

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології і системи»

Кафедра «Автоматика та телекомунікації»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

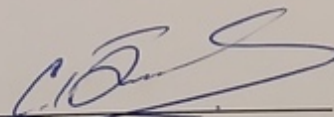
на тему: Застосування принципово нових накопичувачів енергії в системах резервного живлення

за освітньою програмою «Автоматика та автоматизація на транспорті»
зі спеціальності: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Виконав: студент(ка) групи АТ2322 (968М)


_____ / Кирило САВІН /
(підпис студента)

Керівник: доцент кафедри АТ


_____ / Сергій БУРЯК /
(підпис керівника)

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

Студент _____
(підпис студента)

Дніпро – 2025 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty of Computer Technologies and Systems

Department of Automation and Telecommunication

Explanatory Note

to Master's Thesis

master

(higher education degree)

on the topic: Application of fundamentally new energy storage devices in
backup power supply systems

according to educational curriculum «Automatic machinery and automation in transport industry»

in the Specialty: 0714 Electronics and automation (Automation, computer-integrated technologies and robotics)

Done by the student of the group AT2322 (968M)

/ Kyrylo Savin /

Scientific Supervisor: associate professor

/ Serhii Buriak /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології та системи

Кафедра: Автоматика та телекомунікації

Рівень вищої освіти: магістр

Освітня програма: Автоматика та автоматизація на транспорті

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АТ

_____ Володимир ГАВРИЛЮК

(підпис)

Дата 05 жовтня 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу

_____ магістра

(ступінь вищої освіти)

студенту Савін Кирило Олексійович

(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Застосування принципово нових накопичувачів енергії в системах резервного живлення

Керівник роботи: Буряк Сергій Юрійович, к.т.н., доц.

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом від

«05» жовтня 2023 р. № 991ст

2. Строк подання студентом роботи: 10. січня . 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Стрілочні електроприводи з асинхронним двигуном, стрілочні переводи, несправності та дефекти в роботі під час переведення стрілок

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина: Привести особливості будови та застосування накопичувачів електричної енергії нового зразка, вказати їх переваги та недоліки, а також розглянути можливість їх застосування у якості резервних джерел живлення.

4.2 Основна частина: Виконати виміри та провести дослідження хімічних джерел струму. Встановити їх технічні, експлуатаційні та робочі характеристики. Визначити оптимальний режим їх застосування. Зробити аналіз отриманих даних. Привести висновок.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітична частина	04.11.24-10.11.24	30%
2	Основна частина	09.12.24-15.12.24	60%
3	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	06.01.25-12.01.25	100%
4	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	23.01.25	

Студент

_____ (підпис)

Кирило САВІН

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Сергій БУРЯК

_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

62 сторінки, 17 рисунків, 2 таблиці, 19 джерел літератури.

Об'єкт розробки – дослідження накопичувачів електричної енергії

Мета роботи – визначення найбільш придатної технології літієвого акумулятора для резервного енергопостачання систем автоматики на залізничному транспорті.

Методи дослідження – методи математичного моделювання, аналітичного розрахунку параметрів моделі, експериментальні дослідження.

У першому розділі приведений аналіз застосування накопичувачів енергії на залізничному транспорті та перспективи використання літій-іонних накопичувачів електричної енергії. Наведено характеристики широко використовуваних акумуляторних батарей та розглянуто загальні причини виходу з ладу акумуляторних чарунок на основі літій-іонної технології. У другому розділі проведено визначення оптимальної технології літієвого акумулятора для резервного енергопостачання систем автоматики на залізничному транспорті. Вказано особливості застосування літієвих акумуляторів та проведено їх порівняльний аналіз. Зроблено вибір найбільш підходящої технології для накопичення та зберігання електричної енергії. У третьому розділі розглянуто методику визначення параметрів динамічної моделі літій-іонного акумулятора. У четвертому розділі проведено моделювання літій-іонного акумулятора.

Висновок. Враховуючи умови застосування літій-іонних акумуляторів як резервного джерела електроживлення систем автоматики на залізничному транспорті найбільш відповідним є акумулятори літій-залізо-фосфатного типу.

Ключові слова: ХІМІЧНІ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ, ЛІТІЙ-ІОННІ АКУМУЛЯТОРИ, РЕЗЕРВНЕ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ, ЗАЛІЗНИЧНА АВТОМАТИКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1. Застосування накопичувачів енергії на залізничному транспорті..	9
1.2. Перспективи використання літій-іонних накопичувачів електричної енергії.....	14
1.3. Загальні причини виходу з ладу акумуляторних чарунок на основі літій-іонної технології.....	17
2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЛІТІЄВОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ.....	19
2.1. Аналіз стану проблеми та постановка задачі.....	19
2.2. Особливості застосування літєвих акумуляторів.....	22
2.3. Порівняльний аналіз літєвих акумуляторів.....	25
2.4. Визначення найбільш підходящої технології для резервного живлення пристроїв залізничної автоматики.....	33
3. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ЛІТІЙ-ІОННОГО АКУМУЛЯТОРА.....	36
3.1. Короткий опис алгоритму визначення параметрів моделі Шеферда	36
3.2. Опис алгоритму визначення параметрів динамічної моделі ЛПА...	37
3.3. Опис імітаційної динамічної моделі ЛПА в середовищі Simulink Matlab	38
3.4. Методика та алгоритм визначення параметрів динамічної моделі ЛПА	40
3.5. Опис експериментальної установки та результати проведення експерименту.....	42
3.6. Висновок	46
4. МОДЕЛЮВАННЯ ЛІТІЙ-ІОННОГО АКУМУЛЯТОРА.....	47
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНАЦІЇ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	60

ВСТУП

Для будь-якої галузі народного господарства незалежно виробнича це чи побутова сфера, потрібні джерела енергії. Транспортна галузь не виняток із цього постулату, а скоріше навіть підтвердження його. Для транспортної сфери питання джерел енергії є життєво важливим і багато в чому є визначальним у таких питаннях, як ефективність, безпека та екологічність. В даний час ні для кого вже не секрет, що вуглецевмісні носії енергії такі, як нафта, природний газ, кам'яне та буре вугілля, горючі сланці, торф у певний момент підійдуть до кінця, оскільки належать до невідновлюваних енергетичних ресурсів. Цей момент не такий далекий від нас і прогнозується вже в досяжному майбутньому. До того ж не можна ігнорувати питання, пов'язані із забрудненням навколишнього середовища та парникового ефекту від продуктів, отриманих у процесі спалювання вуглецевмісних джерел.

В даний час питання задоволення потреб забезпечення енергією стоїть перед викликом пошуку альтернативних відновлюваних джерел енергії. До них належать використання енергії сонця, вітру, води, геотермальних джерел, прибережних хвиль та інші види. Одночасно з цим виникає дуже важливе питання про накопичення отриманої електроенергії, що дасть змогу вирішити багато сучасних проблем перерозподілу енергії протягом доби, автономності живлення, екологічності та отримання джерел з високою якістю електроенергії. Необхідно брати до уваги, що споживання енергії постійно збільшується, особливо за останні десятиліття, тому динаміка зростання впровадження енергетичних систем нового покоління повинна перевищувати стрімке зростання попиту, щоб мати можливість у майбутньому частково або повністю замінити традиційні вуглецевмісні носії енергії. При цьому варто враховувати якому виду енергетичних систем віддавати перевагу, оскільки в порівнянні з бензиновими двигунами внутрішнього згоряння, ККД у яких становить близько 25-30%, та дизельними з ККД 40%, у яких навіть при використанні турбокомпресора або системи паливного упорскування ККД

піднімається до 55%, ККД електродвигунів потужністю до 100 кВт знаходиться на рівні 75-90%, а понад 100 кВт – 90-97%, що є найвищим показником енергоефективності.

Залізничний транспорт, як будь-яка інша промисловість, критично залежить від енергопостачання. І питання приховано не тільки у забезпеченні живленням силових агрегатів, а й у стійкій роботі систем управління перевізним процесом, який можливий лише за наявності гарантованих джерел живлення. Від стабільності та надійності джерел енергії безпосередньо залежить і безпека функціонування залізниць. Для забезпечення надійності живлення критичних навантажень зазвичай передбачається резервне живлення. Згодом, коли відбувається збій в основному джерелі живлення, навантаження перемикається на резервне або аварійне джерело живлення, забезпечуючи тим самим нормальну роботу підключених навантажень. У зв'язку з цим питання вибору технологій резервного живлення електричних кіл забезпечення управління та контролю систем залізничної автоматики є актуальною проблемою.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Застосування накопичувачів енергії на залізничному транспорті

Транспортний сектор є одним з найбільших джерел викидів парникових газів. На нього припадає 23% викидів CO₂ в цілому. Серед різних видів транспорту залізничний сектор виробляє лише 3,6% від загального обсягу транспортних викидів. Отже, залізничний сектор вважається одним з найзеленіших видів транспорту. Тенденція до скорочення викидів CO₂ також сприяє розвитку саме цього виду транспорту. Згідно зі звітом Міжнародного енергетичного агентства та Міжнародного союзу залізниць, глобальні викиди CO₂ зросли на 50% з 1990 року. У той же час, відносна частка залізничного сектору скоротилася. Більше того, загальне споживання енергії та викиди CO₂ у цьому секторі зменшуються з 1975 року. Загальне споживання енергії вантажними та пасажирськими поїздами скоротилося на 46% на тонно-кілометр та 62% на пасажиро-кілометр відповідно. Наразі загальна частка енергоспоживання залізничного сектору становить лише 2,1% від загального енергоспоживання транспортного сектору. Викиди CO₂ також мають таку ж тенденцію; питомі викиди CO₂ як вантажних, так і пасажирських поїздів скоротилися до 16 г на пасажирський (тонно-км).

Покращення в залізничному секторі є результатом успішного впровадження нових технологій. Аналізуючи споживання енергії на залізниці, більше 70% споживання припадає на потреби тяги, а решта – на нетягові потреби. Отже, більшість нових технологій спрямовані на зменшення споживання енергії, пов'язаної з тягою, наприклад, впровадження систем електричної тяги.

Системи електричної тяги є найбільш енергоефективними тяговими системами в залізничному секторі. Однією з головних причин цього є наявність систем рекуперативного гальмування. При використанні рекуперативного гальмування тяговий двигун діє як генератор і перетворює кінетичну енергію назад в

електричну. Згенерована енергія повинна бути або використана в той самий час, або збережена для подальшого використання. Для одночасного використання регенованої енергії її слід подавати назад в електромережу. Однак існує певна межа сприйнятливості рекуперативних гальм. Сприйнятливість визначається як частка потужності, яка може бути повністю відновлена за допомогою рекуперативного гальмування. Якщо немає споживачів енергії, що генерується в той самий час (наприклад, один потяг прискорюється, а інший сповільнюється), відновлена енергія буде перетворена на тепло і розсіяна в навколишнє середовище. Були проведені дослідження з планування руху поїздів з метою максимізації використання рекуперативного гальмування при наявності декількох поїздів у мережі; основна проблема, однак, виявилася складною оптимізаційною задачею. Більш практичним підходом є накопичення енергії для подальшого використання. Енергію можна зберігати або на борту поїзда, або на накопичувачах на колії. Для цього доцільно застосовувати хімічні джерела струму. Розглянемо деякі з найбільш вдалих технологій їх виготовлення.

Свинцево-кислотні (Lead-Acid) акумуляторні батареї є найстарішим типом акумуляторних батарей і одним із найпоширеніших пристроїв зберігання енергії. Ці батареї були винайдені у 1859 році французьким фізиком Гастоном Планте, і вони досі використовуються у багатьох пристроях. Більшість людей звикли використовувати їх у транспортних засобах, де вони можуть забезпечувати високі струми для запуску. Хоча батареї надійні, вони мають обмежений термін служби, вони важкі при транспортуванні і містять токсичні матеріали, які вимагають спеціальних методів видалення після закінчення терміну служби. Свинцево-кислотні батареї мають помірну питому потужність та гарний час відгуку. Залежно від технології перетворення енергії, що використовується, батареї можуть перейти від прийому енергії до миттєвої подачі енергії. Свинцево-кислотні акумуляторні батареї піддаються впливу температури і повинні підтримуватись у належному стані для досягнення максимального терміну служби.

Нікель-кадмієві (Ni-Cd) акумулятори мають тривалий термін служби, вважаються дуже надійними, мають низький рівень саморозряду, високу міцність і витримують широкий діапазон температур, що робить їх ідеальними для використання у важких умовах експлуатації. Основними обмеженнями є ефект пам'яті і той факт, що кадмій є екологічно небезпечним матеріалом, тому остаточна утилізація цих батарей є серйозною проблемою.

Нікель-метал-гідридні (Ni-MH) акумулятори за своєю технологією батарейі мають такий самий позитивний електрод і електроліт, як і Ni-Cd, але в негативному електроді замість кадмію використовується водень. Завдяки цьому нікель-металогідридні акумулятори не становлять такої небезпеки для навколишнього середовища, як нікель-кадмієві акумулятори. Крім того, Ni-MH акумулятори мають вищу щільність енергії та питому енергію і, що найважливіше, вони не страждають від ефекту пам'яті, як Ni-Cd акумулятори. Основними обмеженнями Ni-MH акумуляторів є те, що при надмірному заряджанні вони перегріваються і можуть виділяти водень, що становить серйозну пожежонебезпеку, а отже, вимагає використання складних схем зарядки. Крім того, при розряді великими струмами, як це відбувається у важких транспортних засобах, термін служби акумулятора значно скорочується (200-300 циклів).

Літій-іонні (Li-Ion) акумулятори сьогодні представляють найпопулярнішу технологію для портативної електроніки, а завдяки зниженню виробничих витрат і високим стимулам до екологічно чистого транспорту ця технологія акумуляторів стала дуже популярною серед виробників електромобілів. Вона замінила технології Ni-Cd і Ni-MH завдяки високій напрузі елементів, високій щільності енергії, тривалому терміну зберігання і циклу без ефекту пам'яті та екологічним проблемам, притаманним технологіям Ni-Cd і Ni-MH. Хоча його вартість все ще висока, вдосконалення виробничого процесу та економія на масштабах виробництва допомагають значно знизити витрати.

Порівняльний аналіз технічних характеристик в таблиці 1 показує величезну кількість переваг використання літій-іонної технології над іншими [1].

Таблиця 1.1 – Характеристики широко використовуваних акумуляторних батарей

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life (80% DoD)	200–300	1,000	300–500	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20%	30%	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V	1.2V	3.6V	3.7V	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	–20 to 65°C (–4 to 149°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months (toping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High		

Незважаючи на те, що свинцево-кислотні акумулятори, які ще використовуються в даний час, мають невелике зниження напруги розряду і високу ефективність вони морально і технічно застаріли і до того ж мають цілу низку недоліків, які роблять їх експлуатацію трудомісткою та скрутною. До таких особливостей відносяться: низька щільність енергії батареї, що визначає її велику вагу; проблема стійкості акумуляторних батарей до глибоких розрядів – термін служби акумуляторних батарей різко скорочується при більш ніж 80%; високі вимоги до технічного обслуговування – рівень електроліту повинен постійно контролюватись (знижена щільність електроліту призводить до сульфатації, а підвищена викликає швидку корозію електродів, отже, різке зниження характеристик), заряджатися в спеціальному приміщенні, що добре провітрюється, а також повинні суворо дотримуватися вимог з охорони ; при зарядці губиться до 30% електроенергії; не можна залишати акумулятор на морозі, коли він розряджений; неповна одномоментна віддача заряду батареєю при великих струмах розряду. За умовами використання свинцево-кислотних батарей у системах залізничної автоматики технологія обслуговування передбачає перевірку їх стану 1 раз на 4 тижні на станціях та переїздах та кожні 2 тижні на перегонах. Слід зазначити, що свинцево-кислотні акумулятори не підлягають ремонту, але переробці підлягає 100% акумуляторів, з яких 98% складових застосовуються повторно.

Літій-іонні акумулятори мають цілу низку переваг, серед яких найбільш значущими є їх висока питома ємність і щільність струму розряду, висока напруга розряду, відсутність «ефекту пам'яті», високі струми зарядки та мінімальний саморозряд. Літійова батарея складається з конкретної кількості елементів, тому вона легко піддається ремонту шляхом заміни тих елементів, які вийшли з ладу. Використання таких акумуляторів може значно знизити експлуатаційні витрати, оскільки їхній термін служби становить від 10 до 15 років, що в 2-3 рази довше, ніж у свинцево-кислотних акумуляторів. При використанні літій-іонних

аккумуляторів немає необхідності контролювати рівень, температуру та щільність електроліту, на відміну від свинцево-кислотних аккумуляторів. До того ж вони не виділяють побічних продуктів у процесі протікання електрохімічних реакцій у навколишнє середовище та не потребують спеціального місця зберігання. Ці батареї також відрізняються високою стабільністю за низьких температур. Однак для літєвих аккумуляторів відсоток переробки становить не більше 5-7%, при цьому повторно може бути використано лише близько 50% складових. Але як позитивну тенденцію слід відзначити наступність технологій, про що свідчить, наприклад, розробка підходів щодо оптимізації та продовження терміну служби батарей електромобілів, які зокрема пропонується використовувати як стаціонарний накопичувач енергії у житловій будівлі [2].

1.2 Перспективи використання літій-іонних накопичувачів електричної енергії

В даний час продовжується і тільки наростає активний перехід на використання в якості накопичувачів енергії аккумуляторних батарей на основі літєвої електрохімічної системи, в тому числі це стосується зокрема і літій-іонних аккумуляторних батарей. Насамперед, пов'язано це з тим, що за своїми енергомасовими та потужними характеристиками літій-іонні аккумулятори значно перевершують аналоги нікелевої електрохімічної системи. Загальновідомими основними перевагами літій-іонних аккумуляторів є:

- зниження маси аккумуляторної батареї за рахунок вищого співвідношення енергія/маса, яке для літій-іонних аккумуляторів досягає 40%;
- низьке тепловиділення та високий ККД енергії під час циклу заряд/розряду з малим саморозрядом;
- більш технологічний процес виготовлення, що забезпечує хорошу повторюваність характеристик, високу надійність та низьку собівартість.

Однак існує й низка серйозних недоліків літій-іонних акумуляторів. Найголовніший з яких полягає в тому, що літій-іонні акумуляторні батареї неминуче починають старіти з моменту їхнього виробництва. Другим серйозним недоліком є те, що батареї обов'язково вимагають наявності вбудованих систем безпеки.

Тим не менш, завдяки своїй наростаючій затребуваності, неослабній перспективності і найбільшій поширеності в усьому світі літієві акумулятори на сьогоднішній день зайняли лідируючу позицію на світовому ринку хімічних джерел струму і, незважаючи на це, продовжують нарощувати свій вплив. Підтвердженням цього може бути не поступове, а лавиноподібне зниження цін за 1 кВт потужності вироблених накопичувачів енергії даного зразка останні кілька років, що пов'язано як з розвитком технологій, так і з стрімким зростанням попиту та пропозиції на світовому ринку в споживчих та промислових цілях.

Вивчення процесів, що протікають усередині літієвих акумуляторів в активному (заряд/розряд) та пасивному (без навантаження) режимах, є основою визначення стану акумулятора в цілому та його складових частин зокрема для створення оптимальних умов використання та отримання найбільшого коефіцієнта корисної дії протягом найбільш тривалого часу. А знання наслідків впливу зовнішніх факторів з урахуванням протікання внутрішніх процесів дозволить максимально зберегти ресурс акумуляторів, у тому числі дасть розуміння можливості їх відновлення.

На сьогоднішній день існує безліч досліджень, присвячених вивченню літієвих джерел струму. Величезний внесок у просування та розвиток наукових та практичних основ побудови, застосування, аналізу та синтезу, процесів деградації та багатьох інших питань, що стосуються виробництва, експлуатації та діагностування стану літієвих акумуляторів, у багатьох своїх працях, а також роботах останнього часу зробили такі вчені в галузі вивчення накопичувачів енергії, як professor Dirk Uwe Sauer, Philipp Dechent and other from RWTH University

of Aachen • Institute for Power Electronics and Electrical Drives (ISEA) Aachen, Germany.

У той же час залишилися недостатньо вивченими такі питання, як механізм неруйнівного контролю параметрів, проблема утилізації, збільшення терміну служби, у тому числі шляхом повторного застосування та надання літєвому акумулятору «другого життя», на багато з яких можна відповісти на підставі визначення їх стану здоров'я. Загальновизнаним є той факт, що на сьогоднішній день немає швидкого, точного та простого способу визначення поточного стану літєвих джерел струму, який можна було б виконати з мінімальною витратою праці та ресурсів, і який би не вимагав застосування спеціального лабораторного вимірювального обладнання та витрат великої кількості часу. Разом з цим розробки в цій галузі продовжуються і зараз.

Згадане раніше старіння літій-іонних акумуляторів пов'язане з перебігом ряду деградаційних процесів усередині акумулятора. Швидкість перебігу таких процесів залежить не тільки від зовнішніх факторів, а й від режимів експлуатації. Проблема деградації електродів під час циклювання є однією з найважливіших при дослідженнях акумуляторів [3].

Несправності літєвих батарей поділяються на збої продуктивності та збої безпеки.

Збій продуктивності включає зниження ємності, скорочення терміну служби, ненормальну напругу, ненормальний струм, надмірний внутрішній опір, саморозряд, старіння за високих та низьких температур тощо.

Збій безпеки включає термічний розбіг, коротке замикання, витікання рідини, випадання літію, деформацію під час розширення, прокол (екструзію).

1.3 Загальні причини виходу з ладу акумуляторних чарунок на основі літій-іонної технології

Причини виходу з ладу літєвих батарей можна розділити на внутрішні і зовнішні.

Внутрішні причини здебільшого ставляться до характеру фізико-хімічних змін відмов, масштаби досліджень можна простежити до атомного та молекулярного масштабів вивчення термодинамічних та кінетичних змін процесу відмови.

Зовнішні фактори включають удар, прокол, корозію, високотемпературне горіння та інші причини.

Розглянемо докладніше деякі з причин виходу з ладу літєвої батареї та ознайомимося з фізикою процесу.

По-перше, розглянемо ефект межі розділу твердих електролітів.

Суть цього явища у тому, що у процесі заряду літій притягується до негативного електроду, цим змінюючи потенціал напруги батареї. Видалення літію під час розряджання не призводить до повного скидання заряду батареї. На поверхні анода утворюється сітка, що складається з атомів літію, яка називається стабільним кордоном розділу електроліту (SEI).

Шар SEI складається з оксиду літію та карбонату літію, і вони ростуть у міру циклу заряду батареї. Ця сітка стає товстішою і в кінцевому підсумку викликає засмічення, що ускладнює взаємодію з графітом. Чим довше батарея залишається у цьому стані, тим гірше стає.

Друга причина – це вплив напруги. Припустимо, що зарядна напруга збільшується понад необхідне верхнє значення напруги чарунки, надмірний струм викликає утворення літєвого покриття і перегрів. Покриття літію виникає через надмірну кількість іонів літію, викликаного надмірною зарядкою. Надлишкові іони літію не можуть бути розміщені між шарами вуглецевого анода та іонами літію. Таким чином, вони накопичуються на поверхні анода та осаджуються у металевому літії.

Це осадження металевого літію на аноді призводить до зменшення кількості вільних іонів літію, отже до незворотної втрати ємності батареї. Потім це викликає коротке замикання між катодами. Литійне покриття також викликає низькотемпературну роботу.

Тут також слід зазначити, що утворення покриття з металевого літію на аноді, викликане тривалим зарядом понад нормоване, призводить до того, що матеріал катода стає елементом, що окислює, і втрачає стабільність, сприяючи утворенню вуглекислого газу (CO_2). Тиск акумулятора в цьому випадку зростає, і якщо заряд продовжується за поточних умов, спрацьовує захисний пристрій, відповідальний за безпеку експлуатації батареї. Якщо тиск продовжує наростати, то мембрана розривається і, зрештою, може статися загоряння акумулятора.

Знижена напруга може призвести до відмови акумулятора. Якщо напруга батареї впаде нижче 2 вольт, батарея вийде з експлуатації. Знижена напруга призводить до розчинення мідного анода в електроліті. Потім це збільшує швидкість саморозряду батареї, але при підвищенні напруги вище 2 вольт іони міді розсіюються по всьому електроліту. Дисперговані іони міді осідають до металевій міді. Це може призвести до короткого замикання між негативними електродами.

Третім потужним фактором, що впливає, є температурні ефекти. Тепло – головний каталізатор деградації літієвих батарей. Високі або низькі температури можуть стати причиною виходу з експлуатації літієвих батарей.

Ефект зниженої температури полягає у зменшенні трансформації активних хімічних речовин у клітині (комірці). Потім це призводить до зниження поточної утримуючої здатності елемента як при зарядці, так і при розрядці. Низькі температури також знижують швидкість хімічної реакції, уповільнюючи впровадження іонів літію в простір інтеркаляції. Отже, знижується потужність та літієве покриття анода із втратою ємності.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЛІТІЄВОГО АКУМУЛЯТОРА ДЛЯ РЕЗЕРВНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

2.1 Аналіз стану проблеми та постановка задачі

Загалом акумулятори, які використовуються на залізничному транспорті, умовно можна поділити на три типи: швидкого (Н), середнього (М) і тривалого (L) розряду. Перші застосовуються як стартерні батареї для запуску двигунів внутрішнього згорання тепловозів, секцій охолодження, вагонів, дизель-поїздів і стаціонарних двигунів. Другі широко використовуються як основне джерело живлення в пасажирських вагонах і рефрижераторних секціях при низьких швидкостях руху та на стоянках, коли їх перестає живити генератор. Треті застосовуються як резервне джерело в джерелах безперебійного живлення з основним живленням змінного струму, або як буфер з основним джерелом живлення постійного струму в апаратурі сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) та зв'язку, а також в низьковольтних колах власних потреб підстанцій та інших стаціонарних об'єктів залізничного транспорту. Під час роботи основного джерела живлення батарея знаходиться в режимі заряджання і використовується у разі збою або тимчасового вимкнення джерела живлення. Використання акумуляторних батарей визначається прагненням мати незалежне джерело при будь-яких аваріях та відмовах у первинних колах, при появі збоїв у енергопостачанні, пов'язаних ударами блискавки, відмовою обладнання чи нещасним випадком. Це гарантоване джерело живлення, завдяки якому забезпечується виконання норм безпеки руху у разі відсутності основних ліній електропостачання [4].

За вимогами, що пред'являються до джерел резервного енергопостачання для систем залізничної сигналізації, які отримують від них живлення в позаштатних та

аварійних ситуаціях, вкрай важливо забезпечити стабільне та надійне електроживлення, тому вони виходять від умов, які пред'являються навантаженням системи: гарантоване безпечне та нормальне виконання операцій, включаючи залізничні переїзди, сигнальні вогні, роботу стрілочних переказів та систем блокування. Ці системи сигналізації зазвичай підключаються до внутрішньої електричної мережі залізниці.

Безпечна робота обладнання залізничної автоматики та телемеханіки потребує стабільності та надійності їх систем електропостачання. Надійна та безперебійна робота систем та пристроїв автоматики та телемеханіки є одним із найважливіших факторів, що визначають безпеку руху поїздів. Високі вимоги до надійності енергообладнання висувають тому, що пристрої залізничної автоматики та зв'язку належать до електроспоживачів особливо важливої першої категорії. Однією з таких вимог є забезпечення безперебійного живлення автоматизованих систем. Ця вимога забезпечується резервним джерелом живлення, яке є акумуляторною батареєю. Акумуляторні батареї виконують роль резервних джерел і забезпечують повну безперервність електроживлення пристроїв автоматики.

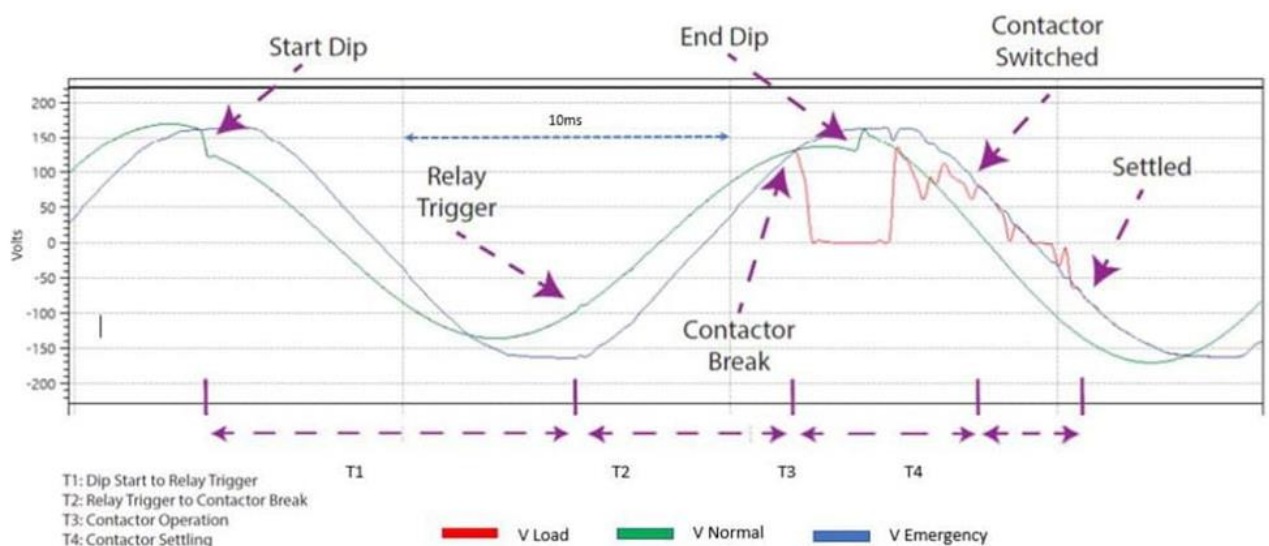


Рисунок 2.1 – Часова залежність роботи приладу Miro ECO Operation

У зв'язку з тим, що з розвитком систем залізничної автоматики дедалі більше застосування отримують мікропроцесорні системи, то значно підвищуються вимоги до надійності енергопостачання. Прикладом передачі живлення є Micro ECO Operation, час спрацювання якого становить приблизно 25-56 мс. Такий короткий час переходу гарантує, що наступне обладнання працюватиме нормально. Тривалий час перемикання часто призводить до несправності або відключення підключених навантажень, викликаючи збої у роботі наступних навантажень (наприклад, систем сигналізації) і, як наслідок, у поїздах.

В даний час все більшої популярності набули рішення джерела безперебійного живлення для залізничної сигналізації та блокування як резервні джерела живлення замість традиційно використовуваних дизельних електрогенераторів, що істотно впливає на вартість установки всієї системи і, оскільки займає значний простір, на питому потужність системи. Приклад організації такої системи показаний рисунку 2.2. Оптимізація спрямовано як усунення резервного дизель-електричного генератора (і пов'язаних із нею викидів парникових газів і шуму), але й підвищення рівня резервування з допомогою додавання акумуляторного блоку [5].

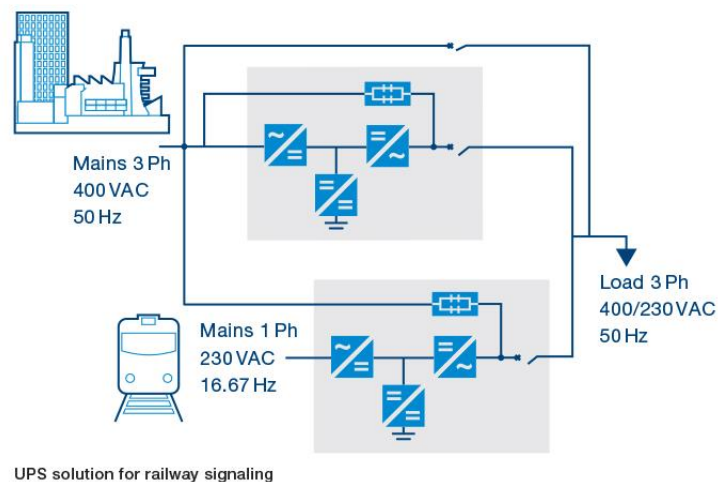


Рисунок 2.2 – Приклад організації модульного резервного енергопостачання систем залізничної сигналізації та блокування

Усі незалежні мережі електроживлення можна використовувати у схемі резервного живлення. Використання перетворювача джерела безперебійного живлення дозволяє організувати мережі електроживлення різних частот. Якщо однієї з них виникає несправність, джерела безперебійного живлення здатний перенаправити навантаження через інший. У разі збою в обох незалежних мережах акумуляторний блок джерела безперебійного живлення, що накопичив енергію, забезпечить живлення всієї системи. Завдяки цьому підходу системи джерела безперебійного живлення забезпечують безпечний та безперервний потік залізничних перевезень. Максимально висока пропускна здатність і готовність системи у будь-який момент часу здійснювати перевізний процес має велике значення, оскільки залізнична інфраструктура використовується безперервно. Це робить надійні системи сигналізації та точне керування транзитом ключовими факторами прибутковості залізничної системи [6].

Тому, враховуючи роль, яку відіграють джерела безперебійного живлення у забезпеченні безперебійності перевізного процесу, особливо важливим завданням у виборі систем джерела безперебійного живлення є правильний підбір літєвої технології, яка враховуватиме умови експлуатації, що стосуються не лише навантажувальних характеристик, а й умов довкілля.

2.2 Особливості застосування літєвих акумуляторів

ЛІВ є великим проривом у світі технологій насамперед завдяки своїй економічності, екологічності та ефективності. А відповідно до різних матеріалів електроліту, що використовуються в літій-іонних батареях, вони діляться на рідкі (LІВ) і полімерні (PLB). Розглянемо перші з них.

Економічність ЛІВ полягає в тому, що вона дозволяє значно знизити витрати на експлуатацію в порівнянні з традиційно використовуваними свинцево-кислотними та лужними акумуляторами. Цей ефект заснований на трьох особливостях. По-перше, ЛІВ мають високий ресурс в 2-3 рази вище, ніж у кращих

свинцево-кислотних акумуляторів, і до 6 разів вище, ніж у лужних акумуляторів. Цей факт збільшення терміну служби вже є повністю економічно виправданим, незважаючи навіть на їхню вищу вартість. По-друге, ЛІВ є повністю герметичними, внаслідок чого гарантується відсутність виділення шкідливих та небезпечних речовин під час експлуатації. Крім того, ЛІВ не потребує технічного обслуговування протягом усього терміну експлуатації. У сукупності це дозволяє кардинально знизити витрати на технічне обслуговування ЛІВ, оскільки поєднання зазначених властивостей позбавляє закупівлі витратних матеріалів, а також дозволяє відмовитися від використання спеціалізованих зарядних кімнат і знизити витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу. По-третє, ЛІВ мають більш високий енергетичний ККД, виражений у вигляді співвідношення енергії, витраченої в процесі їхнього заряду, до енергії, що знімається в процесі їхнього розряду. Вищий ККД ЛІВ у поєднанні з високоефективним зарядним пристроєм, оснащеним імпульсним перетворювачем, дозволяють економити близько 30-40% електроенергії.

Екологічність ЛІВ полягає в тому, що вони є екологічно безпечною продукцією на всіх стадіях життєвого циклу – під час виробництва, експлуатації та утилізації. Заміна свинцево-кислотних або лужних акумуляторів на ЛІВ – це можливість позбутися шкідливих викидів під час роботи та заряду акумуляторної батареї, вирішити проблему прискореної корозії через створення агресивного середовища, покращити стан повітряного середовища.

Ефективність ЛІВ заснована на високих енергетичних показниках, які дозволяють створювати ефективні рішення у будь-якій галузі застосування і на стаціонарних та на мобільних установках. Висока щільність енергії (близько 200 Вт * год / кг і 220 кВт * год / м³) дозволяє досягти економії ваги та обсягу. Процес заряду ЛІВ повністю автоматичний, не вимагає контролю з боку персоналу. Це можливо за рахунок використання спільно з ЛІВ системи контролю та управління

батареєю, яка здійснює безперервний моніторинг за станом окремих осередків та батареї загалом, а у разі аварійних режимів забезпечує роз'єднання силового кола.

Для мобільних програм, в яких батарея не служить противагою, використання ЛІА дозволяє підвищити вантажопідйомність або додатково підвищити пробіг від однієї зарядки, оскільки батарея з ЛІА при рівній енергоємності має в 2-3 рази меншу вагу, ніж свинцево-кислотна або лужна. Наприклад, в електровізках за рахунок зниження ваги батареї корисна вантажопідйомність візка збільшується на 10-30% [7].

Однією з ключових властивостей ЛІА є порівняно швидкий час заряду. З суто практичної точки зору навіть при заряді номінальним струмом 0,5С час повного заряду не перевищує 4 години (у традиційних батареях – 8 годин). За перші дві години, коли триває стадія заряду постійним струмом, акумулятор встигає зарядитися на 85-90%. У багатьох випадках така швидка, хоч і не повна зарядка батареї дозволяє за рахунок зміни графіка роботи техніки скоротити її парк, що в свою чергу веде до суттєвої економії коштів.

Крім цього, ЛІА допускають і набагато швидшу зарядку – максимальний зарядний струм може становити 3С, проте доцільність постійного використання такого режиму заряду має бути економічно обумовлена, оскільки вона може сприяти скороченню ресурсу батареї.

Особливості будови та класифікація літій-іонних акумуляторів полягає також у тому, що їх умовно можна поділити на високопотужні, високоємні та проміжні, що займають місце між двома наведеними класами. Суть цього поділу в тому, що навіть з урахуванням використання того самого електрохімічного процесу сам акумулятор, як кінцевий виріб, можна виготовити по-різному. Якщо струмопровідну основу електрода, представлену алюмінієвою фольгою на позитивному електроді і мідною на негативному, в одному випадку зробити тонше і електродної маси нанести більше, а в іншому все зробити навпаки, отримані характеристики таких виробів будуть істотно відрізнятися. Чим більше

співвідношення активних електродних мас, що у електрохімічних реакціях, до пасивним, які у них, які беруть участь, тим вище питомі характеристики кінцевого виробу. Проте, що менше товщина мідної фольги, то менший струм може пропустити без перегріву. І навпаки, що більше товщина шару електродної маси, тим більше його опір. Тобто акумулятор з більш тонкою струмопровідною основою і більш товстим шаром електродної маси буде мати високі показники по енергії, що запасається, але низьку потужність, і навпаки. Тому для ще більшого зниження опору застосовують активні матеріали з меншим розміром частинок.

Таким чином, шляхом зміни товщини електродів, фольги, сепаратора і матеріалів позитивного та негативного електродів, розмірів частинок, можна отримати акумулятор з різними максимальними струмами розряду та/або різної ємності в тому самому типорозмірі кінцевого виробу.

2.3 Порівняльний аналіз літієвих акумуляторів

Відмінності між різними технологіями безпосередньо впливають і на робочі показники кожного акумулятора такі як щільність енергії, життєвий цикл і термін служби, глибина розряду, безпека, швидкість саморозряду, експлуатація при мінусових температурах, тепловий розгін, екологічна безпека, стабільна подача живлення та напруги. При цьому слід враховувати, що параметри взаємопов'язані, оскільки час життя акумулятора залежить лише від його конструктивних особливостей, а й умов експлуатації. Перевірити параметри та можливості літієвих акумуляторів можна і потрібно експериментальним шляхом, але оскільки такі дослідження пов'язані з марнуванням дуже великої кількості часу, то більш продуктивним у такому випадку способом є звернення до відкритого ресурсу з випробуваннями літієвих батарей від компаній, наукових лабораторій та дослідників, яким можна довіряти.

У таблиці 2.1 показано порівняння найбільш значних параметрів літієвих технологій.

Таблиця 2.1 – Різновиди літієвих батарей

PARAMETER	TYPES OF BATTERIES OF LITHIUM TECHNOLOGY					
	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP	LTO
Nominal voltage, V	3.6	3.7 (3.8)	3.6 (3.7)	3.6	3.2 (3.3)	2.4
Standard operating voltage range, V	3.0-4.2	3.0-4.2	3.0-4.2	3.0-4.2	2.5-3.65	1.8-2.75
Specific energy, Wh/kg	150-200	100-150	150-220	200-260	90-120	70-80
Charge speed	0.7-1C Max	0.7-1C Typ, 3C Max	0.7-1C	0.7 Typ	1C Typ	1C Typ, 5C Max
Discharge rate	1C Max	1C Typ, 10C Max, 30C Pulse	1C Typ, 2C Max	1C Typ	1C Typ, 25C Max, 40C Pulse	10C Max, 30C Pulse
Depth of discharge	80-90%	80-90%	80-90%	80-90%	100%	100%
Life span (cycles)*	500-1000	300-700	1000-2000	500	1000-2000	3000-7000
Temperature, °C (max)	150	250	210	150	270	270
Operating temperature range, °C	-10...+60	0...+45	-20...+55	-10...+60	-30...+60	-30...+45
Thermal runaway	high charging	high charging	high charging	high charging	stable	safest Li-ion batteries
Safety	low	low, but safer than LCO	moderate	low	highest	safest
Price	high	moderate	high	high	moderate	highest

*параметр вказано для втрати 20% потужності

На рисунку 2.3 показані теоретична ємність та потенційний діапазон різних катодних матеріалів, що використовуються в ЛІА [8].

LCO (літій-кобальтові з катодом LiCoO_2) акумулятори містять графітовий анод і катод з оксиду літій-кобальту. Катод у таких моделях має шарувату структуру. Його найбільша перевага – це висока енергоємність (до 200 Вт/год/кг) та невелика вага, що дозволяє робити компактні та ємні акумулятори. Тому саме LCO батареї стоять у переважній більшості смартфонів, ноутбуків, фото- та відеокамер та інших гаджетах, для яких важлива компактність. Літій-кобальтова електрохімічна

система відрізняється високою питомою енергоємністю, але пропонує середні показники питомої потужності, безпеки та терміну служби. У LCO акумуляторів максимальна швидкість заряду та розряду дорівнює 1C, тобто одна повна ємність за одну годину. Все, що швидше може призвести до проблем. Серед найбільших недоліків даної технології це їх небезпечність, оскільки акумулятори можуть спалахнути від механічних впливів або при швидкому заряді/розряді, а також погано переносять негативні температури та перегріваються у спеку. І важливим є фактор ціни, яка на дані виробни досить висока в силу того, що кобальт досить рідкісна корисна копалина, тому його використання обходиться приблизно в 2 рази дорожче нікелю, в 15 разів дорожче алюмінію і в 1000 разів дорожче марганцю. До мінусів також відноситься короткий період служби та обмежені можливості при навантаженнях. Літій-кобальтовий акумулятор не може заряджатися або розряджатися при силі струму вище за його C-рейтинг. Примусовий швидкий заряд або підключення навантаження вище цього значення призведе до надмірного стресу та перегріву.

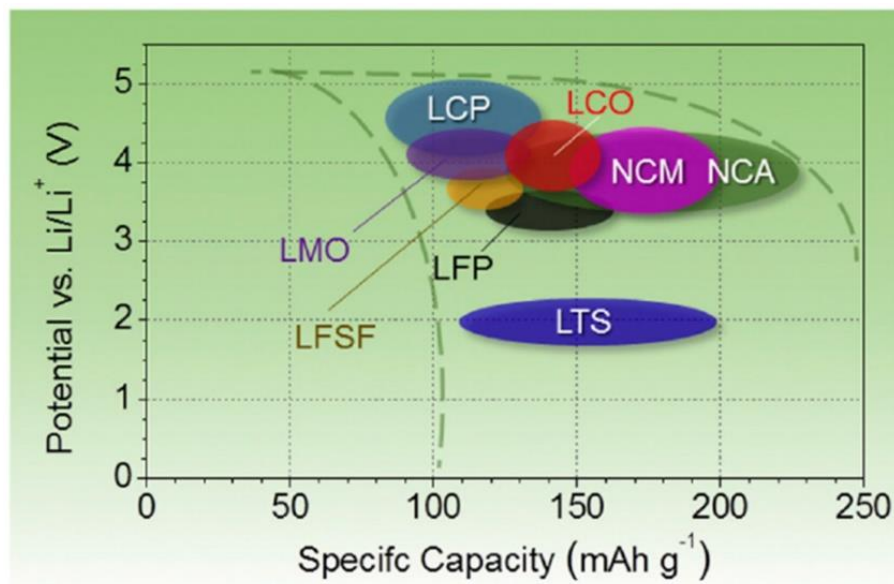


Рисунок 2.3 – Теоретична ємність матеріалу катода літій-іонної батареї (LIB) за
ТИПОМ

ЛМО (літій-марганцево-оксидні з катодами LiMn_2O_4 та Li_2MnO_3) акумулятори мають нижчу енергоємність та менший термін життя, ніж у LCO. Але є її переваги. По-перше, такі акумулятори дешевші, оскільки марганець у 1000 разів дешевші за кобальт. А по-друге, у таких батареях у катоді використовується літій-марганцева шпинель. Це така тривимірна кристалічна структура, яка в порівнянні з шаруватою кобальтовою структурою, покращує потік іонів на електроді по мікроканалах, що істотно зменшує внутрішній опір і підвищує струм, що віддається, зраджуючи значної переваги по потужності.

Завдяки таким особливостям будівлі у ЛМО швидкість заряду становить 3С, тобто в 3 рази швидше ніж у LCO, а струм розряду взагалі в десять разів перевищує його ємність і на рівні 10°C . Саме тому ЛМО акумулятори застосовуються у вимогливому до сили струму обладнанні, де потрібно в короткий проміжок часу видати більшу потужність. У той же час мають середню питому енергоємність за досить великого ресурсу. Передбачається, що використовувати їх можна в цілях користування протягом 5 років, оскільки вони стабільно витримують до 1000 повних циклів розряду заряду.

До особливостей цього типу акумуляторів відноситься самобалансування за рахунок високої термічної стабільності. Якщо напруга досягає максимальних піків, елемент виділяє тепло, щоб не перевищити граничні значення. Завдяки такому ефекту подібні моделі можна застосовувати із мінімальним контролем. Використовуються для живлення дорогого силового інструменту, легкого електротранспорту, медичного обладнання. До недоліків відноситься відсутність можливості заряду при негативних температурах.

NMC (літій-нікель-марганець-кобальт-оксидні з катодом LiNiMnCoO_2) акумулятори поєднують у собі високу енергоємність LCO та високу потужність ЛМО акумуляторів. Це один з нових найбільш успішних варіантів виконання літій-іонної електрохімічної системи, що представляє поєднання нікелю, марганцю та кобальту (NMC) в катоді. Їхня розробка мала на меті об'єднати плюси

попередніх видів. Поєднання цих металів дозволяє компенсувати недоліки один одного та повною мірою використовувати сильні сторони. Тому вони відрізняються: суттєвою питомою електроємністю, хімічною стабільністю, морозостійкістю, високою струмовіддачею.

Секрет цієї технології полягає у поєднанні нікелю та марганцю. Нікель відомий своєю високою питомою енергією, але поганою стабільністю. Марганець славиться своїм низьким опором, завдяки структурі шпинелі. А поєднання цих металів посилює сильні сторони одне одного. Головна його перевага – це збалансованість, оскільки його енергоємність становить 220 Вт/год/кг, що навіть вище ніж у LCO, а термін життя не поступається LCO і знаходиться в проміжку від 1000 до 2000 циклів. До того ж нормальна швидкість заряду до 1C, але при цьому швидкість розряду 2C, що в 2 рази перевищує LCO. З робочими температурами та безпекою ситуація ідентична з LCO, а вартість приблизно така сама.

Серед усіх технологій має найменший рівень нагріву. Це одна з найпопулярніших технологій. NMC акумулятори використовують у тих випадках, коли питання про автономне живлення стосується насамперед сторони потужності джерела та його здатності приводити в дію енергоємні системи. Використовують переважно в електровелосипедах, медичному устаткуванні, електромобілях та промисловості.

NCA (літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні з катодом LiNiCoAlO_2) акумулятори виготовляються за складною та дорогою технологією, що дозволяє виробляти довговічні та енергоємні акумулятори для медичного обладнання, промислових установок та силових агрегатів. Цей тип АКБ немає широкого поширення серед споживачів через високу вартість. Основна проблема акумуляторів цього типу – високий ризик вибуху батареї під час експлуатації в умовах постійних навантажень та високих температур. Єдина перевага технології

NCA – це найвища енергоємність. В інших параметрах акумулятори NCA програють у порівнянні з іншими літійовими акумуляторами.

LFP (літій-залізо-фосфатні з катодом LiFePO_4) акумулятори одночасно поєднують у собі два прориви технології – безпека та потужність. Дані батареї мають значну перевагу в ресурсі роботи в порівнянні з іншими технологіями виготовлення літійових акумуляторів, меншу токсичність, добре витримують перезаряд і перепади напруги в електромережі, мають низький саморозряд і особливу стійкість до низьких температур, що дозволяє їх використовувати поза приміщеннями. Мають хороші електрохімічні властивості та низький внутрішній опір. При цьому вони здатні витримувати високі показники сили струму та жити навантаження 25C. Однак мають низьку енергоємність, отже потрібно виділяти багато місця для встановлення акумуляторного блоку. Тому такі батареї використовують на великому електротранспорті, типу електробусів, як джерела безперебійного живлення або як системи зберігання енергії в портативних або стаціонарних пристроях, де необхідні високі струми навантаження і витривалість. Їх недолік – більша ціна.

LTO (літій-титанат-оксидні з анодом $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) акумулятори найбільш довговічні. При цьому вони є бездоганними з точки зору безпеки, температурної стійкості, а також потужності. Мають значну швидкість як заряду, так і розряду, що робить даний вид акумуляторів особливо цікавими. Однак вони мають і серйозні недоліки, по-перше – це найнижча з усіх енергоємність та найвища вартість. Незважаючи на те, що дана технологія має низьку номінальну напругу комірки, акумулятор може бути дуже швидко заряджений і забезпечувати високий струм розряду 10C, тобто в 10 разів перевищує показник його ємності, а також велика кількість циклів заряду розряду, висока безпека та відмінні характеристики при низькій температурі (близько 80% ємності при температурі -30°C). Проте в даний час все ще має високу вартість і, як і раніше, низьку питому енергоємність.

Знаходять застосування у джерелах безперебійного живлення, електричних силових агрегатах, вуличному освітленні на сонячних елементах.

Для більш наочного уявлення та виконання порівняльного аналізу наведеного в таблиці 2.1 подамо усереднену оцінку акумуляторів у графічному вигляді на рисунку 2.4.

Слід зазначити, що два останні види акумуляторів LFP та LTO технологій відрізняються унікальною електрохімічною та фізичною стабільністю структури матеріалу, чим пояснюються високі електричні показники та тривалий експлуатаційний ресурс. Завдяки перерахованим унікальним властивостям ці акумулятори мають величезний інтерес з боку потужних споживачів у різних галузях промисловості, транспорту та систем резервного електропостачання, де має бути забезпечене гарантоване електроживлення.

Також технології NMC і LFP сьогодні вважаються найефективнішими і, залежно від завдань, проводиться вибір конкретного типу акумулятора, який оптимально підходить для їх виконання. LFP акумулятор – явний лідер стабільності в однаковому ціновому сегменті. Однак літєві акумулятори технології NMC можуть бути кращим варіантом, якщо пріоритет віддається саме високій вихідній потужності. У свою чергу NCA мають найвищу питому енергоємність, проте LMO і LFP перевершують за питомою потужністю та термічною стабільністю, а LTO мають найбільший термін служби. Таким чином, очевидним стає той факт, що занадто широкий діапазон можливостей необхідний для задоволення тільки єдиним технологічним підходом одночасно і ринку споживчих акумуляторів, де на першому місці стоїть ємність, і в той же час промисловості, де необхідні акумуляторні системи з хорошими характеристиками навантаження, тривалим терміном служби та надійною безпечною експлуатацією [10].

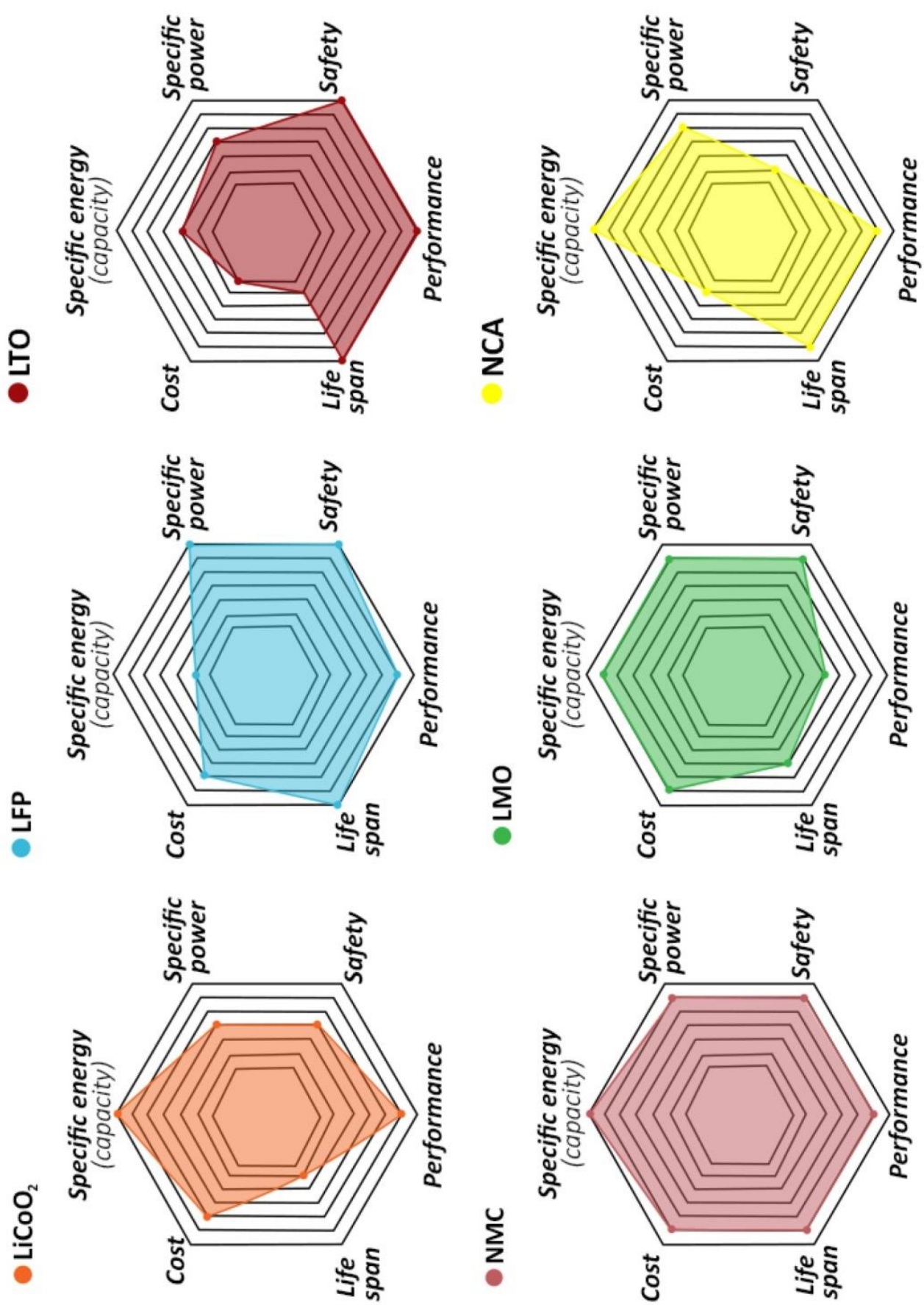


Рисунок 2.4 – Середня оцінка акумуляторів з різною літєвою технологією

Тому як приклад можна навести вдаль поєднання у багатьох випадках LMO акумуляторів у поєднанні з NMC технологією підвищення питомої енергоємності і продовження терміну служби. Цей союз, який називається LMO (NMC), дозволяє досягти оптимальних результатів щодо підвищення питомої потужності, навантажувальних характеристик та довговічності акумулятора і таким чином використовувати сильні сторони обох систем. Саме ці комбіновані акумулятори використовуються у більшості електромобілів, що дозволяє поєднувати високі прискорювальні можливості електродвигуна із тривалою автономною роботою. Слід зазначити, що технології LMO (NMC) можуть бути оптимізовані за ємністю або потужністю.

2.4 Визначення найбільш підходящої технології для резервного живлення пристроїв залізничної автоматики

Надійне та стабільне енергопостачання є запорукою ефективної та безпечної роботи пристроїв та систем, робота яких залежить від стабільності та безперервності подачі електричної енергії. До критично важливих споживачів належать системи залізничної автоматики, які забезпечують виконання та перевірку взаємозалежностей та взаємовиключень у перевізному процесі, віддачу наказів та контроль за їх виконанням.

За рахунок цього залучається мінімальна кількість працівників, чим значною мірою скорочується людський фактор, підвищується швидкість виконання операцій, пов'язаних безпосередньо з експлуатаційною роботою, та збільшується безпека виконання таких робіт. У разі припинення подачі електричної енергії внаслідок форс-мажорних обставин переведення такої системи в ручне керування сильно ускладнене і передбачає значне скорочення кількості операцій, що виконуються. В такому випадку той незначний штат, призначений для оперативного відстеження в режимі реального часу стану системи, в ручному режимі управління зможе виконувати лише основні функції, що призведе, у свою

чергу, до накопичення величезної кількості невиконаних дій і негативно позначиться на пропускній спроможності.

У такому разі високоефективна робота можлива лише за суворого виконання критеріїв енергопостачання критично важливої інфраструктури. До такої на залізничному транспорті як згадувалося раніше відносяться системи автоматики, що виконують керуючу, контрольну та функцію, що аналізує. Тому забезпечення живленням даних систем є одним із найважливіших завдань для залізниць загалом. Вимогами, висунутими умовами подачі резервного електроживлення, визначено, що всі системи автоматики повинні мати три незалежні джерела живлення: основне, резервне та автономне джерело. У деяких випадках споживачі можуть бути підключені до акумуляторних батарей (вхідний світлофор і переїзна сигналізація), що дає високу гарантію безперервності їх роботи.

Розвиток технологій накопичення електричної енергії з усіма перевагами дає привід серйозно розглядати можливість їх застосування як основне резервне джерело. Однак, при всьому різноманітті представлених варіантів слід віддати перевагу найбільш підходящому режимі експлуатації. Для цього необхідно виділити найважливіші критерії. До них належать: вартість, надійність, безпека, ресурс, умови докільця, режим експлуатації (навантаження, частота включення).

На рисунку 2.5 у відсотковому співвідношенні показано значущість даних критеріїв щодо найбільш відповідної технології акумуляування електричної енергії. При цьому слід зазначити, що найбільше значення має надійність, яка визначає готовність дати електричне живлення будь-якої миті часу. Найменше значення має режим експлуатації, оскільки акумулятор знаходиться в гарячому резерві і циклування заряд-розряд не відбувається.

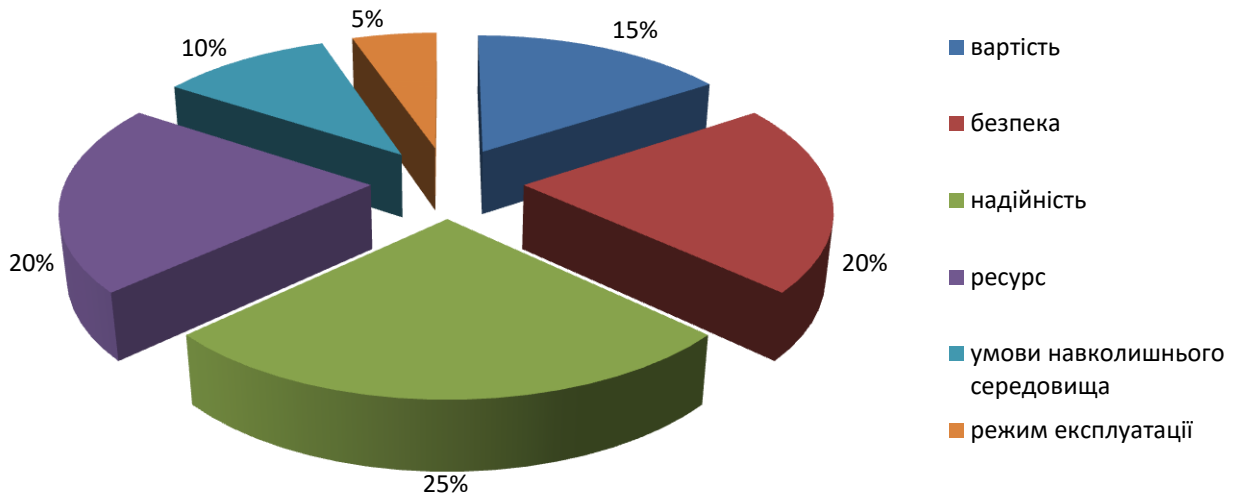


Рисунок 2.5 – Критерії вибору накопичувачів електричної енергії для пристроїв автоматики на залізничному транспорті

Таким чином, у разі застосування в пристроях автоматики на залізничному транспорті слід підбирати таку технологію літійового акумулятора, яка змогла б переносити умови навколишнього середовища, тривалий термін експлуатації, підтримувати стабільне високе енергоспоживання протягом відновлювальних робіт ліній основного живлення. Такою технологією з урахуванням вибору оптимальності ціни доцільно розглядати LFP акумулятори.

3 МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ЛІТІЙ-ІОННОГО АКУМУЛЯТОРА

3.1 Короткий опис алгоритму визначення параметрів моделі Шеферда

Слід відразу зазначити, що основний недолік імітаторів літій-іонних акумуляторних батарей, що випускаються промисловим виробництвом – це відсутність у його структурі окремо представленого імітатора акумулятора.

Реалізація імітатора кожного літій-іонного акумулятора дасть змогу розширити функціональні властивості імітатора всієї батареї.

Розглянемо модель літій-іонного акумулятора, засновану на комбінації моделей Тевеніна та Шеферда, що дає змогу формувати динамічні процеси в акумуляторі [12].

За алгоритмом визначення параметрів моделі Шеферда стаціонарною моделлю ЛІА в режимах заряду-розряду є модель вихідної $U_{\text{вих}}(t)$ напруги, яка описується рівнянням

$$U_{\text{вих}}(t) = E(t) \pm R_0 i(t), \quad (3.1)$$

де $E(t)$ – ЕРС акумулятора, В;

$i(t)$ – струм заряду-розряду акумулятора, А;

R_0 - постійний опір акумулятора, Ом.

Для визначення $E(t)$ скористаємося моделлю Шеферда

$$E(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-BQ_{\Sigma}(t))}, \quad (3.2)$$

де E_0 – максимальна напруга акумулятора, В;

K – поляризаційна складова, В;

Q_{\max} – повна ємність акумулятора, А-год;

$Q_{\Sigma}(t)$ – заряд, отриманий акумулятором за час t , А-год;

A – експоненціальна складова, В;

B – інверсна експоненціальна складова, А-год⁻¹

У режимі заряду акумулятора рівняння (3.1) набуває вигляду:

$$U_{\text{вих}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{Max}}}{Q_{\text{Max}} - Q_{\Sigma}(t)} + Ae^{(-BQ_{\Sigma}(t))} + R_0 i(t). \quad (3.3)$$

Для визначення значень параметрів у виразі (3.3) необхідно скористатися даними виробника акумуляторної батареї або провести експериментальні дослідження, що дають змогу надати параметри ЛІА.

Алгоритм визначення параметрів моделі Шеферда і безпосередньо модель ЛІА було перевірено на тестових прикладах за допомогою програми Simulink Matlab. Встановлено, що максимальна похибка запропонованої моделі ЛІА не перевищує $\pm 1\%$ з даними імітаційної моделі VL48E на всій зарядно-розрядній характеристиці акумулятора.

3.2 Опис алгоритму визначення параметрів динамічної моделі ЛІА

Для побудови динамічної моделі ЛІА скористаємося моделлю Тевеніна, що включає внутрішній імпеданс батареї, активний опір електроліту та електродів, а також електрохімічні ємності. Модель акумулятора складається за схемою заміщення (рис. 3.1) і описується рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} = \frac{i(t)}{C_p(t)} - \frac{U_p(t)}{R_p(t)C_p(t)}, \\ U_{\text{вих}}(t) = E(t) \pm R_0 i(t) + U_p(t), \end{cases} \quad (3.4)$$

де $U_p(t)$, $R_p(t)$, $C_p(t)$ – відповідно еквівалентна напруга, опір і ємність акумулятора.

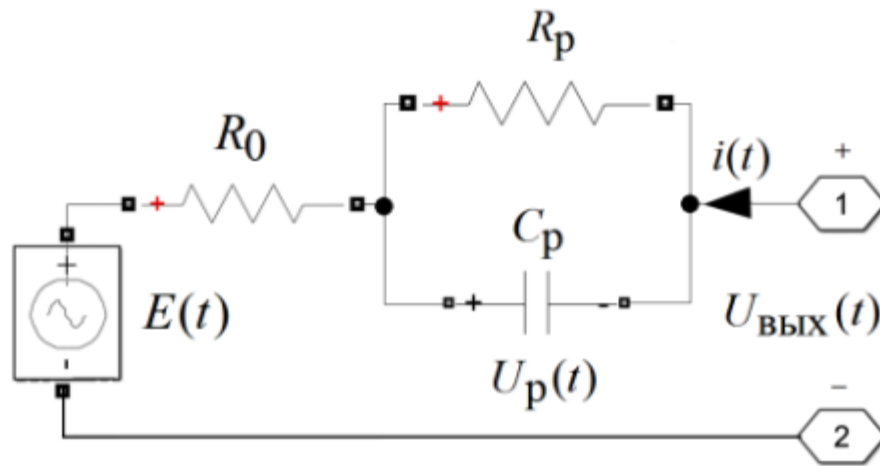


Рисунок 3.1 – Схема заміщення акумулятора за моделлю Тевеніна

Використовуючи рівняння (3.4), можна записати систему рівнянь:

$$U_p(t) = \int_{t_0}^t \left[\frac{1}{C_p(t)} \cdot i(t) - \frac{1}{\tau_{(it)}(t)} U_p(t) \right] dt, \quad (3.5)$$

$$\tau_{(it)}(t) = \frac{E_0 - K \frac{Q_{\max}}{Q_{\max} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-BQ_{\Sigma}(t))}}{\frac{dU_p(t)}{dt}} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}(t)}{\frac{dU_p(t)}{dt}}, \quad (3.6)$$

$$\tau_{(it)}(t) = R_p(t) \cdot C_p(t), \quad (3.7)$$

$$C_p(t) = \frac{\tau_{(it)}(t)}{R_p(t)}, \quad (3.8)$$

$$R_p(t) = \frac{R_0(t)}{2}, \quad (3.9)$$

де $\tau_{it}(t)$ – стала часу, с.

Недолік моделі Тевеніна полягає в необхідності обчислення щонайменше 40 змінних, що ускладнює побудову динамічної моделі ЛАБ у реальному масштабі часу.

Дослідження виявило, що $R_p(t)$ і $C_p(t)$ незначно змінюються на всьому діапазоні циклу заряду-розряду акумулятора.

Об'єднуючи вирази (3.3) і (3.4), запишемо систему рівнянь, що описують динамічні процеси в акумуляторі:

$$\begin{cases} \frac{dU_p}{dt} = \frac{i(t)}{C_p^*} - \frac{U_p(t)}{R_p^* C_p^*}, \\ U_{\text{вих}}(t) = E_0 - K \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{max}} - Q_{\Sigma}(t)} + A e^{(-B Q_{\Sigma}(t))} \pm R_0 i(t) + U_p(t), \end{cases} \quad (3.10)$$

де R_p^* , C_p^* – відповідно фіксовані еквівалентні поляризаційні опір і ємність.

Ця модифікована модель (3.10) має обчислювальну перевагу, для побудови динамічної моделі ЛА необхідно використовувати не більше 5 змінних.

3.3 Опис імітаційної динамічної моделі ЛА в середовищі Simulink Matlab

Опис моделі в середовищі Simulink Matlab і реалізація структури «імітаційна модель ЛА – імітаційна модель VL48E – система керування – система діагностування» були раніше представлені авторами, тут же наведемо лише відомості з реалізацією виразу (3.10).

Після визначення параметрів імітаційної моделі ЛА перевіряється її адекватність у результаті порівняння відповідних характеристик, отриманих на імітаційній моделі VL48E.

У результаті моделювання встановлено, що похибка напруги імітаційної моделі ЛІА в динамічному режимі не перевищує $\pm 2\%$ на всій зарядній і розрядній характеристиці. Імітаційна модель акумулятора VL48E має похибку, що не перевищує $\pm 5\%$ порівняно з експериментальними даними.

3.4 Методика та алгоритм визначення параметрів динамічної моделі ЛІА

Алгоритм визначення параметрів базується на раніше опублікованому матеріалі авторами. При цьому істотною зміною, зробленою в цій роботі, є оновлення параметрів модифікованої моделі (3.10) у кожному циклі вимірювань, що ілюструється блок-схемою (рис. 3.2) [13].

Алгоритм використовує дані, надані виробниками ЛІА або сформовані експериментальним шляхом, і включає такі обчислювальні операції:

- 1) розраховуються необхідні коефіцієнти для моделі (3.10);
- 2) визначається напрямок струму $i(t)$ для побудови моделі заряду або розряду;
- 3) визначається заряд $Q_{\Sigma}(t)$, отриманий або відданий акумулятором за час t ;
- 4) визначається вихідна $U_{\text{вих}}(t)$ напруга за формулою (3.10) і мінімізується різниця $\Delta U_{\text{вих}}(t)$ моделі та значень, отриманих з даних виробника ЛІАБ, шляхом підстроювання її параметрів методом градієнтного спуску;
- 5) коригуються значення параметрів $U_{\text{ном}}$, U_{exp} , $Q_{\text{ном}}$, Q_{exp} ;
- 6) операції 1 – 4 повторюються до моменту досягнення імітації повного заряду або розряду акумулятора.

Оцінювання точності алгоритму визначення параметрів динамічної моделі виконується шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі Simulink Matlab. У результаті досліджень встановлено, що похибка визначення параметрів динамічної моделі ЛІА не перевищує $\pm 2\%$ на всій розрядній характеристиці та $\pm 0,7\%$ на всій зарядній характеристиці акумулятора.

Оцінювання впливу систематичної похибки на точність роботи алгоритмів засвідчило, що найбільший вплив має неточність визначення параметрів R_0 , Q_{\max} .

Застосування розробленого алгоритму визначення параметрів динамічних моделей акумулятора можна використовувати при створенні його імітатора з можливістю відтворення динамічних характеристик.

При цьому для створення імітатора ЛАБ передбачається використовувати систему з необхідного числа імітаторів акумулятора.

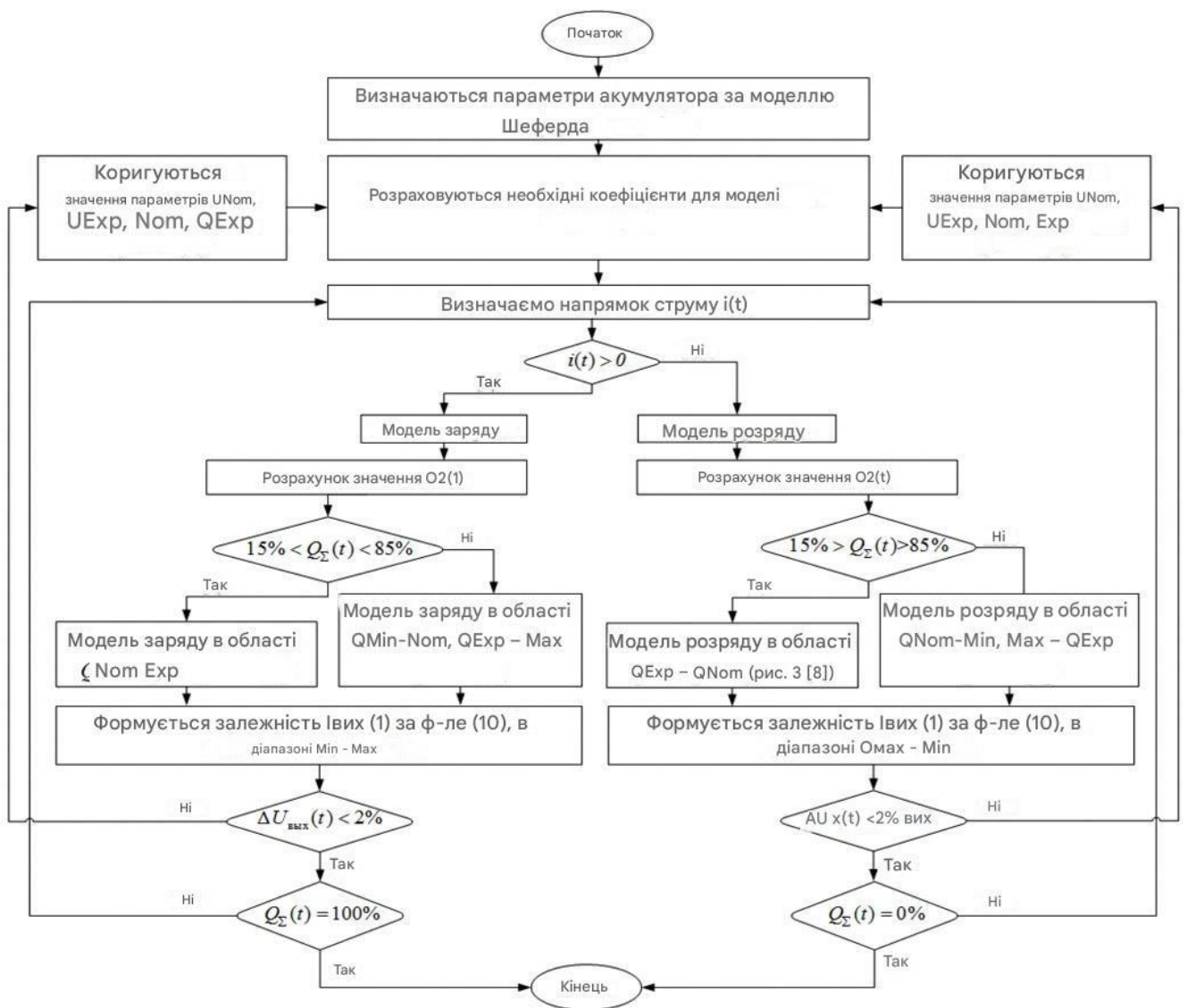


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму визначення параметрів динамічної моделі

ЛІА

3.5 Опис експериментальної установки та результати проведення експерименту

Структуру та характеристики експериментальної установки повною мірою представлено в роботі, призначеній для проведення експериментальних досліджень з ЛІА типу ЛІГП-10, яка адаптована для роботи з батареєю 8ЛІ40 і виконує такі функції:

- 1) вимірювання напруги осередків АБ;
- 2) вимірювання поточного струму;
- 3) заряд АБ струмом до 7,5 А;
- 4) розряд АБ за допомогою імітатора навантаження струмом до 10 А.

На підставі отриманих експериментальних даних розроблено імітаційну модель 8ЛІ40 у програмному середовищі Simulink Matlab і перевірено адекватність алгоритму визначення параметрів динамічної моделі ЛІА.

Для побудови структури «система з експериментальними даними - імітаційна модель батареї – імітаційна модель акумуляторів - система управління - система візуалізації» (рис. 3.3) скористаємося компонентами пакета Simulink Library Browser. Вхідні та вихідні сигнали цієї структури для батареї 8ЛІ40АБ і акумуляторів 8ЛІ40АК є інформаційними [14].

Отримані експериментальні дані батареї 8ЛІ40 у програмному середовищі Simulink Matlab задаються у вигляді моделювальних компонентів «From Workspace» блоком № 1, у якому відображаються задавання струму, що протікає, $i(t)$, напруга акумуляторів і напруга батареї. У блоці № 2 реалізовано імітаційну модель батареї шляхом агрегування акумуляторів (рис. 3.4).

8ЛІ40АБ у програмному середовищі Simulink Matlab:

- блок № 1 – експериментальні дані;
- блок № 2 – імітаційна модель батареї;
- блок № 3 – перевірка на адекватність;
- блок № 4 – візуалізації даних.

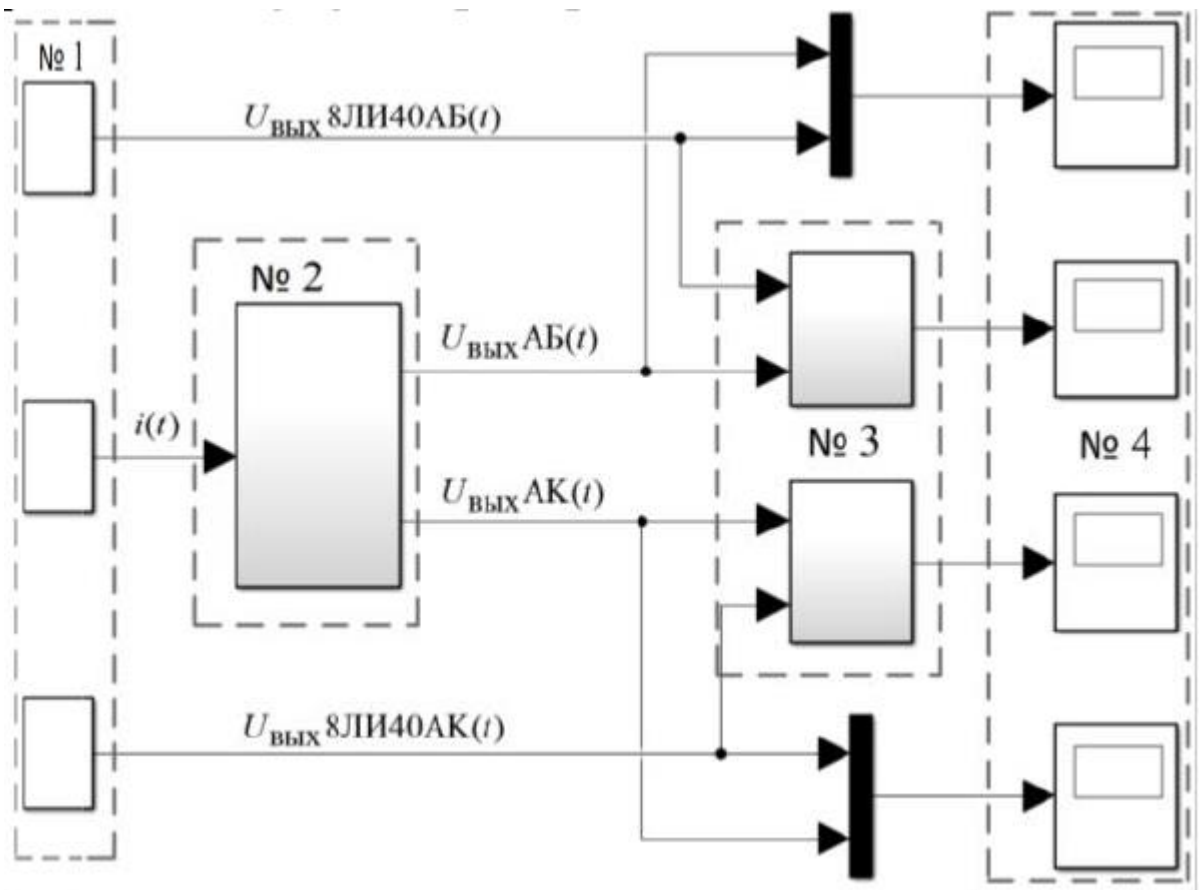


Рисунок 3.3 – Структура імітаційної моделі батареї

У блоці № 3 після визначення параметрів моделі акумулятора блоком № 2.1 модель батареї (блок № 2) перевіряється на адекватність у результаті порівняння відповідних характеристик, отриманих експериментальним шляхом блоку № 1 [15].

На рис. 3.5 наведено результати як імітаційного моделювання напруг восьми акумуляторів 8ЛІ40АК із розкидом параметрів порівняно з напругою моделі восьми акумуляторів 8ЛІ40АК (див. рис. 3.5), так і результати імітаційного моделювання результуючої напруги батареї акумуляторів 80ЛІ40АБ, агрегованої блоком №2.1, порівняно з напругою батареї 80ЛІ40АБ (див. рис. 3.5), у процесі заряду обраним (див. рис. 3.5) профілем струму $i(t)$.

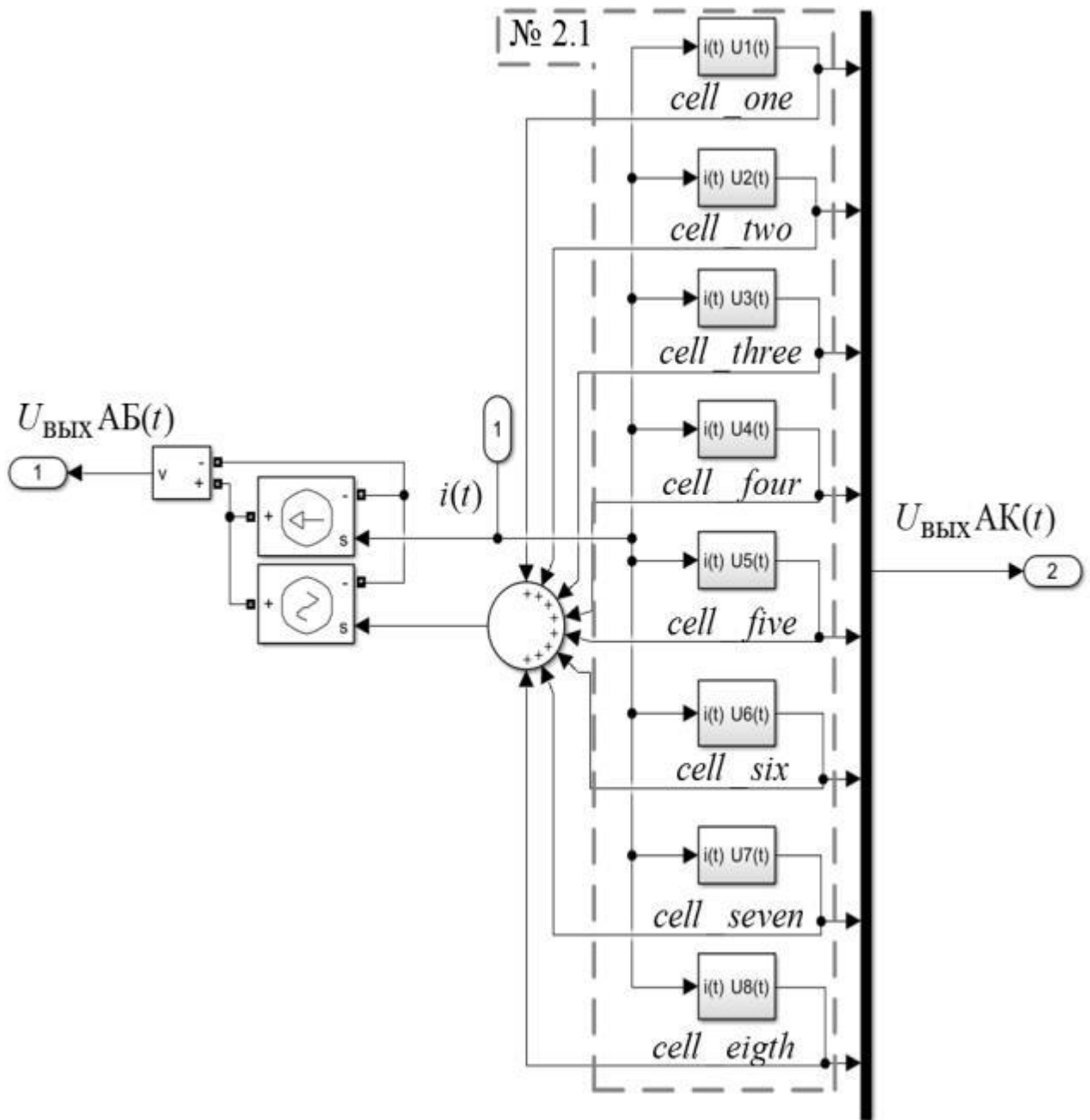


Рисунок 3.4 – Імітаційні моделі батареї 8ЛИ40АБ та її акумуляторів

За результатами моделювання створено вісім імітаційних моделей акумуляторів 8ЛИ40АК з індивідуальними параметрами $E(t)$ і R_0 для кожного.

Похибка характеристик імітаційної моделі акумулятора 8ЛИ40АК не перевищує $\pm 2\%$, модель батареї 8ЛИ40АБ не перевищує $\pm 1\%$ на всьому діапазоні циклу заряду.

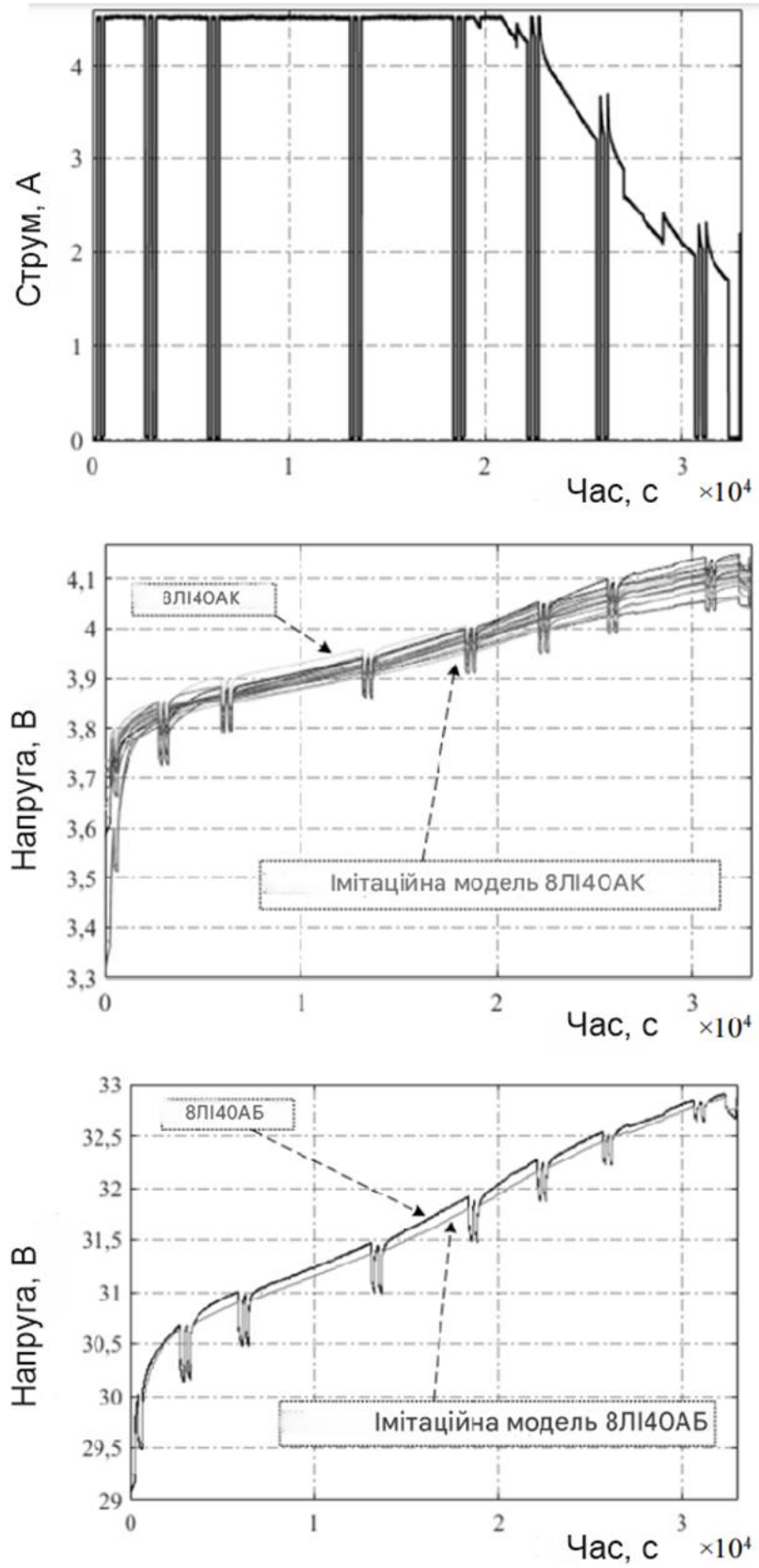


Рисунок 3.5 – Залежності струму завдання та напруги акумуляторів і батареї в режимі заряду

3.5 Висновок

1. Запропоновано алгоритм визначення параметрів динамічної моделі ЛІА, який вирізняється тим, що параметри динамічної моделі ЛІА формуються за експериментальними даними або даними, наданими виробником ЛІА. Розроблена модель ЛІА була перевірена на тестовій моделі VL48E за допомогою програми Simulink Matlab. Похибка алгоритму визначення параметрів динамічної моделі ЛІА не перевищує $\pm 2\%$ на розрядній і $\pm 0,7\%$ на зарядній характеристиках акумулятора. Визначальний вплив систематичної похибки на точність роботи алгоритмів має неточність визначення параметрів R_0 , Q_{\max} .

2. На основі запропонованої моделі акумулятора було розроблено алгоритм, що дає змогу підвищити точність визначення параметрів батареї завдяки агрегуванню моделей кожного акумулятора, а також визначити технічний стан акумуляторів за зміною струму завдання $i(t)$. За допомогою програми Simulink Matlab запропонований алгоритм було перевірено на адекватність. Встановлено, що відтворення параметрів ЛІА можливе з похибкою не більше $\pm 2\%$.

3. Запропоновано алгоритм створення імітаційної моделі батареї 8ЛІІ40АБ на базі експериментальних даних у режимі заряду. У результаті моделювання встановлено, що похибка напруги імітаційної моделі акумулятора 8ЛІІ40АК у динамічному режимі не перевищує $\pm 2\%$, а моделі батареї 8ЛІІ40АБ не перевищує $\pm 1\%$.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ЛІТІЙ-ІОННОГО АКУМУЛЯТОРА

Вимірювання елементів батареї у різних умовах займає багато часу. Зазвичай потрібно кілька годин, щоб виміряти поведінку елемента лише під час одного циклу зарядки та розрядки та відпочинку між ними. Крім того, вимірювання осередків в різних станах здоров'я (SOH) можуть зайняти місяці, до того ж потрібно відключення АБ від системи, що нею живиться.

Моделювання значно знижує вартість експериментів. На додаток до витрат на придбання експериментальних пристроїв та дослідних зразків використання моделей може заощадити час і кошти. Крім того, моделювання одиночних і багатоелементних батарей дозволяє більш детально проаналізувати процеси, що відбуваються всередині, та їх вплив на характеристики акумулятора, що досить важко оцінити експериментально. Комп'ютерне моделювання робить можливим оцінити поведінку батареї в екстремальних умовах за критичних значень основних параметрів не зазнаючи пошкоджень або руйнування дослідних зразків, а також виключаючи можливість їх займання. Моделювання відіграє дуже важливу роль у вивченні об'єкта дослідження і може набувати різних форм, включаючи і фізичну деформацію [16].

Модель батареї також корисна для прогнозування параметрів, які можуть бути безпосередньо виміряні ніякими датчиками. такі як стан заряду (SOC), стан здоров'я (SOH) та стан життя (SOL).

Моделі можна умовно розділити на чотири категорії: емпіричні, електрохімічні, мультифізичні та молекулярно/атомарні. Саме спрощені емпіричні моделі часто використовуються в інженерній практиці. Вони будуються на основі експериментальних розрядних/зарядних даних і використовуються для прогнозування поведінки літій-іонних акумуляторів, при цьому фізико-хімічні процеси, що протікають, усередині не розглядаються. При достатній простоті обчислень ця модель підходить тільки для типів батарей, що вже

використовуються. Вона також добре підходить для проектування та розробки систем контролю та управління BMS (Battery Management Systems), оскільки має достатню простоту реалізації, а також достатню точність оцінки стану заряду акумулятора.

Серед багатьох завдань BMS найбільш важливою є точне надання станів LIB у реальному часі, наприклад, стан заряду (SOC), стан працездатності (SOH) і стан потужності (SOP). Незважаючи на важливість SOH у діагностиці життя LIB, точна оцінка SOH залишається складним завданням. SOH не можна виміряти безпосередньо; замість цього його можна оцінити тільки на основі деяких доступних вимірювань, наприклад струму, напруги і температури.

Для дослідження систем математичне моделювання поділяють на імітаційне, аналітичне та комбіноване.

У моделюванні акумуляторних батарей виділяють два напрями: подання поточних параметрів протягом циклу заряду-розряду та моделювання параметрів функціонального стану за тривалий час експлуатації. Зазначені напрями розглядають різні характерні періоди часу (годинник і добу в першому випадку і сотні діб – у другому), розрізняються за параметрами, що враховуються, і є відносно незалежними. У MATLAB Simulink останніх версій є вбудована модель з деградацією параметрів акумулятора, проте досить складна. Зокрема, при моделюванні роботи більше одного акумулятора значно зростає тривалість рахунку.

MATLAB Simulink – це графічне середовище імітаційного моделювання, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді спрямованих граф будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні та гібридні, нелінійні та розривні системи. Додаткові пакети розширення Simulink дозволяють вирішувати широкий спектр завдань від розробки концепції моделі до тестування, перевірки, генерації коду та апаратної реалізації. Simulink інтегрований у середу MATLAB,

що дозволяє використовувати вбудовані математичні алгоритми, потужні засоби обробки даних та наукову графіку.

Незважаючи на всі переваги літій-іонної батареї, процеси, що протікають всередині акумулятора, мало передбачувані. Елементи літій-іонних акумуляторів не тільки демонструють різну поведінку в залежності від деградації та стану зарядки, але також перезарядження та надмірна розрядка елементів скорочують термін служби акумулятора та викликають проблеми з безпекою, тому необхідні дослідження, спрямовані на отримання точного стану елемента.

Метою побудови моделі елемента літій-іонного акумулятора є моделювання та оптимізація стану працездатності елемента (SOH), стан заряду комірки (SOC) та методи моніторингу. Ця модель оцінює постійний імпеданс елемента під час розряду контролю стану. Зокрема, моделюється імпеданс комірки при подачі багатосинусоїдального сигналу на робочий струм комірки. Щоб вивести імпеданс комірки, імітаційна модель враховує SOC комірки, SOH, температуру комірки та робочий струм.

Для отримання достовірної оцінки експлуатаційних характеристик пропонується застосування математичної моделі на розрахунковій основі. Важливою особливістю запропонованої моделі є простота розрахунку та отримання експлуатаційних характеристик. Необхідні лише три параметри акумуляторної батареї – це початкове значення внутрішнього опору, початкове значення напруги розімкнутого кола та ємності.

У пакеті MATLAB Simulink є вбудована модель акумулятора з деградацією ємності, за допомогою якої можлива симуляція роботи свинцево-кислотного, літій-іонного, нікель-кадмієвого, нікель-металогідридного акумуляторів. Схема розряду літій-іонної батареї з використанням відповідної вбудованої моделі представлена на рисунку 4.1. Параметри АКБ можна встановити вручну або вибрати зі списку у відповідному блоці меню [17].

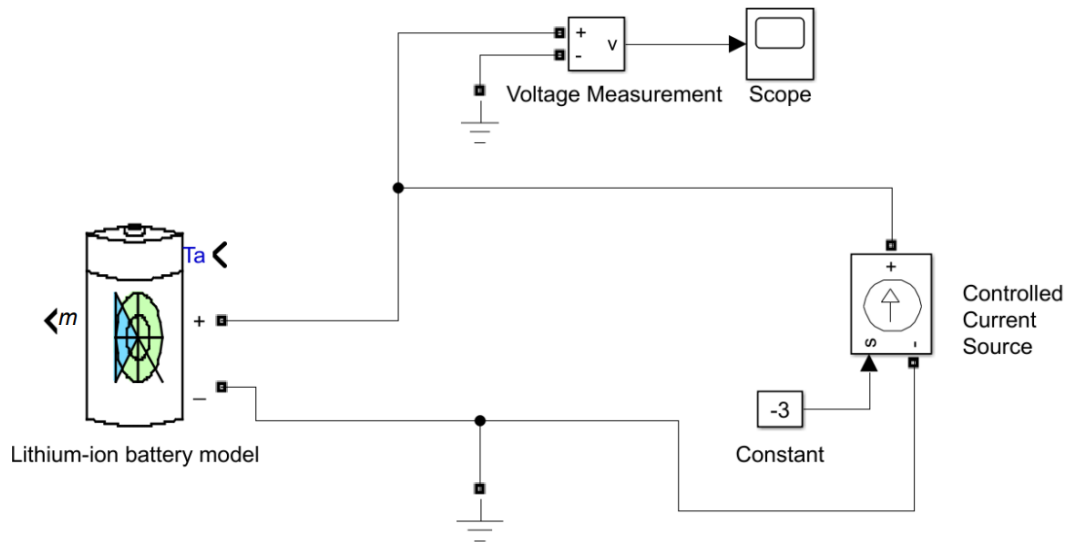
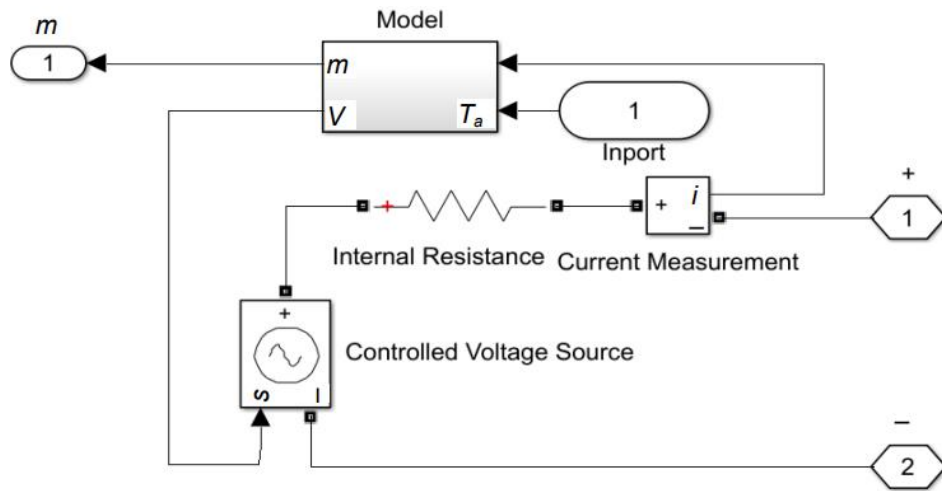


Рисунок 4.1 – Схема розряду літій-іонного акумулятора в Simulink

Модель має ієрархічну структуру, показану на рисунку 4.2. Блок «Internal Resistance» забезпечує внутрішній спротив акумулятора, блок «Current Measurement» вимірює і передає значення струму в моделі акумулятора, «Controlled Voltage Source» – керований джерело напруги.



1, 2 в шестикутнику – плюсова і мінусова клєми акумулятора;

i , T_a – вхідні параметри струм і температура; m , V – вихідні параметри

Рисунок 4.2 – Ієрархічна структура моделі літій-іонного акумулятора

На рисунку 4.3 показана рівнозначна схема акумулятора, модельованого блоку. Блок батарей реалізує загальну динамічну модель. Вбудована модель використовує рівняння, що зв'язують електричні параметри LIB.

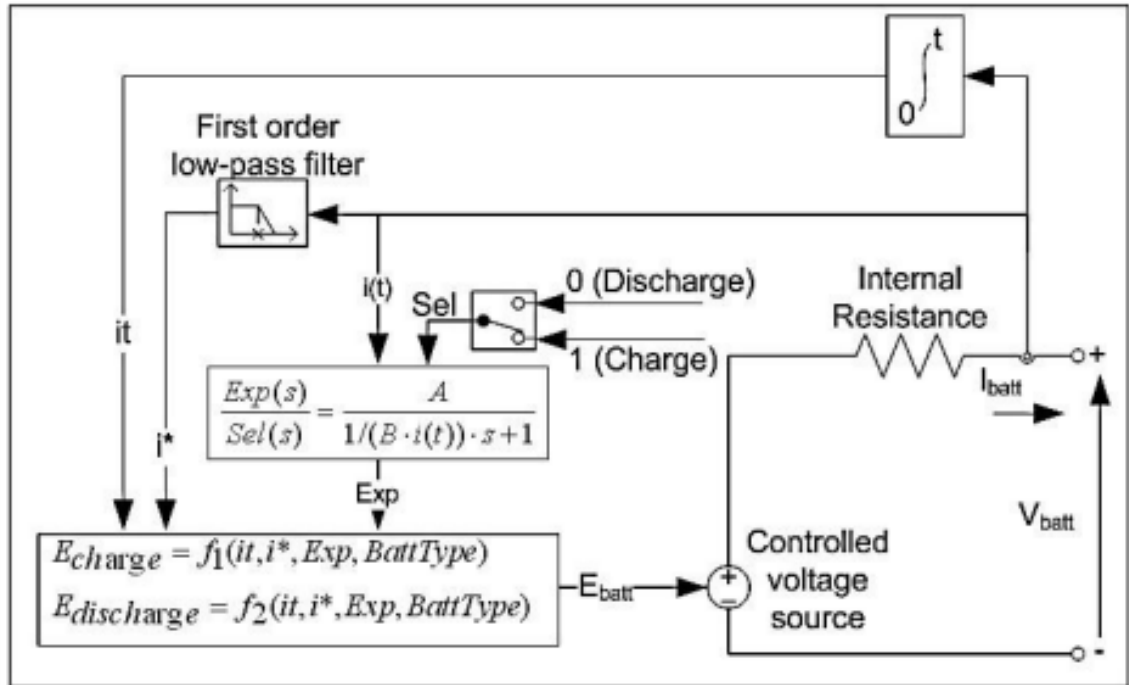


Рисунок 4.3 – Еквівалентна схема батареї

Пропонована модель заснована на певних припущеннях та обмеженнях.

Допущення моделі:

- внутрішній опір передбачається постійним під час циклів зарядки та розрядки і не залежить від амплітуди струму;
- параметри моделі виводяться з розряду характеристики та приймається рівним для заряджання;
- ємність батареї не змінюється залежно від амплітуди струму;
- Температура не впливає на поведінку моделі;
- Саморозряд відсутній;
- Ефект пам'яті відсутній.

Обмеження моделі:

- Мінімальна напруга батареї дорівнює 0 V , а максимальна напруга батареї $2 * E_0$.

- Мінімальна ємність батареї 0 A/год , а максимальна не може бути більше 100% .

Природно, що при моделюванні є якісь припущення, але якщо розглядати найпростіші схеми заміщення акумуляторів, що не враховують кінцеву ємність, деградацію, особливості перенапруги при зарядці, а також моделі з конденсатором, що імітують обмеження швидкості заряду, то можна упустити ключові моменти розуміння акумулятора. Трохи складніша схема, яка називається моделлю Тевеніна, що імітує перенапругу при зарядці, вже включає резистор саморозряду. Існують також моделі заміщення, у яких значення елементів кола залежить від напруги чи струму [18].

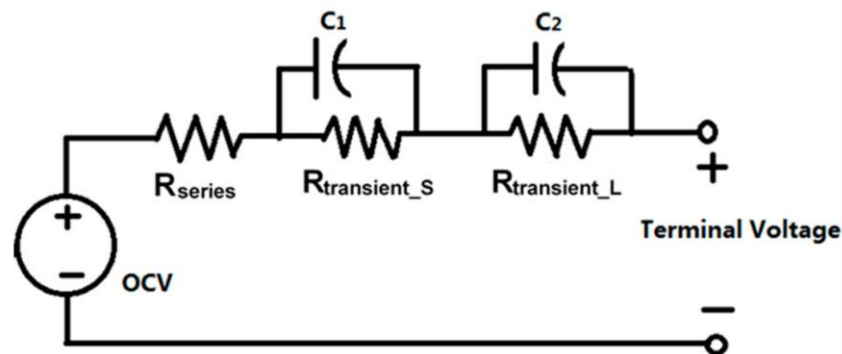


Рисунок 4.4 – Еквівалентна схема батареї на основі моделі Тевеніна

Найбільш часто використовуваними моделями еквівалентних електричних кіл є моделі, засновані на Thevenin, імпедансна модель та модель на основі часу виконання. Модель на основі Thevenin може прогнозувати реакцію батареї на перехідне навантаження при певному SOC завдяки послідовному резисторам та паралельному колу резистор-конденсатор у моделі. Модель імпедансу формується за допомогою моделі імпедансу, еквівалентної змінному струму, частотної області та методу спектроскопії електрохімічного імпедансу. Модель, заснована на часі роботи, використовує конденсатор та керований джерело струму для

прогнозування ємності батареї, SOC, часу роботи та напруги холостого ходу (OCV).

Недоліком еквівалентної схеми моделі батареї Тевеніна є неточність. У процесі зміни стану батареї решта елементів може змінити значення.

Переваги моделей, заснованої на часі виконання та заснованої на Thevenin, об'єднані в еквівалентній моделі електричного ланцюга з покращеними характеристиками, як показано на рисунку 4.1.

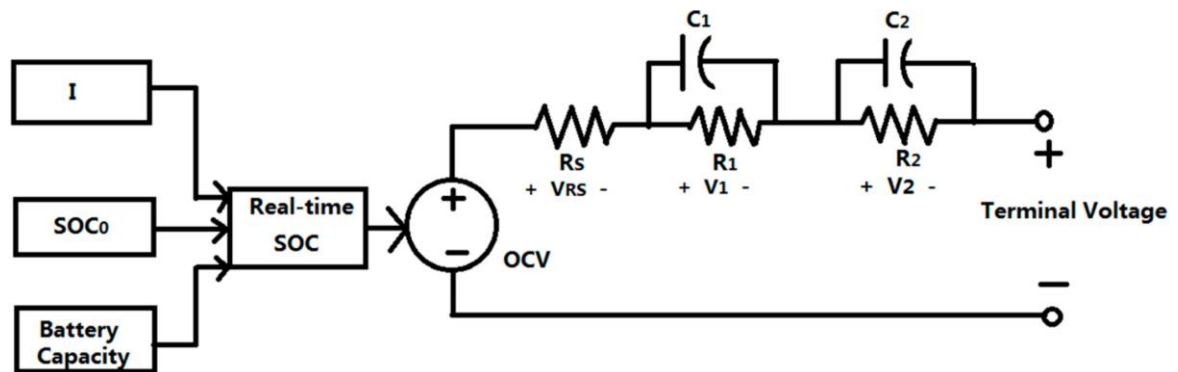


Рисунок 4.5 – Покращена модель Thevenin на основі акумуляторної батареї

Підхід еквівалентного електричного кола вважається загальноприйнятим для моделювання акумуляторних елементів, починаючи від свинцево-кислотних і закінчуючи літій-іонними батареями.

Коли необхідно оцінити поведінку одиночного акумулятора в процесі розряду, заряду та в екстремальних умовах, при критичних значеннях основних параметрів на допомогу може прийти імітаційне моделювання.

Фактична ємність акумуляторної батареї залежить від ряду факторів: середній розрядний струм і тривалість розряду, внутрішня температура батареї, напруга в кінці розряду, тривалість зберігання (саморозряд), кількість циклів заряд-розряд (старіння).

Вимірювання імпедансу елемента батареї використовуються для методів оцінки SOH і SOC елемента, але для підготовки елемента в кожному стані потрібно багато часу, і вимірюється характеристика напруги елемента при зарядці

і розрядці в кожному стані. У цьому дослідженні представлена модель електричної еквівалентної схеми літій-іонних елементів, розроблена серед Simulink пакету MATLAB. SOC комірки, SOH, температура та швидкість C враховуються для більш точного прогнозування імпедансу комірки, а результати моделювання звіряються з результатами вимірів.

Крім того, імпеданс тісно пов'язаний з внутрішніми фізичними та хімічними процесами літій-іонних акумуляторів та є потужним інструментом, який використовується в галузі оцінки та діагностики стану літій-іонних акумуляторів. Імпеданс є важливим параметром електрохімічних систем. Він завжди вважався одним із найпотужніших інструментів для аналізу властивостей системи. Імпеданс літій-іонної батареї відбиває складність руху заряджених частинок. Більш повне уявлення про акумулятор можна отримати саме за допомогою імпедансу.

Спектроскопія електрохімічного імпедансу (EIS) є одним із методів неруйнівного аналізу елементів акумуляторних батарей, що дозволяє оцінити електрохімічні параметри.

Одним із підходів для визначення стану акумулятора є спектроскопія електрохімічного імпедансу (EIS) – це метод неінвазивного аналізу для вимірювання параметрів акумуляторних елементів, який встановлює модельні структури через SOC, SOH, старіння, температуру, внутрішні дефекти тощо. EIS заснований на тому, що процеси електрохімічних втрат відбуваються в широкому діапазоні частот, оскільки кожен процес має свою постійну часу, EIS може ізолювати більшість цих процесів. Вимірювання EIS проводять у широкому діапазоні частот від кількох кГц до кількох МГц щоб одержати характеристичного спектра імпедансу. Якщо кілька частот застосовують одночасно, цей час вимірювання може бути скорочено, і цей метод називається мультисинусоїдальної EIS [19].

По суті електрохімічний імпеданс елемента батареї є частотно-залежне комплексне число.

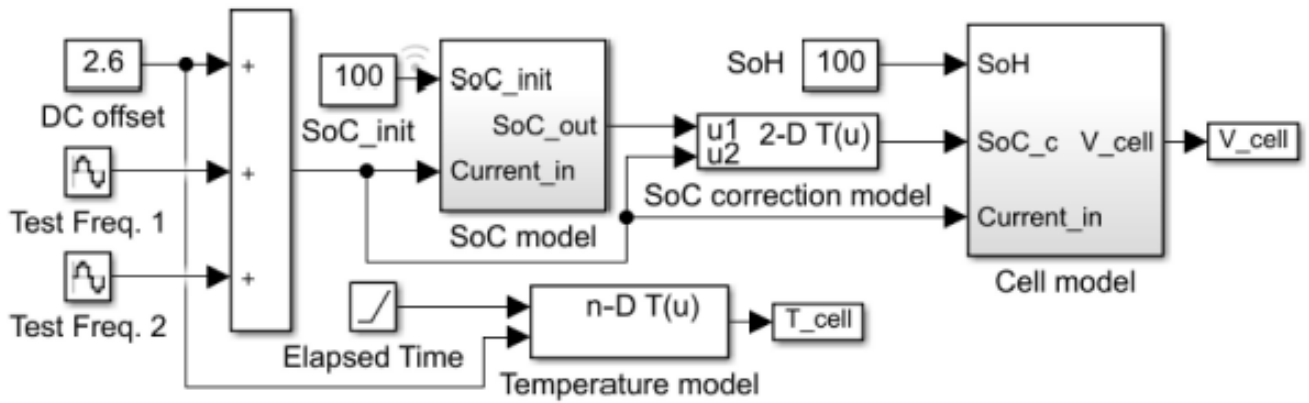


Рисунок 4.6 – Загальний вигляд запропонованої імітаційної моделі.

Чим нижче SOC комірки, тим вищий імпеданс комірки. Крім того, що нижча частота, то вищий імпеданс осередку. Нижчі частоти призводять до більшої різниці імпедансу для кожної SOC, що робить вигідним використання низькочастотного імпедансу для розрізнення SOC кожної комірки.

Еволюція опорів, ємностей та характеристичних частот різних ефектів відстежується за допомогою SOC на двох рівнях старіння. Безпосередньо, в діапазоні імпедансу ідентифікуються два ефекти; один явно викликаний перенесенням заряду на позитивному електроді, тоді як інший, ймовірно, викликаний транспортом іонів літію через міжфазний шар твердого електроліту (SEI). Понад те, з старіння чарунок характерна частота переносу заряду різко знижується приблизно 70 раз. Старіння зазвичай оцінюється з погляду зниження ємності чи підвищення імпедансу за різних умов. Хоча механізми старіння здебільшого ідентифіковані та визначені, вони досі недостатньо вивчені.

Основним параметром деградації за дотримання правил експлуатації літєвих акумуляторів є термін його служби, тобто кількість циклів заряду-розряду – Initial battery age (Equivalent full cycles). Інші параметри задаються автоматично в залежності від типу та параметрів акумулятора, їх також можна редагувати.

На зниження розрядної ємності акумуляторної батареї впливає внутрішній опір АБ. Внутрішній опір визначає продуктивність батареї. У існуючих математичних

моделях внутрішній опір вважається постійним, але на практиці внутрішній опір зростає. На зростання внутрішнього опору впливає ступінь зарядженості та температура – це веде до швидкого падіння розрядної напруги та, в наслідок, до зниження розрядної ємності акумулятора.

У зв'язку з цим виникає необхідність у отриманні достовірної та оперативної інформації про поточний стан та експлуатаційні характеристики АБ. Методи оперативної оцінки стану АБ ґрунтуються на характеристиках, отриманих побічно, в результаті аналізу параметрів. Для цього потрібна математична модель, яка описує основні характеристики акумулятора.

Повний внутрішній опір акумулятора – складається з двох складових: омичний опір та опір поляризації.

Розрядна характеристика – це зв'язок між розрядним напругою АБ і тривалістю розряду, отже, і розрядної ємності. Зі сказаного вище впливає що: вихідним параметром математичної моделі акумуляторної батареї є розрядна напруга, а вхідний параметр – це час розряду.

Математична модель акумуляторної батареї в середовищі Matlab/Simulink не дозволяє змінювати внутрішній опір (передбачається постійною під час циклів заряджання та розряджання і не залежить від амплітуди струму). Але на практиці внутрішній опір батареї зростає за її розряду, особливо в кінці розряду акумуляторної батареї.

На зростання внутрішнього опору впливає ступінь зарядженості та температура – це веде до швидкого падіння розрядної напруги та, в наслідок, до зниження розрядної ємності акумулятора. Внутрішній опір є одним з основних характеристик акумуляторної батареї і визначає продуктивність батареї.

Представлена математична модель накопичувача електричної енергії враховує зміну внутрішнього опору. Її важливою особливістю є простота розрахунку та отримання експлуатаційних характеристик. Результати моделювання належним чином збігаються з реальними характеристиками джерел струму цього типу.

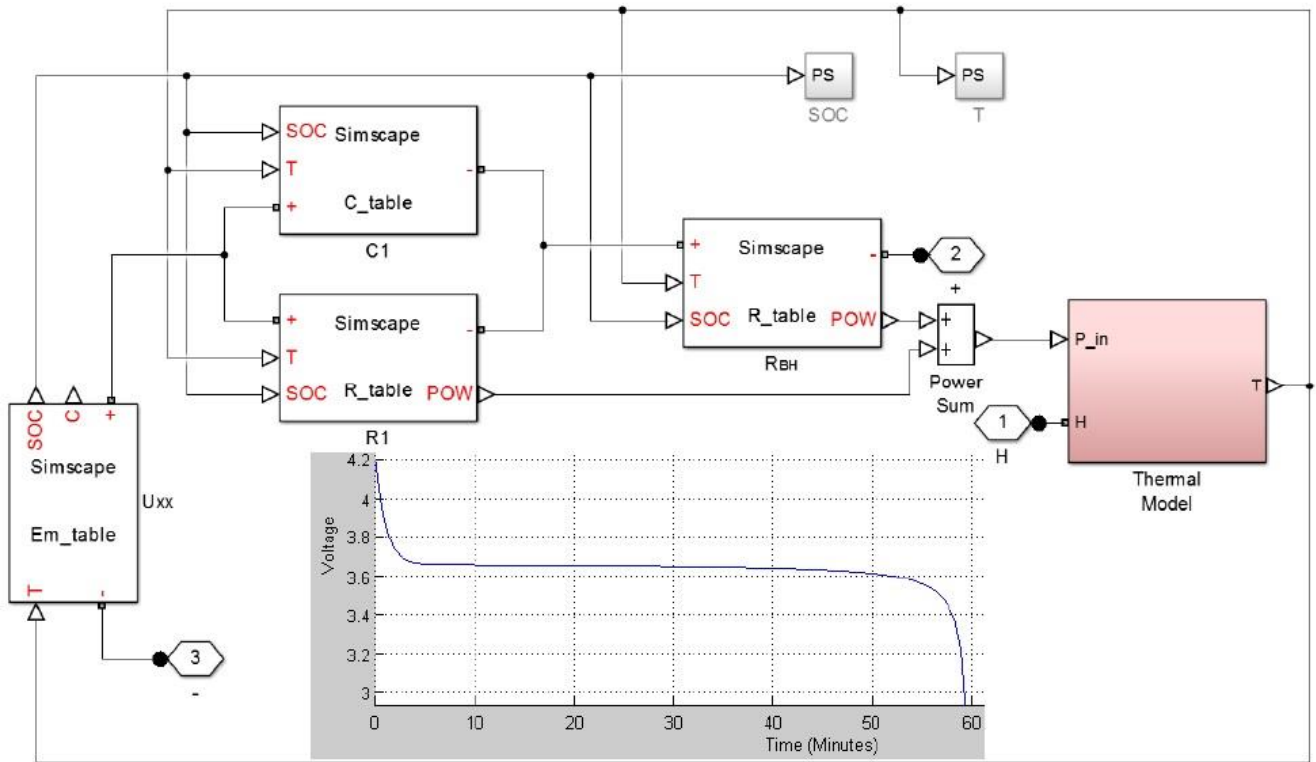


Рисунок 4.7 – Еквівалентна схема літій-іонного елемента

Результати моделювання відображають високу адекватність алгоритму на тестовому прикладі Simulink Matlab і експериментальних даних.

До недоліків описаних моделей можна віднести або грубі недогляди, або відносну складність, що призводить до збільшення тривалості рахунку та ускладнює дослідження збирання акумуляторних батарей.

В основі безпечної експлуатації літій-іонних батарей лежить безперервний контроль основних параметрів акумулятора, а також моніторинг історії заряду/розряду та фактичної ємності. Визначальну роль під час проектування систем контролю та моніторингу відіграє моделювання. Розуміння процесів, що відбуваються в акумуляторному осередку, дозволить у майбутньому запобігти аварійним ситуаціям, продовжити терміни експлуатації та підвищити продуктивність даного накопичувача енергії.

Розробка повномасштабної та достовірної моделі, а також експериментальне підтвердження обраної моделі є актуальним інженерним завданням. При цьому модель повинна відрізнятися простотою реалізації відносно невеликим обсягом і прийнятною швидкістю обчислювальних операцій.

Розглянуто основні методи та напрямки моделювання життєвого циклу АКБ. Показано, що наочним та універсальним методом імітаційного моделювання окремих АКБ та їх складання є електротехнічне симулювання відповідних схем заміщення у сучасному програмному середовищі Simulink пакету MATLAB, де є вбудована модель деградації параметрів АКБ. Вона досить складна і тому дослідження роботи більше одного акумулятора займає значний час, а моделювання великих збірок практично неможливо. При можливості знехтувати високою точністю, існуючу модель слід спростити і таким чином прискорити обчислення.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Основна перевага використання літієвих батарей полягає в тому, що їх не потрібно обслуговувати, вони мають низький саморозряд і не мають так званого «ефекту пам'яті». Однак слід враховувати, що за порушення умов їх використання можна викликати спалах або вибух. Для забезпечення безпеки необхідно дотримуватися таких загальних правил: виключити можливість короткого замикання; не можна допускати перегрівання батареї; не використовувати пошкоджені батареї.

Використання сучасних зразків літій-іонних акумуляторів як резервне джерело живлення у складі джерела безперебійного живлення для пристроїв та систем залізничної автоматики та телемеханіки дозволяє зменшити вагу та габарити батареї майже на цілий порядок, вивільнити приміщення, усунути шкідливі умови для роботи, що виникають при обслуговуванні кислотних та лужних батарей, і продовжити термін служби у кілька разів.

Розвиток технологій у сфері накопичення електричної енергії дає можливість по-новому поглянути на системи організації електропостачання. Завдяки значному технологічному прогресу та досягненням останнього часу у розробці акумуляторних батарей з'явилася можливість організації резервного електроживлення від надійних та стабільних джерел. Крім цього, переваги безпосередньо пов'язані і з якістю електричної енергії, що є вкрай важливим у зв'язку з повсюдним застосуванням мікропроцесорних технологій на залізничному транспорті, які вкрай вимогливі до чистоти та форми струму в мережі у зв'язку зі своєю чутливістю до електроживлення.

Розглянуті типи LiB мають особисті індивідуальні особливості. Їхня різноманітність дозволяє робити оптимальний вибір під конкретне специфічне завдання. Враховуючи умови застосування LiB як резервне джерело електроживлення систем автоматики на залізничному транспорті найбільш відповідним є акумулятори типу LFP.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Drouineau, M.; Maïzi, N.; Mazauric, V.; Drouineau, M. 2014. Impacts of intermittent sources on the quality of power supply: The key role of reliability indicators. *Applied Energy*. Vol. 116. P. 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.069>
2. Jagruti Thakur; Constança Martins Leite de Almeida; Ashish Guhan Baskar. 2022. Electric vehicle batteries for a circular economy: Second life batteries as residential stationary storage, *Journal of Cleaner Production*, Volume 375, 134066, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134066>
3. Akram Eddahech; Olivier Briat; Jean-Michel Vinassa. 2015. Performance comparison of four lithium-ion battery technologies under calendar aging, *Energy*, Volume 84, Pages 542-550, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.019>.
4. Abraham Alem Kebede; Md Sazzad Hosen; Maarten Messagie; Henok Ayele Behabtu; Towfik Jemal; Joeri Van Mierlo; Thierry Coosemans; Maitane Berecibar. 2022. Development of a lifetime model for large format nickel-manganese-cobalt oxide-based lithium-ion cell validated using a real-life profile, *Journal of Energy Storage*, Volume 50, 104289, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104289>.
5. Abraham Alem Kebede; Md Sazzad Hosen; Theodoros Kalogiannis; Henok Ayele Behabtu; Marta Zemedu Assefa; Towfik Jemal; Venkata Ramayya; Joeri Van Mierlo; Thierry Coosemans; Maitane Berecibar. 2023. Optimal sizing and lifetime investigation of second life lithium-ion battery for grid-scale stationary application, *Journal of Energy Storage*, Volume 72, Part C, 108541, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108541>.
6. Leila Ahmadi; Arthur Yip; Michael Fowler; Steven B. Young; Roydon A. Fraser. 2014. Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries, *Sustainable*

- Energy Technologies and Assessments, Volume 6, Pages 64-74, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.01.006>.
7. Jiawei Quan; Siqi Zhao; Duanmei Song; Tianya Wang; Wenzhi He; Guangming Li. 2022. Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies, Science of The Total Environment, Volume 819, 153105, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153105>.
 8. Joris de Hoog; Jean-Marc Timmermans; Daniel Ioan-Stroe; Maciej Swierczynski; Joris Jaguemont; Shovon Goutam; Noshin Omar; Joeri Van Mierlo; Peter Van Den Bossche. 2017. Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with real-life profile validation, Applied Energy, Volume 200, Pages 47-61, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.018>.
 9. Serhii Buriak; Oksana Gololobova; Volodymyr Havryliuk; Tatiana Serdiuk; Oleh Voznyak; & Ivan Manachyn. 2024. Analysis and research of the causes and course of degradation of lithium batteries. MATEC Web of Conferences Volume 390 (2024) 3rd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2023). DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439001003>
 10. Comparison of Open Datasets for Lithium-ion Battery Testing, https://docs.google.com/spreadsheets/d/10w5yXdQtlQjTTS3BxPP233CiiBScIXecUp2OQuvJ_JI/edit#gid=0
 11. Ray Chan. 2022. Stand by for action Condition Monitoring, Products & Technology, Safety, Standards & Regulation, Signalling & Communications February 23, 2022, <https://www.railexpress.com.au/stand-by-for-action/>
 12. Kwon S-J; Lee S-E; Lim J-H; Choi J; Kim J. 2018. Performance and Life Degradation Characteristics Analysis of NCM LIB for BESS. Electronics; 7(12):406. <https://doi.org/10.3390/electronics7120406>

13. Naoki Nitta; Feixiang Wu; Jung Tae Lee; Gleb Yushin. 2015. Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, Volume 18, Issue 5, Pages 252-264, ISSN 1369-7021, <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
14. Hasan, K., Tom, N., Yuce, MR. 2023. Navigating Battery Choices in IoT: An Extensive Survey of Technologies and Their Applications. *Batteries*; 9(12):580. <https://doi.org/10.3390/batteries9120580>
15. Salgado, RM; Danzi, F; Oliveira, JE; El-Azab, A; Camanho, PP; Braga, MH. 2021. The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries. *Molecules*; 26(11):3188. <https://doi.org/10.3390/molecules26113188>
16. Jagruti Thakur; Constança Martins Leite de Almeida; Ashish Guhan Baskar. 2022. Electric vehicle batteries for a circular economy: Second life batteries as residential stationary storage, *Journal of Cleaner Production*, Volume 375, 134066, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134066>
17. Peng, S. 2023. Challenges and Prospects for Zinc-Air Batteries. In *Zinc-Air Batteries: Fundamentals, Key Materials and Application*; Springer Nature Singapore: Singapore; pp. 205–215, https://doi.org/10.1007/978-981-19-8214-9_7
18. Hannan, M. A.; Hoque, M. M.; Hussain, A.; Yusof, Y. and Ker, P. J. 2018. "State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362-19378, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2817655>
19. Miao, Y; Hynan, P; von Jouanne, A; Yokochi, A. 2019. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*; 12(6):1074, <https://doi.org/10.3390/en12061074>