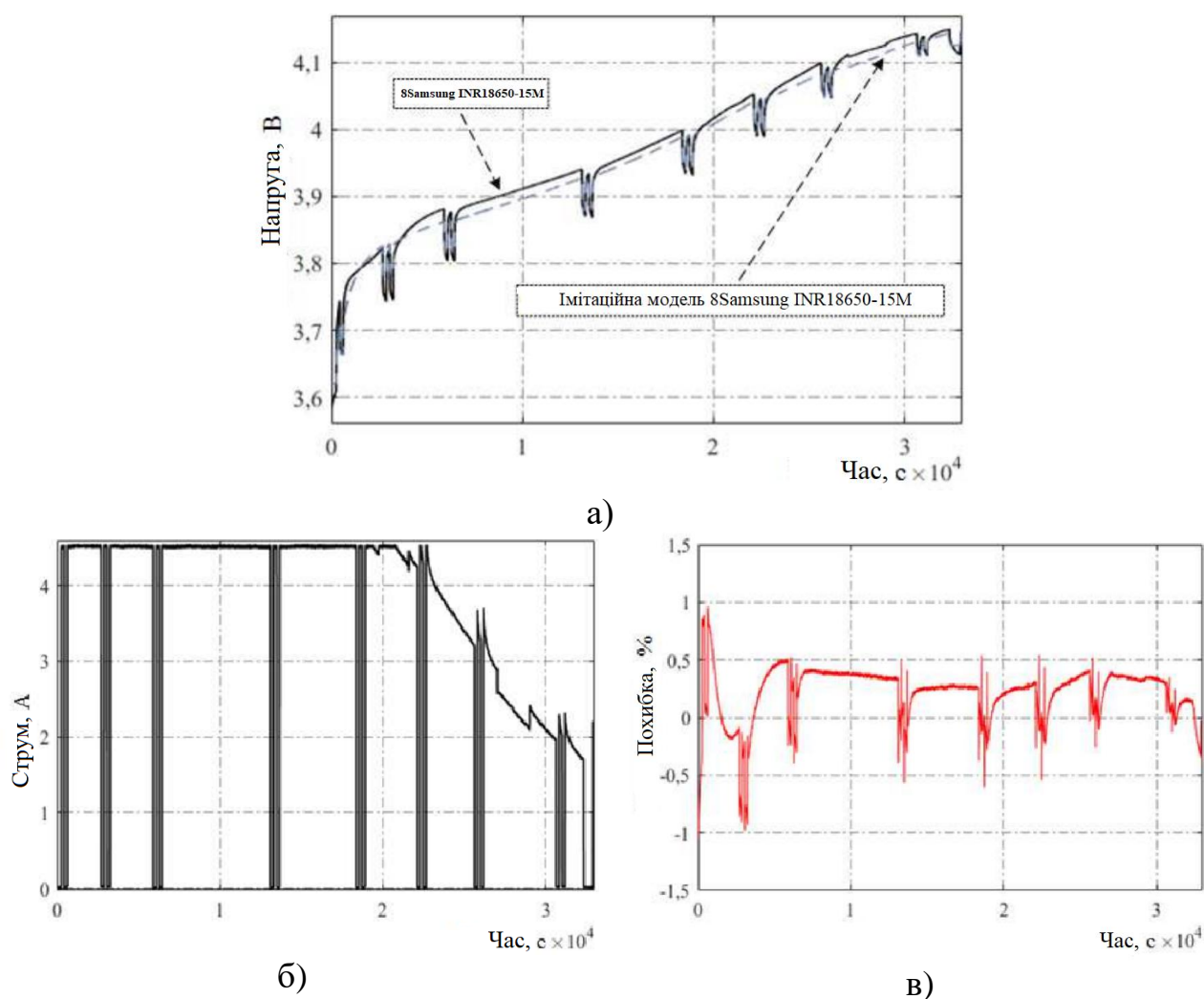


Рисунок 2.5 - Залежності вихідної напруги $U_{вих}(t)$ імітаційної моделі та реального Li-ion 8Samsung INR18650-15M (а), струму $i(t)$ (б) і максимальної відносної похибки $\Delta U_{вих}(t)$ вихідної напруги (в) від часу в режимі заряду (експеримент № 1)

Представлено залежності вихідної напруги акумулятора (рис. 2.5, а); 2.6, а) від часу, сформовані блоком № 4, де позначено експериментальні дані (суцільна лінія) і дані імітаційної моделі (пунктирна лінія).

За результатами моделювання максимальна відносна похибка $\Delta U_{вих}(t)$ вихідної напруги не перевищує $\pm 1,1\%$ на всій зарядній характеристиці (див. рис. 2.5, в), яка становить близько 10 А*год .

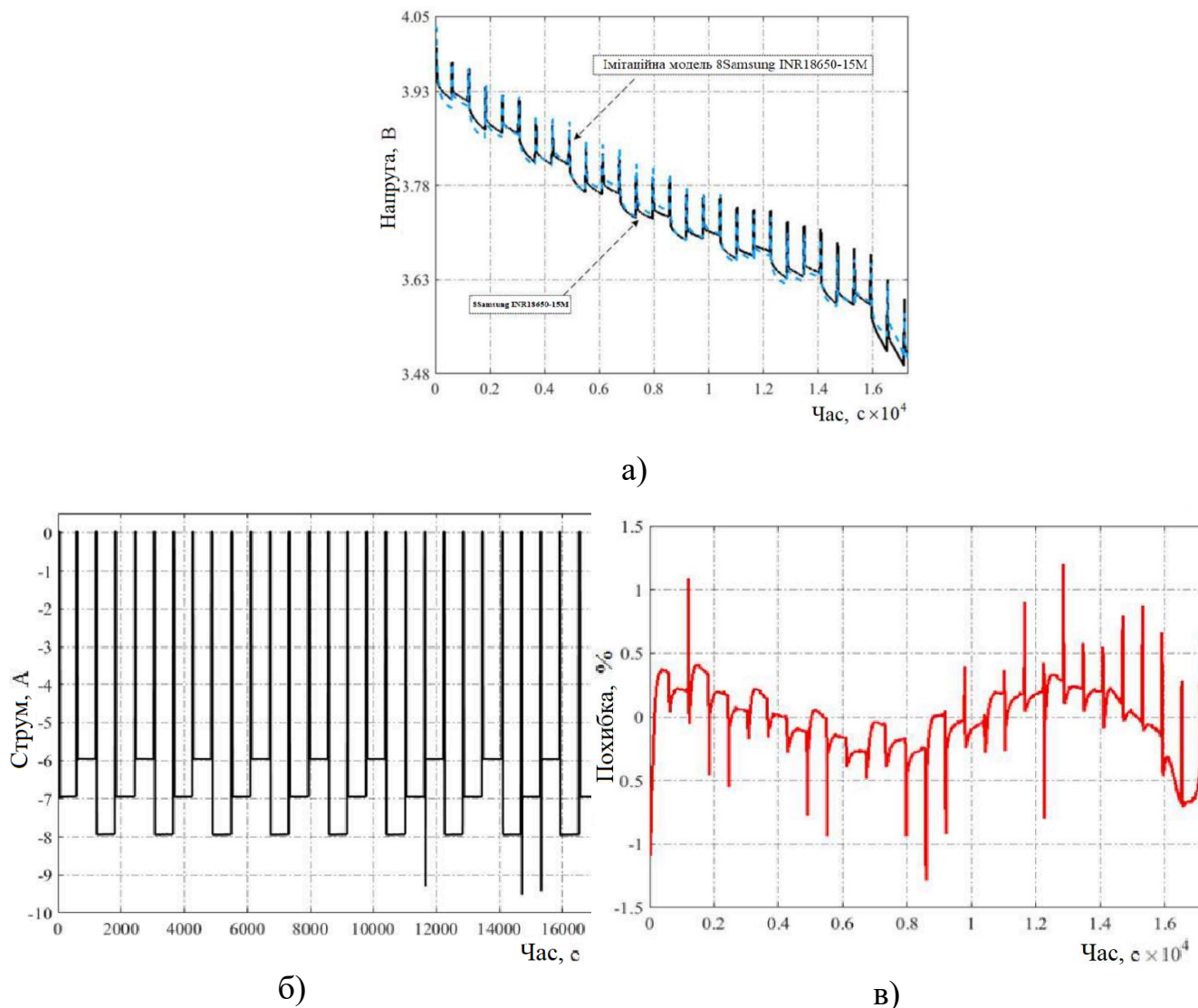


Рисунок 2.6 - Залежності вихідної напруги $U_{вих}(t)$ імітаційної моделі та реального Li-ion 8Samsung INR18650-15M (а), струму $i(t)$ (б) і максимальної відносної похибки $\Delta U_{вих}(t)$ вихідної напруги (в) від часу в режимі розряду (експеримент № 2)

За результатами моделювання максимальна відносна похибка $\Delta U_{вих}(t)$ вихідної напруги не перевищує $\pm 1,4\%$ на всій розрядній характеристиці (див.

рис. 2.6, в), яка становить близько 4 А*год.

Короткий порівняльний аналіз проведених експериментів із Li-ion 8Samsung INR18650-15M наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Порівняльний аналіз проведених експериментів із Li-ion Samsung INR18650-15M

Номер експерименту	$\Delta U_{вих}(t)$	Додаткові відомості
№ 1 (див. рис. 2.5, в)	Не перевищує $\pm 1,1\%$	Динамічний струм $i(t)$. Використовується алгоритм
№ 2 (див. рис. 2.6, в)	Не перевищує $\pm 1,4\%$	визначення параметрів динамічної моделі Li-ion

Аналіз показав, що в результаті імітаційного моделювання процесу заряду й розряду обраним профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.5, б); 2.6, б) максимальна похибка алгоритму визначення параметрів моделі Li-ion, вихідної напруги імітаційної моделі Li-ion порівняно з експериментальними даними на всьому діапазоні зарядної характеристики не перевищує $\pm 1,1\%$, а на всьому діапазоні розрядної характеристики - $\pm 1,4\%$, що свідчить про працездатність алгоритму і коректність визначення параметрів моделі Li-ion.

Таким чином, створено імітаційну модель Li-ion в режимах заряду та розряду з індивідуальними параметрами $E(t)$ і R_0 , які визначаються за допомогою запропонованого алгоритму.

2.3 Основні технічні вимоги та функціональне наповнення імітатора літій-іонного акумулятора в режимах заряду та дозаряду

У розглянутій структурі Li-ion АКБ передбачається, що імітатор Li-ion АКБ призначений для дослідження режимів роботи одного акумулятора. При цьому оцінку похибок вимірюваних сигналів в імітатора Li-ion АКБ необхідно співвіднести з вимогами, які було представлено в першому розділі, для забезпечення перевірки блоку електроніки, що забезпечує контроль і захист

імітатора Li-ion АКБ.

Для проведення автоматизованих перевірок перетворювальної апаратури використовується мікроконтролер, керований від персонального комп'ютера за послідовним інтерфейсом зв'язку. Плавне регулювання вихідної напруги зі швидкістю від 0,2 до 1 мВ/с необхідне для точного контролю рівнів спрацьовування порогових пристроїв апаратури, що перевіряється, які мають затримку реакції на зміни напруги. Цю функцію безперервного автоматизованого керування та контролю доцільно виконати програмним чином.

Для формування вихідної напруги постійного струму від 2 до 4,5 В з кроком не більше ніж 0,2 мВ в імітаторі Li-ion АКБ потрібно використовувати цифро-аналоговий перетворювач з кількістю звітів не менше 12 500. Найбільш підходящим варіантом є мікросхема, що має розрядність 14 біт це 16 384 точок звіту. Регулювання вихідної напруги імітатора Li-ion АКБ у всіх режимах (режимі зберігання, коли напруга стабілізується, і в режимі протікання струму через Li-ion) можливе лінійним регулятором, керованим за допомогою цифро-аналогового перетворювача. У режимі зберігання акумулятора значення розрядного струму, що витікає з імітатора Li-ion АКБ в схему контрольованої апаратури, як правило, не перевищує кількох міліампер. Водночас режим заряду акумулятора передбачає зміну зарядного струму до 30 А. Регулювання напруги із заданою швидкістю зміни можна забезпечити за схемою, коли силовий елемент лінійного регулятора вмикають паралельно колоам вихідної напруги імітатора Li-ion АКБ. Як лінійний регулювальний елемент можливе застосування потужного біполярного або польового транзистора .

Вимірювання встановленої напруги в імітаторі Li-ion АКБ потрібно здійснити з похибкою не більше ніж ± 1 мВ у діапазоні до 4,5 В, що необхідно для контролю похибки вимірювання апаратури.

Імітація датчика температури Li-ion з опором від 80 до 120 Ом і похибкою не більш ніж $\pm 0,1$ Ом можлива шляхом застосування в схемі спільно з постійними опорами цифрового потенціометра. Таке рішення дає змогу під'єднати колої з напругою, що не перевищує напругу живлення. З огляду на

заданий діапазон зміни опору датчика температури (термометра опорів) до 120 Ом і те, що для усунення впливу саморозігріву струм опитування не повинен перевищувати 5 мА, падіння напруги на датчику температури становитиме не більше 600 мВ. Отже, для зміни опору можливе застосування цифрового потенціометра.

Для забезпечення похибки встановлення опору не більше ніж $\pm 0,1$ Ом у діапазоні від 80 до 120 Ом потрібно мати не менше 800 інтервалів зміни опору цифровим потенціометром. Нині випускається низка цифрових потенціометрів різних фірм-виробників із кроками дискретизації 8, 32, 64, 100, 128, 256, 1024 і повним опором 2, 10, 50, 100 кОм. Домогтися 800 ступенів дискретизації з кроком 0,1 Ом можна шляхом каскадного включення двох цифрових потенціометрів. опором 10, 50, 100 кОм і розрядністю 256 біт .

Вимірювання струму дозаряду Li-іон до 1 А з похибкою вимірювання не більше $\pm 0,5$ % можливе з використанням струмового шунта, увімкненого послідовно в коло видачі струму дозаряду з апаратури, що перевіряється, і підсилювача-вимірювача напруги, пропорційної до струму, що протікає. Як датчик - перетворювач струму в напругу доцільно використовувати струмовий шунт, що має порівняно з іншими датчиками високу лінійність, стабільність характеристик. При цьому результуюча похибка вимірювача струму дозаряду не перевищуватиме $\pm 0,4$ %.

Для імітації комутатора байпасного перемикача необхідно шунтувати вихідні клеми Li-іон ключем з малим вихідним опором. Для цього можливе застосування потужного польового транзистора, керованого за зовнішньою командою (наприклад, польового транзистора STP60NF06 з допустимим струмом стоку 60 А, напругою сток - сток - сток 60 В, опором сток - сток у відкритому стані 0,014 Ом). У пасивному режимі транзистор буде в закритому стані й не вплине на вихідну напругу Li-іон , після виконання команди задіяння байпасного перемикача він буде у відкритому стані та зможе замкнути струм Li-іон АКБ (до 30 А), розсіюючи при цьому потужність 4,5 Вт.

Рекуперацію енергії пропонується забезпечити імпульсним перетворювачем напруги, що входить до складу Li-іон . Імпульсний

перетворювач вмикається при досягненні струмом заряду заданого рівня, що перевищує можливості тривалого регулювання і відведення тепла лінійним регулятором напруги. Цей струм може становити близько 1 А (виходячи зі значення розсіюваної потужності приблизно 5 Вт).

2.4 Опис структурно-функціональної схеми імітатора літій-іонного акумулятора

Структурно-функціональна схема імітатора Li-Ion наведена на (рис. 2.7.)

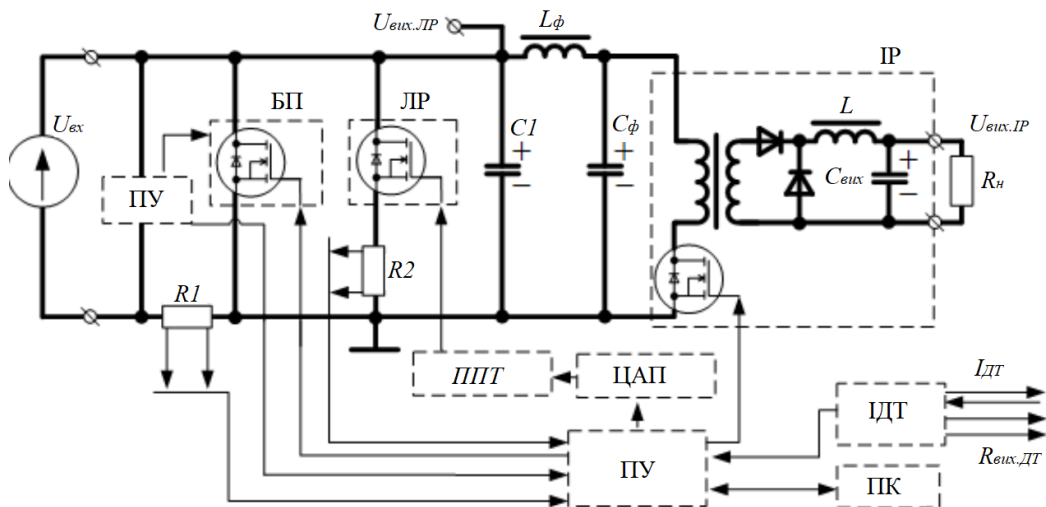


Рисунок 2.7 - Структурно-функціональна схема імітатора Li-Ion

На схемі прийнято такі позначення: ПУ - пороговий пристрій; БП - байпасний перемикач; ЛР - лінійний регулятор; ПСТ - підсилювач постійного струму; ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач; ПУ - пристрій управління, що, окрім управління, виконує функції вимірювання струму та напруги; ПК - персональний комп'ютер; L_ϕ , C_ϕ - елементи фільтру, що загороджує; ІР - імпульсний регулятор; ІДТ - імітатор датчика температури.

ПУ спільно з ключем БП захищає Li-Ion і контрольовану апаратуру від перевищення вихідної напруги Li-Ion понад допустимі рівні в разі відмов електрорадіовиробів (ЕРВ). Силовий ключ БП призначений для виключення акумулятора зі складу Li-Ion АКБ шляхом замикання силових кіл. Шунт R1 призначений для контролю струмів дозарядження акумулятора, що видаються з апаратури, яку перевіряють. ІДТ призначений для імітації температурного

датчика опору.

Принцип роботи схеми полягає в стабілізації напруги на затискачах імітатора шунтувальним регулятором струму, що складається з паралельно ввімкнутих ЛР і ІР. Напруга стабілізації задається ПК через ПУ і може змінюватися із заданою швидкістю. Характеристики імітатора Li-Ion забезпечуються ЛР, а ІР забезпечує скидання надлишкової потужності в джерело постійного струму. Під час протікання струму заряду через імітатор Li-Ion вихідна напруга стабілізується ЛР і ІР. Напруга стабілізації імітатора Li-Ion задається ЦАП. Сигнал помилки між заданою напругою з виходу ЦАП і напругою імітатора Li-Ion посилюється ППТ і подається на ЛР. ЛР стабілізує струм навантаження на рівні 30 А. Для зниження теплових втрат напруга з шунта R2 надходить на управління ІР, який починає відбір потужності і рекуперацію її в джерело постійного струму. При цьому струм, що протікає через ЛР, зменшується.

Під час подавання команди на задіяння БЖ відбувається розмикання силових колоів імітатора Li-Ion, при цьому вимірювальні колои залишаються задіяними. Це дає змогу визначити метрологічні характеристики ЕПА, а також перевірити логіку функціонування як під час задіяння БЖ, так і в режимі зберігання (коли струм заряду із зовнішніх клем " $U_{вх}$ " відсутній). У цьому випадку імітатор Li-Ion формує і стабілізує напругу на накопичувальному конденсаторі С1 невеликої ємності за допомогою регулювального елемента ЛР. ПУ здійснює вимірювання напруг з необхідною точністю 24-розрядним аналого-цифровим перетворювачем.

Таким чином, розроблена схема імітатора Li-Ion дає змогу імітувати характеристики реального Li-Ion за допомогою запропонованої моделі, а використання ІР забезпечує рекуперацію енергії під час протікання зарядного струму через імітатор Li-Ion і сприяє зменшенню теплових втрат більш ніж утричі. У разі послідовного ввімкнення декількох імітаторів Li-Ion перевірка апаратури з різними схемами керування і контролю параметрів (напруги, температури, струму заряду і дозаряду) забезпечується гальванічною розв'язкою колоів керування від первинного джерела живлення.

2.5 Схемотехнічні рішення елементів імітатора літій-іонного Акумулятора

Розглянемо схемотехнічні рішення елементів ІLi-ion для виконання структурно-функціональної схеми та заявлених вимог.

Перетворювач напруги

Перетворювач напруги (рис. 2.8) забезпечує підтримання стабілізованої вихідної напруги, що імітується Li-ion під час протікання струму заряду до 30 А.

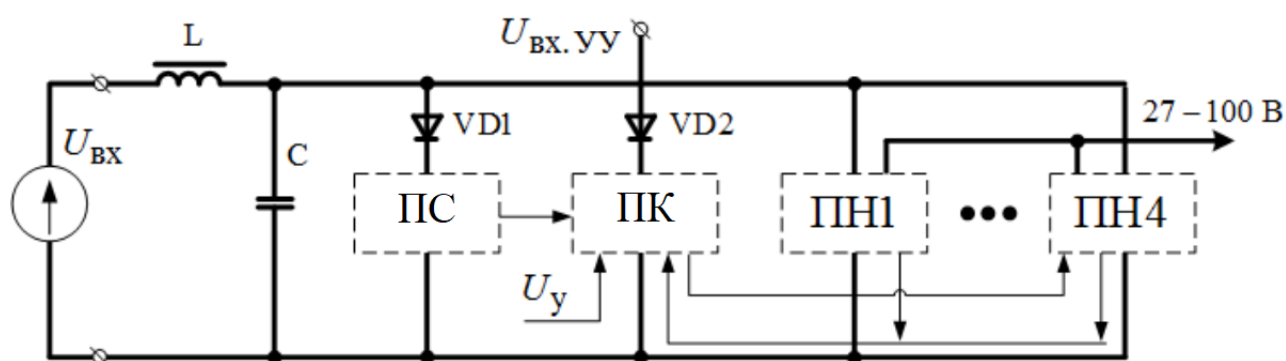


Рисунок 2.8 - Структурна схема перетворювача напруги

Структурна схема перетворювача напруги містить LC-фільтр, пристрій синхронізації (ПС), пристрій керування (ПК), перетворювачі напруги (ПН1 - ПН4). Діоди VD1, VD2 призначені для розв'язки напруг живлення УС і УУ. УС забезпечує синхронізацію керівних сигналів на ПН1 - ПН4 напругами, зсунутими на кут 90° одна відносно одної. Напруги живлення УС і УУ необхідні для захисту ІLi-ion від перенапруги в разі відмови джерела живлення схеми керування. Під дією струму заряду напруга зростатиме до виходу з ладу ЕРІ.

Подача напруги живлення на ПС і ПК через діод VD2 дає змогу забезпечити автономний режим перетворювача напруги. При цьому напруга $U_{ВХ}$ не перевищує 7 В. Управління струмом здійснюється напругою U_y . Зі збільшенням напруги струм зростає і досягає максимального значення 30 А за напруги 1 В. LC-фільтр забезпечує фільтрацію перешкод, що виникають під час

роботи ПН1 - ПН4. Для вирівнювання струму по ПН1 - ПН4 у схемі ведено зворотний зв'язок за струмом.

Основна мета дослідження - відпрацювання технічних рішень вищенаведених блоків.

За результатами дослідження перетворювача напруги за струму 7,5 А потужність, що розсіюється, не перевищує 6,5 Вт. Отже, за струму 30 А сумарна потужність, що розсіюється чотирма перетворювачами, не перевищуватиме 26 Вт.

За результатами схемотехнічного опрацювання обрано елементну базу та сформовано вимоги для конструкції ІLi-ion .

Імітатор датчика температури

Імітатор датчика температури має забезпечувати точність встановлення значення опору не гірше $\pm 0,1$ Ом у діапазоні від 80 до 120 Ом. У нашому випадку імітатор датчика температури розміщується в ІLi-ion АКБ для перевірки спрацювання порогових пристроїв температури.

Розглянемо такий варіант побудови імітатора датчика температури (рис. 2.9).

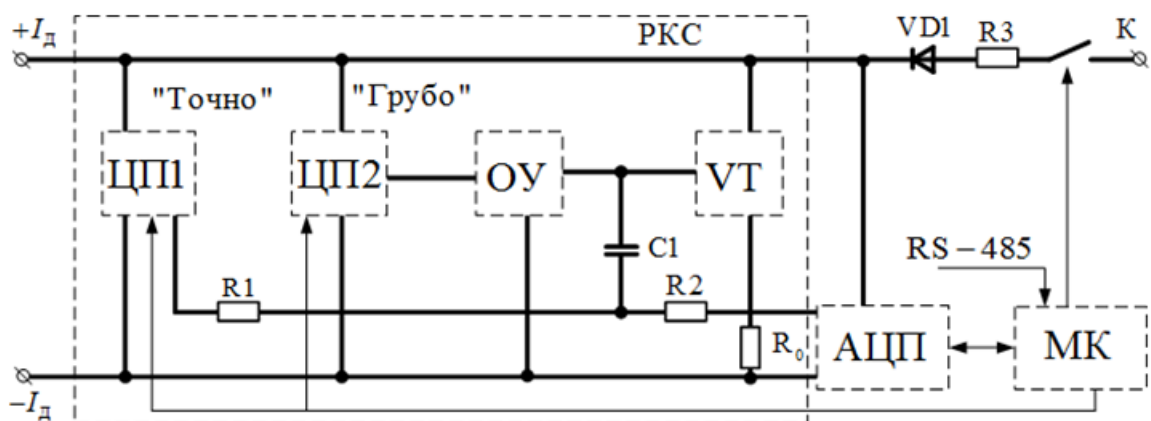


Рисунок 2.9 - Структурна схема імітатора датчика температури з регульованим опором

Схема містить цифрові потенціометри (ЦП1, ЦП2), операційний підсилювач (ОУ), транзистор VT, резистори R_0 , R_1 , R_2 і конденсатор C_1 . Ці елементи складають регульований кодом опір (PKC). Причому один ЦП

регулює опір грубо, інший - точно. АЦП вимірює напругу на резисторі R_0 і на РКС. МК керує роботою АЦП, ЦП1 і ЦП2. Інтерфейсом RS-485 надходить завдання на встановлення певного опору термодатчика. За відсутності постійної напруги опитування МК вмикає ключ К і під'єднує РКС до джерела живлення, вимірює опір i , регулюючи ЦП1 і ЦП2, встановлює потрібне значення опору.

Похибка встановлення опору імітатора імітатора датчика температури з урахуванням його періодичного підстроювання визначається стабільністю резистора R_0 . Використання резистора R_2 , зміна опору якого під час напруцювання становить $\pm 0,01\%$, а під час зміни температури в діапазоні від 5 до 35 °C - $\pm 0,0075\%$, забезпечить виконання вимог до похибки встановлення з великим запасом - не менше ніж $\pm 0,02$ Ом (при вимозі не більше $\pm 0,1$ Ом).

Об'єктом аналітичного дослідження були макети імітатора датчика температури зібрані за схемою (див. рис. 2.9). Програма дослідження включає аналіз характеристик елементів схеми при зменшенні струму до 1 мА та при збільшенні струму до 3 мА.

Результати дослідження (табл. 2.2) засвідчили, що під час зміни струму термодатчика на ± 1 мА, що становить 50 % від початкового значення, його опір змінюється не більше ніж на $\pm 0,1$ Ом.

Отже, безперервна корекція опору за допомогою МК не потрібна. Це дає змогу використовувати імітатор датчика температури у режимі циклічних опитувань пристроями вимірювання температури зі складу приладу.

Таблиця 2.2 - Результати аналітичного дослідження

Опір, Ом, при струмі			Абсолютна похибка вимірювання опору, Ом	
2 мА	1 мА	3 мА	при зменшенні струму до 1 мА	при збільшенні струму до 3 мА
80,235	80,307	80,200	0,072	-0,035
89,810	89,893	89,773	0,083	-0,037
100,285	100,367	100,240	0,082	-0,045
109,385	109,470	109,336	0,085	-0,049
120,315	120,410	120,270	0,095	-0,045

Запропоновані рішення показали високу лінійність його вихідної характеристики. При зміні опору від 80 до 120 Ом і струму опитування від 1 до 3 мА похибка встановленого опору змінювалася не більше ніж на $\pm 0,1$ Ом.

За отриманими результатами обрано елементну базу та сформовано вимоги для опрацювання конструкції імітатора Li-ion АКБ.

2.6 Алгоритми визначення параметрів динамічної моделі літій-іонного акумулятора для реалізації на мікроконтролері

Згідно зі структурною схемою (рис. 2.10) розглянемо детальніше алгоритмічне забезпечення пристрою керування, а саме алгоритм визначення параметрів моделі Li-ion, запропонований у другому розділі .

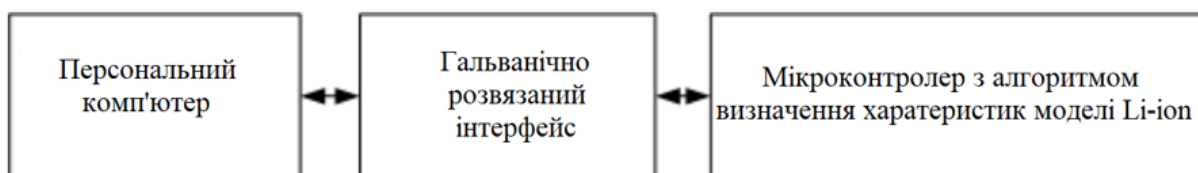


Рисунок 2.10 - Структурна схема експериментальної установки для реалізації алгоритму визначення параметрів моделі Li-ion

Цей програмний модуль дає змогу відпрацювати будь-які режими з протіканням струму, а також прогнозувати деградацію Li-ion, а отже, і всієї батареї. Крім того, є можливість з частини загублених даних відновити поточні режими на основі інформації про струм або певного діапазону $Q_{\Sigma}(t)$.

Цей модуль необхідно розглядати в основному режимі роботи програми, щоб оцінити ресурси і час функціонування (рис. 2.11).

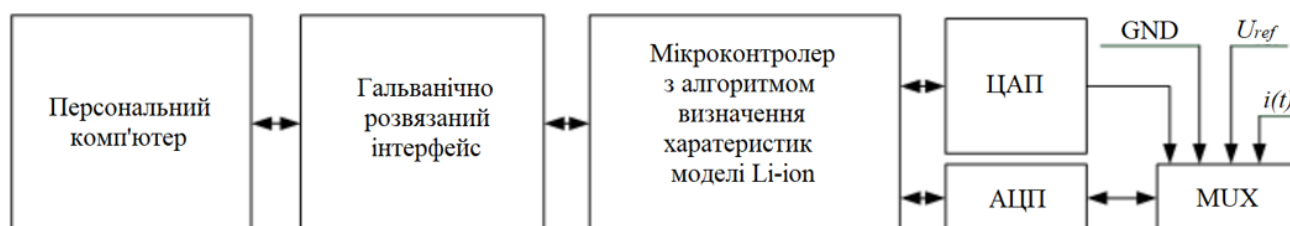


Рисунок 2.11 - Розширена структура експериментальної установки

Програма може функціонувати в таких режимах:

- штатний режим роботи імітатора;
- режим рекуперації енергії;
- режим ліквідації несправного PLi-ion ;
- аварійна ситуація.

За відсутності команд по інтерфейсу після увімкнення АБО А підпрограми-завдання виконуються в такому порядку (рис. 2.12):

- 1) системне калібрування аналогово-цифрового перетворювача (АЦП);
- 2) калібрування цифро-аналогового перетворювача (ЦАП);
- 3) вимірювання струму $i(t)$. Якщо значення струму понад 5 А, вмикається рекуперація енергії;
- 4) обчислення напруги PLi-ion за запропонованим алгоритмом визначення параметрів моделі Li-ion, що складається з 13 кроків;
- 5) формування напруги PLi-ion ;
- 6) вимірювання напруги PLi-ion ;
- 7) якщо різниця між сформованими вимірюною напругою перевищує понад 3 мВ, перехід на крок 1;
- 8) кінець.

Системне калібрування включає калібрування повної шкали АЦП і нульового значення за зовнішніми сигналами. Тривалість калібрування з урахуванням комутації мультиплексора становить 150 мс.

Час вимірювання АЦП з архітектурою "дельта-сигма" становить 20 мс, з урахуванням придушення перешкод частотою 50 Гц виробник гарантує точне перетворення після четвертого вимірювання. Відповідно, з періодом 120 мс можна гарантовано отримувати коректні дані. При цьому вимірювання струму доцільно проводити іншим АЦП.

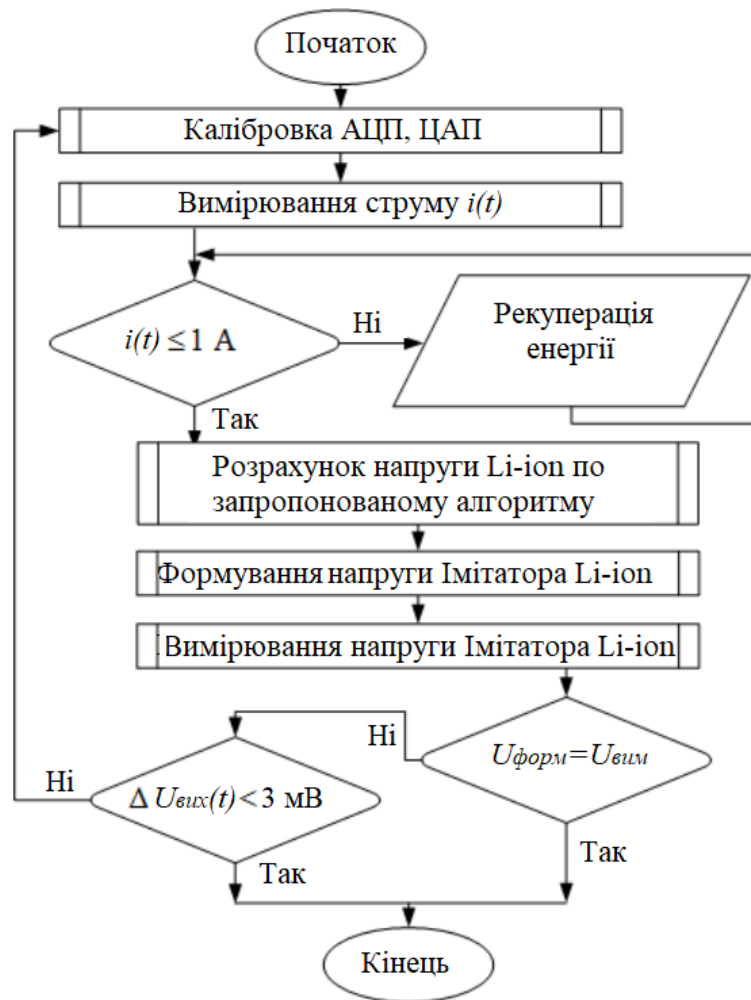


Рисунок 2.12 - Блок-схема алгоритму роботи ІLi-ion

Калібрування АЦП проводять не рідше ніж кожні 16 384 цикли, що дає змогу компенсувати зміну параметрів елементів через нагрівання та деградацію.

Розроблений і скомпільований модуль програми з алгоритмом визначення параметрів динамічної моделі Li-ion може виконуватися на будь-яких мікроконтролерах.

Встановлене на персональному комп'ютері програмне забезпечення виконує такі функції:

- збір і подання даних імітатора Li-ion АКБ в зручному для користувача вигляді

вигляді

- протоколювання одержуваних даних для подальшого аналізу;
- налаштування вимірювальної частини імітатора Li-ion АКБ.

Найважливішою функцією програми є протоколювання даних, що дає змогу зберігати дані для статистичного аналізу результатів експерименту.

2.7 Дослідження характеристик імітатора літій-іонного акумулятора в режимах заряду і дозаряду

Для дослідження процесів у Li-ion АКБ і перевірки алгоритмів було створено дослідний зразок експериментального стенда (рис. 2.13).

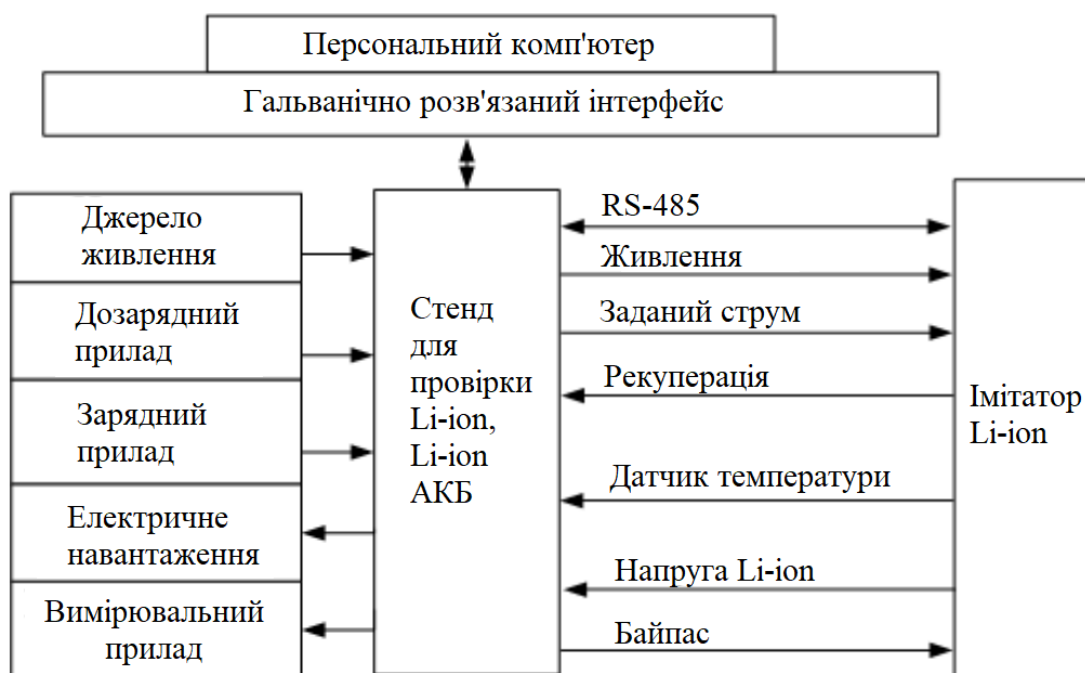


Рисунок 2.13 - Загальна схема експериментального стенда

Експериментальні дослідження проводяться в чотири етапи:

- 1) експеримент у програмному середовищі з моделлю Li-ion АКБ;
- 2) експеримент на стенді імітатора Li-ion АКБ з моделлю акумулятора Samsung INR18650-15M;
- 3) експеримент на стенді або на акумуляторах з індивідуальними моделями акумуляторів Samsung INR18650-15M;
- 4) експеримент на стенді Li-ion із застосуванням термокамери.

Перший етап експерименту дає можливість створення імітаційного стенда з моделлю Li-ion АКБ на підставі наданих експериментальних даних щодо батареї 8 Samsung INR18650-15M. Модель Li-ion АКБ у програмному

середовищі Matlab Simulink дає змогу своєчасно налагодити алгоритм визначення параметрів моделі Li-ion і використовувати її для прогнозування поведінки Li-ion АКБ у реальному часі.

На другому і третьому етапах експерименту тестують моделі Li-ion і Li-ion АКБ з алгоритмом визначення параметрів, проводять оцінювання його впливу на результати роботи імітатора Li-ion АКБ, а також коригування розроблених алгоритмів з урахуванням агрегування ПLi-ion .

Четвертий етап експерименту дає змогу остаточно визначити точність розробленого алгоритму та імітатора Li-ion АКБ в умовах мінливої навколишньої температури.

Експериментальний стенд дає змогу проаналізувати реакцію імітатора Li-ion АКБ на струм і визначити параметри моделі Li-ion. Команди від персонального комп'ютера передаються в ПLi-ion по гальванічно розв'язаному інтерфейсу RS-485 PCI-1612.

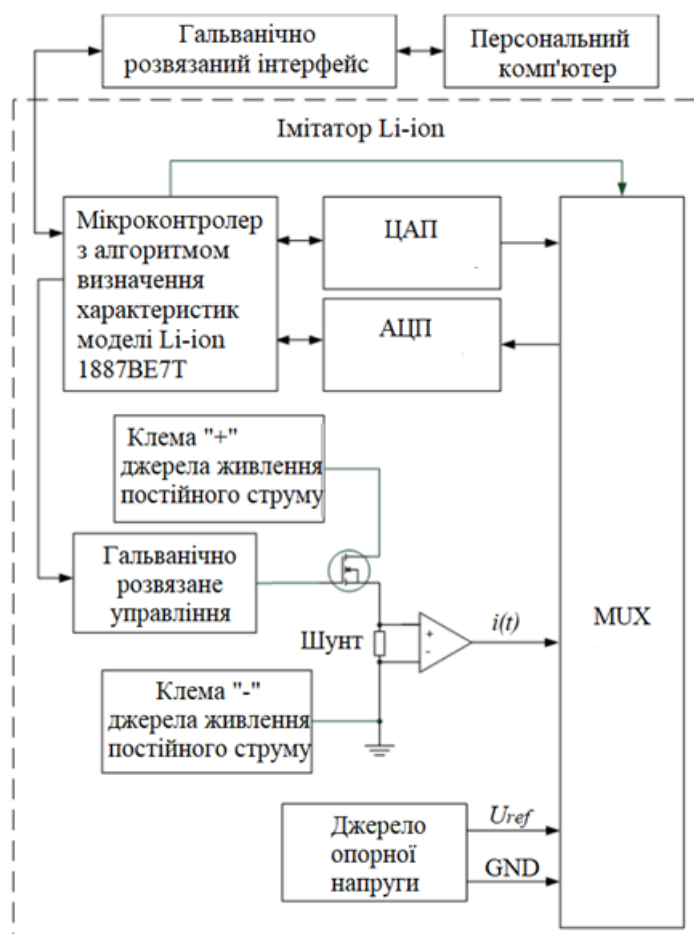


Рисунок 2.14 - Загальна схема ПLi-ion

Як джерело живлення імітатора Li-ion АКБ використовується перший канал GPD-73303S другий канал використовується як дозарядний пристрій з межами за струмом від 0 до 3 А. У ролі зарядного пристрою слугує джерело живлення постійного струму N8736A з межами за струмом від 0 до 85 А. Електронне навантаження АТН-8301 використовується для рекуперації енергії та реалізації режиму розряду. Еталонним вимірювальним пристроєм є цифровий мультиметр .

Керування Li-ion (рис. 2.14) здійснює мікроконтролер з алгоритмом визначення параметрів моделі Li-ion, пов'язаний послідовним інтерфейсом з аналого-цифровим перетворювачем і з цифро-аналоговим перетворювачем для формування напруги за струмом. Вибір каналу вимірювання здійснюється за допомогою аналогового мультиплексора. Він забезпечує роботу восьми каналів вимірювання і двох додаткових каналів для калібрування аналого-цифрового перетворювача.

Керування комутацією мультиплексора відбувається паралельною шиною, яка також використовується для керування імітатора Li-ion АКБ. Мікроконтролер керує увімкненням транзисторів, що під'єднують електронне навантаження або зарядний пристрій. Імітатор Li-ion АКБ має гальванічну розв'язку від персонального комп'ютера, електронного навантаження і зарядного пристрою.

Для вимірювання напруги імітатора Li-ion АКБ використовується підключення входу аналого-цифрового перетворювача через дільник напруги з коефіцієнтом $\frac{1}{2}$.

При цьому для виключення похибки дільника напруги під час калібрування напруга джерела опорної напруги також підключається через нього.

Методика і програма досліджень імітатора Li-ion АКБ

Для імітації Li-ion АКБ необхідні еталонні дані та моделі Li-ion з алгоритмом визначення параметрів динамічної моделі Li-ion в режимі реального часу.

Еталонні дані для моделі Li-ion можна отримати наступним способом, а

саме взяти дані у заводу-виробника Li-ion, де пройдено всі випробування з урахуванням технічних умов під час приймально-здавальних випробувань;

Для формування залежностей напруги акумулятора від ємності в режимі заряду необхідні такі умови:

- 1) номінальний профіль зарядного струму Li-ion АКБ;
- 2) діапазон від мінімального до максимального допустимих значень напруг Li-ion АКБ.

Варто зауважити, що в процесі експерименту спочатку проводять заряд батареї до максимальної допустимої напруги, потім слідує вирівнювання напруг на акумуляторах, щоб усі перехідні процеси в батареї завершилися і не впливали на точність вимірювань. У цьому стані батарея вважається повністю зарядженою, а ємність, яку вона може віддати, - максимальною, і отримані параметри для моделі розряду оптимальні. Для параметрів моделі розряду проводиться зворотна процедура. Результати випробування Li-ion наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Метрологічні та технічні характеристики Li-ion

Найменування характеристики	Значення
Діапазон формованої напруги постійного струму, що формується, В	Від 2 до 4,5
Швидкість зміни вихідної напруги, мВ/с	Від 0,2 до 1
Межі допустимої основної абсолютної похибки вимірювань напруги постійного струму, мВ	$\pm 1,0$
Діапазон відтворення електричного опору постійному струму, Ом	Від 80 до 120
Межі допустимої абсолютної похибки відтворення електричного опору постійного струму відтворення електричного опору постійному струму, Ом	$\pm 0,1$
Діапазон вимірювань сили постійного струму дозаряду, А	Від 0 до 1
Межі допустимої приведеної до верхнього значення діапазону вимірювань похибки вимірювання сили постійного струму дозаряду, %	$\pm 0,5$
Діапазон протікання постійного струму заряду, А	Від 0 до 30
Значення струму споживання, А, не більше	0,3
Напруга живлення від джерела постійного струму, В	28 ± 3
Середнє напрацювання, год, не менше	25 000
Термін служби, років, не менше	12

З наведених даних випливає, що метрологічні та технічні характеристики Li-ion задовольняють вимогам, що висуваються до подібних спеціалізованих пристроїв, і перевершують відомі аналоги, наведені в таблиці 1.1.

2.8 Висновки до розділу

Було побудовано технічну модель системи тестування з застосуванням в ній імітатора Li-ion АКБ та описано різні шляхи реалізації цієї моделі проведені дослідження переконливо доводять, що представлений алгоритм визначення параметрів динамічної моделі Li-ion є працездатним та ефективним.

Було досліджено недоліки даної моделі та надано деякі пропозиції щодо покращення актуальності системи та покращення її функціональних можливостей, а саме модифікації припали на перетворювач напруги та спосіб імітації датчика температури.

Було розроблено алгоритм програмної моделі та описану структуру схеми її виконання, проведено дослідження на актуальність її використання при різних режимах роботи акумулятора, а саме процесу розрядження та зарядження.

Було виконано порівняння з еталонними даними та визначено похибку вихідної напруги, що лежить в межах норми $\pm 2\%$.

Отже з вище вказаних результатів роботи, можна побачити, що система технічно розв'язує завдання визначення параметрів динамічної моделі Li-ion. Крім того, у пристрій керування та персональний комп'ютер вводиться модульне програмне забезпечення, що дає змогу відображати процес імітації Li-ion АКБ.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Структурна схема стенда для дослідження характеристик імітатора літій-іонної акумуляторної батареї у режимах заряду та дозаряду

У цьому розділі розглядаються експериментальний стенд і методика перевірки адекватності рішень в режимах заряду і дозаряду.

Сутність розв'язання технічної задачі полягає в тому, що керування режимами заряду Li-ion АКБ має здійснюватися за результатами контролю параметрів кожного акумулятора батареї. Використання , у складі комплексу автоматики та стабілізації напруги (КАС), пристроїв контролю параметрів Li-ion передбачає оцінку їхньої похибки у складі програмно-обчислювальних пристроїв випробувального обладнання.

Прийнятним варіантом технічного рішення може бути пристрій, що складається з послідовно з'єднаних джерела безперебійного живлення, вторинного джерела електроживлення, що випробовується, навантажувального пристрою рекупераційного типу, виходи якого під'єднані до акумуляторної батареї, що входить до складу джерела безперебійного живлення.

Однак недоліком такого пристрою є обмеження, пов'язані з обов'язковим використанням акумуляторної батареї, а також із неможливістю реалізації всіх функцій управління акумуляторами батареї, що не дає змоги повною мірою виконати програму випробувань вторинного джерела електроживлення.

Запропонований варіант імітатора Li-ion АКБ передбачає розширення функціональних можливостей пристрою за рахунок імітації зарядних характеристик кожного акумулятора Li-ion АКБ .

Цей варіант (рис. 3.1) передбачає наявність у складі пристрою , в режимі імітації заряду Li-ion АКБ, який містить паралельно сполучені джерело живлення 1, пристрій рекуперації 2 і КАС, який випробовується, 3. Вихід зарядного пристрою через резистивний шунт 4 під'єднано до першого силового виводу імітатора Li-ion АКБ 5 і датчика напруги 6, вихід якого та вимірювальні клеми резистивного шунта сполучено з входами аналого-цифрового

перетворювача 7, під'єданого до першого інформаційного входу контролера 8, другий, третій, четвертий та п'ятий інформаційні входи якого сполучено відповідно до першого інформаційного входу КАС, що випробовується, інформаційного входу пристрою рекуперації, інтерфейсу персонального комп'ютера 9 і першого інформаційного входу КАС, що випробовується, і інтерфейсу персонального комп'ютера 9. Li-ion АКБ містить n імітаторів 10, 11, n -а кількість імітаторів Li-ion АКБ з'єднаних між собою послідовно, водночас силовий вхід першого і силовий вихід n -го імітатора Li-ion АКБ є відповідно першим і другим силовими виводами імітатора Li-ion АКБ. Перший і другий інформаційні входи імітатора Li-ion АКБ під'єдані відповідно до першої та другої інформаційних шин, які являють собою перший і другий інформаційні входи імітатора Li-ion АКБ.

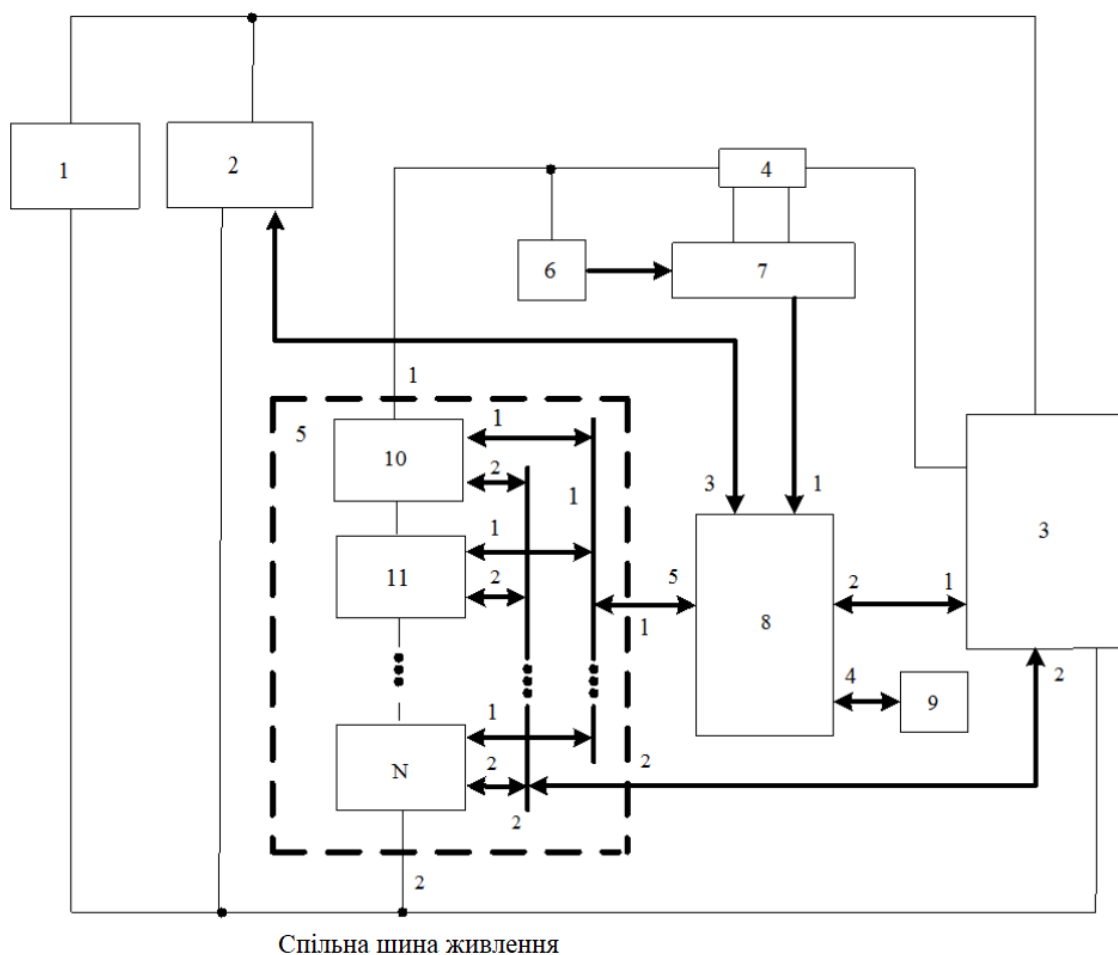


Рисунок 3.1 - Структурно-функціональна схема стенда для тестування Li-ion АКБ

Інформаційні входи 1 слугують для керування режимами роботи

імітаторів акумуляторів, що підключаються за програмою випробувань КАС. При цьому швидкість зміни напруги встановлюється для кожного імітатора Li-ion , а потім фіксується. Тим самим забезпечуються різні режими роботи КАС під час заряду Li-ion АКБ, зокрема режим зберігання батареї і балансування напруг акумуляторів. Крім цього, за цими входами здійснюється встановлення значень опорів імітаторів термодатчиків, що забезпечують тестування функцій контролю температурного стану акумуляторної батареї. До персонального комп'ютера надходять отримані значення параметрів імітаторів Li-ion , які використовуються для розрахунку похибки пристроїв контролю та балансування напруги акумулятора. За інформаційним входом 2 КАС під'єднується до імітаторів Li-ion для вимірювання опорів імітаторів термодатчиків, напруги та струму імітаторів Li-ion . За інформаційним входом 3 до персонального комп'ютера надходять дані про значення напруг і температури, виміряних пристроями контролю КАС, і сигнали керування його режимами роботи. У персональному комп'ютері розраховуються похибки вимірювання параметрів Li-ion АКБ пристроями контролю КАС.

Персональний комп'ютер, відповідно до програми випробувань КАС, формує необхідні керувальні команди для контролера, який, зі свого боку, забезпечує увімкнення імітаторів акумуляторів. Після увімкнення випробуваного КАС у режимі імітації заряду Li-ion АКБ струм і напругу на його виході вимірюють датчики, їх перетворює аналого-цифровий перетворювач, вони надходять у контролер для формування вольт-амперної навантажувальної характеристики випробуваного приладу.

Аналогові регулятори імітаторів Li-ion формують необхідну вольт-амперну характеристику імітатора Li-ion АКБ.

Частина енергії постійного струму, отриманої імітаторами Li-ion від випробуваного КАС, повертається пристроєм рекуперації в силовий канал живлення КАС.

У процесі роботи пристрою здійснюється передавання даних про стан випробуваного КАС у контролер і далі - в комп'ютер для візуального відображення інформації відповідно до алгоритмів випробувань.

Перевага пропонованого технічного рішення полягає в тому, що режими випробувань обладнання з імітатором акумуляторної батареї максимально наближені до реальних режимів роботи кожного акумулятора. У цьому пристрої кількість циклів заряду не обмежується, і під час випробувань КАС можна імітувати процеси

деградації акумуляторів літій-іонної батареї. Крім того, є можливість проведення випробувань КАС з будь-якою кількістю Li-ion в батареї без зміни структури пристрою, що забезпечує універсальність пропонованого рішення за його технічної реалізації.

3.2 Побудова імітаційної моделі літій-іонної акумуляторної батареї та перевірка її адекватності.

8Samsung INR18650-15M має вісім Li-ion акумуляторів, датчики температури LM35A і байпасні перемикачі OT40_C. Для створення імітаційної моделі Li-ion АКБ доцільно використовувати експериментальні дані, які отримано на етапі приймально-здавальних випробувань Li-ion або Li-ion АКБ.

Розглянемо алгоритм визначення параметрів динамічної моделі Li-ion для семи Li-ion 8Samsung INR18650-15M, що залишилися, в процесі заряду і розряду (рис. 3.2, 3.3) обраним профілем струму $i(t)$.

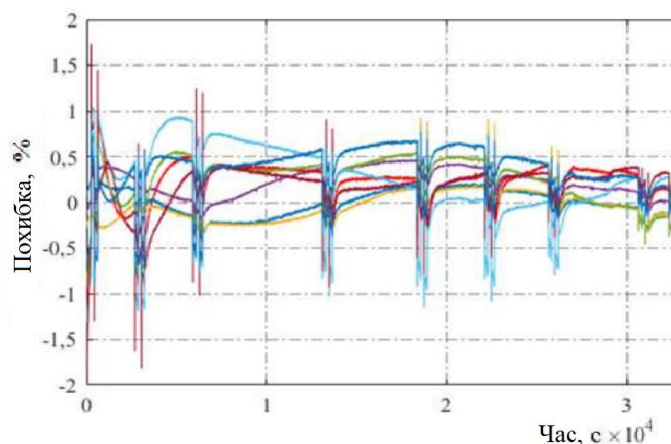


Рисунок 3.2 - Залежність максимальної відносної похибки $\Delta U_{вих}(t)$ восьми імітаційних моделей і реального Li-ion 8Samsung INR18650-15M від часу в режимі заряду заданим (див. рис. 2.5, б) профілем струму $i(t)$

Максимальна відносна похибка $\Delta U_{\text{вих}}(t)$ вихідної напруги не перевищує $\pm 2\%$ на всій зарядній характеристиці батареї 8Samsung INR18650-15M.

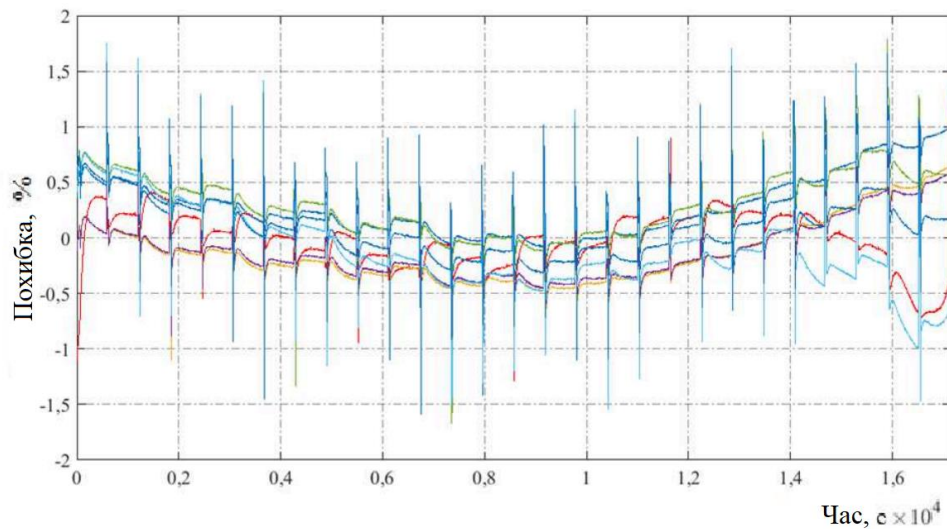


Рисунок 3.3 - Залежність максимальної відносної похибки $\Delta U_{\text{вих}}(t)$ восьми імітаційних моделей і реального Li-ion 8Samsung INR18650-15M від часу в режимі розряду заданим (див. рис. 2.6, б) профілем струму $i(t)$.

Максимальна відносна похибка $\Delta U_{\text{вих}}(t)$ вихідної напруги не перевищує $\pm 2\%$ на всій розрядній характеристиці 8Samsung INR18650-15M.

Стислий порівняльний аналіз проведених експериментів із вісьмома Li-ion 8Samsung INR18650-15M наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняльний аналіз проведених експериментів із вісьмома Li-ion 8Samsung INR18650-15M

Номер експерименту	$\Delta U_{\text{вих}}(t)$	Додаткові відомості
№ 1 (див. рис. 3.2)	Не перевищує $\pm 2\%$	Динамічний струм $i(t)$.
№ 2 (див. рис. 3.3)		Використовується алгоритм визначення параметрів динамічної моделі Li-ion

Наразі за результатами моделювання є вісім моделей акумуляторів з

індивідуальними параметрами $E(t)$ і R_0 , визначеними в режимі заряду і розряду з різними профілями струму $i(t)$.

Для побудови структури моделі батареї (рис. 3.4) "система з експериментальними даними - імітаційна модель батареї - система діагностування - система візуалізації" будемо використовувати раніше розглянуту структуру моделі акумулятора, використовуючи компоненти пакета Simulink Library Browser. Отримані експериментальні дані батареї задаються у вигляді моделювальних компонентів From Workspace блоком № 1, у якому відображаються профіль струму протікання $i(t)$, напруга акумуляторів і напруга батареї. У блоці № 2 реалізовано імітаційну модель батареї шляхом агрегування акумуляторів (рис. 3.5).

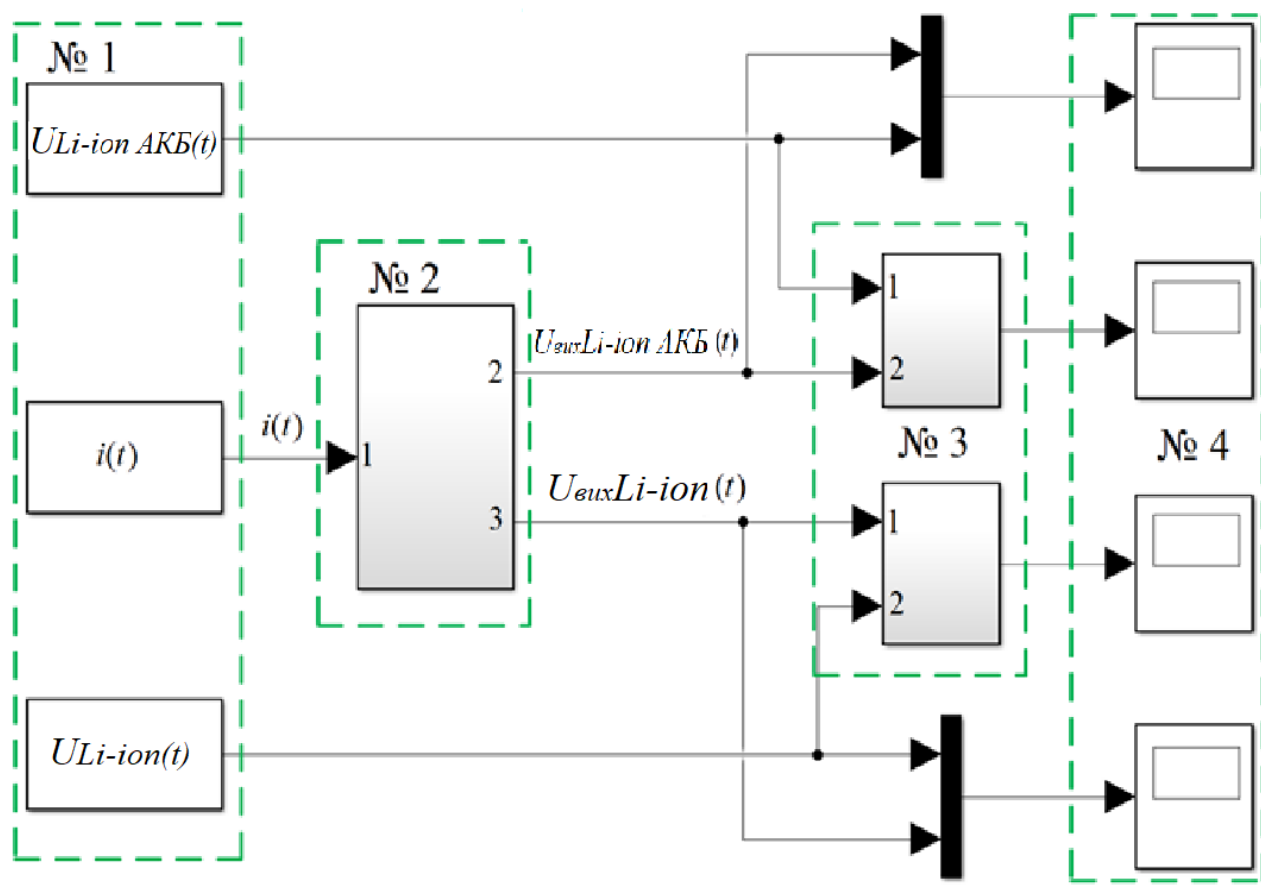


Рисунок 3.4 - Імітаційна модель батареї в середовищі Matlab Simulink: блок № 1 - експериментальні дані; блок № 2 - імітаційна модель батареї; блок № 3 - перевірка на адекватність; блок № 4 - візуалізація даних

Після визначення параметрів моделі акумулятора блоком № 2.1 модель

батареї 8Samsung INR18650-15M (блок № 2) перевіряється на адекватність блоком № 3 у результаті порівняння відповідних характеристик, отриманих експериментальним шляхом, що зберігаються в блоці № 1.

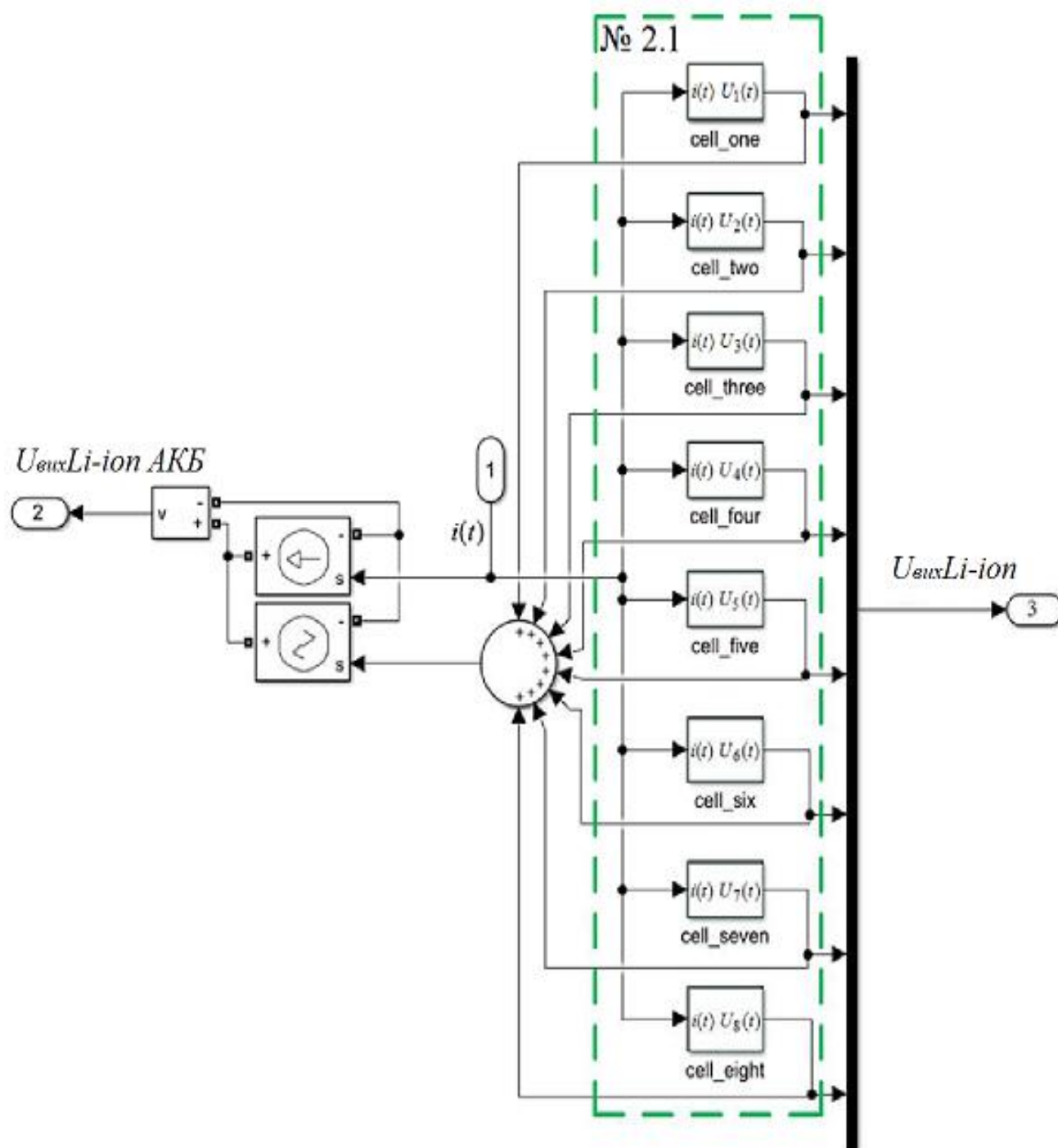
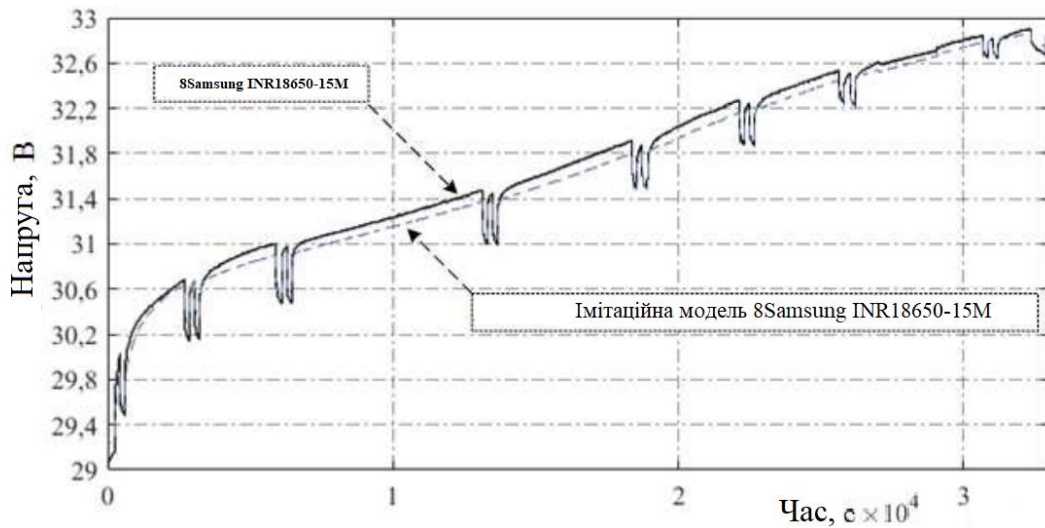
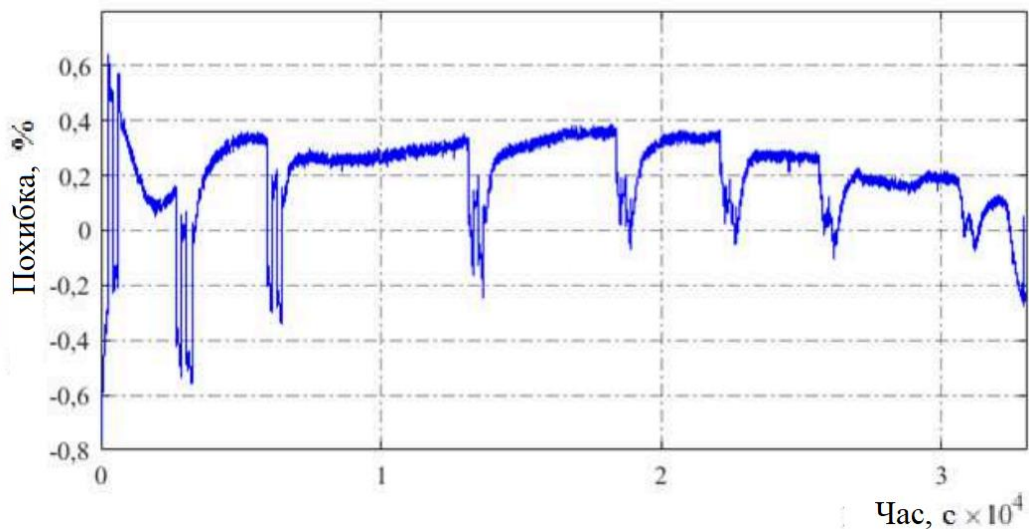


Рисунок 3.5 - Імітаційна модель батареї 8Samsung INR18650-15M у середовищі Matlab Simulink

Результати моделювання динамічної моделі батареї 8Samsung INR18650-15M (рис. 3.6-3.7) наведені за тих самих змінних, що і для Li-ion в процесі заряду і розряду.



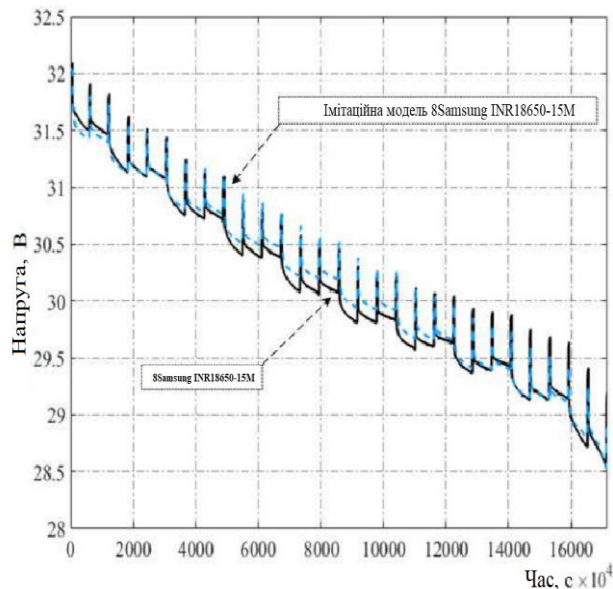
а)



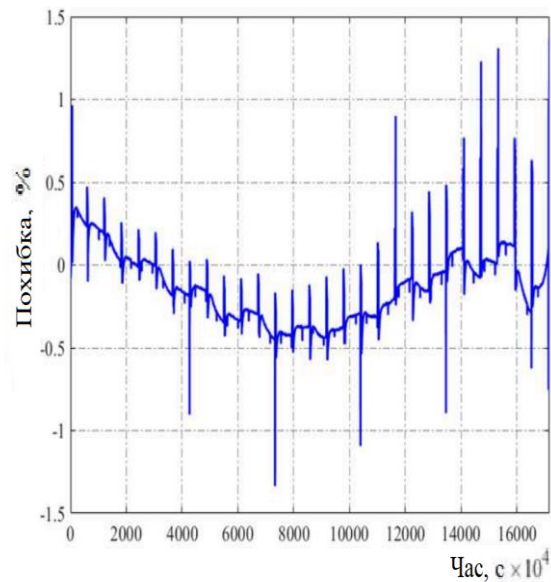
б)

Рисунок 3.6 - Залежності вихідної напруги $U_{вих}(t)$ імітаційної моделі та реальної Li-іон АКБ 8Samsung INR18650-15M (а) і максимальна відносна похибка $\Delta U_{вих}(t)$ вихідної напруги (б) у режимі заряду з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.5, б)

Похибка характеристик імітаційної моделі Li-іон АКБ 8Samsung INR18650-15M не перевищує $\pm 0,8\%$ на всьому діапазоні циклу заряду (див. рис. 3.6) з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.5, б) у разі використання алгоритму визначення параметрів моделей Li-іон АКБ та $\pm 1,5\%$ - на всьому діапазоні циклу розряду (рис. 3.7) з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.6, б).



а)



б)

Рисунок 3.7 - Залежності вихідної напруги $U_{вих}(t)$ імітаційної моделі та реальної Li-ion АКБ 8Samsung INR18650-15M (а) і максимальна відносна похибка $\Delta U_{вих}(t)$ вихідної напруги (б) у режимі розряду з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.6, б)

Короткий порівняльний аналіз проведених експериментів із батареєю 8Samsung INR18650-15M наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Порівняльний аналіз проведених експериментів із батареєю 8Samsung INR18650-15M

Номер експерименту	$\Delta U_{ВИХ}(t)$	Додаткові відомості
№ 1 (див. рис. 3.6, б)	Не перевищує $\pm 0,8\%$	Динамічний струм $i(t)$. Використовується алгоритм
№ 2 (див. рис. 3.7, б)	Не перевищує $\pm 1,5\%$	визначення параметрів динамічної моделі Li-ion

Похибка характеристик імітаційної моделі батареї 8Samsung INR18650-15M не перевищує $\pm 2\%$ на всьому діапазоні циклу заряду і розряду у разі використання раніше визначених параметрів моделі заряду і розряду Li-ion.

Під час побудови моделі датчика температури LM35A у програмному середовищі Matlab Simulink скористаємося його імітаційною моделлю.

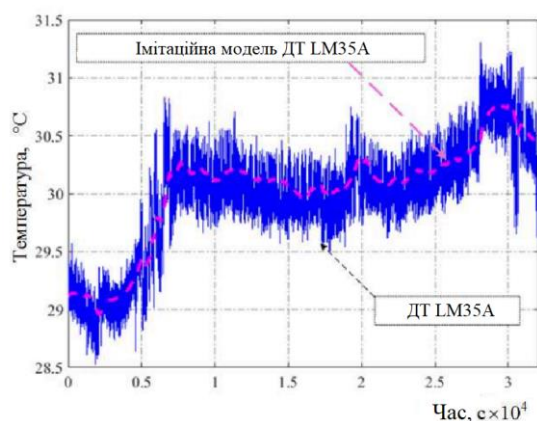
Похибка моделі датчика температури LM35A становить не більше $\pm 5\%$, що прийнятно для розв'язуваної задачі. Модель датчика температури (рис. 3.8).

Перевірку адекватності моделі датчика температури LM35A проводили за результатами порівняння з експериментальними даними 8Samsung INR18650-15M. Представлено залежності температури від часу (рис. 3.9 – 3.10), де зазначено експериментальні дані (суцільна лінія) і дані імітаційної моделі датчика температури LM35A (пунктирна лінія).

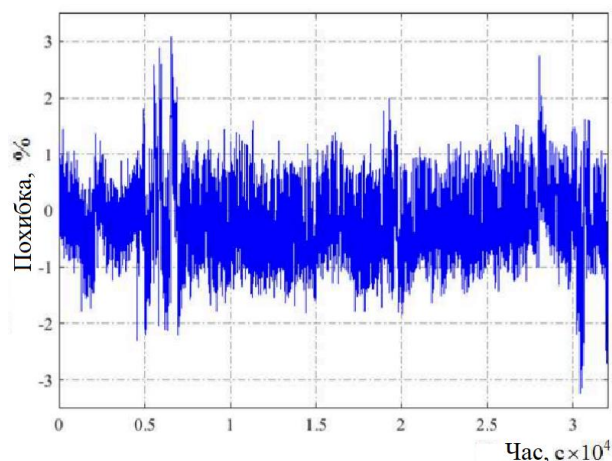


Рисунок 3.8 - Імітаційна модель датчика температури в середовищі Matlab Simulink

Результати моделювання датчика температури LM35A наведено за тих самих змінних, що й для Li-ion в процесі заряду та розряду, але з різним (див. рис. 2.5, б); 2.6, б); профілем струму $i(t)$.



а)



б)

Рисунок 3.9 - Залежності температури імітаційної моделі та реального датчика температури LM35A (а) і максимальна відносна похибка $\Delta T(t)$ температури (б) у режимі заряду з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.5, б)

Похибка характеристик імітаційної моделі датчика LM35A не перевищує $\pm 3,2\%$ на всьому діапазоні циклу заряду (див. рис. 3.9) із профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.5, б) і $\pm 2,2\%$ - на всьому діапазоні циклу розряду (рис. 3.10) із профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.6, б).

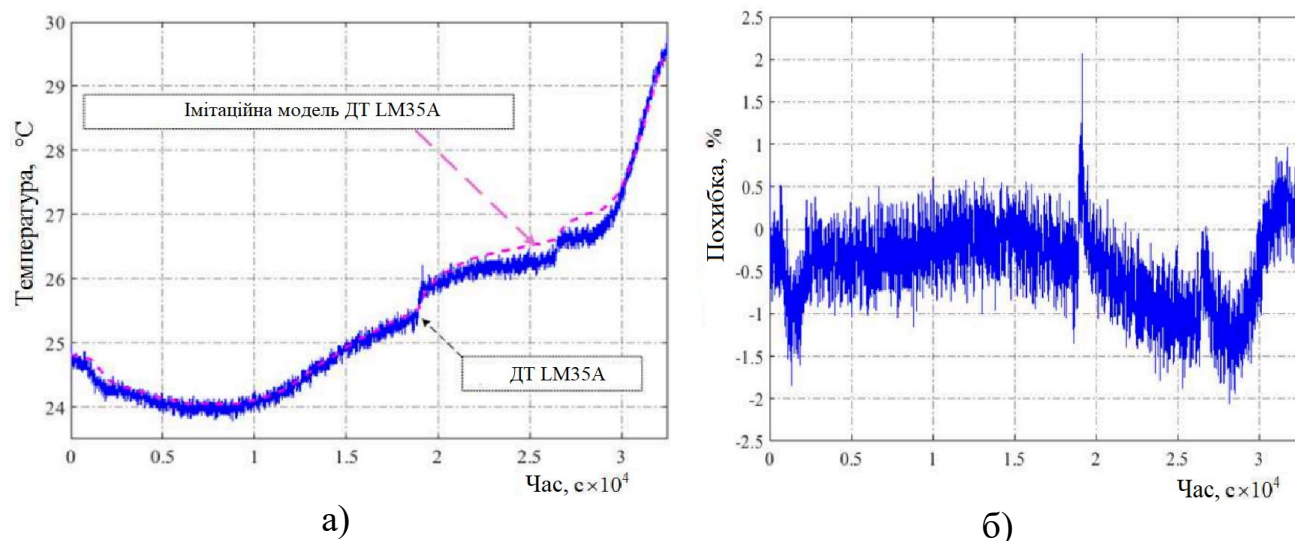


Рисунок 3.10 - Залежності температури імітаційної моделі та реального датчика температури LM35A (а) і максимальна відносна похибка $\Delta T(t)$ температури (б) у режимі розряду з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.6, б)

Короткий порівняльний аналіз проведених експериментів із датчиком температури LM35A наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Порівняльний аналіз проведених експериментів із датчиком температури LM35A

Номер експерименту	$\Delta T(t)$	Додаткові відомості
№ 1 (див. рис. 3.9)	Не перевищує $\pm 3,2\%$	Характеристики експериментальної установки: похибка вимірювання $\pm 5\%$, діапазон вимірювання від 10 до 40 °C
№ 2 (див. рис. 3.10)	Не перевищує $\pm 2,2\%$	

Похибка імітаційної моделі датчика температури LM35A щодо експериментальних даних батареї 8Samsung INR18650-15M не перевищує $\pm 3,2\%$ на всьому діапазоні циклу заряду і розряду. Потрібно зазначити, що експериментальна установка дає змогу отримати експериментальні дані з

датчика температури LM35A з точністю $\pm 5\%$ на всьому діапазоні.

Особливість байпасного перемикача комутаційного типу OT40 _C полягає в його низькому перехідному опорі $R_{\text{бп}}$ (не понад 100-130 мкОм) за комутуючих струмів від 50 А. Слід зазначити, що конструктивне виконання байпасного перемикача передбачає проводити його експериментальне дослідження шляхом багаторазового перемикання у вихідне положення, тим самим отримуючи необхідні дані для його моделі.

Основним завданням байпасного перемикача є виключення з кола електроживлення навантаження несправних Li-ion, не розриваючи коло "Li-ion АКБ - корисне навантаження" на час понад 500 мкс. За час перемикання струм короткого замикання може сягати понад 1000 А.

Під час побудови моделі байпасного перемикача комутаційного типу в програмному середовищі Matlab Simulink, у зв'язку з його особливістю, готових рішень не знайдено. Для побудови моделі байпасного перемикача використовується рівняння Джоуля-Ленца, що дає змогу моделювати процеси протікання досить великих струмів під час короткого замикання і тепловиділення на контактах перемикача.

Модель байпасного перемикача реалізовано в середовищі Matlab Simulink (рис. 3.11).

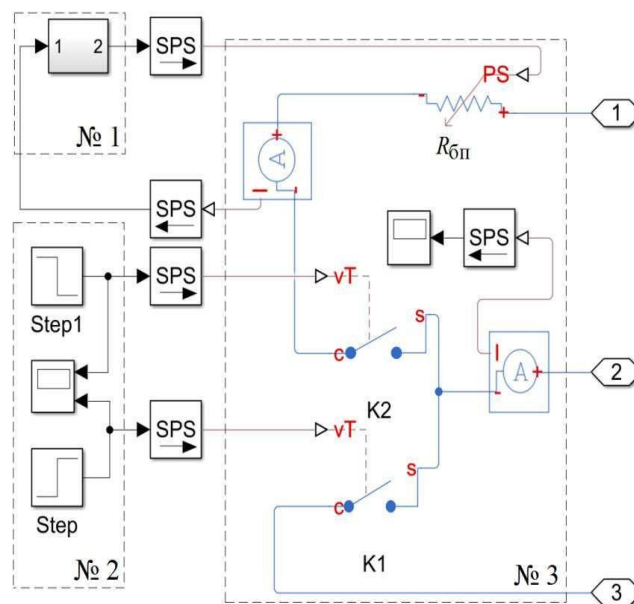


Рисунок 3.11 - Імітаційна модель байпасного перемикача у середовищі Matlab Simulink

Математичний вираз закону Джоуля-Ленца і модель теплового опору представлені компонентами блоку № 1. Активація байпасного перемикача здійснюється блоком № 2, імітація активації байпасного перемикача - блоком № 3

У результаті створено імітаційну модель Li-ion АКБ 8Samsung INR18650-15M з байпасним перемикачем OT40 _C і датчиком температури LM35A шляхом агрегування восьми моделей акумуляторів. Похибка характеристик вихідної напруги імітаційної моделі батареї 8Samsung INR18650-15M не перевищує $\pm 0,8\%$ на всьому діапазоні циклу заряду (див. рис. 3.6) з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.5, б) за умови використання алгоритму визначення параметрів моделі Li-ion і $\pm 1,5\%$ - на всьому діапазоні циклу розряду (див. рис. 3.7) з профілем струму $i(t)$ (див. рис. 2.6, б).

3.3 Результати дослідження та порівняння з реальним аналогом

Для визначення точності алгоритму обчислення параметрів моделі Li-ion застосовується порівняльний аналіз з еталонними даними.

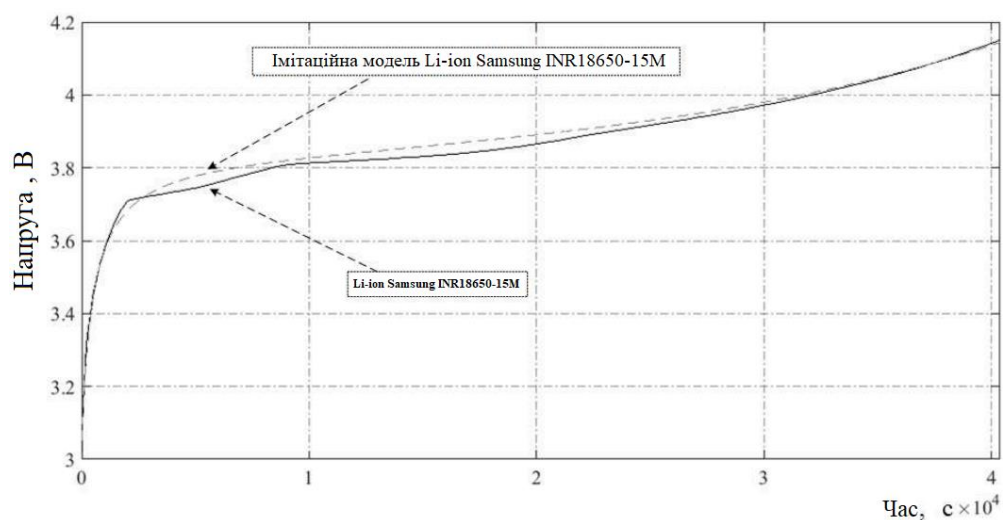
Під час першого етапу експерименту було взято дані виробника щодо Li-ion типу Samsung INR18650-15M, на підставі яких було визначено параметри, необхідні для побудови моделі Li-ion в режимах заряду та розряду (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 - Параметри моделі акумулятора Samsung INR18650-15M

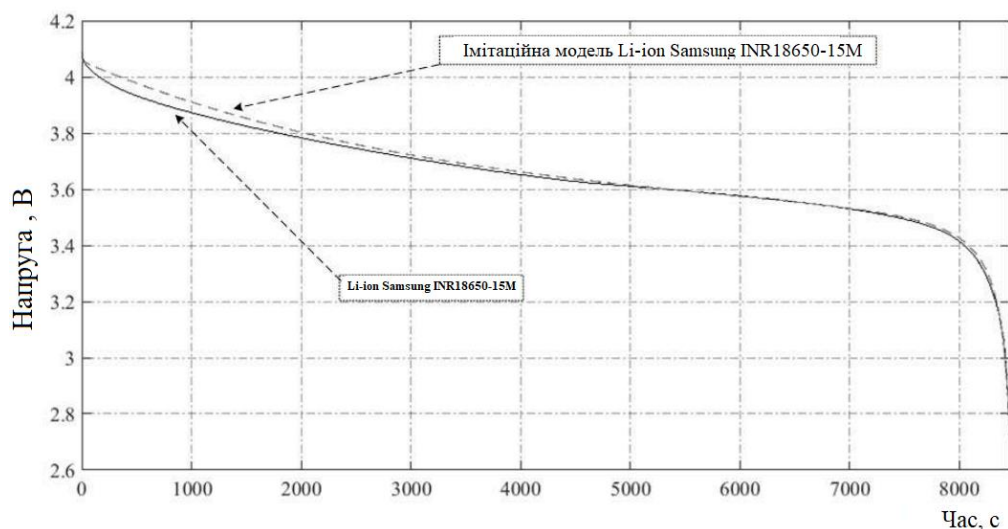
Параметр	Значення	
	у режимі заряду	в режимі розряду
$i(t)$, А	4,4	22
A	0,35	0,55
B	0,05	0,05
K	0,01	0,009
E_0 , В	3,811	3,811
R_0 , Ом	0,000177	0,006675
R_P , Ом	0,000177	0,006675
Z_P , Ф	10000	10000
τ , с	3,535	13,35
t , год	11,22	2,35

З наведених параметрів випливає, що внутрішній опір Li-іон залишається постійним на початку розряду, проте починає швидко зростати при зменшенні ємності, також збільшуються поляризаційна ємність і опір.

Для отримання статистичних даних було проведено експериментальні цикли заряду-розряду Li-іон, під час яких її поведінку порівнювали з Li-іон для обчислення похибки алгоритму визначення параметрів динамічної моделі Li-іон. Отримані дані були оброблені в програмі Matlab Simulink. Максимальна похибка $\Delta U_{вих}(t)$ визначення напруги акумулятора становила не більше $\pm 2\%$.



а)



б)

Рисунок 3.12 - Графік залежності вихідної напруги імітаційної моделі та реального Li-ion Samsung INR18650-15M у режимах заряду (а) і розряду (б)

Під час другого етапу експерименту проводився аналіз точності

алгоритму визначення параметрів моделі Li-ion в режимі заряду струмом 4,4 А і в режимі розряду струмом 22 А. За результатами експериментальних досліджень створено модель 8Samsung INR18650-15M із заводськими параметрами, які визначено за допомогою запропонованого алгоритму. Максимальна похибка характеристик моделей Samsung INR18650-15M не перевищує $\pm 1,5\%$ на всьому діапазоні циклу заряду-розряду Li-ion АКБ (рис. 3.12).

Під час третього етапу експерименту проводили запис даних із моделі Samsung INR18650-15M у мікроконтролер ПLi-ion і його перевірку на експериментальному стенді.

Для випробувального стенда, оснащеного персональним комп'ютером, розроблено додатковий модуль програмного забезпечення верхнього рівня. Програмний модуль (рис. 3.13) реалізовано в середовищі RAD Studio XE8 і виконує такі функції:

- збір інформації та її подання в зручному для користувача вигляді вигляді;
- протоколювання одержуваних даних для подальшого аналізу та формування $U_{вих}(t)$;
- введення параметрів Li-ion.

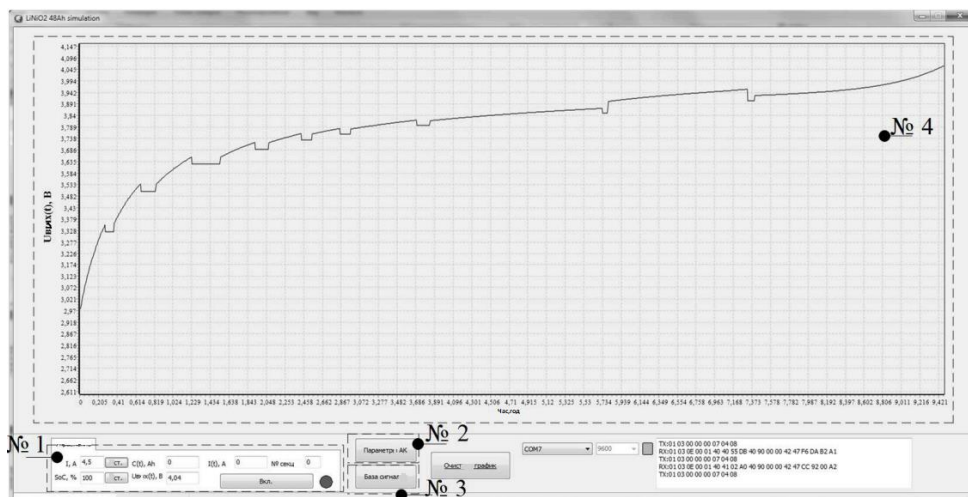


Рисунок 3.13 - Інтерфейс верхнього рівня ПLi-ion з реалізацією режиму імітації акумулятора: блок № 1 - реалізація органів управління; блок № 2 - реалізація профілю змінних для моделей; блок № 3 - реалізація сервера; блок № 4 - візуалізація результату

Блок № 1 (рис. 3.14) призначений для зчитування або встановлення струму $i(t)$, ступеня зарядженості (SoC) і дає змогу задавати діапазон роботи. Також передбачено відображення зчитаного струму $i(t)$, що формується $U_{вих}(t)$ і $Q_{\Sigma}(t)$ імітованого Li-ion.

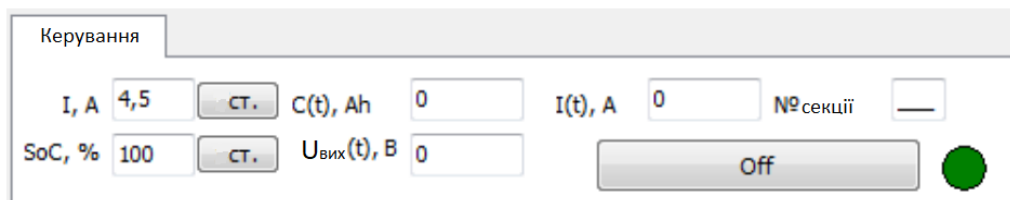


Рисунок 3.14 - Вікно "Керування" блоку № 1

Блок № 2 (рис. 3.15) призначений для введення необхідних змінних моделі Li-ion з можливістю збереження профілю даних, що дає змогу з мінімальними зусиллями перепризначати тип Li-ion АКБ.

Блок № 3 (рис. 3.16) виконує функцію сервера і забезпечує протокол обміну нижнього рівня з верхнім рівнем. У ньому формуються дані про стан Li-ion та його працездатність.

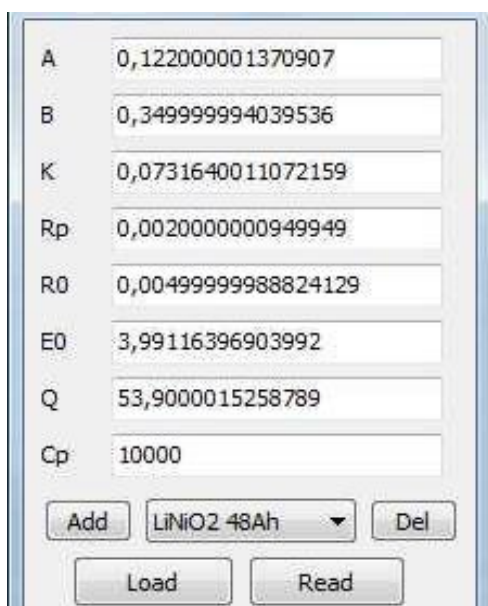


Рисунок 3.15 - Вікно "Параметри АК" блоку № 2

	Type	Address	Data
Mode	U16	0x00	unknow
$U_{вых}(t)$	float	0x01	unknow
i	float	0x03	unknow
$i(t)$	float	0x05	unknow
TMD.A	float	0x07	unknow
TMD.B	float	0x09	unknow
TMD.K	float	0x0b	unknow
TMD.R0	float	0x0d	unknow
TMD.E0	float	0x0f	unknow
TMD.Q	float	0x11	unknow
TMD.Cp	float	0x13	unknow
TMD.Rp	float	0x15	unknow

Рисунок 3.16. - Вікно "База сигналів" блока №

Блок № 4 забезпечує візуалізацію залежності вихідної напруги акумулятора від часу і струму вихідної напруги акумулятора від часу і струму $i(t)$.

Для отримання статистики було проведено експериментальні цикли заряду-розряду Li-ion, під час яких обчислювали похибку алгоритму визначення параметрів динамічної моделі Li-ion. Отримані дані обробляли в програмі Matlab Simulink.

3.4 Висновки по розділу.

За результатами дослідження було складено імітаційну модель Li-ion АКБ на основі алгоритму наданому в розділі 2 . Задля змоги дослідити можливості схеми та перевірити на працездатність та точність імітування Li-ion АКБ її було змодельовано в середовищі програмного забезпечення Matlab Simulink, що дало можливість оцінювати та порівняти запропоновану модель з її реальним аналогом .

Дослідивши та порівнявши дані , отримані на підставі експериментальних даних батареї 8Samsung INR18650-15M, за допомогою Matlab Simulink, було встановлено, що відтворення параметрів Li-ion , а саме технічний стан Li-ion АКБ за зміною профілю струму $i(t)$, можливе з похибкою не більше $\pm 2\%$, похибка визначення параметрів динамічної моделі Li-ion не перевищує $\pm 1,4\%$ на всьому діапазоні циклу розрядної та $\pm 0,7\%$ - зарядної характеристик. що задовільняє очікування

Розраховавши та дослідивши елементи модерізації системи в Matlab Simulink реалізовано моделювання байпасного перемикача і датчика температури LM35A, порівнявши з реальними аналогами отримано максимальне значення відносної похибки вихідної напруги динамічної моделі Li-ion АКБ 8Samsung INR18650-15M , що не перевищує $\pm 1,5\%$ на всьому діапазоні циклу розрядної та $\pm 0,8\%$ - зарядної характеристик батареї, отримані результати задовільні .

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [15].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [13].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не

рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та

навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Захист від статичної електрики

Статична електрика – це сукупність явищ, що пов'язані з виникненням, накопиченням та релаксацією вільного електричного заряду на поверхні або в об'ємі діелектричних та напівпровідникових речовин, матеріалів та виробів. Виникнення зарядів статичної електрики є результатом складних процесів перерозподілу електронів чи іонів при стиканні двох різнорідних тіл (речовин) [15].

Порушення поверхневого контакту при терті тіл призводить до

електризації - виникнення електричних зарядів, які можуть утримуватись на поверхні цих тіл протягом тривалого часу. Такі заряди, на відміну від рухомих зарядів динамічної електрики (електричний струм) знаходяться у статичному стані.

Електричні заряди виникають:

- при терті діелектричних тіл один об одного або об метал (наприклад, пасові передачі);
- при переливанні, перекачуванні, перевезенні в ємностях горючих талегкозаймистих рідин;
- при транспортуванні горючих газів трубопроводом;
- при подрібненні діелектриків;
- при переміщенні сухого запиленого повітря зі швидкістю понад 15 –20 м/с і т.п.

Систематичний вплив електростатичного поля підвищеної напруженості негативно впливає на організм людини, викликаючи, в першу чергу, функціональні розлади центральної нервової та серце-судинної систем.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів досягається трьома основними способами:

- запобіганням виникнення та накопичення статичної електрики,
- прискоренням стікання електростатичних зарядів,
- нейтралізацією електростатичних зарядів.

4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій — це підготовка та реалізація комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу (спостережень), експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу

подій з метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків [16].

Зазначені функції запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру в нашій країні виконує Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 3 серпня 1998 р. № 1198.

Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру (ЄДСЗР) включає в себе центральні та місцеві органи виконавчої влади, виконавчі органи рад, державні підприємства, установи та організації з відповідними силами і засобами, які здійснюють нагляд за забезпеченням техногенної та природної безпеки, організують проведення роботи із запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного походження і реагування у разі їх виникнення з метою захисту населення і довкілля, зменшення матеріальних втрат.

Основною метою створення ЄДСЗР є забезпечення реалізації державної політики у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації, забезпечення цивільного захисту населення.

Завданнями ЄДСЗР є:

- розроблення нормативно-правових актів, а також норм, правил та стандартів з питань запобігання надзвичайним ситуаціям та забезпечення захисту населення і територій від їх наслідків;
- забезпечення готовності центральних та місцевих органів виконавчої влади, виконавчих органів рад, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;
- навчання населення щодо поведінки та дій у разі виникнення надзвичайної ситуації;
- виконання цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ та організацій, зменшення можливих матеріальних втрат;

- збирання та аналітичне опрацювання інформації про надзвичайні ситуації, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;
- прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах;
- створення, раціональне збереження і використання резерву матеріальних та фінансових ресурсів, необхідних для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- проведення державної експертизи, забезпечення нагляду за дотриманням вимог щодо захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій (у межах повноважень центральних та місцевих органів виконавчої влади);
- оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій, своєчасне та достовірне його інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи;
- захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення;
- пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;
- здійснення заходів щодо соціального захисту постраждалого населення, проведення гуманітарних акцій;
- реалізація визначених законодавством прав у сфері захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, в тому числі осіб (чи їх сімей), щобрали безпосередню участь у ліквідації цих ситуацій;
- участь у міжнародному співробітництві у сфері цивільного захисту населення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У результаті аналізу літературних джерел та розглядання методик визначення параметрів Li-Ion, встановлено, що наявні методики не дають змоги повною мірою забезпечити необхідну точність або мають вкрай високу обчислювальну складність.

2. Було побудовано технічну модель системи тестування з застосуванням в ній імітатора Li-ion АКБ та описано різні шляхи реалізації цієї моделі.

3. Було досліджено недоліки даної моделі та надано деякі пропозиції щодо покращення актуальності системи та покращення її функціональних можливостей.

4. Було розроблено алгоритм програмної моделі та описану структуру схеми її виконання, проведено дослідження на актуальність її використання при різних режимах роботи акумулятора.

5. Було виконано порівняння з еталонними даними та визначено похибку вихідної напруги, що лежить в межах норми $\pm 2\%$.

6. Було складено імітаційну модель Li-ion АКБ, її було змодельовано в середовищі програмного забезпечення Matlab Simulink, що дало можливість оцінювати та порівнювати запропоновану модель з її реальним аналогом.

7. Було встановлено, що відтворення параметрів Li-ion, а саме технічний стан Li-ion АКБ за зміною профілю струму $i(t)$, можливе з похибкою не більше $\pm 2\%$, похибка визначення параметрів динамічної моделі Li-ion не перевищувала $\pm 1,4\%$ на всьому діапазоні циклу розрядної та $\pm 0,7\%$ - зарядної характеристик.

8. Було розглянуто елементи модернізації системи в Matlab Simulink, реалізовано моделювання байпасного перемикача і датчика температури LM35A.

11. Було отримано, шляхом порівняння з реальними аналогами, максимальне значення відносної похибки вихідної напруги динамічної моделі Li-ion АКБ 8Samsung INR18650-15M, що не перевищує $\pm 1,5\%$ на всьому діапазоні циклу розрядної та $\pm 0,8\%$ - зарядної характеристик батареї.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Fleischer C., Ostendorp B., Sauer D. U. Simulative comparison of balancing algorithms for active and passive cell balancing systems for lithium-ion batteries. In Proc. Adv. Automotive Battery Conf.. 2013, February. P 11.
2. . Patel M.R. Spacecraft power systems / M.R. Patel. CRC press, 2004. 736 p.
3. L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, “A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,” *Journal of Power Sources*, vol. 226, pp. 272–288, 2013.
4. R. Klein, N. A. Chaturvedi, J. Christensen, J. Ahmed, R. Findeisen, and A. Kojic, “Optimal charging strategies in lithium-ion battery,” in 2015 American Control Conference (ACC). IEEE, 2015, pp. 382–387.
5. M. Torchio, N. A. Wolff, D. M. Raimondo, L. Magni, U. Kreuer, R. B. Gopaluni, J. A. Paulson, and R. D. Braatz, “Real-time model predictive control for the optimal charging of a lithium-ion battery,” in 2015 American Control Conference (ACC). IEEE, 2015, pp. 4536–4541.
6. Андрійчук, В. А., & Філюк, Я. О. (2017). Акумуляючі пристрої для систем автономного живлення світлотехнічних установок. *Технічна електродинаміка*, (2), 40-47..
7. Enhanced Coulomb counting method for estimating State-of-Charge and State-of-Health of Lithium-Ion Batteries / K.S. Ng [et al.] // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86, No. 9. P. 1506–1511.
8. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles / H. Rahimi-Eichi [et al.] // *Industrial Electronics Magazine*. IEEE, 2013. Vol. 7, No. 2. P. 4–16.
9. Tremblay O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay, A.L. Dessaint // *World Electric Vehicle Journal*. 2010. Vol. 3. P. 1–10.
10. Chen M. Accurate Electrical Battery Model capable of predicting runtime and IV performance / M. Chen, G.A. Rincon-Mora // *IEEE transactions on*

Energy Conversion. 2006. Vol. 21, No. 2. P. 504–511.

11. Malkhandi S. Fuzzy logic-based learning system and estimation of State-of-Charge of Lead-Acid Battery / S. Malkhandi // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2006. Vol. 19, No. 5. P. 479–485.

12. Zhang F. A Battery State of Charge estimation method with extended Kalman Filter / F. Zhang, G. Liu, L. Fang // IEEE/ASME (AIM) International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2008. P. 1008–1013.

13. He H. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models For State of Charge Estimation by an Experimental Approach / H. He, R. Xiong, J. Fan // Energies. 2011. No. 4. P. 582–598.

14. . Hentunen A. Time-Domain Parameter Extraction Method for Thévenin-Equivalent Circuit Battery Models / A. Hentunen, T. Lehmuspelto, J. Suomela // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2014. – Vol. 29. – № 3. – P. 558-566.

15. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.

16. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.