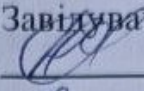


**- НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«18» 06 2025 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
на тему: «Оцінка ефективності застосування різних типів низьковольтих
акумуляторних батарей»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕВ-11

Фомін Владислав Сергійович



Керівник:

Доцент кафедри теоретичної електротехніки,

Доцент, Кандидат технічних наук

Халімовський Олексій Модестович



Консультант з назва розділу:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ініціали

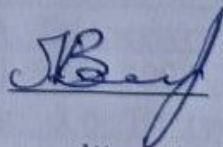


Рецензент:

Доцент кафедри теоретичної електротехніки,

Доцент, Кандидат технічних наук

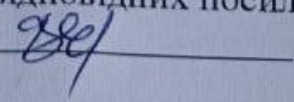
Лободзінський Вадим Юрійович



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

Студент

Київ – 2025 року



**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки**

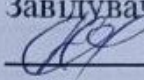
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«19» 05 2025р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Фомін Владиславу Сергійовичу

1. Тема роботи «Оцінка ефективності застосування різних типів низьковольтних акумуляторних батарей», керівник роботи Халімовський Олексій Модестович, Доцент, Кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «16» 05 2025р. № 1740-е
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: Panasonic NCR18650B Номінальна напруга: 3.6 В, Ємність: 3.4 А·год, Енергія: 12.24 Вт·год, Внутрішній опір: 60 мОм, Макс. струм розряду: 6.8 А (2С), Температура розряду: від -20 °С до +60 °С, Маса: 47 г.
Yuasa NP7-12 Номінальна напруга: 12 В, Ємність: 7 А·год, Енергія: 84 Вт·год, Внутрішній опір: 28 мОм, Макс. струм розряду: 21 А, Температура розряду: від -15 °С до +50 °С, Маса: 2.45 кг.
Panasonic BK-300SCE Номінальна напруга: 1.2 В, Ємність: 3.0 А·год, Енергія: 3.6 Вт·год, Внутрішній опір: 20 мОм, Макс. струм розряду: 6 А (2С), Температура розряду: від -10 °С до +50 °С, Маса: 70 г.
Maxwell BCAP3000 P270 K04 Номінальна напруга: 2.7 В, Ємність: 3000 Ф, Енергія: 3.04 Вт·год, Внутрішній опір (ESR): 0.29 мОм, Макс. струм розряду: 170 А, Температура розряду: від -40 °С до +65 °С, Маса: 510 г.

4. Зміст пояснювальної записки: 1. Огляд різних типів низьковольтних накопичувачів енергії. 2. Розрахунки для порівняння цінових характеристик з енергетичними. 3. Розрахунок практичного використання батарей кожного типу в різних сферах застосування. 4. Моделювання процесів розряду та заряду накопичувачів та порівняння отриманих результатів.

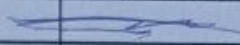
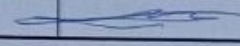
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація, публікація.

6. Консультанти розділів роботи

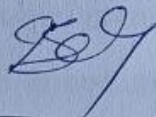
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 19.05.2025 р

Календарний план-графік

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка керівника про виконання або не виконання
1	Огляд літератури по заданій темі	07.05 – 13.05.	
2	Написання розділу 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОЇ НАПРУТИ.	15.05 – 20.05.	
3	Написання розділу 2. МЕТОДИКА ВИБОРУ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ.	21.05 – 23.05.	
4	Написання розділу 3. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ НИЗЬКОЇ НАПРУТИ.	25.05 – 27.05.	
5	Написання розділу 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПОРІВНЯЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ.	28.05 – 01.06.	
6	Оформлення роботи	02.06 – 03.06.	

Студент



Владислав ФОМІН

Керівник роботи



Олексій ХАЦМОВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 100 сторінках, містить 39 рисунків, 4 таблиці та 48 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – системи накопичення енергії низької напруги на основі літій-іонних, свинцево-кислотних, нікель-металогідридних акумуляторів та суперконденсаторів.

Предмет дослідження – порівняння, моделювання та вибір оптимального типу накопичувача енергії низької напруги для застосування у системах відновлюваної енергетики, джерелах безперебійного живлення (UPS) та електротранспорті.

Мета роботи – комплексний аналіз різних технологій накопичення енергії та розробка підходу до моделювання в середовищі MATLAB/Simulink для оцінки їхньої роботи при циклічному навантаженні.

Результати та їх новизна: У дипломній роботі досліджено та порівняно чотири типи накопичувачів енергії низької напруги: літій-іонний, свинцево-кислотний, нікель-металогідридний акумулятори та суперконденсатор. Проведено розрахунки кількості елементів для забезпечення навантаження 100 Вт·год, змодельовано поведінку батарей у MATLAB/Simulink за різних струмів (0.5C, 1C, 2C), побудовано графіки напруги, заряду, температури.

Ключові слова: НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ, АКУМУЛЯТОР, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, МОДЕЛЮВАННЯ, ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ІМІТАЦІЯ РОЗРЯДУ, ТЕРМІЧНИЙ АНАЛІЗ, UPS, ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Оцінка ефективності застосування різних типів низьковольтних акумуляторних батарей		
Розроб.		Фомін					
Перевір.		Халімовський					
Н. Контр.							
Затверд.		Халімовський			КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр. ЕВ-11		
					Лім.	Арк.	Акрушів
						5	100

ABSTRACT

The diploma project is completed on 100 pages, includes 39 figures, 4 tables, and 48 references.

Object of study – Low-voltage energy storage systems based on lithium-ion, lead-acid, nickel-metal hydride batteries, and supercapacitors.

Subject of research – Comparison, modeling, and selection of optimal types of low-voltage energy storage devices for applications in renewable energy systems, uninterruptible power supply (UPS), and electric transport.

The aim – Comprehensive analysis of different energy storage technologies and development of a modeling approach in MATLAB/Simulink for evaluating their performance under cyclic loads.

Results and their novelty: This thesis investigates and compares four types of low voltage energy storage devices: lithium-ion, lead-acid, nickel-metal hydride batteries and a supercapacitor. The number of cells to provide a load of 100 Wh was calculated, the behavior of the batteries was modeled in MATLAB/Simulink at different currents (0.5C, 1C, 2C), and voltage, charge, and temperature graphs were constructed.

Key words: ENERGY STORAGE, BATTERY, SUPERCAPACITOR, MODELING, RENEWABLE ENERGY SOURCES, DISCHARGE SIMULATION, THERMAL ANALYSIS, UPS, ELECTRIC TRANSPORT.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Фомін			Оцінка ефективності застосування різних типів низьковольтних акумуляторних батарей			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Халімовський								6	100
Н. Контр.											
Затверд.		Халімовський									
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр. ЕВ-11						

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ.....	13
1.1 Літій-іонні накопичувачі	13
1.2 Свинцево-кислотні акумулятори	17
1.3 Нікель-металогідридні акумулятори	21
1.4 Суперконденсатори	24
1.5 Порівняння характеристик різних типів накопичувачів.....	27
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИБОРУ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ	30
2.1 Критерії вибору	30
2.2 Вплив температури та перенавантаження на роботу акумуляторів.....	34
2.3 Оцінка надійності та безпеки	42
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ	45
3.1 Накопичувачі в системах відновлюваної енергетики (ВДЕ)	45
3.2 Системи безперебійного живлення (UPS)	51
3.3 Накопичувачі в електротранспорті	56
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПОРІВНЯЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ.....	63
4.1 Вибір умов порівняння для моделювання	63
4.2 Розрахунок кількості та параметрів елементів кожного блока батарей	64
4.3 Створення моделей в Simulink	65

4.4 Приведення графіків моделювання та їх аналіз.....	72
ВИСНОВКИ	95
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	97

					EB11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AGM – Absorbent Glass Mat – абсорбований скловолоконний сепаратор (тип VRLA-акумулятора)

APS – Advanced Power Systems (ймовірно назва компанії або технології, потребує уточнення контексту)

BAK – назва китайського виробника акумуляторів (BAK Battery)

BMS – Battery Management System – система управління акумулятором

BU – Battery University – джерело технічної інформації (використовується як скорочення в посиланнях)

CC-CV – Constant Current – Constant Voltage – режим заряджання постійним струмом і напругою

DOD – Depth of Discharge – глибина розряду

DOI – Digital Object Identifier – цифровий ідентифікатор публікації (для джерел)

EN – European Norm – європейський стандарт

ESS – Energy Storage System – система зберігання енергії

EV – Electric Vehicle – електричний транспортний засіб

IEA – International Energy Agency – Міжнародне енергетичне агентство

IEC – International Electrotechnical Commission – Міжнародна електротехнічна комісія

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – Інститут інженерів електротехніки та електроніки

IR – Internal Resistance – внутрішній опір

KOH – гідроксид калію (електроліт у NiMH батареях)

LCO – літій-кобальтовий оксид (LiCoO_2)

LFP – літій-залізо-фосфат (LiFePO_4)

LSD – Low Self-Discharge – акумулятор із низьким саморозрядом

LTO – титанат літію ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

MATLAB – середовище технічного моделювання

MDPI – Multidisciplinary Digital Publishing Institute – міжнародне видавництво

MH – Metal Hydride – металогідрид (в NiMH батареях)

					EB11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

NCA – нікель-кобальт-алюмінієвий оксид

NCBI – Національний центр біотехнологічної інформації (США)

NMC – нікель-манган-кобальтовий оксид

SEI – Solid Electrolyte Interphase – твердотільна міжфазна плівка

SOC – State of Charge – рівень заряду

UPS – Uninterruptible Power Supply – джерело безперебійного живлення

USD – долари США

VRLA – Valve-Regulated Lead-Acid – герметизований свинцево-кислотний акумулятор

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасному світі накопичувачі енергії низької напруги відіграють ключову роль у забезпеченні безперебійного живлення електронних пристроїв, електротранспорту та систем відновлюваної енергетики. Зростаюча потреба в енергоефективних рішеннях, мінімізація втрат електроенергії та стабільна робота обладнання роблять дослідження у цій сфері надзвичайно актуальним. Інтенсивний розвиток технологій акумуляторів, суперконденсаторів, паливних елементів та інших систем накопичення стимулює пошук оптимальних рішень з урахуванням експлуатаційних характеристик, довговічності та економічної ефективності.

Враховуючи розвиток відновлюваної енергетики та електротранспорту, існує потреба у високопродуктивних накопичувачах, що забезпечують швидке заряджання, значну енергетичну щільність та тривалий термін експлуатації. Дослідження у цій сфері сприяють зниженню негативного впливу на довкілля, оптимізації виробничих витрат та підвищенню загальної ефективності енергосистем.

Метою роботи є аналіз різних типів накопичувачів енергії низької напруги з огляду на їхні технічні характеристики, ефективність та можливість застосування у різних сферах. Основні завдання дослідження включають: класифікацію існуючих накопичувачів; вивчення фізико-хімічних процесів, що в них відбуваються; аналіз ключових експлуатаційних параметрів, зокрема ємності, ККД, терміну служби та температурних особливостей; моделювання процесів заряджання й розряджання для прогнозування їхньої поведінки у різних умовах.

Об'єктом дослідження виступають накопичувачі енергії низької напруги, а предметом – їхні фізичні характеристики, принципи функціонування та застосування у практичних системах. Дослідження охоплює широкий спектр пристроїв, зокрема хімічні акумулятори, суперконденсатори та альтернативні технології збереження енергії.

Методи дослідження включають аналіз наукових джерел, порівняння

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристик накопичувачів, математичне моделювання та експериментальне вивчення ключових параметрів. Використання спеціалізованого програмного забезпечення для симуляції процесів заряджання й розряджання дає змогу отримати точні дані щодо продуктивності та довговічності накопичувачів.

Структура роботи складається з п'яти розділів. Перший розділ присвячений огляду сучасних накопичувачів енергії низької напруги, їхнім характеристикам та порівнянню. У другому розглядається методика вибору накопичувачів на основі критеріїв ефективності, надійності та впливу температурних факторів. Третій аналізує сфери застосування накопичувачів у відновлюваній енергетиці, системах безперебійного живлення та електротранспорті. Четвертий містить моделювання та розрахунки оптимальної конфігурації системи накопичення енергії в програмах: MATLAB/Simulink та Mathcad, Microsoft Excel. Останній структурний елемент містить висновки, рекомендації, список використаних джерел і графічні матеріали.

Таким чином, ця дипломна робота є комплексним дослідженням, спрямованим на оцінку ефективності різних типів накопичувачів енергії низької напруги та визначення їхньої придатності для конкретних сфер застосування.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СУЧАСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

1.1 Літій-іонні накопичувачі

Сучасний розвиток технологій енергозбереження потребує високоефективних і надійних накопичувачів електричної енергії, особливо в умовах зростання популярності мобільної електроніки, електротранспорту та систем відновлюваної енергетики. Серед різноманіття доступних технологій найбільшу увагу привертають літій-іонні акумулятори завдяки їх унікальному поєднанню високої енергетичної щільності, тривалого терміну служби та широкого діапазону застосування [1]. Їхнє масове виробництво розпочалося в 1990-х роках і з того часу вони стали основою для багатьох галузей, починаючи від побутових пристроїв і закінчуючи промисловими системами накопичення енергії [2]. У цьому пункті розглянуто ключові аспекти літій-іонних акумуляторів, включаючи їх будову, принцип роботи, основні характеристики, переваги, обмеження та перспективи розвитку. Їхня популярність обумовлена високою енергетичною щільністю, тривалим терміном служби, низьким рівнем саморозряду та високою ефективністю перетворення енергії. Принцип роботи ґрунтується на русі літій-іонів між катодом і анодом через електроліт: під час заряджання іони мігрують до анода, накопичуючись у його пористій структурі, тоді як під час розряду повертаються до катода, як показано на рисунку 1.1, забезпечуючи електричний струм у зовнішньому колі [2]. Основними матеріалами для анода найчастіше є графіт або титанат літію, а для катода – оксиди металів (LiCoO_2 , LiFePO_4 , LiMn_2O_4), що визначає ключові характеристики та сферу застосування акумулятора [3].

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

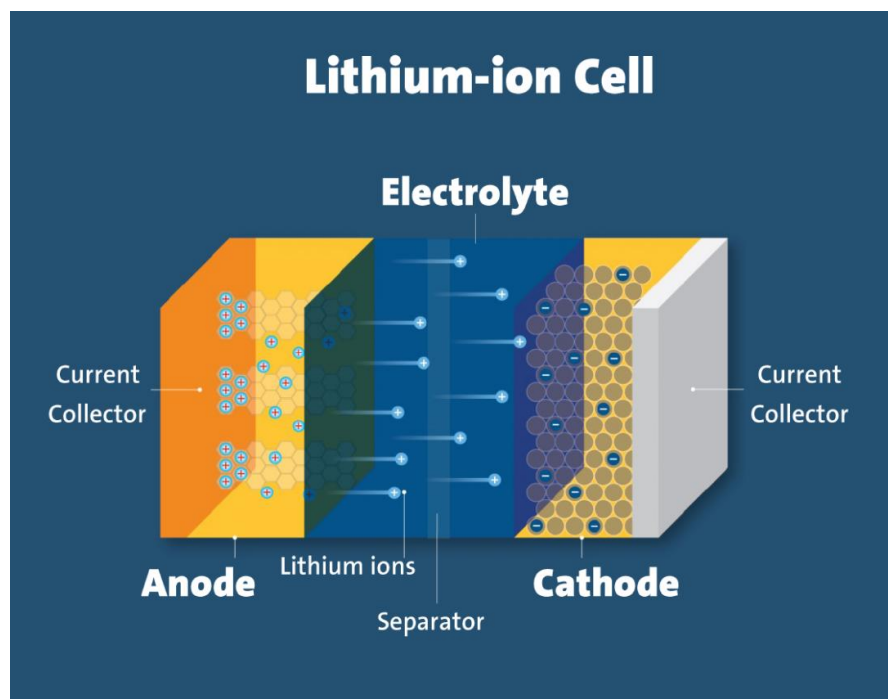


Рисунок 1.1 – Будова Li-ion батареї

де Lithium-ion Cell – Літій-іонний елемент;

Electrolyte – Електроліт;

Current Collector – Струмознімальний колектор;

Anode – Анод;

Lithium ions – Літієві іони;

Separator – Сепаратор;

Cathode – Катод.

Сучасні Li-ion батареї демонструють енергетичну щільність у діапазоні від 150 Вт·год/кг до 260 Вт·год/кг, тоді як у передових моделях із катодами на основі нікелю, марганцю та кобальту (NMC) вона може перевищувати 270 Вт·год/кг [3]. Питома потужність досягає від 600 Вт/кг до 1200 Вт/кг, що дає можливість використовувати їх у високонавантажених системах, зокрема в електромобілях та авіації. Коефіцієнт корисної дії при заряджанні й розряді сягає від 90% до 96%, а рівень саморозряду становить лише від 1,5% до 3% на місяць, що особливо важливо для тривалого зберігання енергії. Час заряджання варіюється залежно від типу батареї та режиму: стандартне заряджання триває від 1 години до 3 годин, тоді як із застосуванням швидкісних систем (до 5C – це показник швидкості заряджання або розряджання акумулятора, що в даному

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випадку означає п'ятикратну силу струму від номінальної ємності батареї) можна досягти повної зарядки менш ніж за 30 хвилин без суттєвого впливу на ресурс [4]. Сучасні технології дозволяють досягати понад 2000 циклів заряд-розряд при глибині розряду 80% (DOD – Depth of Discharge або глибина розряду – це показник, що відображає, наскільки сильно розряджається акумулятор відносно його повної ємності), однак новітні розробки у сфері твердотільних електролітів і катодних матеріалів обіцяють збільшення цієї цифри від 3000 циклів до 5000 циклів [3].

Значну роль у виборі типу Li-ion акумулятора відіграє тип катода: наприклад, літій-кобальтові (LCO) елементи характеризуються високою енергетичною щільністю (до 240 Вт·год/кг), проте мають обмежений термін служби (від 500 циклів до 800 циклів) і схильні до перегріву. Нікель-метал-кобальт-алюмінієві (NCA) та NMC-батареї забезпечують кращий баланс між потужністю, щільністю та довговічністю (до 2000 циклів) і тому найчастіше використовуються в електромобілях. Літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори мають нижчу щільність (від 90 Вт·год/кг до 160 Вт·год/кг), але відзначаються підвищеною термічною стабільністю, тривалістю експлуатації (від 2500 циклів до 5000 циклів) і безпечністю, що робить їх популярними для стаціонарних систем накопичення енергії [4]. Різновиди на основі титанату літію (LTO) демонструють надзвичайну циклічність – до 7000 циклів, хоча й мають нижчу енергетичну щільність (від 70 Вт·год/кг до 90 Вт·год/кг) [4].

Температурний діапазон роботи більшості Li-ion акумуляторів становить від 20°C до +60°C, однак при експлуатації за межами рекомендованих значень ефективність і ресурс помітно знижуються [2]. При температурах нижче -10°C зниження ємності може сягати 30%, тоді як перегрів вище +70°C здатен призвести до термічного розгону – небезпечного явища, що супроводжується виділенням газів і потенційним займанням. Саме тому сучасні батареї оснащуються системами управління BMS (Battery Management System або система управління акумуляторною батареєю), які контролюють рівень заряду, температуру та запобігають перезаряду й надмірному розряду [3].

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сфера застосування Li-ion акумуляторів надзвичайно широка: у споживчій електроніці вони використовуються для смартфонів, ноутбуків, фотоапаратів, де цінується компактність і тривала автономність; в електротранспорті – для живлення електромобілів, електробусів і скутерів, де забезпечують максимальний пробіг від 400 км до 500 км на одному заряді при використанні високощільних елементів; у системах зберігання енергії для сонячних і вітрових електростанцій – як буферні накопичувачі для балансування коливань генерації. Також зростає їх використання у медичному обладнанні, військових технологіях і авіакосмічній галузі. Особливо актуальними є рішення для мережевих ESS (Energy Storage Systems або системи зберігання енергії – це технології, що накопичують енергію для подальшого використання), де застосування літій-залізо-фосфатних модулів забезпечує ресурс понад 10 років експлуатації [1]. Типовий вигляд Li-ion акумуляторів показано на рисунку 1.2 [5].



Рисунок 1.2 – Типовий вигляд Li-ion акумуляторів

Вартість Li-ion акумуляторів за останнє десятиліття суттєво знизилася: якщо у 2012 році середня ціна становила близько 700 USD/кВт·год, то станом на 2024 рік вона коливається у межах від 120 до 160 USD/кВт·год для масового виробництва, а для високощільних моделей – до 200 USD/кВт·год. Такий прогрес став можливим завдяки масштабному виробництву, удосконаленню технологій та розширенню ланцюгів постачання, зокрема в Китаї, Південній Кореї та Європі. Проте виробництво пов'язане з використанням рідкісних металів – літію, кобальту й нікелю, видобуток яких має значний екологічний

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вплив. За оцінками IEA, виробництво 1 кВт·год ємності Li-ion батареї супроводжується викидом близько 70 кг CO₂ [1]. Утилізація таких акумуляторів потребує складних технологічних процесів, однак сучасні методи дозволяють відновити до 85% матеріалів [6].

Розвиток Li-ion технологій нині зосереджений на підвищенні безпеки, енергетичної щільності та зниженні вартості. Дослідження у сфері твердотільних акумуляторів обіцяють збільшення щільності до 400 Вт·год/кг і подвоєння терміну служби, а також усунення ризику займання. Паралельно ведуться розробки з використанням літій-сірчаних і літій-металевих систем, здатних забезпечувати щільність понад 500 Вт·год/кг, хоча ці технології поки що перебувають на стадії прототипів. Важливим напрямом є заміна кобальту менш токсичними матеріалами для зменшення екологічного сліду [3].

Попри конкуренцію з боку альтернативних технологій (наприклад, натрієвих акумуляторів і суперконденсаторів), Li-ion батареї залишаються лідерами на ринку накопичення енергії завдяки універсальності, ефективності й гнучкості в застосуванні. Їхнє подальше вдосконалення матиме вирішальне значення для розвитку електротранспорту, децентралізованих енергосистем і стійкої інфраструктури.

1.2 Свинцево-кислотні акумулятори

Свинцево-кислотні акумулятори є найстарішим типом вторинних джерел електричної енергії, винайденим Гастоном Планте у 1859 році, і, незважаючи на вік технології, вони досі залишаються широко використовуваними завдяки своїй простоті, надійності та відносно низькій вартості [7]. Основні сфери їх застосування включають автомобільний транспорт, системи безперебійного живлення (UPS), телекомунікації, електроенергетичні мережі, а також відновлювану енергетику, де важливими є стабільність роботи й низькі експлуатаційні витрати. Конструктивно свинцево-кислотний акумулятор складається з свинцевих електродів (анод – свинець, катод – діоксид свинцю) та електроліту, що містить розчин сірчаної кислоти. Під час заряджання

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відбувається перетворення сульфату свинцю (PbSO_4) у вихідні речовини – свинець і діоксид свинцю, тоді як під час розряду процес іде у зворотному напрямку. Кожна осередок акумулятора забезпечує напругу близько 2 В, що дозволяє формувати батареї зі стандартними номіналами: 6 В, 12 В, 24 В і 48 В. Вигляд такого акумулятора в розрізі наведено на рисунку 1.3 [8].

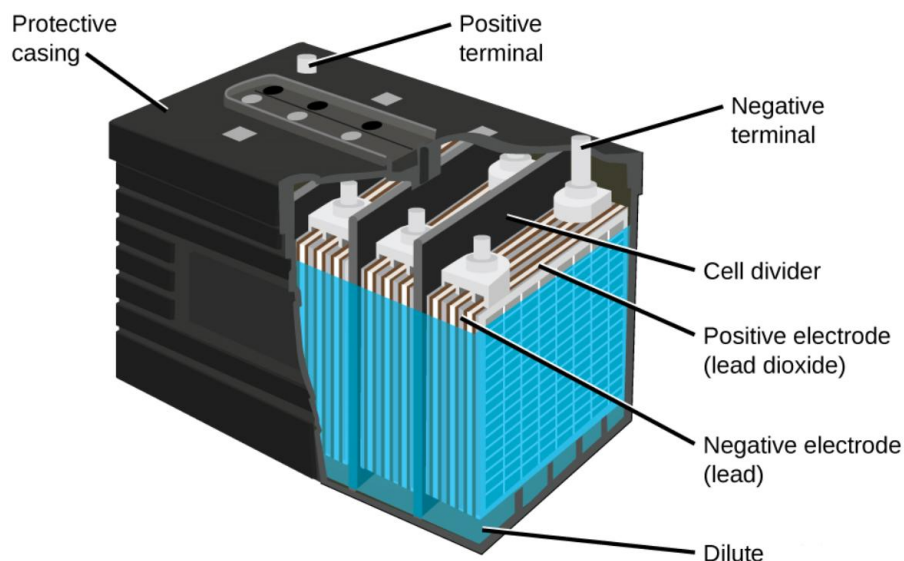


Рисунок 1.3 – Свинцево-кислотна батарея у розрізі

де Protective casing – Захисний корпус;

Positive terminal – Позитивний вивід (плюсова клемма);

Negative terminal – Негативний вивід (мінусова клемма);

Cell divider – Перегородка між елементами;

Positive electrode (lead dioxide) – Позитивний електрод (діоксид свинцю);

Negative electrode (lead) – Негативний електрод (свинець);

Dilute – Розбавлений електроліт (сірчана кислота з водою).

Енергетична щільність свинцево-кислотних акумуляторів знаходиться в діапазоні від 30 Вт·год/кг до 50 Вт·год/кг, що значно нижче порівняно з сучасними літій-іонними (від 150 Вт·год/кг до 250 Вт·год/кг) чи нікель-металогідридними (від 60 Вт·год/кг до 120 Вт·год/кг) аналогами. Питома потужність сягає від 100 Вт/кг до 200 Вт/кг, що достатньо для застосувань із помірними навантаженнями. Час заряджання, залежно від типу зарядного пристрою, триває від 6 годин до 14 годин при стандартному режимі та може

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути скорочений до приблизно 4 годин за умови використання швидких зарядних технологій. Коефіцієнт корисної дії свинцево-кислотних систем складає від 75% до 85%, однак при високих струмах розряду ефективність може знижуватися до 65%. Термін служби значною мірою залежить від режиму експлуатації: у циклічному режимі він становить від 300 циклів до 600 циклів глибокого розряду (80% DOD), тоді як у буферному (резервному) – може досягати від 8 років до 10 років за умови підтримки температурного режиму в межах від 20°C до 25°C. Варто зазначити, що підвищення температури експлуатації до 40°C може скоротити ресурс у два-три рази.

Типологія свинцево-кислотних акумуляторів включає відкриті (заливні) моделі, герметичні VRLA (Valve Regulated Lead Acid), а також їхні підвиди – AGM (Absorbent Glass Mat) та гелеві (Gel Cell) акумулятори. Відкриті акумулятори відрізняються простотою конструкції та низькою вартістю (від 80 USD/кВт·год до 120 USD/кВт·год), однак потребують регулярного обслуговування, доливання електроліту й контролю рівня заряду [7]. AGM-батареї, у яких електроліт абсорбований у скловолоконні сепаратори, забезпечують кращу стійкість до вібрацій і можуть експлуатуватися у різних положеннях без ризику витоку. Їхня енергетична щільність трохи вища – до 60 Вт·год/кг, а термін служби – до 800 циклів. Гелеві акумулятори використовують електроліт, загущений силіконовими добавками, що підвищує стабільність роботи при низьких температурах (до -30°C) та дозволяє досягати від 700 циклів до 900 циклів розряду [9].

Особливістю експлуатації свинцево-кислотних акумуляторів є їхня чутливість до глибокого розряду, що призводить до утворення кристалів сульфату свинцю, які погіршують провідність електродів і зменшують загальну ємність. Для уникнення цього ефекту рекомендується підтримувати рівень розряду на рівні не більше 50% для циклічного використання. Крім того, під час заряджання можливе виділення водню та кисню, що потребує належної вентиляції у разі використання відкритих моделей. З погляду температурних характеристик оптимальний діапазон становить від -20°C до +40°C, проте при

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низьких температурах ефективність акумулятора знижується до 60%, а при температурах вище +50°C зростає ризик деградації електродів [10].

Сфера застосування свинцево-кислотних акумуляторів охоплює широкий спектр галузей. У транспорті вони слугують для запуску двигунів внутрішнього згоряння та живлення бортових систем, типовий вигляд такого акумулятора показано на рисунку 1.4 [11];



Рисунок 1.4 – Типовий вигляд свинцево-кислотного акумулятора в автомобілі

у телекомунікаціях – як джерела резервного живлення для базових станцій; у системах аварійного електропостачання – для UPS (Uninterruptible Power Supply або джерело безперебійного живлення – це пристрій, що забезпечує резервне живлення електрообладнання у разі зникнення основного електропостачання) у дата-центрах, медичних закладах та промислових комплексах. У відновлюваній енергетиці, особливо у невеликих сонячних і вітрових установках, свинцево-кислотні батареї використовуються завдяки низькій вартості та простоті інтеграції у енергосистеми. Однак їхня низька енергетична щільність і тривалий час заряджання обмежують застосування у мобільних пристроях і сучасному електротранспорті.

Екологічні аспекти свинцево-кислотних акумуляторів викликають значну увагу через вміст свинцю й сірчаної кислоти, що становлять небезпеку для довкілля та здоров'я людини. Водночас ця технологія має один із найвищих

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показників утилізації: близько 95% матеріалів можна переробити й повторно використовувати, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку [12]. Однак у країнах із низьким рівнем контролю над відходами нерідко спостерігаються випадки несанкціонованого захоронення чи спалення відпрацьованих батарей, що призводить до забруднення ґрунтів і водних ресурсів.

Перспективи розвитку свинцево-кислотної технології зосереджені на підвищенні енергетичної щільності (від 60 Вт·год/кг до 70 Вт·год/кг) за допомогою вдосконалення активних матеріалів електродів і впровадження наноструктурованих добавок. Дослідження також спрямовані на зменшення часу заряджання до 2 годин і підвищення циклічної стабільності. Сучасні експерименти із застосуванням вуглецевих покриттів анодів демонструють можливість збільшення терміну служби до 1000 циклів без значної деградації ємності. Попри це, глобальні тенденції у сфері накопичувачів енергії свідчать про поступове витіснення свинцево-кислотних систем більш ефективними технологіями, зокрема літій-залізо-фосфатними (LiFePO₄) та натрієвими акумуляторами, що пропонують кращі енергетичні показники та менший екологічний слід.

Загалом, свинцево-кислотні акумулятори залишаються актуальними для сфер, де важливими є низька вартість, надійність і стабільність у тривалому буферному режимі. Їхнє використання у комерційному та промисловому секторі продовжує залишатися економічно доцільним, особливо у системах, де не потрібна висока щільність енергії, але необхідна довготривала робота за доступною ціною.

1.3 Нікель-металогідридні акумулятори

Нікель-металогідридні (NiMH) акумулятори є одним із найпоширеніших типів накопичувачів енергії низької напруги, які широко застосовуються у побутовій електроніці, гібридних автомобілях, медичному обладнанні та системах аварійного живлення [13]. З'явившись на початку 1990-х років як

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вдосконалена альтернатива нікель-кадмієвим (NiCd) батареям, NiMH акумулятори стали популярними завдяки кращим екологічним показникам, вищій енергетичній щільності й відсутності токсичного кадмію у складі. Їхня конструкція базується на використанні нікель-оксид-гидроксидного катода (NiOOH), металогідридного анода та водного електроліту на основі гідроксиду калію (KOH). Принцип роботи полягає у зворотних хімічних реакціях: під час заряджання водень абсорбується в анод, тоді як під час розряду він окиснюється, вивільняючи електрони для живлення зовнішнього кола [14]. Номінальна напруга одного осередку становить 1,2 В, що дозволяє створювати акумуляторні збірки на 6 В, 12 В, 24 В та інші стандартні значення. Розріз типового NiMH акумулятора показано на рисунку.

Сучасні NiMH батареї демонструють енергетичну щільність у діапазоні від 60 Вт·год/кг до 120 Вт·год/кг, що приблизно на 35% вище за NiCd, але поступається літій-іонним (Li-ion) аналогам, показники яких досягають від 150 Вт·год/кг до 250 Вт·год/кг [14]. Потужність на виході може сягати від 150 Вт/кг до 300 Вт/кг, що робить NiMH акумулятори придатними для пристроїв із середніми навантаженнями. Їхній термін служби коливається від 500 циклів до 1000 циклів глибокого розряду (80%), а при часткових розрядах (до 30%) може перевищувати 1200 циклів. Час заряджання залежить від режиму – при використанні стандартних зарядних пристроїв становить від 3 годин до 5 годин, тоді як із застосуванням прискорених технологій може скорочуватися приблизно до 1 години без значної деградації елементів. Однією з ключових переваг є широка зона експлуатаційних температур: від -20°C до +50°C при мінімальній втраті ємності. Проте за температур нижче -10°C спостерігається зниження ефективності до 70% від номінальної ємності [15].

Характерним недоліком NiMH акумуляторів є високий рівень саморозряду – від 15% до 25% на місяць при кімнатній температурі, хоча у сучасних моделях із низьким саморозрядом (LSD) цей показник знижено до 10%. Також вони чутливі до перезаряду, що може призвести до перегріву й скорочення терміну служби, тому більшість сучасних пристроїв оснащуються

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схемами захисту. Вартість виробництва NiMH акумуляторів становить у середньому від 150 USD/кВт·год до 180 USD/кВт·год, що робить їх доступнішими порівняно з літій-іонними системами, ціна яких сягає 200 USD/кВт·год.

Сфера застосування цих акумуляторів є доволі широкою: у побутовій електроніці вони використовуються для живлення пультів дистанційного керування, іграшок, фотоапаратів, бездротових телефонів та інших портативних пристроїв, вигляд таких акумуляторів показано на рисунку 1.5 [16].



Рисунок 1.5 – Типовий вигляд NiMH батареї

У транспорті NiMH-батареї набули особливого поширення у гібридних автомобілях, наприклад, Toyota Prius попередніх поколінь, де вони забезпечують високий вихідний струм до 200 А та ефективну роботу систем рекуперації енергії гальмування. Перевагою у таких застосуваннях є стійкість до глибоких циклів розряду і можливість швидкого відновлення заряду. Також NiMH використовуються у медичних пристроях, зокрема дефібриляторах і мобільних системах моніторингу, де критичною є надійність і безпечність [13].

Екологічні переваги нікель-металогідридних батарей полягають у відсутності токсичних важких металів, таких як кадмій, що знижує негативний вплив на довкілля [16]. Близько 80% матеріалів NiMH акумуляторів можуть бути утилізовані та використані повторно. Проте процес переробки вимагає спеціалізованих технологій для вилучення нікелю й рідкоземельних металів зі сплавів анода. Водночас велика кількість енергії, необхідна для виробництва й утилізації, підвищує вуглецевий слід порівняно з новими акумуляторними

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологіями.

Розвиток NiMH технологій нині орієнтований на вдосконалення матеріалів електродів, наприклад, впровадження вуглецевих добавок, що збільшують енергетичну щільність до 140 Вт·год/кг і знижують саморозряд до 10%. Дослідження також показують можливість підвищення кількості циклів до 1500 без значної деградації при використанні нових сплавів на основі лантану й церію [17]. Гібридні системи, де NiMH акумулятори працюють спільно з суперконденсаторами або літій-іонними елементами, демонструють приріст загальної ефективності від 10% до 15%, що особливо актуально для транспортної галузі та мобільних джерел живлення. Проте на глобальному ринку спостерігається поступове витіснення NiMH батарей літій-іонними аналогами через їх вищу питому енергію, меншу вагу й кращу довговічність.

Попри конкуренцію, NiMH акумулятори залишаються популярними в умовах, де важливими є екологічність, стабільність при температурних коливаннях та відносна дешевизна. Їхній потенціал до модернізації, особливо у сфері альтернативної енергетики й транспорту, зберігає актуальність для низки галузей, що потребують ефективних і безпечних джерел енергії.

1.4 Суперконденсатори

Суперконденсатори, або ультраконденсатори, є високоефективними накопичувачами енергії низької напруги, які поєднують властивості традиційних конденсаторів і акумуляторів [18]. Їхня робота ґрунтується на принципі електростатичного зберігання заряду через подвійну електричну шарову ємність, що утворюється на межі електрода й електроліту, розріз суперконденсатора наведено на рисунку 1.6 [19]. Основними матеріалами для електродів є активоване вугілля, графен або карбонові нанотрубки, що забезпечують велику площу поверхні (до 2000 м²/г) та високу питома-ємнісну характеристику [20]. Середня напруга однієї комірки суперконденсатора становить близько 2,7 В, а для отримання вищих значень напруги використовують послідовне з'єднання декількох осередків [21].

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Енергетична щільність сучасних суперконденсаторів досягає приблизно 15 Вт·год/кг, що значно нижче порівняно з літій-іонними батареями (від 150 Вт·год/кг до 250 Вт·год/кг), проте їхня потужність перевищує 10 кВт/кг, що робить їх придатними для застосувань із високими миттєвими навантаженнями. Коефіцієнт корисної дії досягає від 95% до 98%, а час заряджання – від кількох секунд до 2 хвилин залежно від ємності та струму. Суперконденсатори мають виняткову довговічність – понад 500000 циклів заряд-розряд без суттєвої втрати ємності, що значно перевищує ресурс будь-яких акумуляторних систем. Робочий температурний діапазон варіюється від -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$, при цьому ефективність пристроїв зберігається на рівні понад 85% навіть за низьких температур [18; 22].

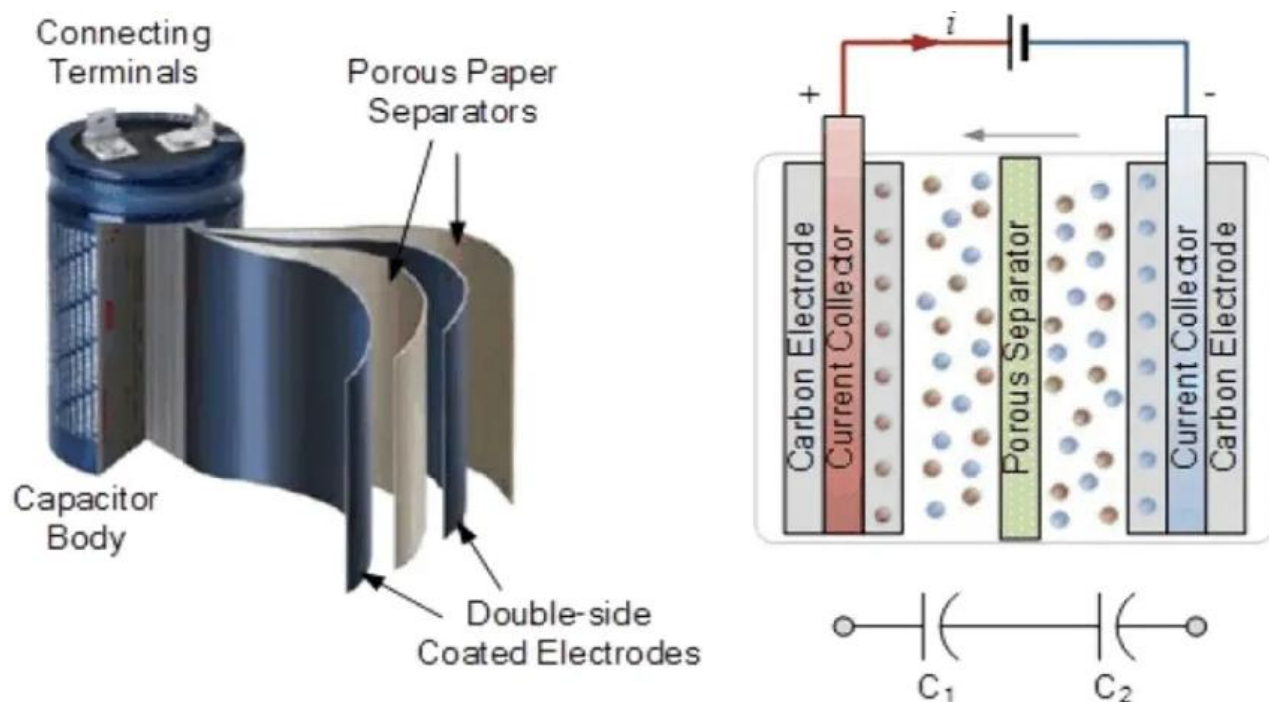


Рисунок 1.6 – Суперконденсатор в розрізі

де Connecting Terminals – З'єднувальні клеми;

Capacitor Body – Корпус конденсатора;

Porous Paper Separators – Пористі паперові сепаратори;

Double-side Coated Electrodes – Двосторонньо покриті електроди;

Carbon Electrode – Вуглецевий електрод;

Current Collector – Струмознімальний колектор;

Porous Separator – Пористий сепаратор.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Ключовими перевагами суперконденсаторів є їхня здатність до надшвидкого заряджання, висока потужність виходу, відсутність деградації при частих циклах та низький рівень технічного обслуговування. Вартість коливається в межах від 300 USD/кВт·год до 500 USD/кВт·год [18], що, попри дорожнечу порівняно з традиційними батареями, компенсується тривалістю експлуатації та мінімальними експлуатаційними витратами. Недоліками залишаються невисока енергетична щільність, необхідність складних балансувальних схем при серійному з'єднанні комірок та поступова втрата заряду під час тривалого простою.

Застосування суперконденсаторів охоплює транспортні системи (зокрема гібридні автобуси й трамваї), де вони використовуються для рекуперації енергії гальмування [20], забезпечуючи приріст енергоефективності до 30%, один із варіантів вигляду суперконденсатора наведено на рисунку 1.7 [23].



Рисунок 1.7 – Типовий вигляд зовні суперконденсатора

У споживчій електроніці вони встановлюються в портативних пристроях як джерела резервного живлення та в бездротових сенсорах, що потребують миттєвого старту. У відновлюваній енергетиці суперконденсатори виконують роль буферних накопичувачів у фотоелектричних і вітрових установках для згладжування коливань потужності. Наприклад, у сонячних станціях ємністю до 50 кВт·год їх використання дозволяє зменшити перепади напруги майже на 40% [20].

Перспективи розвитку зосереджені на впровадженні наноматеріалів та покращенні електродів на основі графенових структур, що можуть підвищити енергетичну щільність до 30 Вт·год/кг [21]. Дослідження також спрямовані на інтеграцію суперконденсаторів із літій-іонними батареями у гібридні системи, де перші забезпечують пікові навантаження, а другі – тривале зберігання енергії. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства, обсяг ринку суперконденсаторів може зрости до 7,5 млрд USD до 2030 року зі щорічним приростом близько 15% [24].

Екологічна безпека є однією з переваг цієї технології: використання нетоксичних електролітів та відсутність важких металів у складі сприяють зменшенню шкідливого впливу на довкілля. Крім того, понад 90% матеріалів суперконденсаторів підлягають вторинній переробці, що відповідає вимогам сталого розвитку [18].

1.5 Порівняння характеристик різних типів накопичувачів

Порівняння характеристик різних типів накопичувачів енергії низької напруги є завершальним етапом огляду сучасних технологій у цій сфері. Основними типами, які розглядаються, є літій-іонні (Li-ion), нікель-металогідридні (NiMH), свинцево-кислотні (Pb-acid) акумулятори та суперконденсатори [1; 4; 7; 18]. Кожен із цих типів має свої унікальні переваги та обмеження, що визначають їхню доцільність у певних сферах застосування. Аналіз їхніх характеристик базується на даних із сучасних наукових статей, технічних звітів та аналітичних досліджень за період 2020–2024 років.

Li-ion акумулятори демонструють найвищу енергетичну щільність серед досліджуваних варіантів – від 150 Вт·год/кг до 260 Вт·год/кг, що робить їх ідеальними для мобільної електроніки та електротранспорту [1; 3; 4]. Їхня питома потужність досягає від 600 Вт/кг до 1200 Вт/кг, час заряджання варіюється від 30 хвилин до 3 годин, а ефективність становить приблизно 96%. Термін служби складає від 1500 циклів до 3000 циклів при 80% глибині розряду (DOD), залежно від хімічного складу (NMC, LFP, NCA). NiMH акумулятори

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мають нижчу енергетичну щільність – від 60 Вт·год/кг до 120 Вт·год/кг, питому потужність від 200 Вт/кг до 400 Вт/кг, час заряджання від 2 годин до 5 годин та ефективність на рівні 75% [14; 15]. Їхній термін служби зазвичай становить від 500 циклів до 1000 циклів. Свинцево-кислотні батареї характеризуються енергетичною щільністю від 30 Вт·год/кг до 50 Вт·год/кг і питомою потужністю від 100 Вт/кг до 200 Вт/кг. Вони мають найдовший час заряджання (від 6 годин до 12 годин) та нижчу ефективність (від 70% до 85%) [7; 10]. Середній термін служби складає від 300 циклів до 600 циклів. Суперконденсатори вирізняються найнижчою енергетичною щільністю – приблизно 15 Вт·год/кг, але володіють надзвичайно високою питомою потужністю – до 10000 Вт/кг, здатністю миттєвого заряджання (менше 2 хвилин) та ресурсом понад 500000 циклів[18; 21; 22].

Узагальнені дані характеристик вище зазначених акумуляторів наведено в таблиці 1.1 [1; 3; 7; 14; 18].

Таблиця 1.1 – Порівняння основних характеристик досліджуваних накопичувачів енергії

Характеристика	Li-ion	NiMH	Pb-acid	Суперконденсатори
Енергетична щільність	150–260 Вт·год/кг	60–120 Вт·год/кг	30–50 Вт·год/кг	5–15 Вт·год/кг
Питома потужність	600–1200 Вт/кг	200–400 Вт/кг	100–200 Вт/кг	До 10 000 Вт/кг
Час заряджання	0,5–3 год	2–5 год	6–12 год	<2 хвилин
Ефективність	90–96%	65–75%	70–85%	95–98%
Термін служби (цикли)	1500–3000	500–1000	300–600	>500 000
Вартість (USD/кВт·год)	120–200	150–180	80–120	300–500
Робочий діапазон температур	-20°C до +60°C	-20°C до +50°C	-20°C до +40°C	-40°C до +70°C
Рівень переробки	≈ 75%	>80%	≈ 95%	>90%

Примітка. Таблиця складена на основі даних із зазначених джерел, а також аналітичних висновків на основі відкритої наукової інформації. Деякі значення отримані шляхом усереднення або екстраполяції даних із доступних публікацій у сфері енергетичних систем.

Аналіз таблиці 1.1 свідчить, що Li-ion акумулятори є найбільш універсальним варіантом із високою енергоємністю та тривалим терміном служби, що робить їх придатними для портативної електроніки,

електротранспорту та систем резервного живлення. NiMH батареї, хоча й поступаються за енергетичною щільністю, демонструють кращу екологічність і підходять для побутових пристроїв і гібридних авто. Свинцево-кислотні акумулятори залишаються популярними завдяки низькій вартості й високому рівню переробки, що забезпечує їх застосування у стаціонарних системах живлення та транспорті. Суперконденсатори ж, попри низьку енергетичну щільність, вирізняються рекордною кількістю циклів і миттєвим заряджанням, що робить їх незамінними для короточасних пікових навантажень, рекуперації енергії та аварійного живлення [18; 21; 22].

Таким чином, вибір оптимального накопичувача залежить від конкретних експлуатаційних вимог: для мобільних пристроїв найкращими є Li-ion, для економічних систем – Pb-acid, для циклічних навантажень – NiMH, а для високих пікових навантажень – суперконденсатори.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ВИБОРУ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Методика вибору накопичувачів енергії базується на аналізі їхніх основних характеристик, експлуатаційних властивостей і вартості. Важливо правильно підібрати тип акумулятора залежно від умов використання, необхідної ємності, ефективності, потужності та довговічності. Розрахунки дозволяють оцінити кількість необхідних накопичувачів, їхню продуктивність у різних температурних умовах та потенційний термін служби. У цьому розділі розглянуто принципи вибору акумуляторів та їхню взаємодію з навколишнім середовищем.

Вибір оптимального типу накопичувача енергії є ключовим завданням при розробці систем низьковольтного живлення. Врахування технічних параметрів, впливу зовнішніх факторів та довговічності дозволяє забезпечити ефективність роботи системи при мінімальних витратах. У цьому розділі розглянуто основні критерії вибору акумуляторів, вплив температури на їхню роботу, а також оцінку надійності та безпеки накопичувачів із розрахунками для реальних зразків.

2.1 Критерії вибору

При виборі накопичувача енергії для систем низької напруги важливо враховувати кілька ключових параметрів: ємність, ефективність, термін служби, потужність та вартість. Для кращого розуміння особливостей різних типів накопичувачів проведемо детальний аналіз, зробимо необхідні розрахунки та визначимо оптимальний варіант залежно від конкретних умов експлуатації.

Для узагальненого прикладу оберемо наступні параметри для розрахунку та вибору акумуляторів: для порівняння накопичувачів між собою – стандартне навантаження потужністю 0.01 кВт та необхідний запас енергії на 10 годин роботи. Таким чином, нам потрібен акумуляторний блок, здатний забезпечити 100 Вт·год енергії.

Необхідну ємність для кожного типу накопичувача можна знайти за

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формулою:

$$C = P \frac{t}{U}, \quad (2.1)$$

де C – необхідна ємність, А·год;

P – потужність навантаження, Вт;

t – час роботи, год;

U – напруга акумулятора, В.

Отже, перейдемо до обрахунків. Моделі розглянутих нижче акумуляторів обрані за найбільшою розповсюдженістю та доступністю. Крім цього, зрозуміло, що неможливо максимально точно порівнювати різні типи накопичувачів, бо вони всі мають різні параметри. Узагальнене порівняння на даному етапі задовольняється різницею вхідних даних різних типів накопичувачів, тобто різницею номінальних даних можна знехтувати, поставивши однакову задачу й привівши один параметр до спільного, в даному випадку мінімальне забезпечення енергії в 100 Вт·год. Серед літій-іонних акумуляторів оберемо наступну модель – Panasonic NCR18650B. Вона широко використовується в системах накопичення енергії.

Характеристики Panasonic NCR18650B: ємність 3.4 А·год, номінальна напруга 3.6 В, ККД 95%, енергія однієї батареї 12.24 Вт·год термін служби 1000 циклів, вартість 4 \$/шт [25].

Необхідну кількість батарей можна знайти з наступного виразу:

$$N = \frac{E_{\text{порівняльна}}}{E_{\text{Li-Ion}}}, \quad (2.2)$$

де N – кількість батарей;

$E_{\text{порівняльна}}$ – задана потужність 100, Вт·год;

$E_{\text{Li-Ion}}$ – потужність однієї батареї, Вт·год.

Підставивши значення в формулу (2.2) отримаємо наступне значення необхідної кількості батарей:

$$N = \frac{100}{12.24} = 8.18 \approx 9$$

Свинцево-кислотні акумулятори мають нижчу ефективність, але їхня вартість значно менша. Оберемо популярний глибокорозрядний акумулятор

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Yuasa NP7-12.

Характеристики Yuasa NP7-12: ємність 7 А·год, номінальна напруга 12 В, ККД 80%, термін служби 400 циклів, вартість 25\$/шт, енергія однієї батареї 84 Вт·год [26].

Необхідна кількість батарей, з формули (2.2):

$$N = \frac{100}{84} = 1.19 \approx 2$$

Округлення в більшу сторону зумовлене завданням забезпечити необхідну кількість енергії, а саме – 100 Вт·год.

Нікель-металогідридні акумулятори рідше використовуються у великих накопичувальних системах, однак вони знаходять застосування в електроінструментах, медичному обладнанні, радіокерованих моделях та деяких промислових пристроях завдяки своїй надійності та стабільності. Візьмемо акумулятор Panasonic BK300SCE.

Характеристики Panasonic BK300SCE: ємність 3 А·год, номінальна напруга 1.2 В, ККД 75%, термін служби 500 циклів, вартість 3 \$/шт, енергія однієї батареї 3.6 Вт·год [27].

Необхідна кількість модулів, за формулою (2.2):

$$N = \frac{100}{3.6} = 27.8 \approx 28$$

Як і в випадках вище, округлення в більшу сторону необхідне.

Суперконденсатори забезпечують надзвичайно швидкі цикли зарядки/розрядки та високу ефективність, але мають значно меншу енергетичну щільність. Візьмемо модель Maxwell BCAP3000 P270 K04.

Характеристики Maxwell BCAP3000 P270 K04: номінальна напруга 2.7 В, ємність 3000 Фарад, ККД 98%, термін служби більш ніж 1 000 000 циклів, вартість 76.54\$/шт [28].

Енергія одного суперконденсатора обчислюється за формулою:

$$E = \frac{1}{2} C U^2, \text{ Дж}, \quad (2.3)$$

Підставивши значення в формулу (2.3) з урахуванням переводу з Дж в Вт·год отримаємо:

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E = \frac{1}{2 \cdot 3600} 3000 \cdot 2.7^2 = 3.04 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

Необхідна кількість суперконденсаторів, з формули (2.2):

$$N = \frac{100}{3.04} 32.9 \approx 33$$

Перейдемо до розрахунку витрат. Треба зазначити, що обрахунок відповідатиме не заданій умові в 100 Вт·год, а реальній ціні, котра зумовлена кількістю використаних батарей різного типу:

$$M_n = N \cdot \text{Ціна}_{1-\text{батареї}}, \$, \quad (2.4)$$

Варто зазначити, що ціни на акумулятори варіюються та постійно змінюються, тому варто враховувати, що наведений розрахунок актуальний на 2025 рік в Україні.

Розрахункові ціни за формулою (2.4) на наступні акумулятори складають: Panasonic NCR18650B – $4\$ \cdot 9 = 36\$$; Yuasa NP7-12 – $25\$ \cdot 2 = 50\$$; Panasonic BK300SCE – $3\$ \cdot 28 = 84\$$; Maxwell BCAP3000 P270 K04 – $76.54 \$ \cdot 33 = 2525.82\$$.

Результати розрахунків показують, що найбільш економічно доцільним варіантом для накопичення 100 Вт·год є літій-іонні акумулятори Panasonic NCR18650B. Вони мають високий ККД (95%), прийнятний термін служби (1000 циклів) та відносно низьку загальну вартість батарейного блоку (36\$ за 9 елементів). Ці акумулятори також мають компактний розмір і малу вагу, що є їхньою додатковою перевагою [29].

Свинцево-кислотні акумулятори Yuasa NP7-12 є найдешевшими з точки зору вартості одного елемента, проте вони мають суттєво нижчий ККД (80%) та значно менший термін служби (400 циклів). Загальна вартість блоку (50\$ за 2 акумулятори) все ще залишається конкурентоспроможною, але великі габарити та вага можуть створювати додаткові обмеження.

Нікель-металогідридні акумулятори Panasonic BK300SCE вимагають значної кількості елементів (28 штук) для досягнення 100 Вт·год, що робить їх менш привабливими через високу загальну вартість (84\$). Попри їхню стабільність і довговічність, використання такого типу акумуляторів у великих системах є нерациональним.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Суперконденсатори Maxwell BCAP3000 P270 K04 демонструють чудові експлуатаційні характеристики, включаючи високу швидкість зарядки та тривалий термін служби (понад 1 000 000 циклів). Однак їхня низька енергетична щільність означає, що для накопичення 100 Вт·год потрібно 33 одиниці, що призводить до надзвичайно високої вартості (2525.82\$). Таким чином, застосування суперконденсаторів у цій ситуації є фінансово невигідним.

Отже, для накопичення 100 Вт·год найбільш збалансованим варіантом є літій - іонні акумулятори, які поєднують ефективність, доступну ціну та відносно великий термін служби. Свинцево-кислотні акумулятори можуть бути хорошим бюджетним рішенням, але поступаються за ефективністю. Нікель-металогідридні акумулятори менш практичні через велику кількість необхідних елементів. Суперконденсатори мають сенс лише там, де потрібна надшвидка зарядка/розрядка, але не для класичних систем накопичення енергії.

2.2 Вплив температури та перенавантаження на роботу акумуляторів

Літій-іонний акумулятор Panasonic NCR18650B. Їмність Li-ion батареї помітно знижується при низьких температурах, але залишається на прийнятному рівні до певного порогу. Для комірки NCR18650B (3400 мА·год) виробник допускає розряд до -20 °C [30]. За даними тестів, при 0 °C цей акумулятор зберігає приблизно 90% ємності (близько 2950 мА·год), при -10 °C – приблизно 85% (2800 мА·год), а при -20 °C – приблизно 67% (майже 2190 мА·год) від ємності при +25 °C. Вища температура навпаки дещо підвищує віддачу ємності: наприклад, при +40 °C можна отримати близько 105% номінальної ємності (за рахунок зниження внутрішнього опору). Однак перегрів понад +60 °C може негативно впливати на акумулятор, тому +60 °C є верхньою межею робочого діапазону (далі можливе пошкодження або спрацювання вентилля) [30]. На рисунку 2.1 показано відносну ємність NCR18650B від -30 °C до +70 °C на основі цих даних (100% – при +25 °C).

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

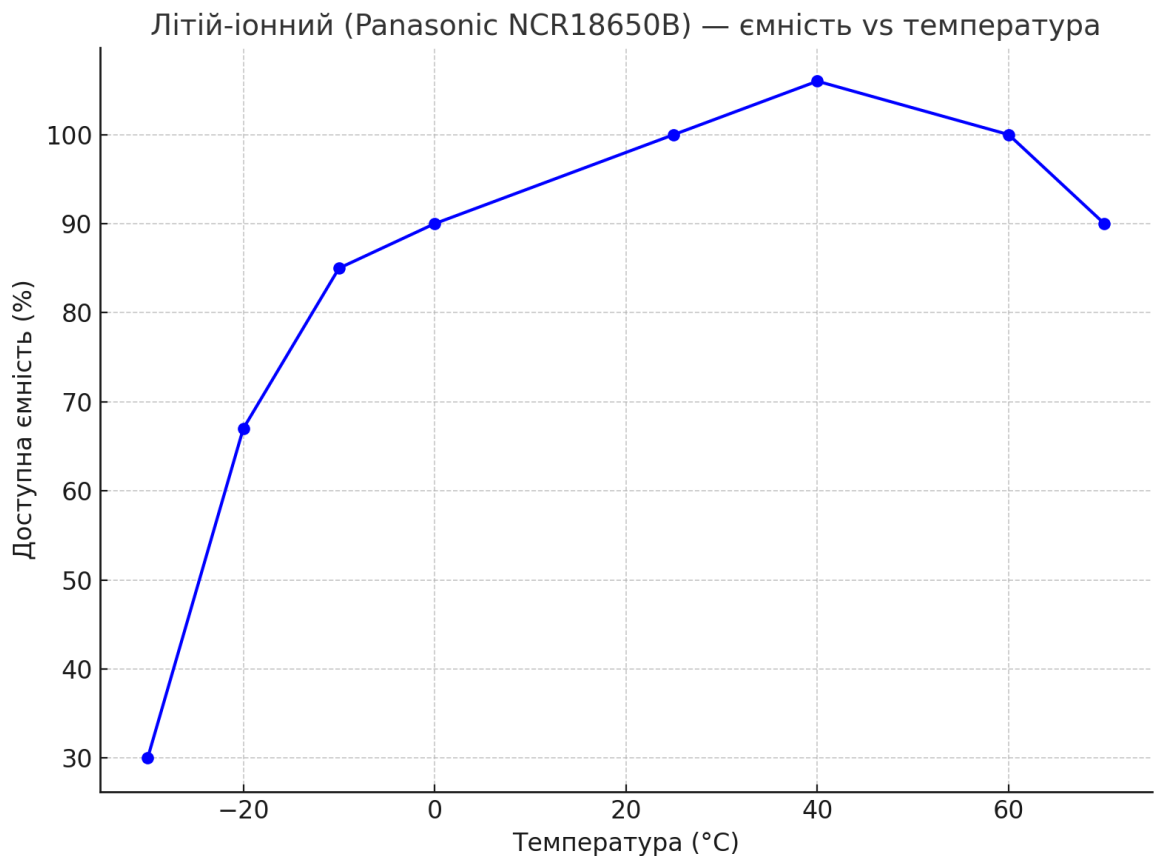


Рисунок 2.1 – Залежність ємності Li-ion NCR18650B від температури
(розряд при 3.3 А)

Свинцево-кислотний акумулятор Yuasa NP7-12. Свинцеві AGM-акумулятори також втрачають ємність при зниженні температури: при 0 °C доступно приблизно 80% ємності, а при -20 °C – приблизно від 50% до 60% [31; 32]. Типово на кожен градус нижче +25 °C ємність зменшується на приблизно від 0,8% до 1% [33]. Наприклад, стандарт IEEE 485 наводить корекційні коефіцієнти: при +4 °C потрібно збільшити ємність батареї на 30%, щоб компенсувати холод (тобто лише приблизно 77% ємності доступно), а при +15 °C – на 11% (приблизно 90% ємності). При підвищених температурах свинець проявляє зворотний ефект – ємність трохи зростає: при +40 °C може становити приблизно 105% від номіналу, але водночас прискорюється старіння пластин. На +50 °C ємність може бути на від 10% до 15% вищою за номінальну, однак ресурс при цьому різко скорочується [31; 33]. Рисунок 2.2 для NP7-12 ілюструє цю залежність.

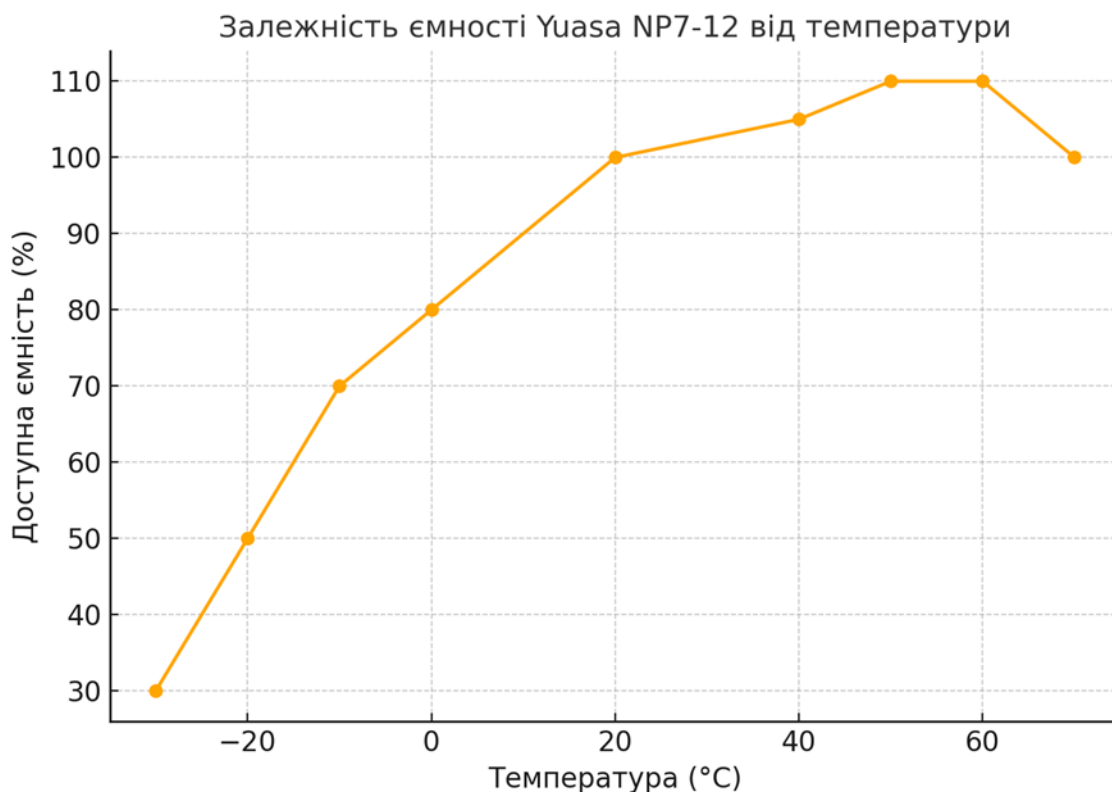


Рисунок 2.2 – Температурна характеристика ємності свинцево-кислотної батареї Yuasa NP7-12

Нікель-металогідридний акумулятор Panasonic BK300SCE. NiMH-батареї особливо чутливі до холоду. Вони втрачають значну частину ємності при низьких температурах: реальні тести показують, що при 0 °C NiMH може віддати приблизно 80% ємності, а при -20 °C – лише близько 20% [34]. Це узгоджується з досвідом використання NiMH Energizer: «приблизно 80% ємності при 0 °C та приблизно 20% при -20 °C». Причина – зростання внутрішнього опору і уповільнення хімічних реакцій в холодному електроліті. На рисунку 2.3 видно, що NiMH BK300SCE практично втрачає працездатність нижче -20 °C. Натомість підвищення температури до 40 °C може трохи збільшити віддачу (до приблизно 105% на +40 °C) за рахунок поліпшення кінетики, але надлишкове тепло призводить до підвищення тиску газів та ризику витікання електроліту. При >+60 °C NiMH-елементи можуть перегріватися і втрачати ємність через прискорений саморозряд та вентиляцію [34].

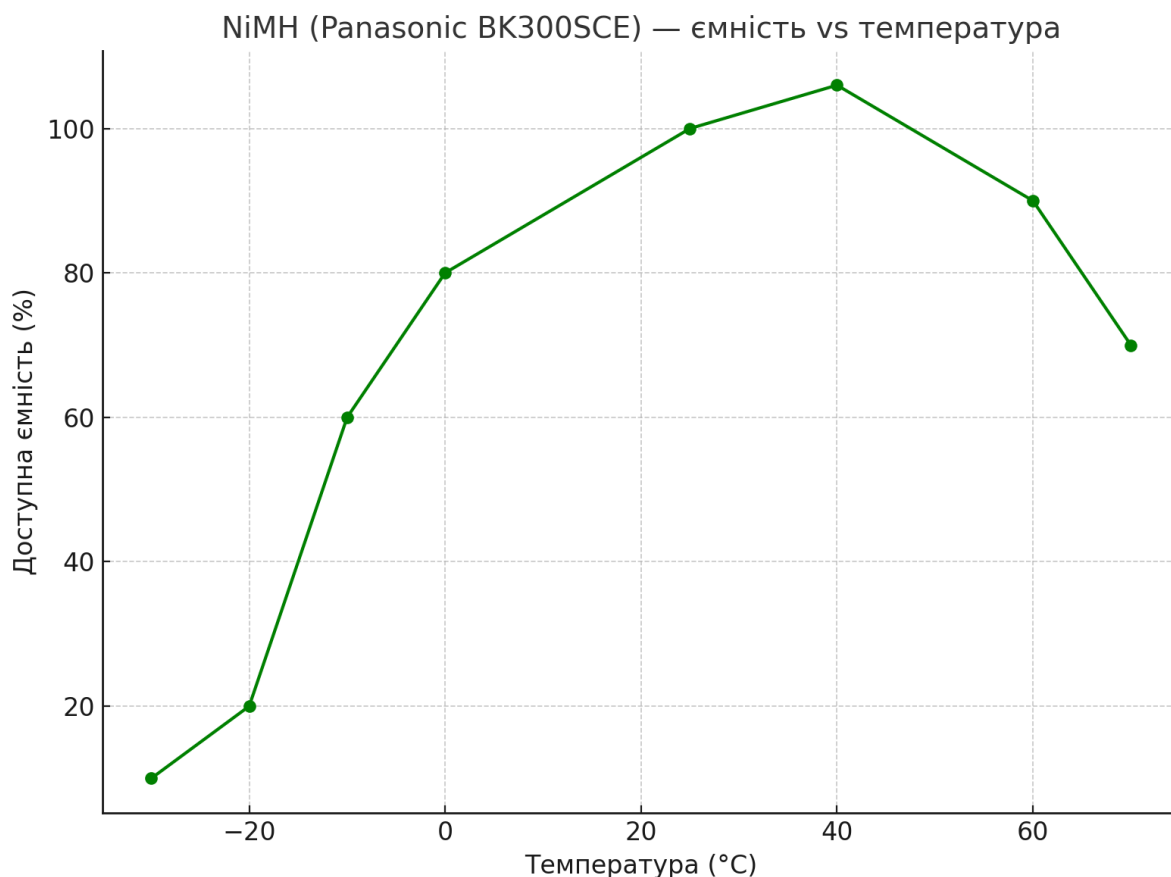


Рисунок 2.3 – Ємність NiMH Panasonic BK300SCE (Sub-C 3000 мА·год)
при різних температурах

Суперконденсатор Maxwell BCAP3000 P270. На відміну від акумуляторів, суперконденсатори мають майже незмінну ємність (фарадну) в широкому діапазоні температур. За даними досліджень, їхня ефективна ємність знижується лише на приблизно 2% між -20 °C та +60 °C [35]. Навіть при -40 °C ємність падає всього на приблизно 5% порівняно з -20 °C. На практиці це означає, що від -30 °C до +65 °C суперконденсатор зберігає приблизно від 95% до 100% номінальної ємності. На рисунку 2.4 показано, що крива є майже плоскою: при -30 °C ємність приблизно 97%, при 0°C до +60 °C – близько 100%, і лише при наближенні до +70 °C можлива невелика втрата (до приблизно 5%) через підвищення внутрішнього опору та випаровування електроліту. Важливо, що робочий діапазон для цієї моделі обмежений +65 °C, перевищення якого призводить до прискореного зносу [35; 36].

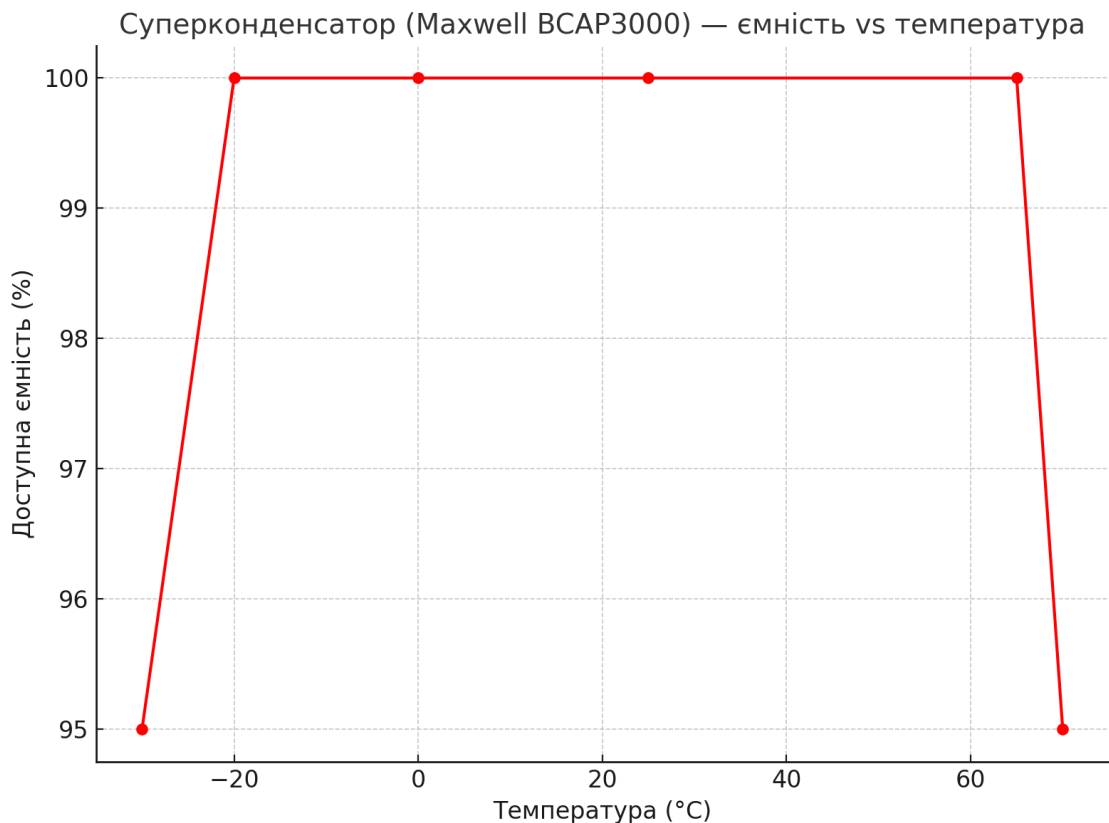


Рисунок 2.4 – Залежність ємності суперконденсатора Maxwell BCAP3000 (3000 Ф, 2.7 В) від температури

Для інженерних розрахунків часто застосовують спрощені моделі залежності ємності від температури. У стандартах (ІЕС, ІЕЕЕ, ДСТУ тощо) зазвичай наводяться поправкові коефіцієнти. Наприклад, стандарт ІЕЕЕ 485 рекомендує множники до ємності свинцевих батарей при зниженні температури: 1.04 при +21 °С, 1.11 при +15.6 °С, 1.30 при +4.4 °С тощо [33]. Це еквівалентно втраті приблизно 0.9% ємності на кожен °С нижче 25 °С.

У формі рівняння це можна записати як:

$$C(T) = C_{25}(1 - \alpha(25 - T)), \quad (2.5)$$

де $C(T)$ – фактична ємність акумулятора при температурі T , А·год або Ф (залежно від типу накопичувача);

C_{25} – номінальна ємність акумулятора при температурі +25 °С, А·год або Ф;

α – температурний коефіцієнт зменшення ємності (виражається в частках від 1 за кожен °С або у відсотках/°С);

T – фактична температура експлуатації, °С;

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25 – референсна температура, при якій задається номінальна ємність (стандартно +25 °C).

Для свинцево-кислотного акумулятора (при T менше 25°C а приблизно 0.009). Якщо температура становить $T = 0^\circ\text{C}$, то ємність для заданих 2 акумуляторів, кількість яких виходила з необхідної умови забезпечення 100 Вт·год в пункті 2.1 розраховується за формулою (2.5) так:

$$C(0) = C_{25}(1 - 0.009(25 - 0)) = C_{25}(1 - 0.225) = 0.775 C_{25}$$

Ємність становитиме приблизно 0.8 від номіналу.

Для інших хімії точна залежність не лінійна, але в обмеженому діапазоні її також інколи лінеаризують. Таке рішення не задовільняє наше завдання, бо розкид температур є великим і формула покаже неточні результати. Виробники літій-іонних осередків зазвичай надають графіки замість явних формул, проте можна оцінити, що для NCR18650B в інтервалі від +25°C до 0 °C втрати складають майже 0.4% на °C, а при сильнішому охолодженні зростають до приблизно 1.8% на °C (між -10°C і -20 °C) – такі коефіцієнти отримують інтерполяцією даних даташиту [30; 37]. У випадку NiMH акумуляторів існують емпіричні криві (рисунок 2.3); одна з оцінок – втрата приблизно 1% ємності на °C при переході від 20 °C до 0 °C, але подальше зниження до -20 °C призводить до диспропорційно великого падіння (приблизно 3% на °C або більше) [34]. Суперконденсатори, навпаки, мають дуже малий температурний коефіцієнт ємності – орієнтовно -0.025%/°C (незначне зменшення ємності при охолодженні нижче -20 °C) [35].

Можна зробити висновок, що зазначені формули слід застосовувати з обережністю, оскільки вони не враховують інші ефекти (наприклад, збільшення внутрішнього опору), які впливають на віддачу енергії при різних температурах. Тим не менш, такі коефіцієнти зручні для приблизних розрахунків і закладені в багато нормативних документів, але не є об'єктивними, як наприклад графіки.

Сучасні наукові дослідження підтверджують: високі температури прискорюють деградацію батарей, а низькі – погіршують їх ефективність і можуть спричиняти особливі види пошкоджень. Підвищення температури

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прискорює всі хімічні процеси в акумуляторі, тому прискорюється розклад електроліту та зношення електродів. Згідно з оглядом 2024 р., висока температура прискорює утворення побічних продуктів і руйнування матеріалів електродів, що призводить до швидкої втрати ємності та підвищення внутрішнього опору [38]. Наприклад, вже при температурі від +35 °C до 40 °C для свинцевих батарей ресурс знижується вдвічі проти номінального, а для літій-іонних елементів від 40°C до 50 °C спричиняє інтенсивний ріст SEI-плівки та газоутворення, які необоротно зменшують ємність [32; 39]. Низькі температури (нижче 0 °C) не спричиняють негайної хімічної деградації матеріалів, але значно знижують ефективність: через збільшення в'язкості електроліту та уповільнення дифузії Li⁺, акумулятор віддає менше енергії і має нижчу кулонівську ефективність. 2022 року повідомлено, що при температурі від -10 °C до -20 °C комерційні Li-іон елементи можуть втрачати більшу частину корисної ємності і навіть припиняти роботу при глибокому охолодженні. Це пов'язано з різким зростанням поляризації: при холоді знижується робоча напруга під навантаженням, що веде до значних енергетичних втрат. Окрім оборотного падіння ємності, низька температура викликає літієве плакування на аноді Li-іон при зарядженні, що призводить до прискореної деградації і ризику внутрішніх коротких замикань. Дослідження відзначають, що саме утворення дендритного літію при зарядці в мороз є одним з головних факторів скорочення строку служби батареї в холодному кліматі [39].

Суперконденсатори в наукових роботах 2020-х розглядаються як перспективні для екстремальних температур, оскільки не мають фазових переходів всередині. Як зазначалося, між -40 °C та +60 °C їх ємність змінюється менш ніж на 5%. Проте висока температура пришвидшує висихання електроліту і тим самим зменшує ресурс суперконденсатора. Тому хоча короткочасно суперконденсатор може працювати при +70 °C, довго тримати його при такій температурі небезпечно – за оцінками, підвищення робочої температури на кожні 10 °C понад норму приблизно вдвічі скорочує його строк служби (аналогічно до закону Арреніуса, що спостерігається і для батарей) [32].

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В цілому, дослідження 2020–2024 рр. підтверджують класичні знання: перегрів руйнує акумулятори хімічно, а переохолодження – функціонально. Сучасні літєві батареї вдосконалюються додаванням домішок і нових електролітів для покращення холодної роботи, але фундаментальні обмеження залишаються. Інженери активно впроваджують системи термоконтролю – підігрів при морозі та охолодження при спеці – щоб підтримувати батареї в оптимальному інтервалі приблизно від 15 °С до 35 °С, де вихідна ємність максимальна і деградація мінімальна [38; 39].

Підсумовуючи даний підпункт, літій-іонні (NCR18650B): при морозах зберігають більшу частину ємності (майже 67% на -20 °С) і здатні працювати до -30 °С, хоча з помітним падінням віддачі. У низьковольтних системах це означає, що Li-ion акумулятори придатні для використання взимку, але слід врахувати зниження ємності при розрахунку резерву. Заборонено заряджати Li-ion нижче 0 °С (ризик літєвого плакування та виходу з ладу). При перегріві понад +60 °С Li-ion швидко деградують і можуть виходити з ладу (спрацьовує вентиля або виникає термічний розгін), тому в експлуатації треба уникати нагріву понад +50 °С. В нормальному діапазоні (від 0 °С до +40 °С) літій-іонні акумулятори забезпечують високий ККД та ресурс.

Свинцево-кислотні (Yuasa NP7-12): за низької температури відчутно втрачають ємність – приблизно вдвічі менше ємності при -20 °С. Тому для роботи взимку потрібна більша батарея або утеплення батарейного відсіку. Водночас свинцеві акумулятори менш чутливі до заряду в холоді – їх можна підзаряджати малим струмом навіть при -20 °С без негайних пошкоджень. При перегріві понад +40 °С слід очікувати прискореного старіння: випаровування електроліту, корозія решіток і скорочення ресурсу приблизно вдвічі з кожними 8 °С – 10 °С понад норму. У системах 12 В свинцеві батареї бажано експлуатувати при від 15 °С до 25 °С; короткочасно вони працюють і при температурі від +50 °С до 60 °С, але потрібна вентиляція і контроль напруги заряду (термокомпенсація -3 мВ/°С на банку).

Нікель-металогідридні (Panasonic BK300SCE): не рекомендуються для

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

морозних умов – вже при 0 °С віддають приблизно 80% ємності, а в сильний мороз (-20 °С) можуть видати лише приблизно 20%. Для низьковольтних пристроїв це означає різке зменшення часу роботи на холоді. NiMH оптимально працюють при кімнатній температурі; їх слід зберігати зарядженими в теплому місці перед використанням на морозі, а батарейні відсіки – утеплювати. До перегріву NiMH більш стійкі, ніж літєві: вони можуть працювати при +50 °С, але при цьому йде прискорений саморозряд і можливе виділення газів (якщо є вентиляційні клапани). Температури >+60 °С можуть призвести до витоку електроліту та необоротної втрати ємності. Отже, NiMH доцільно застосовувати в діапазоні приблизно від 0 °С до +40 °С; при нижчих температурах краще обрати іншу хімію (наприклад, NiCd або літій-іонні).

Суперконденсатори (Maxwell BCAP3000): придатні для надширокого температурного діапазону. Вони майже не втрачають ємності ні в мороз, ні в спеку, тому ідеально підходять для систем низької напруги, що працюють на вулиці чи в транспорті при температурі від -30 °С до +60 °С. Важливо пам'ятати, що при сильному охолодженні збільшується внутрішній опір конденсатора – це може зменшити потужність віддачі, хоч ємність і залишається високою. При перегріві понад +65 °С суперконденсатори втрачають ресурс через висихання – бажано не перевищувати цю температуру тривало. В застосуваннях низької напруги (наприклад, буфер живлення від 12 В до 24 В) суперконденсатори можуть забезпечити надійну роботу там, де акумулятори втрачають ефективність (на сильному морозі), але потрібен контроль напруги і балансування комірок у разі послідовного з'єднання.

2.3 Оцінка надійності та безпеки

Надійність і безпека накопичувачів енергії є ключовими характеристиками, що визначають їхню придатність до застосування у системах низької напруги. Ці параметри визначають тривалість експлуатації, стабільність роботи та мінімізацію ризиків аварійних ситуацій. Оцінку надійності та безпеки слід виконувати з урахуванням конструктивних особливостей, хімічного

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складу, характеру деградації, систем захисту та відповідності вимогам нормативних документів, зокрема ДСТУ ІЕС 62133-2:2020, ДСТУ ІЕС 60896-21:2016 та ДСТУ EN 61056-1:2018. При цьому необхідно опиратися на дані, отримані в результаті розрахунків та порівнянь у пунктах 2.1 і 2.2.

Літій-іонні акумулятори на прикладі Panasonic NCR18650B, згідно з даними пунктів 2.1 та 2.2, демонструють високу питому енергію, ККД та широкий температурний діапазон роботи, однак є найбільш чутливими до порушень режимів експлуатації. Їх надійність залежить від роботи системи управління BMS, яка контролює зарядно-розрядні процеси, температуру та струми. При перевищенні температури понад +60 °C або струмів понад 6,8 А зростає ризик внутрішніх замикань, термічного розгону та деградації. При зберіганні важливо дотримуватися рівня заряду в межах від 30% до 50%.

Свинцево-кислотні акумулятори Yuasa NP7-12, як показано у пунктах 2.1 та 2.2, характеризуються надійністю та стабільністю роботи при дотриманні регламентованих режимів. Основними ризиками є глибокий розряд, що призводить до сульфатації пластин, та робота при підвищених температурах, що скорочує термін служби через корозію решіток і висихання електроліту. Використання VRLA-технологій знижує ризики витоків та підвищує безпечність. Згідно з ДСТУ, для подовження ресурсу рекомендовано дотримуватися глибини розряду не більше 50% та забезпечувати вентиляцію.

Нікель-металогідридні акумулятори Panasonic BK300SCE є досить стабільними та безпечними у використанні, але, як свідчать дані розділів 2.1 і 2.2, схильні до значного зниження ємності при низьких температурах. Основними ризиками є перезаряд та зберігання у розрядженому стані. При дотриманні вимог ДСТУ EN 61951-2:2018 та використанні інтелектуальних зарядних пристроїв із контролем температури та струму середній термін служби може сягати 1000 циклів.

Суперконденсатори Maxwell BCAP3000 P270 K04, відповідно до результатів у пунктах 2.1 та 2.2, є найбільш надійними завдяки відсутності складних хімічних процесів та мінімальній чутливості до температурних

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коливань. Основним фактором деградації є тривале перевищення робочої температури та високі напруги. Відповідно до ІЕС 62391-1, для довготривалої експлуатації важливо дотримуватися граничної робочої напруги, температури та використовувати балансувальні схеми.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що найбільшу безпечність і надійність демонструють свинцево-кислотні акумулятори та суперконденсатори завдяки своїй стабільності та стійкості до перевантажень. Літій-іонні акумулятори потребують суворого контролю експлуатації та дотримання температурних і струмових режимів, а нікель-металогідридні батареї є безпечними за умов правильного заряджання та уникнення глибоких розрядів.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

3.1 Накопичувачі в системах відновлюваної енергетики (ВДЕ)

Системи відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) – такі як сонячні фотоелектричні станції та вітрові турбіни – потребують накопичувачів енергії для балансування виробітку та споживання. Акумуляторні батареї низької напруги широко застосовуються для зберігання надлишкової енергії вдень і віддачі її вночі або при затишші вітру. Накопичувачі забезпечують автономність системи та підвищують надійність живлення споживачів. В цьому підрозділі проаналізовано чотири типові низьковольтні накопичувачі на прикладі їх моделей – літій-іонний елемент Panasonic NCR18650B, свинцево-кислотний акумулятор Yuasa NP7-12, нікель-метал-гідридний елемент Panasonic BK300SCE та суперконденсатор Maxwell BCAP3000 P270 – в контексті використання в системах ВДЕ. Для об’єктивного порівняння всі накопичувачі приведено до єдиного умовного обсягу зберігання енергії (~ 100 Вт·год) та номінальної напруги близько 12 В. На основі реальних характеристик виконано розрахунки кількості елементів у батареї, часу автономної роботи, струмів та ККД для кожного типу, з урахуванням глибини розряду (DOD) і температурного режиму.

Візьмемо вже відомі характеристики елементів з другого розділу. Літій-іонний акумулятор Panasonic NCR18650B має номінальну напругу 3,6 В і типову ємність 3350 мА·год (при 25 °C). Це відповідає приблизно 12 Вт·год енергії, що може віддати один елемент при повному розряді ($3,6 \text{ В} \times 3,35 \text{ А} \cdot \text{год}$). Маса одного елемента – близько 48 г, а енергетична щільність – ~ 243 Вт·год/кг, що є дуже високим показником [40]. Нікель-метал-гідридний (NiMH) елемент Panasonic BK300SCE має номінальну напругу $\sim 1,2$ В і ємність 3000 мА·год, тобто енергія одного такого акумулятора становить приблизно 3,6 Вт·год. Маса NiMH елемента – ~ 60 г, отже питома енергія ≈ 60 Вт·год/кг, що в рази менше, ніж у Li-ion [41]. Свинцево-кислотний акумулятор Yuasa NP7-12 – це

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

герметизований VRLA (моноблок з шістьох 2-вольтових свинцевих елементів), номінальна напруга блоку 12 В, ємність 7 А·год при 20-годинному режимі розряду. Таким чином, повний заряд акумулятора містить ~ 84 Вт·год енергії ($12 \text{ В} \times 7 \text{ А} \cdot \text{год}$). Маса батареї становить близько 2,2 кг – 2,65 кг, відповідно питома енергія свинцевого накопичувача низька – порядку 30–38 Вт·год/кг [26; 42]. Суперконденсатор Maxwell BCAP3000 P270 має номінальну напругу 2,7 В і надвисоку ємність 3000 Ф. Енергія, обчислена за формулою 2.3 в другому розділі $\approx 3,0 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Маса такого суперконденсатора $\sim 0,475 \text{ кг}$ (475 г), тож питома енергія становить лише $\sim 6 \text{ Вт} \cdot \text{год/кг} - 7 \text{ Вт} \cdot \text{год/кг}$ (близько 3 Вт·год на 0,475 кг) [43]. Отже, за енергоємністю один Li-ion елемент переважає NiMH в ~ 4 рази, свинцеву батарею – приблизно в 6 – 8 разів, а суперконденсатор – більш ніж у 30 разів. З іншого боку, суперконденсатори і свинцеві акумулятори можуть віддавати значно більші струми: внутрішній опір Yuasa NP7-12 $\sim 23 \text{ мОм} - 25 \text{ мОм}$, а Maxwell BCAP3000 – $\sim 0,15 \text{ мОм} - 0,29 \text{ мОм}$, що дозволяє імпульсний струм до 2300 А. Для порівняння, опір Li-ion осередку NCR18650B – близько 50 мОм (при 1 кГц), максимальний безпечний безперервний струм розряду $\sim 5 \text{ А} - 6,8 \text{ А}$, а NiMH елемент BK300SCE може безпечно віддавати струм порядку 3С (до $\sim 9 \text{ А}$) тривалий час і до $\sim 15\text{С}$ імпульсно [42; 43; 44].

Отже, перейдемо до розрахунку конфігурації батареї ($\sim 100 \text{ Вт} \cdot \text{год}$, 12 В). Для забезпечення $\sim 100 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ корисної ємності при напрузі $\sim 12 \text{ В}$ розрахуємо, скільки елементів кожного типу потрібно з'єднати. Приймемо глибину розряду DOD, допустиму для щоденного циклу, на рівні 80% для Li-ion, 100% для NiMH, 50% для свинцевого акумулятора (рекомендовано для продовження ресурсу) та 100% для суперконденсатора (циклічний ресурс практично не обмежений). Також врахуємо, що номінальна напруга 12 В можна отримати з різної кількості послідовно з'єднаних осередків: Li-ion – 3 шт. послідовно (3S) дають 11,1 В номінально (макс. 12,6 В), NiMH – 10 шт. ($10 \times 1,2 \text{ В} = 12 \text{ В}$), суперконденсаторів – 6 шт. ($6 \times 2,7 \text{ В} = 16,2 \text{ В}$ максимальна; на практиці робочий інтервал напруги буде $\sim 12 \text{ В} - 16 \text{ В}$). Свинцевий блок уже є 12-вольтовим моноблоком, тому беремо один акумулятор як мінімальну серію.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення 100 Вт·год корисної енергії: (1) Li-ion: енергія одного 3S ланцюжка NCR18650B (3 послідовних елементи) ~ 36 Вт·год (3×12 Вт·год). Для 100 Вт·год при 80% DOD потрібно загальна місткість ≈ 125 Вт·год, тобто $\approx 3,5$ таких ланцюжків. Приймаємо 4 паралельних ланцюжки (3S4P) – це 12 елементів, що дає ~ 144 Вт·год повної ємності, з яких ~ 115 Вт·год використовуються (80% DOD). Отримана батарея Li-ion матиме номінальну напругу 11,1 В і ємність $4 \times 3,35$ А·год = 13,4 А·год. (2) NiMH: енергія одного 10S ланцюжка BK300SCE ~ 36 Вт·год ($10 \times 3,6$ Вт·год). Для 100 Вт·год при 100% DOD потрібно ~ 100 Вт·год повної ємності, тобто $\sim 2,8$ ланцюжка. Приймаємо 3 паралельних ланцюжки (10S3P), всього 30 NiMH елементів, з сумарною енергією ~ 108 Вт·год (номінальна напруга 12 В, ємність 3×3 А·год = 9 А·год). (3) Свинцевий акумулятор: один NP7-12 має ~ 84 Вт·год повної ємності; при DOD 50% корисна енергія ~ 42 Вт·год. Для запасу 100 Вт·год необхідно як мінімум $N = 100/42 \approx 2,4$ таких акумуляторів. На практиці беруть 3 шт. паралельно (що дає 12 В, 21 А·год, 252 Вт·год повної ємності) або переходять на акумулятор більшої місткості. Для розрахунку візьмемо 2 шт. (12 В, 14 А·год сумарно, 168 Вт·год), що при 60% розряду забезпечать ~ 100 Вт·год. (4) Суперконденсатори: шість послідовно (6S) дають робочу напругу ~ 12 В – 15 В. Енергія одного 6S модуля = $6 \times 3,0$ Вт·год = 18 Вт·год (якщо використати весь діапазон від 15 В до 0). При розряді в інтервалі 15 В – 12 В (імітація роботи на рівні 12 В) з 6×3000 Ф отримаємо близько 10 Вт·год корисної енергії. Необхідно 10 таких модулів паралельно для досягнення 100 Вт·год (всього 60 суперконденсаторів). Це вкрай неефективно за масою і об'ємом – сумарна маса складе $\approx 28,5$ кг тільки на конденсаторах ($60 \times 0,475$ кг). Узагальнені розрахунки наведено у табл. 3.1 для еквівалентної батареї ~ 12 В, ~ 100 Вт·год на різних технологіях.

З наведених даних видно, що для зберігання однакового запасу енергії потрібна істотно різна кількість елементів. Літій-іонна батарея потребує найменшу масу та кількість осередків, тоді як суперконденсатори – в десятки разів більше.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 – Порівняння батарей (~100 Вт·год, ~12 В) на різних технологіях накопичення енергії

Параметр	Li-ion (NCR18650B)	Свинцевий (NP7-12)	NiMH (BK300SCE)	Суперконденсатор (BCAP3000)
Конфігурація батареї	3S4P (12 елементів)	2×12 В (2 батареї паралельно)	10S3P (30 елементів)	6S10P (60 конденсаторів)
Номинальна напруга, В	~ 11,1	12	~ 12	15 (макс), ~ 12 робоча
Ємність (повна), А·год	13,4 (4×3,35)	14 (2×7)	9 (3×3)	167 Ф (500 Ф × 10 паралельно)
Повна енергія, Вт·год	~ 144	~ 168	~ 108	~ 180 (при 15 В повн., 0 В кінц.)
Корисна енергія при DOD, Вт·год	~ 115 (80% DOD)	~ 100 (60% DOD)	~ 108 (100% DOD)	~ 100 (~ 15 В – 8 В розряд через DC/DC)
Маса оцінна, кг	~ 0,58 (12×0,048)	~ 4,4 (2×2,2)	~ 1,8 (30×0,06)	~ 28,5 (60×0,475)
Питома енергія системи, Вт·год/кг	~ 198	~ 23	~ 60	~ 3.5
Максимальний струм розряду	~ 20 А (при 4P, ~5 А/елемент)	~ 40 А – 75 А (5 мин)	~ 27 А (3 P, ~ 9 А/елемент)	>500 А (практично, обмежується ESR)
ККД циклу (заряд-розряд)	~ 95%	~ 70% – 85%	~ 70%	~ 90% – 98% (втрати на ESR)
Саморозряд (при 20 °C)	~ 2–3%/міс	~ 3% – 5%/міс	~ 20%/добу; низьк. саморозряд <5%/міс	~ 5%/добу (витік струму ~ 2,8 мА)

Питомі характеристики Li-ion суттєво кращі завдяки високій енергоємності. Свинцевий акумулятор, хоча і дешевий та простий, є найважчим – система на 100 Вт·год буде важити кілька кілограм і матиме невисокий ККД. NiMH займає проміжне положення за масою, але характеризується дуже високим саморозрядом: без щоденного перезаряду такий акумулятор втратить значну частину енергії вже за тиждень. Суперконденсатори практично не застосовуються для довготривалого зберігання енергії ВДЕ через малу енергоємність і значний саморозряд, проте вони можуть ефективно згладжувати

короткочасні коливання генерації чи навантаження завдяки високій потужності та мільйонному ресурсу циклів.

Уявімо типову добову циклограму: вдень сонячна панель заряджає батарею, ввечері накопичена енергія витрачається на живлення навантаження. Припустимо, потрібно забезпечити 100 Вт навантаження протягом 1 год (100 Вт·год) із збереженої енергії. Літій-іонна батарея 3S4P (12×NCR18650B) при ємності $\sim 13,4$ А·год здатна віддавати 100 Вт ($\approx 8,3$ А при ~ 12 В) приблизно 1,2 год, розряджаючись на $\sim 90\%$. При цьому кожен Li-ion елемент працюватиме з струмом $\sim 2,1$ А, що становить $\sim 0,6\text{C}$ – цілком прийнятний режим (номінально 1C). Втрата ємності на холоді для Li-ion може сягати 20% – 30% при -20°C , тому взимку ємність дещо знизиться. NiMH батарея 10S3P (9 А·год) при струмі 8,3 А розрядиться приблизно за 1,1 год – 1,2 год, оскільки фактична ємність близька до номінальної на такому $\sim 1\text{C}$ режимі. Однак NiMH помітно гріються при заряді/розряді високим струмом, і їх ККД може знижуватися – частина енергії витрачається як тепло. Свинцеві акумулятори (2×NP7-12 паралельно) сумарною ємністю 14 А·год при навантаженні 8,3 А матимуть розряд приблизно 50% за $\sim 0,84$ год (50 хв). Це пов'язано з тим, що при підвищених струмах (0,6C на кожен акумулятор) ефективна ємність менша за 7 А·год – за даними паспорта, при 1 год розряді доступно $\sim 4,2$ А·год (60%). Отже, два акумулятори забезпечать потрібну годину роботи, розрядившись приблизно на 60–70%. ККД свинцевої батареї дещо нижчий через внутрішній опір і витрати на побічні реакції (виділення газу при заряді тощо). Суперконденсатори, як показав розрахунок, взагалі неефективно використовувати для годинного живлення – навіть при наявності достатньої кількості, напруга на них сильно падає під час розряду. Для підтримання стабільних 12 В потрібен перетворювач постійної напруги, що ускладнює систему. Таким чином, за добового циклу «заряд вдень – розряд ввечері» найбільш ефективно працюватимуть літій-іонні акумулятори (найвищий ККД і відсутність потреби обслуговування), прийнятним є також використання свинцевих батарей (низька вартість, проте менший ресурс при глибоких циклах). NiMH акумулятори можуть

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовуватися, але високий саморозряд означає, що частину накопиченої за день енергії буде втрачено до вечора; до того ж NiMH-батареї потребують складнішого зарядного пристрою (контроль $\Delta V/\Delta t$ або температури для відсічення заряду). Суперконденсатори в автономних ВДЕ-системах варто застосовувати лише для згладжування пікових навантажень або дуже частих коротких циклів, де хімічні батареї швидко зношувались би.

Вплив DOD та температури на ресурс. Накопичувачі в ВДЕ зазнають щоденних циклів глибокого розряду, тому їхній строк служби суттєво залежить від глибини розряду. Свинцеві акумулятори при 50% DOD можуть витримати ~ 500 циклів – 700 циклів, тоді як при 100% DOD – лише ~ 200 циклів – 300 циклів. Тому в сонячних установках часто обирають більшу батарею і експлуатують її в діапазоні 30% – 50% розряду. Li-ion акумулятори менш чутливі до глибини розряду: типовий ресурс становить ~ 500 повних циклів до зниження ємності до ~ 80%, але при розряді на 80% кількість циклів може зрости до 800 – 1000. NiMH батареї забезпечують ~ 500 циклів при глибокому розряді, але за високих температур їх ресурс зменшується. Необслуговувані VRLA акумулятори типу NP7-12 розраховані приблизно на 3 роки – 5 років роботи у буферному режимі; в циклічному режимі (щоденний розряд-заряд) фактичний строк служби може бути ~ 1 рік – 2 роки при регулярних глибоких розрядах. За високих температур (понад +30 °C вдень на сонці) свинцевий акумулятор інтенсивніше деградує – кожні +10 °C понад норму приблизно вдвічі скорочують термін служби через корозію пластин і висихання електроліту. Li-ion також відчувають деградацію при нагріванні, але багато сучасних літєвих акумуляторів мають системи термостатування у складі батарейних блоків. NiMH можуть працювати в ширшому діапазоні температур (до -20 °C), але їхня ефективна ємність на морозі теж знижується (~ 80% при 0 °C, ~ 60% при -20 °C). Суперконденсатори добре переносять низькі температури (до - 40 °C) без втрати циклічності, хоча їх внутрішній опір дещо зростає. При високих температурах (близько +65 °C) суперконденсатори старішають (термін служби ~ 1500 годин при +65 °C), але при номінальних +25 °C їх ресурс обчислюється вже мільйонами годин.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки по підрозділу 3.1: Системи накопичення енергії для ВДЕ повинні забезпечувати велику ємність при відносно невеликих масогабаритних показниках і витримувати глибокі циклічні режими. Літій-іонні акумулятори нині є оптимальним вибором: вони мають найвищу енергоємність та ККД, достатній ресурс циклів ($\approx 500 - 1000$) і помірний саморозряд, хоча вимагають системи керування зарядом/розрядом (BMS) і коштовніші. Свинцево-кислотні батареї – дешевший та перевірений часом варіант для сонячних установок малої потужності; проте їх низька питома ємність і деградація при глибоких розрядах роблять їх менш привабливими для тривалої експлуатації (доведеться ставити більше батарей і частіше їх змінювати). Нікель-метал-гідридні (а також нікель-кадмієві) акумулятори можуть працювати у ширшому температурному діапазоні та витримувати багато циклів, але їх високий саморозряд та нижча ефективність заряджання обмежують застосування у ВДЕ – наразі вони майже витіснені літій-іонними. Суперконденсатори як основні накопичувачі енергії для ВДЕ непридатні через низьку енергоємність, зате їх варто використовувати як допоміжні буфери потужності: вони здатні приймати/віддавати великі пікові струми на порядки більше циклів, ніж акумулятори, що дозволяє вирівнювати коливання генерації та продовжити життя основної батареї. Таким чином, комбінування літій-іонних батарей (для накопичення основної енергії) і суперконденсаторів (для згладжування піків) є перспективним напрямком підвищення ефективності систем відновлюваної енергетики.

3.2 Системи безперебійного живлення (UPS)

Системи безперебійного живлення (UPS – Uninterruptible Power Supply) призначені для забезпечення електроенергією критичних навантажень під час зникнення мережевої напруги або значних її провалів. UPS широко використовуються для живлення серверів, комп'ютерної та медичної апаратури, телеком обладнання тощо. Низьковольтні накопичувачі енергії є ключовим компонентом UPS, оскільки саме в акумуляторах зберігається резервна енергія. До таких накопичувачів висуваються вимоги надійності, здатності віддавати

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високі струми протягом короткого часу та довговічності в режимі чергування (буферного зарядного утримання). Розглянемо застосування тих самих моделей накопичувачів (NCR18650B, NP7-12, BK300SCE, BCAP3000) в типових умовах роботи UPS, де потрібна потужність резервного живлення сотні ват протягом кількох хвилин. Виконаємо порівняльний розрахунок для забезпечення ~ 100 Вт навантаження на тривалість 30 хв (0,5 години), що еквівалентно $50 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ енергії, – цього достатньо, аби коректно завершити роботу обладнання або пережити короткочасне відключення.

Необхідна конфігурація батарей. Більшість малої та середньої потужності UPS використовують свинцеві акумулятори 12 В (або послідовні зв'язки 24 В, 36 В тощо) у буферному режимі: акумулятор постійно підтримується в зарядженому стані від мережі і в разі збою віддає енергію в інвертор. Для нашого розрахунку приймемо 12-вольтову систему: навантаження 100 Вт відповідає розрядному струму $\sim 8,3$ А при 12 В. Свинцевий акумулятор: Один Yuasa NP7-12 (7 А·год, 12 В) має повну енергоємність $\sim 84 \text{ Вт}\cdot\text{год}$. При розряді за 30 хв (2С швидкість) його ефективна ємність буде менша – довідково при 1 год (1С) ємність $\sim 4,2$ А·год, можна очікувати $\sim 3,5$ А·год – 4 А·год за 0,5 год, тобто $\sim 42 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ – $48 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ від одного акумулятора. Таким чином, один акумулятор майже покриває потребу $50 \text{ Вт}\cdot\text{год}$, але працюватиме на межі глибокого розряду. Для резерву візьмемо 2 акумулятори NP7-12 паралельно (12 В, 14 А·год сумарно): це дасть $\sim 84 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ доступної енергії за півгодини (при розряді $\sim 0,5\text{С}$ на акумулятор, що ближче до номінального режиму 2-годинного розряду). Напруга при такому навантаженні залишатиметься в допустимих межах (понад 11 В), оскільки кожен акумулятор віддає $\sim 4,15$ А (0,6С). Li-ion: Для $50 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ енергії достатньо батареї 3S2P з елементів NCR18650B (6 шт. по 3,35 А·год). Її повна ємність $\sim 2 \times 3,35 \text{ А}\cdot\text{год} = 6,7 \text{ А}\cdot\text{год}$, повна енергія $\sim 6,7 \text{ А}\cdot\text{год} \times 11,1 \text{ В} \approx 74 \text{ Вт}\cdot\text{год}$. При навантаженні 100 Вт (8,3 А) така батарея розрядиться на $\sim 68\%$ за 30 хв (використано $\sim 50 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ із $\sim 74 \text{ Вт}\cdot\text{год}$). Струм в кожному з двох паралельних осередків $\sim 4,15$ А, що становить $\sim 1,25\text{С}$ для NCR18650B – це дещо вище за рекомендований

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безперервний (1С), але оскільки розряд короточасний (30 хв), акумулятори здатні його витримати. Для зменшення навантаження на осередки можна застосувати 3S3P (9 шт) – тоді струм на елемент $\sim 2,8 \text{ А}$ (0,8С), а запас енергії $\sim 111 \text{ Вт}\cdot\text{год}$, що дасть більший резерв по часу [45]. NiMH: Використаємо батарею 10S2P з елементів BK300SCE (20 шт). Її повна ємність $6 \text{ А}\cdot\text{год}$ ($2\times 3 \text{ А}\cdot\text{год}$), енергія $\sim 6 \text{ А}\cdot\text{год} \times 12 \text{ В} = 72 \text{ Вт}\cdot\text{год}$. При розряді $8,3 \text{ А}$ ($\approx 1,4\text{С}$ загалом, тобто $\sim 0,7\text{С}$ на кожний паралельний ланцюжок) NiMH акумулятори віддадуть $\sim 50 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ за півгодини (очікуваний залишок заряду $\sim 30\%$). Напруга NiMH батареї під таким навантаженням впаде з $\sim 12 \text{ В}$ до $\sim 11 \text{ В}$ (приблизно $1,1 \text{ В}$ на елемент), але залишиться достатньою для інвертора. Суперконденсатори: Для живлення 100 Вт протягом 30 хв (1800 с) потрібна значно більша ємність, ніж розраховувалось для ВДЕ. Енергія $50 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ – це 180 кДж . Один суперконденсатор 3000 Ф накопичує $10,9 \text{ кДж}$. Навіть якщо використовувати повний інтервал напруги ($16,2 \text{ В}$ до $\sim 0 \text{ В}$) 6 послідовних конденсаторів дають $65,6 \text{ кДж}$ ($18,2 \text{ Вт}\cdot\text{год}$). Отже, знадобилося б $N = 180/18,2 \approx 10$ паралельних гілок 6S (як і в попередньому розрахунку). Це абсолютно нерентабельно. Втім, у випадку UPS можливий інший підхід: суперконденсатори можуть забезпечити дуже коротке резервування (кілька секунд) для безперервної роботи або плавного вимкнення. Для прикладу, щоб жити 100 Вт протягом 10 с (короточасний провал мережі), достатньо енергії $100 \text{ Вт} \times 10 \text{ с} = 1000 \text{ Дж}$. Це менше повної енергії одного модуля $6\times\text{BCAP3000}$ (65610 Дж) майже в 65 разів. Фактично один 6S модуль суперконденсаторів ($18 \text{ Вт}\cdot\text{год}$) міг би забезпечити 100 Вт $\sim 3 \text{ хв}$, якщо використовувати весь запас до 0 В з підвищуючим перетворювачем. На практиці суперконденсатори в UPS застосовують для діапазону резервування $<1 \text{ хв}$: наприклад, для кількасекундного живлення до ввімкнення дизель-генератора або як буфер при перемиканні на інше джерело живлення. У таких застосуваннях їхній величезний ресурс циклів і відсутність потреби в заміні протягом всього строку служби UPS є великим плюсом.

Зведемо ключові показники різних накопичувачів для випадку UPS (100 Вт , 30 хв) в табл. 3.2:

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Порівняння параметрів батарей для UPS (резерв 100 Вт на 30 хв)

Показник	Li-ion (3S2P)	Свинцевий (2× NP7-12)	NiMH (10S2P)	Суперконденсатори
Енергоємність (Вт·год)	~ 74 (повна), ~ 50 використано	~ 168 (повна), ~ 50 використано	~ 72 (повна), ~ 50 використано	~ 180 (6S10P модуль) повна, ~ 50 використано
Кількість елементів	6 × NCR18650B	2 батареї по 6 елементів	20 × BK300SCE	60 × BCAP3000
Маса батареї, кг (оцінка)	~ 0,29	~ 4,4	~ 1,2	~ 28
Розрядний струм на елемент	~ 4,15 А (0,6С–1,3С)	~ 4,15 А (0,6С на акум)	~ 4,15 А (≈ 1,4С сумарно, 0,7С на паралель)	~ 0,83 А на модуль 6S (при 10 модулях паралельно)
Вихідна напруга	12,6 → ~ 11 В (Li-ion BMS вимкн. ~ 9 В)	13,0 → ~ 11 В (від повного заряду до 50% розряду)	~ 13,0 → 11,0 В (від 100% до 30%)	15 → ~ 12 В (за 50 % розряду з DC/DC підтримкою)
Термінова віддача потужності	Висока (до 5С – 10С при більше паралелей)	Висока (до 10С короткочасно)	Висока (до 3С – 5С тривало)	Дуже висока (до 100С+)
Режим очікування	Потрібен BMS, зберігається при ~ 100% SOC, саморозряд низький	Постійний підзаряд (float 13,65 В), саморозряд низький	Необхідна період. підзарядка, саморозряд високий	Постійний підзаряд (через витік), саморозряд високий
Ресурс (буферний режим)	5 років – 10 років (обмежений деградацією при постійно високому SOC)	3 років – 5 років (в стандарт. режимі)	~ 3 років – 5 років з періодичним обслуговуванням	>10 років (майже необмежений циклами)

Аналіз роботи в UPS показав, що свинцево-кислотні батареї традиційно домінують у сегменті UPS завдяки простоті і низькій вартості. В наведеному прикладі 2×NP7-12 успішно забезпечать 100 Вт навантаження протягом 30 хв, але майже повний розряд (60% – 70%) зменшуватиме їхній ресурс. Оскільки UPS-події трапляються нерегулярно, свинцеві акумулятори більшість часу перебувають у стані повного заряду під буферною напругою ~ 13,65 В. В такому режимі відбувається поступова сульфатація пластин, тому навіть без глибоких

розрядів VRLA батареї потребують заміни через 3 роки – 5 років роботи (виробник класифікує NP7-12 як Standby use, 3–5 years life) [26]. Літій-іонні акумулятори в UPS дозволяють зменшити вагу й габарити батарейного модуля у ~ 10 разів. Наприклад, Li-ion батарея з 6 – 9 високопродуктивних 18650 осередків може замінити двокілограмовий свинцевий акумулятор, забезпечивши той самий час резерву. До того ж, Li-ion зберігають $\approx 80\%$ ємності навіть після 500 циклів, а в режимі рідких розрядів їх можна експлуатувати 7 років – 10 років. Однак підтримка Li-ion в UPS складніша: потрібна система керування батареєю (захист від перезаряду/перерозряду, балансування), інший алгоритм заряду (CC-CV, приблизно 12,6 В для 3S). Також постійне утримання Li-ion на 100% SOC небажане – це пришвидшує старіння елементів [46]. Тому виробники Li-ion UPS часто тримають батарею при $\sim 90\%$ заряду і дозаряджають лише за потреби, щоб продовжити її ресурс. NiMH акумулятори можуть забезпечувати високі струми для UPS і менш вибагливі до перезаряду, ніж Li-ion (надлишок енергії розсіюється як тепло при trickle charge). Проте для буферного режиму вони не ідеальні: NiMH не можна постійно тримати на повному заряді – після насичення потрібно зменшувати струм до кількох відсотків від C, і все одно йде нагрів та деградація. Через високий саморозряд NiMH в UPS будуть постійно підзаряджатись, витрачаючи енергію і нагріваючись, що знижує їх строк служби. Тому NiMH/ NiCd застосовувалися в спеціалізованих системах (наприклад, у військовій чи промисловій апаратурі, де потрібна робота при екстремальних температурах), але в типових UPS не набули поширення. Суперконденсатори в ролі єдиного накопичувача здатні підтримувати роботу лише дуже короткий час – це підходить для захисту від миттєвих провалів мережі. Перевага суперконденсаторів – майже необмежений циклами ресурс і відсутність необхідності заміни протягом десятиліть. Існують промислові UPS, що використовують суперконденсатори замість батарей для покриття 1 секундних – 2 секундних переривань живлення (так звані Battery-free UPS). Наприклад, установка на 6 конденсаторних модулів може віддавати десятки кіловат за секунди і перезаряджатися за кілька хвилин. Утім, для

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тривалішого резерву (хоча б на хвилини) суперконденсатори поки що не конкурентні – потрібний їх дуже великий банк, що дорого і громіздко.

Висновки по підрозділу 3.2: Для джерел безперебійного живлення характерні короткочасні розряди високої потужності і тривалий буферний режим підтримки заряду. Свинцево-кислотні VRLA акумулятори залишаються найпоширенішими в UPS завдяки низькій вартості, простоті експлуатації (терпимість до постійного підзаряду) та здатності віддавати великі струми. Їх недоліки – велика маса та відносно малий ресурс (потребують заміни кожні ~ 3 роки – 5 років). Літій-іонні батареї поступово впроваджуються в сучасні UPS: вони забезпечують меншу вагу і довший термін служби, але дорожчі й потребують складної системи керування. Для навантажень, чутливих до масогабаритних обмежень (авіоніка, портативні UPS), Li-ion є оптимальним вибором. NiMH акумулятори в стандартних UPS застосовуються рідко через високий саморозряд і тепловиділення при буферному заряді, хоча можуть бути корисні при широкому діапазоні температур або коли потрібні часті глибокі цикли (NiCd/NiMH краще переносять повний розряд без втрати ємності). Суперконденсатори доцільно використовувати в UPS для дуже короткого резервування (секунди) або в гібридних схемах: наприклад, поєднання батарей і суперконденсаторів дозволяє останнім брати на себе імпульсні навантаження, згладжувати пускові струми і тим самим зменшувати знос батарей [47]. Загалом, для тривалості резерву понад кілька хвилин наразі лідирують хімічні акумулятори, тоді як суперконденсатори – перспективний елемент для підвищення надійності та довговічності систем безперебійного живлення.

3.3 Накопичувачі в електротранспорті

Низьковольтні акумуляторні батареї історично використовуються як основне джерело енергії для електротранспорту – від електрокарів початку XX століття до сучасних електромобілів, електровелосипедів, скутерів та електронавантажувачів. Вимоги до накопичувачів у електротранспорті дуже суворі: необхідна висока енергоємність (щоб забезпечити достатній запас ходу),

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

висока потужність віддачі (для розгону та подолання підйомів), стабільна робота в широкому діапазоні температур, безпека і довгий цикл життя при частих глибоких розрядах. У цьому підрозділі проаналізуємо застосування вибраних моделей накопичувачів (Li-ion NCR18650B, VRLA Yuasa NP7-12, NiMH BK300SCE, суперконденсатор BCAP3000) в контексті електротранспорту. Хоча реальні тягові батареї електромобілів мають напругу сотні вольт і складаються з сотень-тисяч осередків, для спрощення візьмемо низьковольтний транспортний засіб – наприклад, електроскутер з бортовою напругою ~ 24 В і еквівалентною енергією батареї $\sim 0,2$ кВт·год (200 Вт·год). Такий запас енергії дозволяє проїхати кілька кілометрів на одному заряді, що підходить для ілюстрації розрахунку.

Приклад: батарея 24 В 7 А·год (≈ 168 Вт·год). Багато легких електроскутерів і електровелосипедів початкового рівня оснащуються 24-вольтовими свинцевими батареями ємністю порядку 7 А·год – 12 А·год. Розглянемо батарею 24 В, 7 А·год на основі різних технологій. Для свинцевого варіанту це дві послідовно з'єднані акумуляторні батареї NP7-12 (2×12 В = 24 В, 7 А·год), якраз типова конфігурація для електровелосипеда економ-класу. Її повна енергоємність ~ 24 В $\times$ 7 А·год = 168 Вт·год. Маса такої батареї $\sim 2 \times 2,2$ кг = 4,4 кг. Літій-іонна батарея еквівалентної напруги потребує 7 послідовно з'єднаних осередків Li-ion (номінально $7 \times 3,6$ В = 25,2 В). Оберемо комбінацію 7S2P з NCR18650B: 14 елементів сумарною ємністю 6,7 А·год (як в попередньому підрозділі). Номінальна напруга батареї 25,2 В, енергія $\sim 25,2$ В $\times$ 6,7 А·год ≈ 169 Вт·год – практично така сама, як у $2 \times$ NP7-12. Маса Li-ion батареї $\sim 14 \times 48$ г = 0,67 кг, що в 6 разів – 7 разів менше за свинцеву. NiMH-батарея 24 В може бути виконана з 20 NiMH осередків ($20 \times 1,2$ В = 24 В). Для досягнення ~ 7 А·год візьмемо 20S3P з BK300SCE (60 елементів по 3 А·год). Ємність такої батареї 9 А·год, енергія ~ 24 В $\times$ 9 А·год = 216 Вт·год. Це трохи більше цільових 168 Вт·год, але зручна конфігурація; можна було б взяти 20S2P (40 елементів, 6 А·год, 144 Вт·год) і отримати трохи менший запас енергії. Маса NiMH-батареї (20S3P) $\sim 60 \times 60$ г = 3,6 кг (для 20S2P $\sim 2,4$ кг). Нарешті,

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суперконденсатори: для ~ 24 В необхідно 10 послідовних конденсаторів ($10 \times 2,7 \text{ В} = 27 \text{ В макс.}$). Енергія одного 10S модуля $\sim 10 \times 3,0 \text{ Вт}\cdot\text{год} = 30 \text{ Вт}\cdot\text{год}$. Щоб отримати 168 Вт·год, потрібно 6 паралельних таких зв'язок ($6 \times 30 = 180 \text{ Вт}\cdot\text{год}$). Це всього 60 конденсаторів (10S6P), масою $\sim 60 \times 0,475 \text{ кг} = 28,5 \text{ кг}$ – очевидно непрактично. Результати підсумовано в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Орієнтовні параметри батарей 24 В 7 А·год різних типів для електротранспорту

Батарея 24 В $\approx$ 7 А·год	Li-ion (7S2P)	Свинцева (2 $\times$ 12 В)	NiMH (20S2P / 20S3P)	Суперконденсатори (10S6P)
Кількість елементів	14 $\times$ NCR18650B	2 $\times$ 6 елементних блоки	40 $\times$ BK300SCE / 60 $\times$ BK300SCE	60 $\times$ BCAP3000
Повна енергія, Вт·год	~ 169	~ 168	~ 144 / ~ 216	~ 180 (повна)
Маса батареї, кг	$\sim 0,67$	$\sim 4,4$	$\sim 2,4$ / $\sim 3,6$	$\sim 28,5$
Питома енергія, Вт·год/кг	~ 252	~ 38	~ 60 / ~ 60	~ 6.3
Макс. неперервний струм	~ 15 А (при 2P, $\sim 7,5$ А/ел)	~ 30 А – 40 А (обмежене кабелями, 4С)	~ 20 А – 30 А (при 2–3P)	>500 А (обмежується ESR)
Циклічний ресурс	~ 500 циклів – 1000 циклів	~ 200 циклів – 300 циклів	~ 500 циклів	$>500\,000$ циклів

Розрахунок запасу ходу і характеристик. Припустимо, електроскутер споживає в середньому 250 Вт потужності при русі з помірною швидкістю. Тоді батареї ємністю $\sim 168 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ вистачить приблизно на $t = 168 \text{ Вт}\cdot\text{год} / 250 \text{ Вт} \approx 0,67$ год, тобто ~ 40 хв руху. За цей час можна проїхати, наприклад, ~ 15 км (якщо середня швидкість $\sim 22 \text{ км/год}$). Свинцева батарея 2 $\times$ 7 А·год, розряджаючись майже повністю за 40 хв (розрядний струм ~ 10 А, що $\approx 1,5\text{C}$), матиме помітне просідання напруги до ~ 22 В під кінець розряду і нагрівання. Вона віддасть майже всю ємність, але такий глибокий цикл при великому струмі спричиняє підсульфатування пластин і ~ 200 циклів можуть істотно знизити її ємність. Літій-іонна батарея 7S2P при струмі ~ 10 А ($\approx 1,5\text{C}$ на елемент) теж досить сильно навантажена – для NCR18650B це близько допустимого

максимуму [45; 46]. Вона нагріватиметься, і без належного охолодження це скоротить ресурс. Практично в електротранспорті використовують або елементи з хімії, розрахованої на високі струми (наприклад, LiFePO_4 , LTO або спеціальні Li-ion з меншою ємністю, але більшою потужністю), або збільшують кількість паралельних осередків. Наприклад, акумулятор e-bike 24 В 20 А·год може бути реалізований як 7S6P з NCR18650B (42 елементи), що дасть струм на елемент лише $\sim 0,5\text{C}$ при споживанні 250 Вт – такі умови значно продовжують життя Li-ion. NiMH батарея 20S3P (9 А·год) при 10 А розряду ($\sim 1,1\text{C}$ на елемент) зможе видати необхідну потужність, але наприкінці розряду напруга кожного осередку впаде до $\sim 1,0$ В або нижче, тобто батарея 20S опуститься до ~ 20 В, що може бути недостатньо для контролера двигуна. Тому, хоча NiMH і здатні віддати великий струм, підтримувати стабільну напругу під навантаженням їм важче [48]. Зазвичай у ранніх гібридних авто (Toyota Prius 1-го покоління) використовували NiMH батареї з більшою кількістю осередків, щоб мати запас по напрузі, і працювали в діапазоні 40% – 80% SOC, щоб подовжити термін служби. NiMH в електротранспорті мають ще одну проблему – нагрівання при заряді/розряді: у тому ж Prius батарея примусово охолоджувалась вентилятором. Свинцеві акумулятори теж значно нагріваються при швидкій зарядці/розрядці, а відведення тепла від моноблоків гірше, що може призвести до “закипання” електроліту при перегріві. Літій-іонні осередки, навпаки, краще віддають тепло назовні завдяки металевому корпусу і меншому об’єму, і при струмах до 1C майже не нагріваються.

Рекуперація енергії та пікові навантаження. Сучасний електротранспорт широко застосовує рекуперативне гальмування – повернення енергії в батарею при гальмуванні двигуном. Це ставить додаткові вимоги до батареї: вона має приймати високі струми заряду короткий час. Літій-іонні батареї здатні поглинати струми до 1C – 2C без значної втрати ресурсу, хоча при більших ($>2\text{C}$ – 3C) можливий перегрів і прискорена деградація. NiMH можуть приймати великі зарядні струми (швидкий заряд 1C і більше), але при цьому сильно нагріваються і потребують охолодження. Свинцеві акумулятори неефективні в

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

режимі рекуперації: при високому струмі заряду значна частина енергії витрачається на побічні реакції (виділення газів, нагрів), ККД заряду падає. До того ж, якщо акумулятор майже заряджений, він не зможе прийняти імпульс енергії гальмування. Тому електротранспорт з свинцевими батареями зазвичай або взагалі не реалізує рекуперацію, або вона дуже обмежена. Суперконденсатори в цьому аспекті мають величезну перевагу – вони легко приймають та віддають імпульси потужності. Є практичні реалізації: гібридні системи накопичення в автобусах і тролейбусах, де батарея (Li-ion або навіть свинцева) доповнена суперконденсаторним блоком. При розгоні енергія спочатку береться з суперконденсаторів (розвантажуючи батарею від ударних струмів), а при гальмуванні – значна частина кінетичної енергії накопичується в них, після чого повільно передається в основну батарею. Такий підхід дозволяє використати переваги обох типів: високу енергоємність хімічної батареї і високу потужність та ресурс суперконденсатора [49]. Наприклад, суперконденсаторні автобуси (Shanghai APS) заряджаються на зупинках за 30 секунд – 60 секунд і можуть проїхати кілька кілометрів на одній «дозаправці» – у цьому разі суперконденсатори виступають як основний накопичувач, але маршрут спроектовано з частими підзарядками [47].

Безпека і обслуговування. У транспортних застосуваннях безпека накопичувачів є критичною. Літій-іонні батареї потребують захисту від перегріву, перевантаження і фізичних пошкоджень, адже при короткому замиканні або перегріві існує ризик термічного розгону і займання осередків. Сучасні електромобілі оснащуються складними BMS та системами термостатування (охолодження/нагріву) батарейного модуля для підтримання оптимального режиму. Свинцеві акумулятори вибухобезпечніші (водень виділяється мінімально у VRLA, іскри всередині відсутні), але можуть видавати дуже великі струми на коротке замикання, що небезпечно для електропроводки – потрібні запобіжники. NiMH та NiCd акумулятори при перегріві можуть вентилювати гази через клапани, але загалом вважаються відносно безпечними (не схильні до самозаймання). Суперконденсатори є електростатичними

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристроями і не містять горючих компонентів, проте при неправильній експлуатації (надлишкова напруга, перегрів) можуть розгерметизуватися. В плані обслуговування, Li-ion і NiMH батареї не потребують обслуговування протягом життя (тільки контроль параметрів), а свинцеві іноді потребують перевірки стану, підзаряду в разі тривалого простою, NiCd – профілактичного повного розряду для уникнення ефекту пам'яті. Суперконденсатори практично не вимагають обслуговування.

Висновки по підрозділу 3.3: Електротранспорт висуває жорсткі вимоги до акумуляторів – висока енергемісткість, вихідна потужність і циклічна довговічність. Літій-іонні батареї наразі домінують у більшості електротранспортних засобів (від електровелосипедів до електромобілів) завдяки найвищій питомій енергії і достатній потужності. Вони забезпечують десятки кілометрів пробігу та тисячі циклів за умови правильної експлуатації, хоча потребують складних систем керування і термостабілізації. Свинцеві акумулятори все ще застосовуються в недорогому легкому електротранспорті (скутери, гольф-кари, навантажувачі) та спеціальній техніці, але їх велика маса обмежує запас ходу, а короткий цикл життя при глибоких розрядах призводить до частих заміन батарей. NiMH акумулятори відігравали важливу роль у гібридних автомобілях (Toyota Prius та інші до 2010-х років) завдяки непоганій питомій потужності і надійності; зараз вони частково витіснені Li-ion, але все ще використовуються в деяких гібридних моделях через перевірену безпеку і довговічність. Для чисто електричних авто NiMH не застосовуються через нижчу енергоемність і значну масу, проте ця технологія лишається актуальною в нішевих випадках (наприклад, в дуже холодному кліматі NiCd/NiMH можуть бути кращі, оскільки Li-ion вимагають підігріву перед роботою при -30 °C). Суперконденсатори як основне джерело енергії в транспорті поки що рідкість – вони не забезпечують достатнього пробігу. Однак у поєднанні з батареями суперконденсатори значно підвищують ефективність: дають змогу рекуперувати більше гальмівної енергії і знизити навантаження на батареї при піках споживання. Перспективними є електробуси і трамваї з проміжною

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультра-швидкою зарядкою на зупинках, де суперконденсаторні модулі беруть на себе роль “буфера” між зарядною станцією і батареєю або взагалі замінюють батарею при достатній частоті зупинок. Загалом, для електротранспорту найкращим вибором сьогодні є літій-іонні накопичувачі, а суперконденсатори використовуються як допоміжні пристрої для підвищення потужності системи [47]. Свинцеві та нікель-кадмієві/метал-гідридні технології поступаються за більшістю критеріїв, залишаючись лише в дешевих або спеціалізованих застосуваннях.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКИ ПОРІВНЯЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

4.1 Вибір умов порівняння для моделювання

На основі проведеного аналізу в розділах 1–3 було сформовано уявлення про конструктивні особливості, технічні характеристики та сфери застосування чотирьох типів накопичувачів енергії: літій-іонних, свинцево-кислотних, нікель-металогідридних акумуляторів та суперконденсаторів. Щоб отримати більш об'єктивне порівняння їхньої роботи, доцільно виконати моделювання в умовах, наближених до реальної експлуатації в системах низької напруги.

Враховуючи результати розділу 2, де було виконано розрахунок кількості елементів, необхідних для забезпечення навантаження потужністю 100 Вт на годину, стало зрозуміло, що умови порівняння треба трішки розширити, тому обрано приблизно 140 Вт на годину та від 11 В до 12 В обрано як умови уніфікованого навантаження. Такий підхід дозволяє не лише зберігати фізичну обґрунтованість, але й гарантує коректність порівняння енергетичних характеристик (напруга, струм, час автономної роботи, вольт-амперні криві тощо) у різних типах джерел.

Особливу увагу варто звернути на моделювання суперконденсаторів, яке потребує окремого підходу. На відміну від акумуляторів, суперконденсатори характеризуються значно меншою питомою енергоємністю при дуже низькому внутрішньому опорі. Як показано у пункті 2.4, незважаючи на вражаючі характеристики за циклічністю та тривалістю служби, навіть при використанні комбінацій надпотужних модулів типу Maxwell BCAP3000 P270 K04, забезпечення сталої потужності 100 Вт, як показано в розділі 2, протягом тривалого часу (від 15 хвилин і більше) вимагає величезних значень ємності. Це робить суперконденсатори нерентабельними для задач із фіксованим тривалим енергоспоживанням, у порівнянні з акумуляторами.

Саме тому моделювання суперконденсатора в умовах постійного струмового чи потужнісного навантаження не є цілком коректним, адже воно

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

демонструє лише короткочасну віддачу енергії (до кількох секунд або хвилин). Водночас для задач миттєвої компенсації пускових струмів або рекуперації енергії гальмування такі пристрої є беззаперечно ефективними — проте ці сценарії виходять за межі поточного порівняння. Відповідно, результати симуляцій для суперконденсаторів будуть надані лише як ілюстрація особливостей, але не використовуватимуться як основа для кількісного порівняння з акумуляторними блоками.

Таким чином, у цьому розділі буде змодельовано роботу трьох акумуляторних блоків (Li-ion, Pb-acid, NiMH), зібраних із реальних елементів Panasonic NCR18650B, Yuasa NP7-12 та Panasonic BK300SCE відповідно, які забезпечують потужність приблизно 140 Вт на годину при напрузі від 11 В до 12 В. Для кожного типу будуть отримані графіки зміни напруги, струму, залишкового заряду (SOC) та температури для лі-іон батареї у процесі розряду, що дозволить візуалізувати та порівняти поведінку різних типів накопичувачів при однаковому навантаженні.

4.2 Розрахунок кількості та параметрів елементів кожного блока батарей

Для забезпечення однакових умов моделювання — напруга від 11 В до 12 В та потужність навантаження кожного акумуляторного блоку приблизно 140 Вт на годину — було виконано розрахунок кількості елементів для кожного типу акумуляторів, виходячи з їхніх номінальних характеристик, наведених у розділі 2. Основним критерієм була можливість стабільної роботи елементів у межах безпечної зони експлуатації, а також наближеність до реальних технічних умов.

Для літій-іонної батареї (Panasonic NCR18650B), за номінальними значеннями вказаними в розділі 2, обрано наступну конфігурацію блока: щоб забезпечити 12 В, потрібно з'єднати 3 елементи послідовно ($3 \times 3.6 \text{ В} = 10.8 \text{ В}$, що з урахуванням явища поверхневого заряду досягне приблизно 12 В). Оскільки для умови порівняння також треба забезпечити 140 Вт на годину, то

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поділивши 140 Вт на 10.8 В отримаємо 12.96 А·год, що для даного типу батареї відповідає чотирьом елементам по 3.35 А·год з'єднаних паралельно.

Загальна кількість елементів: 3 послідовно $\times$ 4 паралельно = 12 елементів.

Щодо свинцево-кислотної батареї (Yuasa NP7-12), то оскільки один акумулятор Yuasa NP7-12 вже забезпечує необхідну напругу 12 В, достатньо розрахувати необхідну кількість паралельно з'єднаних моноблоків для забезпечення потужності 140 Вт на годину. Один елемент може безпечно працювати при струмах до 7 А на годину. Таким чином, 2 моноблоки паралельно забезпечать потрібну потужність із запасом по струму.

Загальна кількість елементів: 2 $\times$ Yuasa NP7-12 (паралельно).

Оберемо конфігурацію нікель-металогідридного блоку батарей (Panasonic BK300SCE). Для досягнення 12 В необхідно 10 елементів послідовно ($10 \times 1.2 \text{ В} = 12 \text{ В}$). Щоб забезпечити потужність 140 Вт на годину, потрібно 4 паралельні гілки ($12 \text{ В} \times 4 \times 3 \text{ А} \cdot \text{год} = 144 \text{ Вт на годину}$).

Загальна кількість елементів: 10 послідовно $\times$ 4 паралельно = 40 елементів.

4.3 Створення моделей в Simulink

Для реалізації моделювання було обрано Simulink – інтерактивний інструмент (програмне забезпечення) для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем, включаючи дискретні, неперервні та гібридні, нелінійні та розривні системи.

З реальних тестувань і порівнянь батарей зрозуміло, що найбільш оптимальною схемою буде розряд на постійний струм навантаження. Доцільно також буде реалізувати різні номінали цього струму, а саме 0.5C, 1C та 2C для більш детального розуміння зміни параметрів. Крім того, варто задати циклічність, тобто заряд і розряд, реалізацію цього варто зробити через постійний струм заряду в 0.25C, хоча й реальним нормальним значенням є 0.5C.

Отже, перейдемо до збору схеми. Першим зберемо лі-іон блок батарей, для цього використаємо математичну модель батареї (рисунок 4.1) в

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

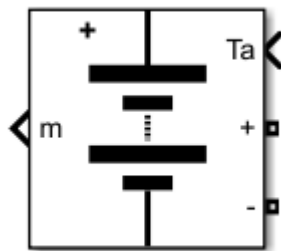


Рисунок 4.1 – Математична модель батареї в Simulink

де m – інформаційний вихід, вивід даних на дисплей, графіки та інше;

T_a – температура навколишнього середовища;

«+» та «-» – Плюсова клемма та мінусова клемма.

Наступним елементом візьмемо Bus Selector (рисунок 4.2), для розділення одного інформаційного сигналу на декілька. Simulink/Commonly Used Blocks.



Рисунок 4.2 – Розділювач сигналу

Крім цього, для виведення інформаційного сигналу на графіки нам необхідний елемент Scope (рисунок 4.3). Simulink/Commonly Used Blocks.



Рисунок 4.3 – Scope

Для реалізації заряду та розряду необхідне джерело струму, котре можна реалізувати за рахунок елемента Controlled Current Source (рис. 4.4) та деяких сталих блоків Constant (рис. 4.5) з поєднанням керованого вимикача Multiport Switch (рис. 4.6). Програмний шлях до цих елементів є наступним: 1) Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/ Sources; 2) Simulink/Commonly Used Blocks; 3) Simulink/Signal Routing.



Рисунок 4.4 – Controlled Current Source

де s – керований вхід сигналу;

«+» та «-» – Плюсова клема та мінусова клема.

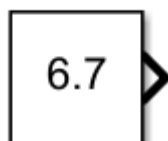


Рисунок 4.5 – Constant

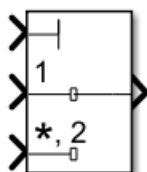


Рисунок 4.6 – Multipoint Switch

де верхня клема – керований вхід сигналу з реле;

1 та 2 – значення входу.

Також, важливим елементом цієї схеми є реле Relay (рисунок 4.7) Simulink/Discontinuties.

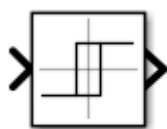


Рисунок 4.7 – Реле

Принцип роботи даної схеми буде базуватись на роботі реле, котре буде ловити сигнал рівня заряду з інформаційного виходу батареї й змінювати значення та напрям протікання струму. Таким чином, коли значення заряду на блоці батарей буде рівним 100% то постійний струм буде протікати в напрямку розряду батареї, тобто від плюсової клем до мінусової, а коли інформаційний аналоговий вихід заряду батареї покаже значення рівне нулю, то реле перемкне

напряг струму і він буде заряджати батарейний блок. Такий цикл буде повторюватись велику кількість разів.

Перейдемо до налаштувань ключових елементів схеми. Першим налаштуємо реле (рисунок 4.8).

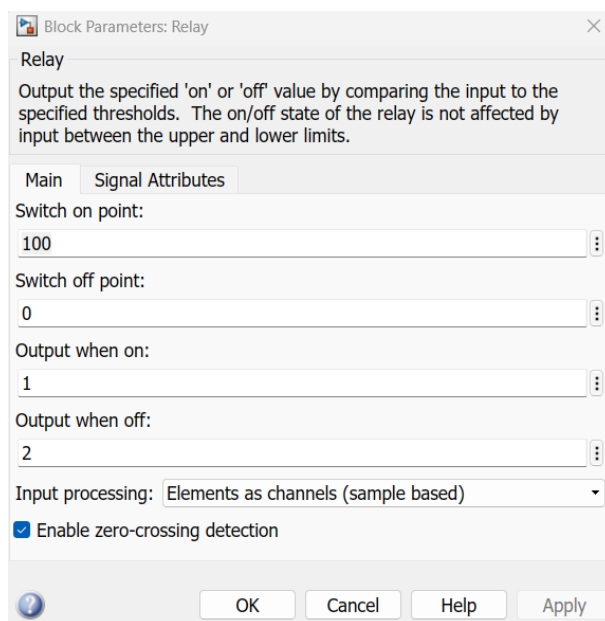


Рисунок 4.8 – Налаштування правильної роботи реле

Другим налаштуємо блок батарей для лі-іон (рисунок 4.9).

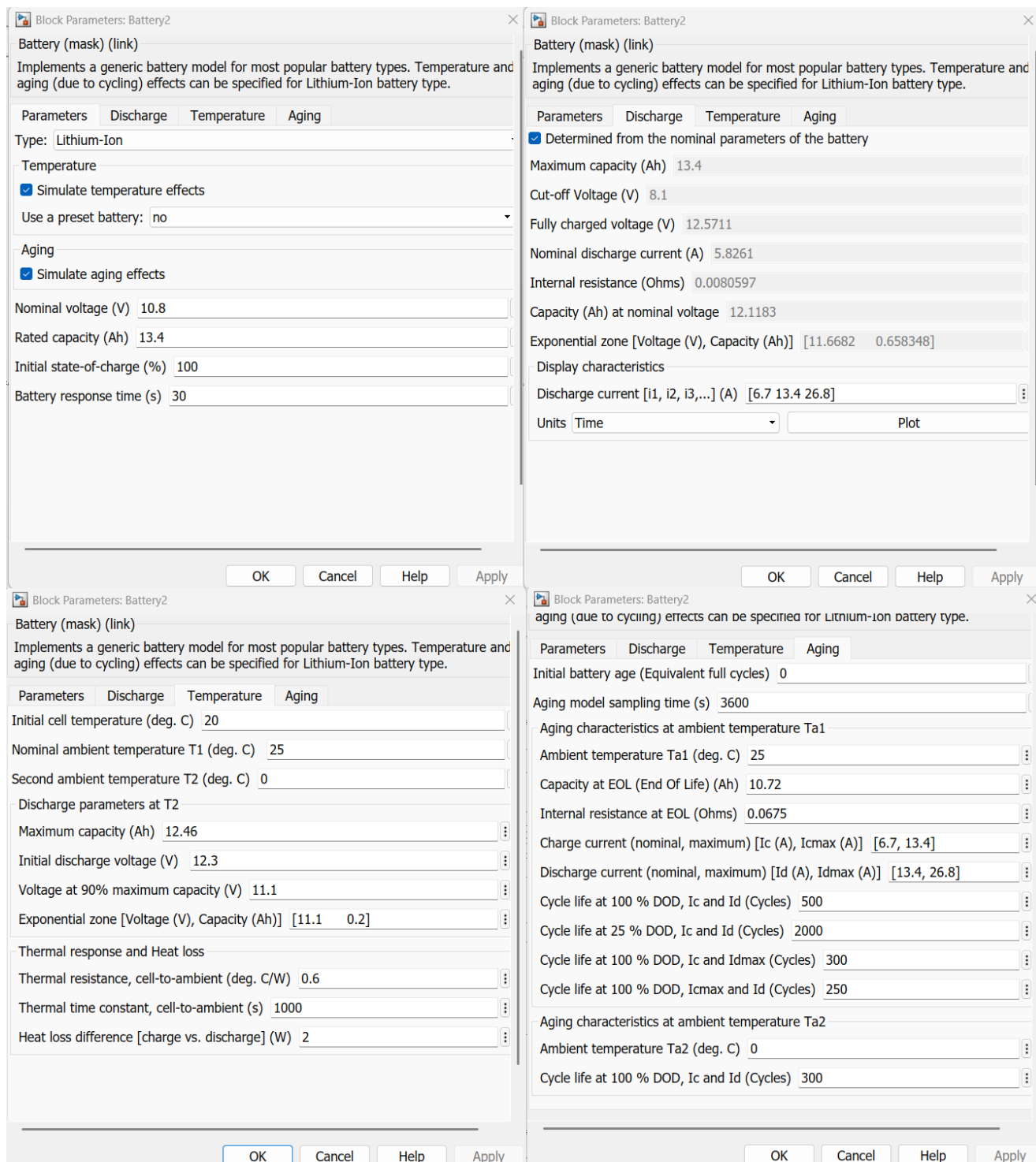


Рисунок 4.9 – Налаштування блоку батарей лі-іон

Зібрана схема для розряду лі-іон батареї на 0.5C представлена на рисунку 4.10.

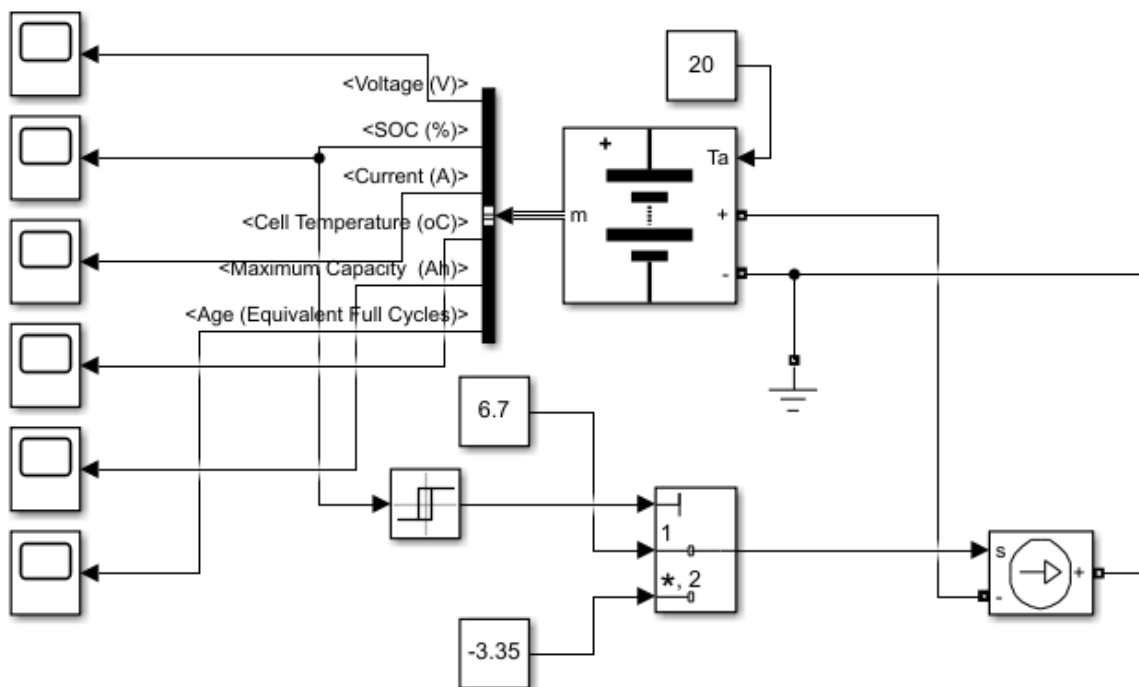


Рисунок 4.10 – Схема розряду лі-іон блоку батарей при 0.5C

Але, нам необхідно зробити ще дві схеми для цього блоку батарей на 1C та 2C розряд, для комфортного порівняння. Для цього використаємо попередньо створену схему, але замінемо значення постійного струму розряду на відповідні номінали (рисунок 4.11).

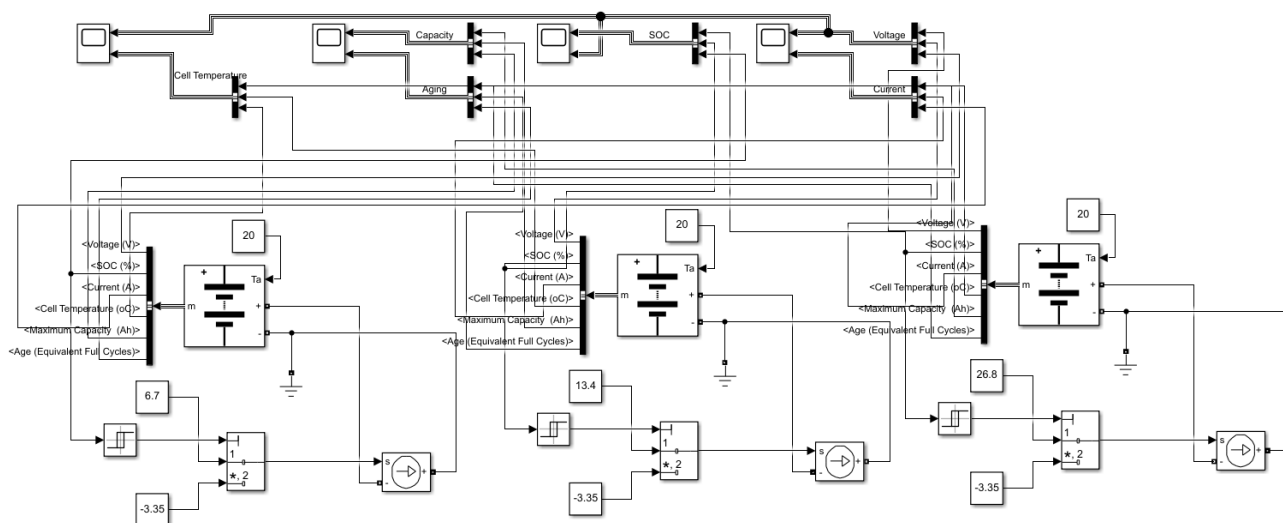


Рисунок 4.11 – Схема розряду лі-іон блоку батарей при 0.5C, 1C та 2C

Перейдемо до свинцево-кислотного блоку батарей. Схема буде виконана так само як і для лі-іон, але без врахування температур та старіння, через відсутність такої опції для даного типу батарей в цьому програмному пакеті.

Налаштування блоку представлено на рисунку 4.12, а схема на рисунку 4.13.

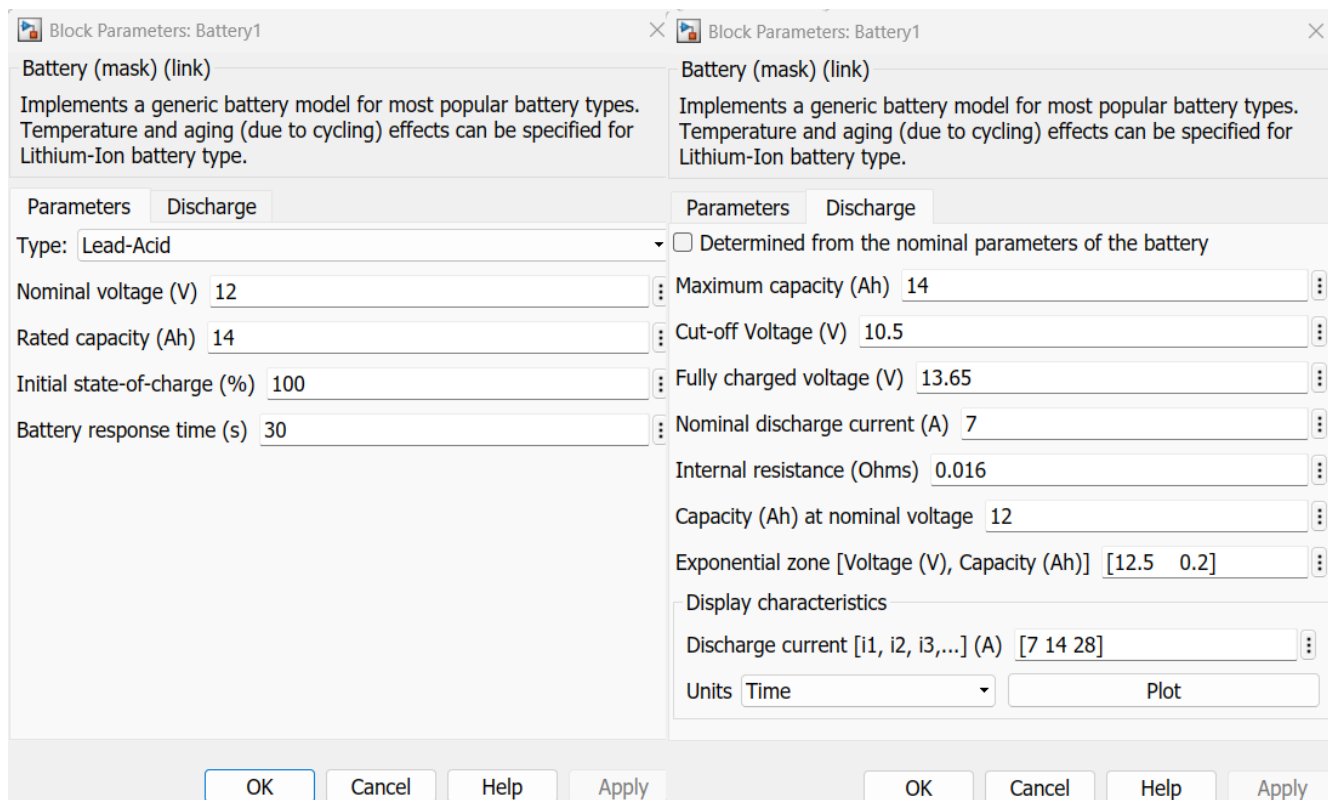


Рисунок 4.12 – Налаштування блоку батарей свинцево-кислотних

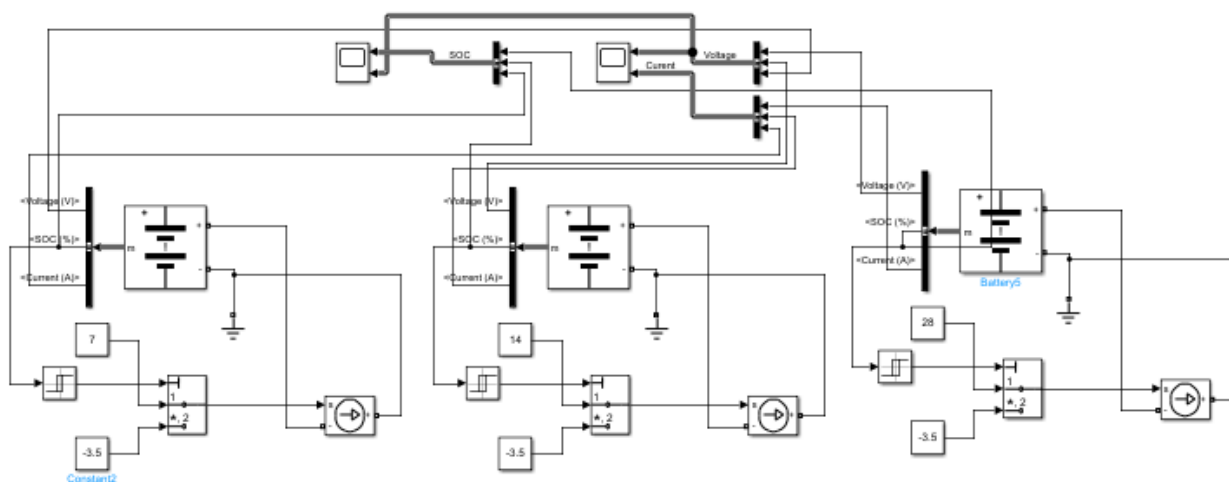


Рисунок 4.13 – Схема розряду свинцево-кислотного блоку батарей при 0.5C, 1C та 2C

Перейдемо до нікель-металогідридного блоку батарей. Схема буде виконана так само як і для лі-іон та свинцево-кислотного блоку, але без врахування температур та старіння, через відсутність такої опції для даного типу батарей в цьому програмному пакеті. Налаштування блоку представлено на рисунку 4.14, а схема на рисунку 4.15.

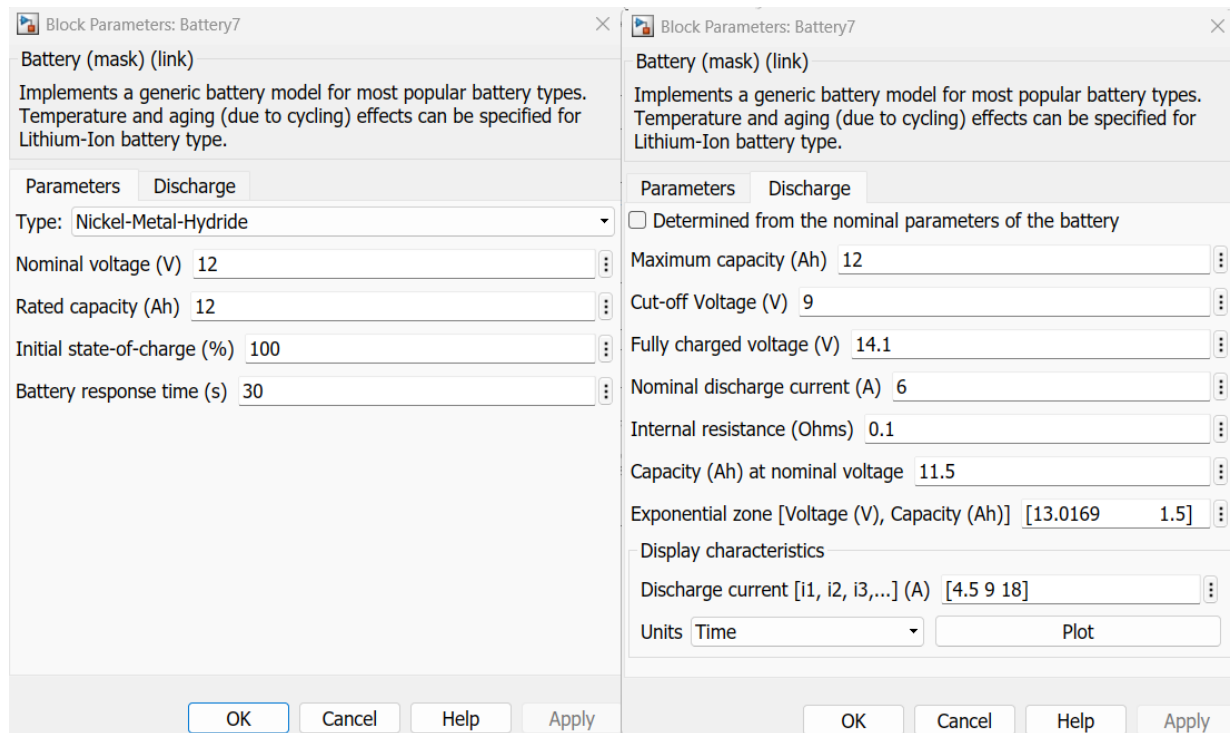


Рисунок 4.14 – Налаштування блоку батарей нікель-металогідридних

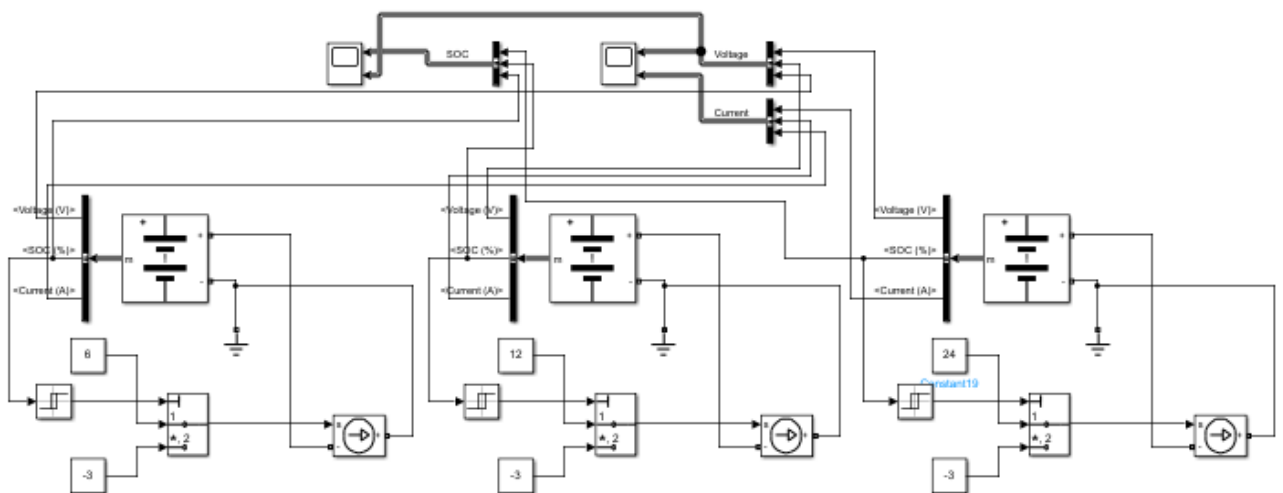


Рисунок 4.15 – Схема розряду нікель-металогідридного блоку батарей при 0.5C, 1C та 2C

4.4 Приведення графіків моделювання та їх аналіз

Виконавши побудову схем в підпункті 4.3, можна перейти до побудови та аналізу порівняльних характеристик кожного блоку батарей у вигляді графіків. Для цього, спочатку розглянемо математично розрахований графік розряду блоку на різні номінали струму. Першим буде лі-іонний блок. На рисунку 4.16 видно, що залежність напруги від часу має характерну для літій-іонних батарей

форму з відносно стабільною ділянкою плато, що зберігається більшість часу розряду при середньому та малому струмі. Так, при навантаженні 6.7 А ($\approx 0.5C$) блок демонструє стабільну роботу понад 2 години, з незначним просіданням напруги до ≈ 11.5 В, що свідчить про високу енергоефективність елементів NCR18650B у складі. При підвищенні навантаження до 13.4 А ($\approx 1C$), тривалість роботи знижується майже вдвічі, а напруга в кінці розряду стрімко падає, демонструючи чутливість до струмового навантаження.

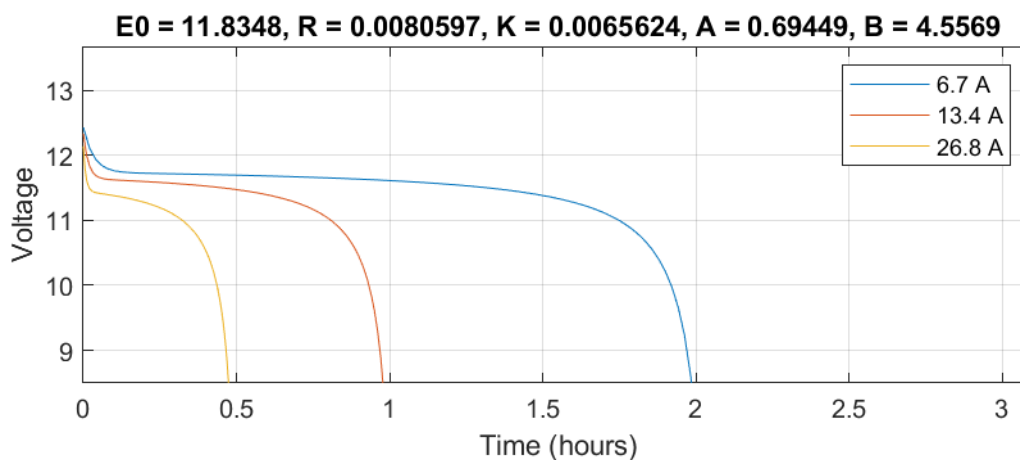


Рисунок 4.16 – Розряд лі-іонного блоку батарей при різних номіналах струму розряду

Найгірші результати спостерігаються при 26.8 А ($\approx 2C$) — тривалість роботи зменшується до менш ніж 30 хвилин, при цьому напруга на виході падає нижче 9 В ще до завершення циклу, що може бути критичним для систем, які потребують стабільного живлення. Це підтверджує, що навіть попри добру щільність енергії, літій-іонні батареї мають обмеження за струмом розряду, які важливо враховувати при виборі типу накопичувача для потужних навантажень.

Автоматично отримані значення параметрів E_0 , R , K , A та B у верхній частині графіка використовуються для подальшого моделювання розряду та побудови емпіричних моделей з високою точністю. Параметр E_0 (електрорушійна сила) визначає початкову напругу батареї без навантаження при повному заряді й зазвичай є наближеною до максимальної напруги елемента або всього блоку. R характеризує внутрішній опір батареї, який впливає на спад напруги при протіканні струму: чим більший опір, тим більші

втррати. Параметр K відповідає за нахил плато напруги під час розряду, тобто враховує зміну напруги в залежності від рівня заряду (SOC). Значення A відображає амплітуду експоненційної частини — воно вказує, наскільки різко напруга падає на початку або в кінці розряду. Нарешті, B є сталою експоненційного спадання і визначає, з якою швидкістю змінюється ця експоненційна складова під час процесу розряду батареї. У сукупності ці п'ять параметрів дозволяють створити точну математичну модель реального джерела живлення та використовуються для побудови апроксимації в Simulink.

Також, описуючи дані графіки розряду, можна поділити криві на декілька зон. Так наприклад на рисунку 4.17 показано типовий розрядний графік батареї з виділенням трьох характерних зон: експоненційної, номінальної та зони крутого спаду.

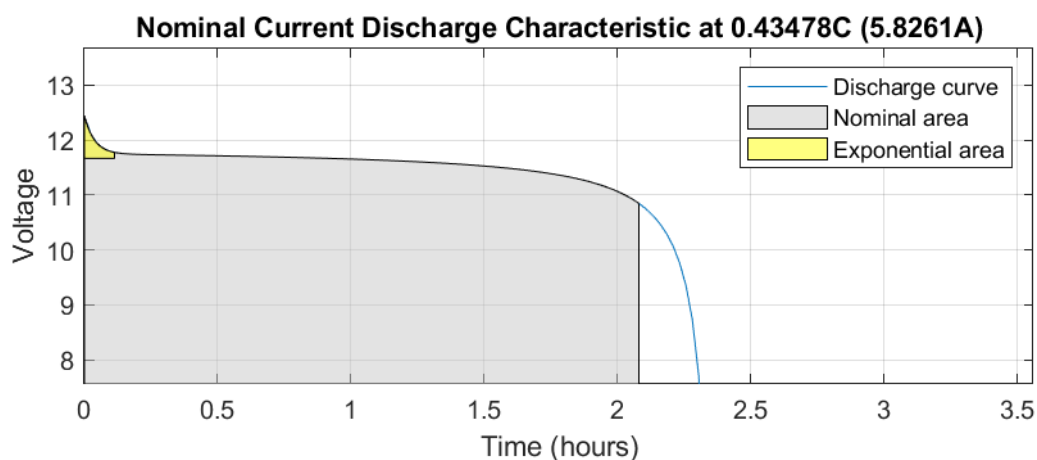


Рисунок 4.17 – Зони розряду лі-онного блоку батарей

Жовта зона на графіку відповідає експоненційному спаданню напруги, яке спостерігається на самому початку розряду. У цей період напруга падає досить швидко, що пов'язано з формуванням внутрішніх електрохімічних процесів у батареї. Цей спад зазвичай є коротким, але важливим для розуміння швидкодії елемента.

Сіра область позначає номінальну зону роботи батареї. У цьому діапазоні напруга залишається стабільною, а батарея працює з максимальним енергетичним потенціалом. Саме ця частина кривої забезпечує більшість споживаної енергії, що і є основною характеристикою ефективності акумулятора при практичному використанні.

Остання частина кривої, де відбувається різке падіння напруги, свідчить про виснаження заряду та перехід до завершення розрядного процесу. Цей спад є критичним для електронних систем, які потребують стабільного живлення, тому він часто визначає точку відключення навантаження.

Такий поділ дозволяє більш детально оцінити якість розряду елемента, побачити наскільки ефективно він підтримує напругу в номінальній зоні та зрозуміти поведінку при досягненні межі заряду. Крім того, це дає змогу калібрувати математичну модель у Simulink відповідно до реальних характеристик, розділивши вплив експоненційного та лінійного спадання на напругу.

Наступним покажемо графік розряду свинцево-кислотного блоку батарей (рисунок 4.18). При розряді струмом 7 А, що приблизно відповідає номінальному значенню, крива напруги демонструє класичну поведінку свинцево-кислотного акумулятора. Початкова напруга становить близько 12.6–12.8 В, після чого спостерігається коротка експоненційна фаза з незначним спадом. Далі батарея працює стабільно в номінальній зоні з повільним зниженням напруги в межах 12.5–11.5 В. Тривалість такої фази становить близько двох годин, що свідчить про достатню енергоємність для помірного навантаження. Наприкінці розряду напруга різко знижується, сигналізуючи про повне вичерпання заряду.

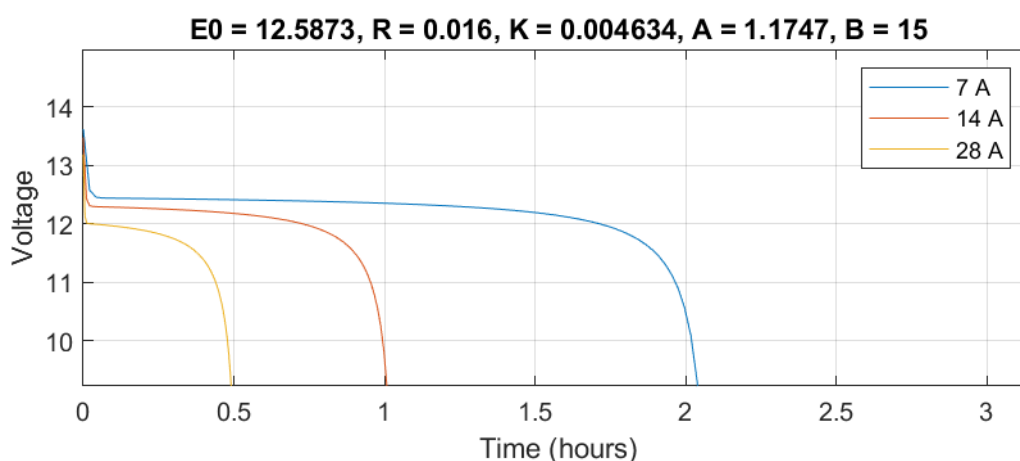


Рисунок 4.18 – Розряд свинцево-кислотного блоку батарей при різних номіналах струму розряду

При розряді струмом 14 А, який удвічі перевищує номінальний,

спостерігається помітніший спад напруги в перші хвилини роботи. Експоненційна зона стає більш вираженою, що вказує на зростання втрат напруги через внутрішній опір. Номінальна зона роботи скорочується до приблизно 1 години, при цьому середня робоча напруга знижується до ~11.7 В. Висока сила струму пришвидшує електрохімічні реакції та нагрів батареї, що впливає на її ефективність.

При максимальному навантаженні 28 А розряд відбувається надзвичайно швидко — менше ніж за 30 хвилин. Напруга просідає вже на старті, падаючи нижче 12 В за лічені секунди. Основна частина розряду відбувається в зоні, близькій до мінімально допустимої напруги, що означає значне перевантаження батареї. Такий режим може бути допустимий лише для короткочасного використання, оскільки призводить до швидкого зносу, глибокого розряду і втрати ресурсу.

Отже, розрядні характеристики свинцево-кислотного блоку підтверджують, що дана технологія є придатною для стабільного середнього навантаження, однак швидко втрачає ефективність при перевищенні номінального струму. Водночас низький внутрішній опір дозволяє підтримувати стабільну напругу у межах допустимого навантаження. Це корелює з розрахунками попередніх розділів, де було визначено доцільність застосування Yuasa NP7-12 у помірно-динамічних режимах.

Щодо зон розряду, то графік на рисунку 4.19 ілюструє типовий профіль для свинцево-кислотного акумулятора при номінальному струмі 7 А (що відповідає 0.5С для блока Yuasa NP7-12).

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

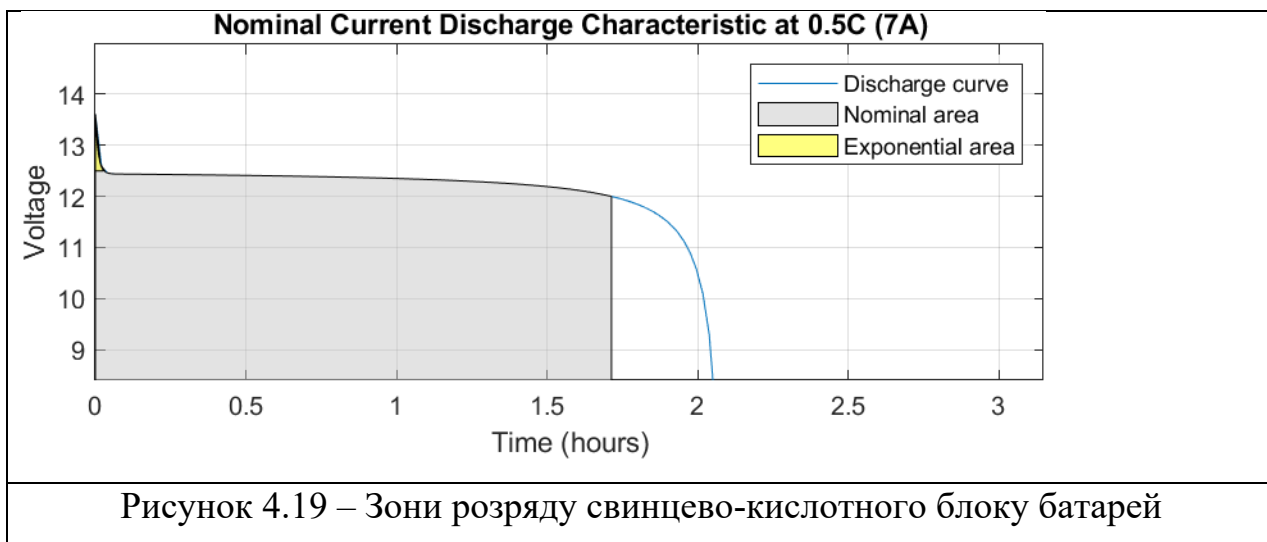


Рисунок 4.19 – Зони розряду свинцево-кислотного блоку батарей

Умовно весь розряд можна поділити на три характерні ділянки.

Експоненційна зона (exponential area) — позначена жовтим кольором, триває перші 5–10 хвилин після початку розряду. На цій ділянці спостерігається стрімке падіння напруги від початкового значення (понад 13.5 В) до ~12.3–12.4 В. Цей спад обумовлений активацією внутрішніх процесів у батареї: перерозподіл іонів, наростання внутрішнього опору, реакція електроліту на навантаження. Незважаючи на коротку тривалість, саме ця ділянка часто спричиняє помилкове сприйняття про стан батареї.

Номінальна зона (nominal area) — основна частина розряду, відображена сірою заливкою. Тривалість складає приблизно 1.7–1.8 години. Напруга повільно зменшується в межах 12.4–11.5 В, що вважається стабільною робочою зоною для свинцево-кислотних АКБ. У цьому діапазоні батарея забезпечує оптимальне поєднання енергоефективності та безпеки. Саме ця зона найбільше цікавить інженерів при моделюванні систем резервного живлення або джерел енергії середньої потужності.

Кінцева зона (cut-off zone) — характеризується стрімким обвалом напруги після досягнення порогового рівня заряду. Починається приблизно після 1.9 години розряду. Тут напруга стрімко знижується нижче 11 В, сигналізуючи про необхідність завершення циклу. У цій зоні зростає ризик глибокого розряду, що шкодить акумулятору.

Такий поділ підтверджує типову поведінку свинцево-кислотних батарей:

вони добре витримують стабільні навантаження, проте чутливі до глибоких розрядів і швидких змін струму. Саме тому для коректного використання таких елементів у практичних системах необхідне дотримання оптимального струмового режиму, що було також підтверджено у попередніх розрахунках дипломної роботи.

Нікель-металогідридний блок демонструє характерну залежність напруги розряду від часу, яка суттєво змінюється залежно від прикладеного навантаження. На рисунку 4.20 зображено три криві розряду при струмах 6 А, 12 А та 24 А, які ілюструють типову поведінку цього типу накопичувача.

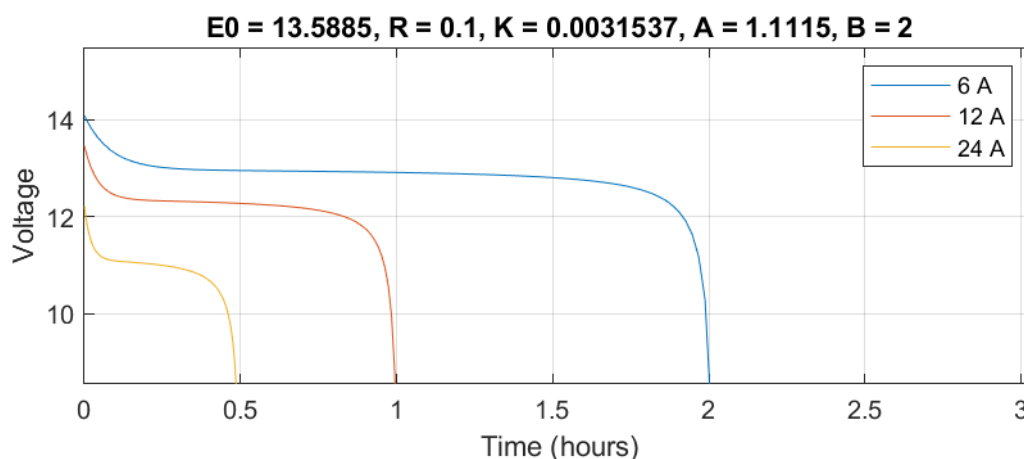


Рисунок 4.20 – Розряд нікель-металогідридного блоку батарей при різних номіналах струму розряду

За навантаження 6 А блок працює понад 2 години, зберігаючи напругу в межах від 12.5В до 11.5 В протягом основної частини часу, що свідчить про стабільний розряд і хорошу адаптованість до середнього струмового режиму. При навантаженні 12 А час розряду скорочується приблизно до 1 години, однак напруга залишається у безпечних межах, підтверджуючи здатність NiMH-блоку працювати при струмі, близькому до номінального. У разі застосування струму 24 А ($\approx 2C$), час розряду стрімко зменшується до 30 хвилин, а напруга швидко втрачається вже на початку розряду. Це вказує на внутрішні обмеження нікель-металогідридної хімії при високих струмах, на відміну від літій-іонних аналогів, які краще адаптовані до пікового навантаження.

Отримані параметри моделі підтверджують ці особливості: початкова ЕРС E_0 становить 13.6В, що відповідає блоку з десяти послідовно з'єднаних

елементів по 1.2 В. Внутрішній опір $R = 0.1$ Ом є вищим, ніж у Li-ion та Pb-acid батарей, що пояснює більший спад напруги при навантаженні. Параметр $K = 0.00315$ свідчить про відносно стабільну зону плато на кривій напруги, а значення $A = 1.1115$ та $B = 2$ описують початкове експоненційне падіння напруги, яке тут є помірним, але помітним при високому струмі.

Загалом, нікель-металогідридний блок забезпечує тривалість роботи, порівнянну з літєвими батареями при середніх струмах, однак проявляє значну деградацію характеристик при великих струмах навантаження. Це слід враховувати при виборі типу накопичувача для задач з піковими струмами або частими імпульсними навантаженнями. У таких умовах NiMH менш придатні до використання в порівнянні з іншими дослідженими типами.

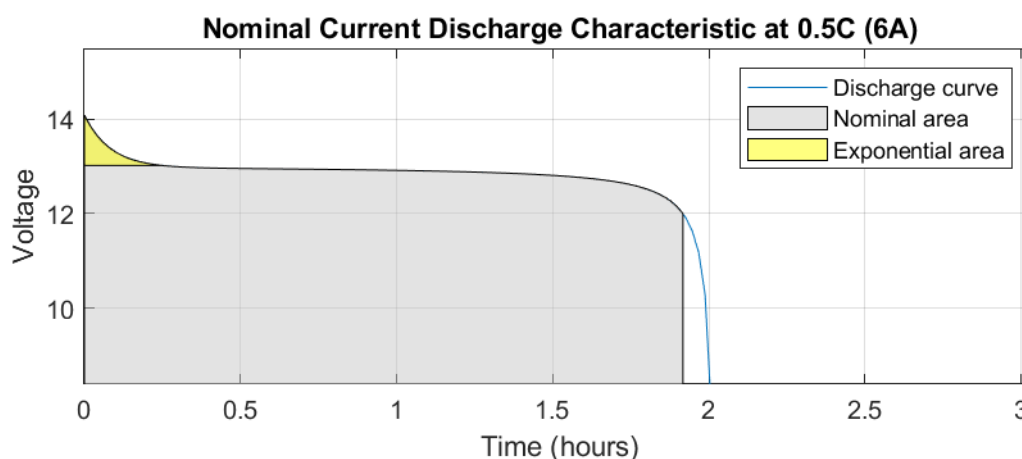


Рисунок 4.21 – Зони розряду нікель-металогідридного блоку батарей

На рисунку 4.21 зображено номінальну характеристику розряду нікель-металогідридного блоку при струмі 6 А (що відповідає 0.5C). Графік чітко ілюструє три ключові області розряду. Перша — експоненційна зона (виділена жовтим кольором), у якій напруга стрімко зменшується одразу після початку розряду. Це є типовою поведінкою для металогідридних батарей, зумовленою хімічною інерційністю та адаптацією електродів. Така зона може тривати кілька хвилин або до 10 % від загального часу.

Далі настає номінальна зона (позначена сірим), у якій напруга зберігається практично сталою — близько 13 В протягом майже 1.8 години. Саме в цій зоні енергія акумулятора використовується найефективніше, а графік демонструє майже горизонтальне плато. Це підтверджує стабільну роботу

NiMH-блоку при середньому навантаженні.

Остання частина — різкий спад напруги, який сигналізує про повне вичерпання заряду. Як видно з графіка, ця зона настає ближче до 2 години та триває дуже коротко. У цей момент напруга зменшується нижче 10 В, що є граничним рівнем для подальшої безпечної експлуатації.

Загалом, дана характеристика підтверджує, що нікель-металогідридний блок найкраще проявляє себе при навантаженнях, близьких до номінальних. Ефективна зона розряду становить понад 90 % від загального часу, що свідчить про високу стабільність напруги в середньому струмовому режимі. Це робить NiMH-блоки хорошим вибором для задач, де важлива постійність енергопостачання протягом фіксованого часу. Однак їхня придатність до пікових навантажень, як вже було проаналізовано вище, є обмеженою.

Тепер, приведемо графіки лі-іонного блоку, на котрих видно зміну напруги в вольтах та струму в амперах за часом в секундах, в нормальній циклічній роботі схеми, тобто заряд та розряд. На рисунку 4.22 наведено результати моделювання циклічної роботи літій-іонного блоку батареї при різних значеннях струму зарядки та розрядки: синя крива відповідає струму 1С, помаранчева — 0.5С, а жовта — 2С. Графік складається з двох частин: у верхній частині зображено зміну напруги у вольтах, а в нижній — зміну струму в амперах, обидва — відносно часу (в секундах).

Із графіка напруги видно, що в кожному циклі (розряд–заряд) блок демонструє типовий спад напруги під час розряду та її підйом під час заряджання. Для струму 0.5С (помаранчева крива), напруга змінюється повільніше, а коливання менш виражені. Це підтверджує вищу стабільність роботи акумулятора при малих струмах, відповідно до відомих експлуатаційних характеристик Li-ion елементів.

Синя крива (1С) демонструє більш виражене просідання напруги під час розряду — до приблизно 4.5 В у деякі моменти. Це є характерною реакцією батареї на більший струм навантаження, яка супроводжується зростанням внутрішніх втрат (IR drop).

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Жовта крива (2С) демонструє найгіршу поведінку: кожен розряд призводить до стрімкого зниження напруги, в окремих випадках — нижче 4 В, що вказує на межу допустимого розряду. Така поведінка може бути критичною для систем із високими вимогами до надійності, адже навіть короточасні просідання напруги можуть призвести до аварійного завершення роботи.

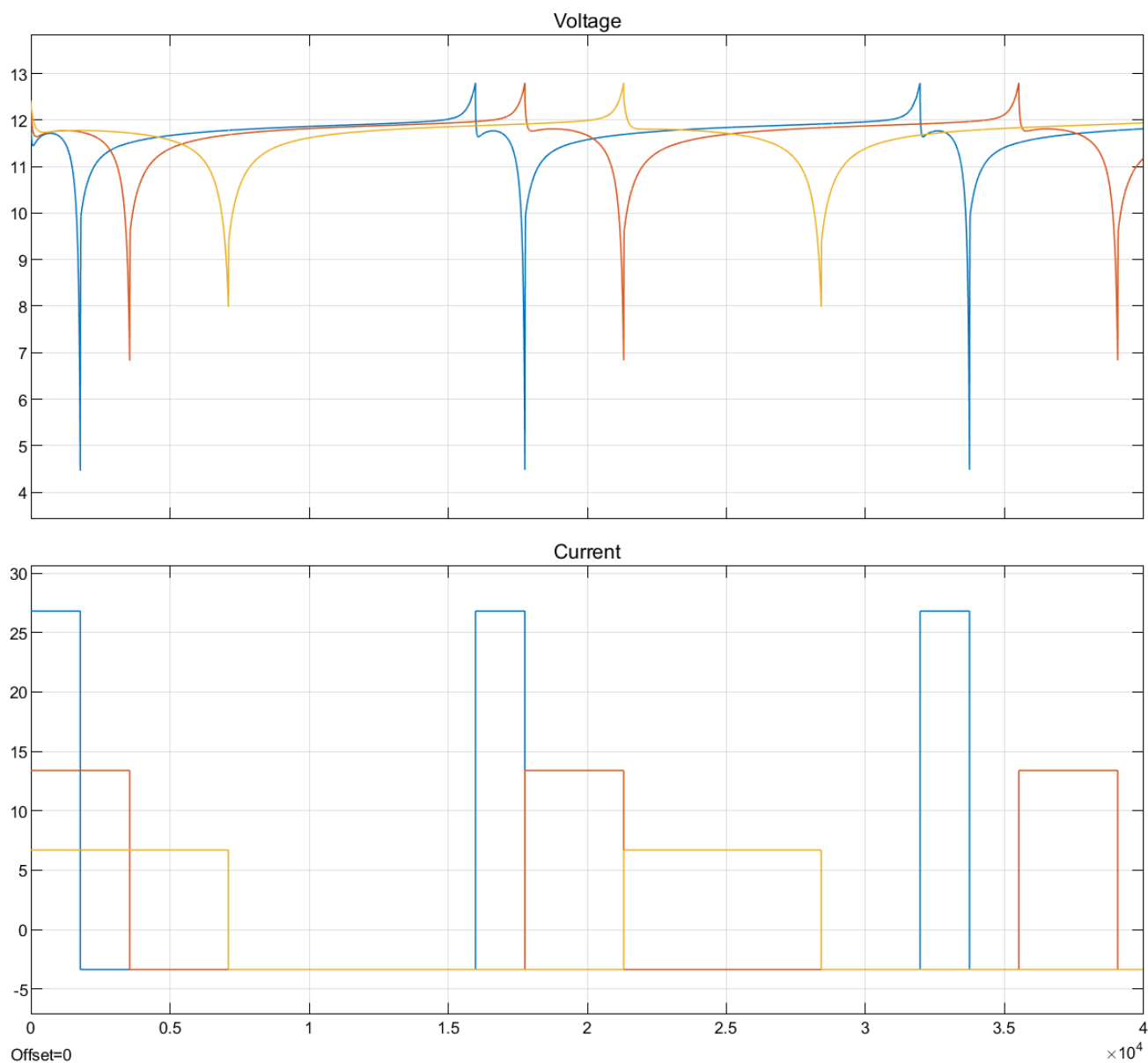


Рисунок 4.22 – Розряд/заряд лі-іонного блоку батарей

На графіку струму чітко видно прямокутні імпульси, які відображають послідовність розряд/заряд. Під час заряджання струм стає від'ємним, що показано нижче нульової осі. Таке чергування є характерним для реальних умов роботи накопичувача в гібридних або автономних системах живлення. Зокрема, кожен блок проходить через 3 основні цикли зарядки/розрядки, що імітує

повторювану роботу акумулятора у прикладних сценаріях (наприклад, накопичення енергії у ВДЕ або електротранспорті).

Загалом, модель підтверджує добру придатність літій-іонного блоку до циклічної експлуатації, особливо при струмах до 1С. При 2С спостерігається помітна деградація напруги, що має бути враховано при виборі струмового режиму у реальних застосуваннях.

На рисунку 4.23 зображено зміну напруги та струму свинцево-кислотного блоку батарей під час циклічної роботи, яка включає етапи заряду та розряду при різних струмах: 0.5С, 1С і 2С. Жовтим кольором показано режим з розрядним струмом 2С, синім — 1С, а помаранчевим — 0.5С.

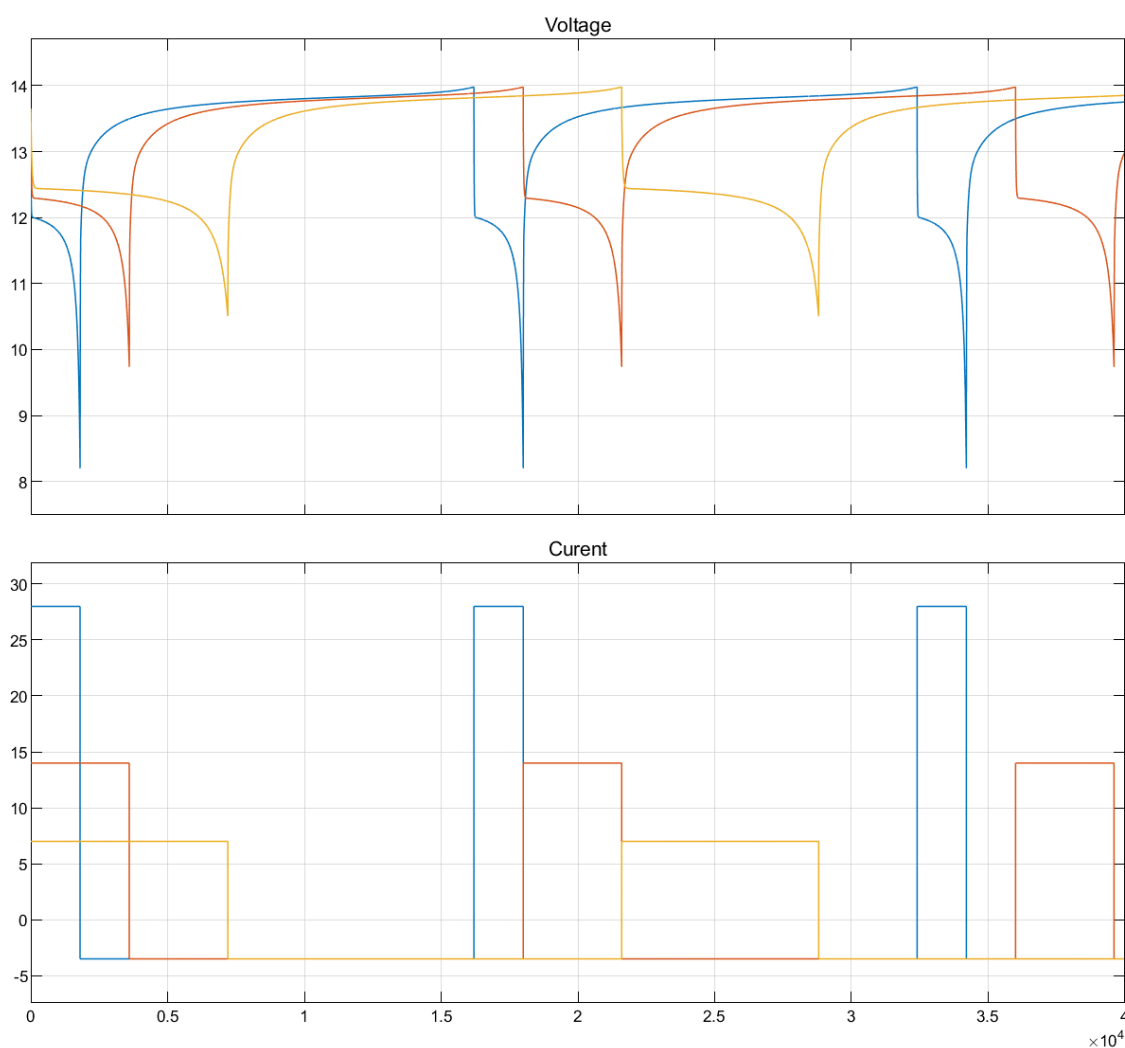


Рисунок 4.23 – Розряд/заряд свинцево-кислотного блоку батарей

Графік напруги вгорі демонструє характерну поведінку для свинцево-кислотних акумуляторів. У всіх трьох режимах напруга на початку розряду різко падає, що пов'язано з високим внутрішнім опором та особливостями

хімічного процесу в електродах батареї. Найбільше просідання напруги спостерігається в режимі 2С, що повністю відповідає фізиці процесу — при високому струмі втрати енергії на внутрішньому опорі стають значними, і ефективність використання батареї падає.

Після початкового спадання, напруга поступово стабілізується, утворюючи зону плато, яка є найтривалішою у режимі 0.5С. Ця зона характерна для нормального розряду свинцево-кислотних акумуляторів — при невеликому струмі хімічна реакція встигає підтримувати стабільну напругу довше. Наприкінці кожного циклу напруга різко падає, що вказує на повну втрату залишкового заряду та необхідність завершення циклу.

На графіку струму вниз видно, що впродовж симуляції реалізовано кілька повноцінних циклів заряд/розряд, у кожному з яких напруга піднімається до максимального значення при заряді (негативний струм) і спадає при розряді (позитивний струм). Найбільший розрядний струм — у режимі 2С — чергується з доволі коротким зарядним періодом. У режимі 0.5С процес триває довше, але енергетичні втрати в такому випадку менші.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що свинцево-кислотний блок демонструє типову поведінку для цієї технології: високе стартове просідання напруги, обмежене плато та швидке завершення розряду при великих струмах. На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що оптимальним для цього типу накопичувача є режим 0.5С — саме він забезпечує найменші втрати енергії та найбільшу стабільність вольт-амперних характеристик під час роботи. Також це повністю узгоджується з аналітичними даними, описаними у попередніх підпунктах дипломної роботи.

На рисунку 4.24 зображено динаміку зміни напруги та струму для нікель-металогібридного батарейного блоку під час періодичного навантаження, яке включає етапи заряду і розряду. Розглянуто три основні режими: 0.5С (жовтий колір), 1С (помаранчевий) і 2С (синій). Ці криві дозволяють побачити, як поводить себе даний тип накопичувача під різним струмовим навантаженням, а також оцінити його стабільність, реакцію на зміну струму та потенційний час

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автономної роботи.

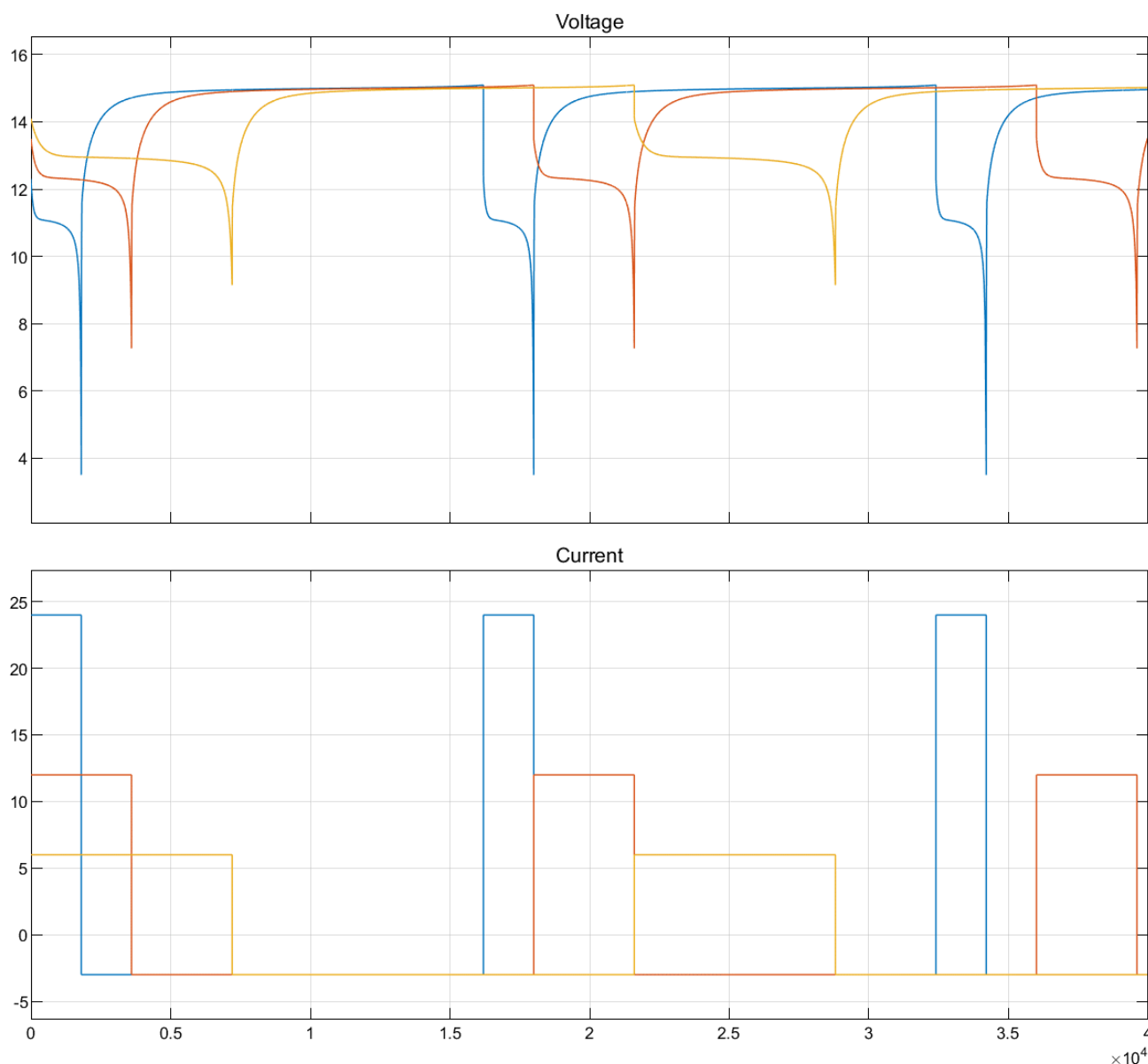


Рисунок 4.24 – Розряд/заряд нікель-металогідридного блоку батарей

У верхній частині графіка представлена зміна напруги. Спостерігається типовий для NiMH-елементів характер розряду — спочатку напруга різко падає, далі утворюється відносно рівна ділянка (плато), а ближче до повного розряду — знову суттєве зниження. Вплив струму добре простежується: при вищому навантаженні (2C) падіння напруги більш виражене, ніж при розряді струмом 0.5C. Таким чином, чим більше струм, тим менший час роботи та більші втрати.

Графік струму (нижня частина рисунка) показує чергування фаз заряду (від'ємні значення) та розряду (додатні значення). Всі три режими мають чітко окреслену структуру, що відповідає однаковому циклу для порівняння. Добре

видно, що при збільшенні струму заряд/розряд відбувається швидше, але при цьому спостерігається помітніший спад напруги.

Що цікаво — при струмі 0.5C батарея поводить себе найстабільніше, з мінімальними коливаннями напруги, що цілком логічно, враховуючи її тип. При 1C можна досягти кращого співвідношення між часом роботи та втратами, а от при 2C — попри коротший цикл, ефективність значно падає. У момент переходу між фазами заряд/розряд видно характерне “перевищення” напруги, що також типово для NiMH — це пояснюється їх хімічною інерційністю та тепловим ефектом.

У цілому, результати цього моделювання повністю підтверджують аналітичні припущення з попередніх розділів. Такий тип батарей чудово підходить для сценаріїв, де потрібна середня потужність, стабільність напруги та витривалість до циклічних навантажень.

Наступними наведено графіки зміни заряду та напруги від часу, для літій-іонного блоку батарей. На рисунку 4.25 подано графіки зміни рівня заряду (SOC) та напруги у часі для літій-іонного блоку батарей при трьох режимах навантаження: 0.5C (жовта лінія), 1C (помаранчева) та 2C (синя). Як видно з верхньої частини графіка, SOC змінюється лінійно — це характерно для роботи моделі з постійними струмами заряду та розряду. Після досягнення 0% рівня заряду відбувається негайне переключення в режим заряду, що забезпечує симетричну «пилкоподібну» форму.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

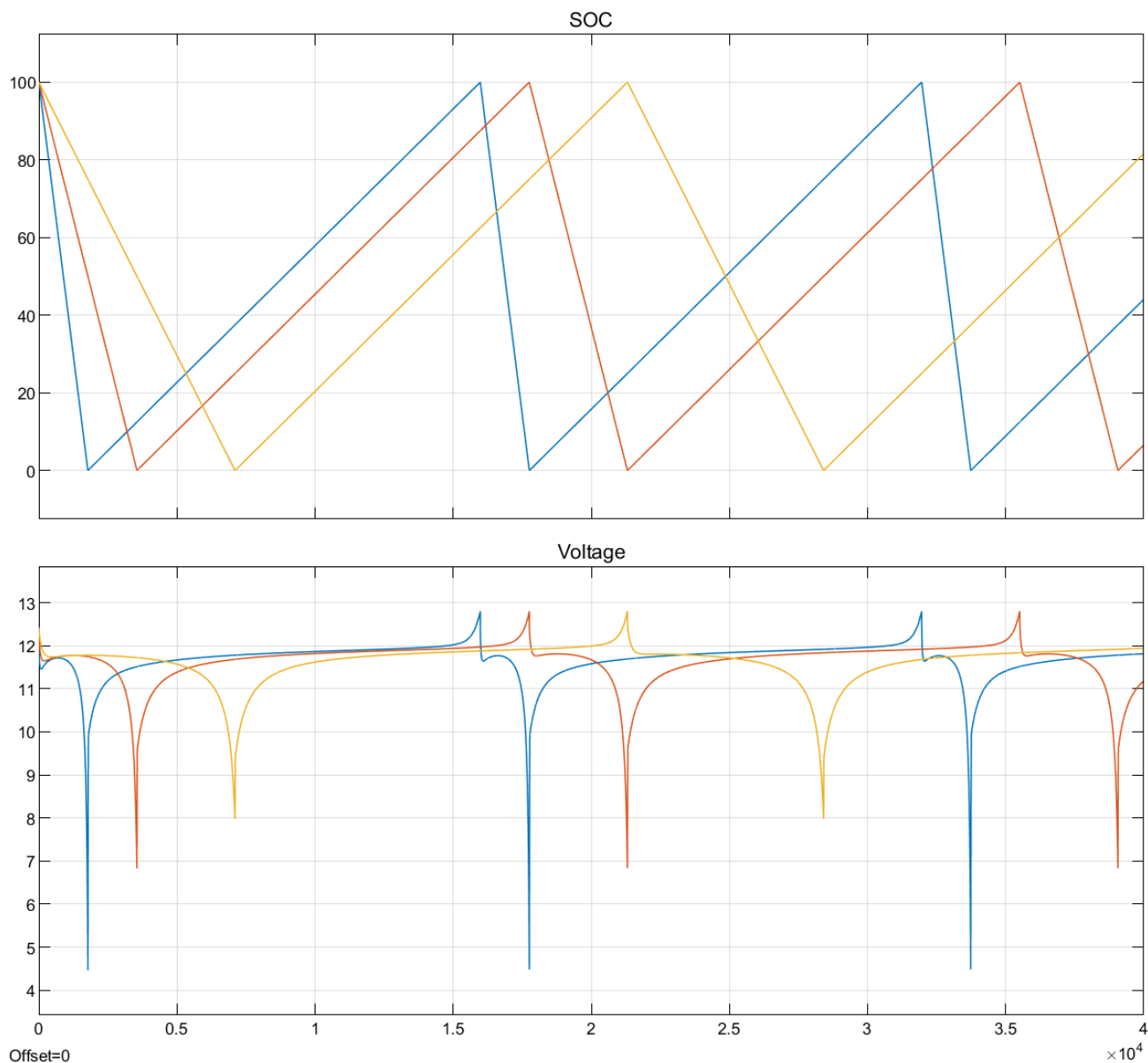


Рисунок 4.25 – Рівень заряду та напруги в літій-іонному блоці

У нижній частині графіка представлено напругу блоку. Крива має характерну форму для літій-іонної хімії: на початку заряду/розряду є короткий перехідний процес (піки або провали), далі — напруга входить у зону плато, а наприкінці розряду знову помітно падає.

Цікаво, що напруга при досягненні 0% SOC (тобто повного розряду) не знижується до нуля, як це могло б здатися. Це пояснюється тим, що в реальних літій-іонних елементах розряд припиняється ще до того, як напруга опуститься до 0 В — зазвичай є встановлене граничне значення (наприклад, від 2.5 В до 3.0 В на елемент), нижче якого батарею не розряджають, щоб уникнути деградації. У нашому випадку використовується модель блоку з номінальною

напругою близько 12 В, тому й на 0% SOC вона зберігає залишкову напругу.

Також помітно, що це залишкове значення при повному розряді різниться для кожного навантаження: при 2С (синя лінія) воно найнижче, при 0.5С (жовта) — вище. Це пов'язано з ефектом падіння напруги на внутрішньому опорі батареї. Чим більший струм, тим сильніше падіння напруги ($U = IR$), отже й напруга на виході за однакового SOC буде нижчою при вищому навантаженні.

Наступним розглянемо динаміку роботи свинцево-кислотного блоку батарей під час циклічного заряджання та розряджання. Графіки SOC (верхня частина) та напруги (нижня частина) ілюструють реакцію батареї на різні рівні навантаження: 0.5С (жовтий), 1С (помаранчевий) та 2С (синій). Подібно до попередніх типів накопичувачів, заряд змінюється лінійно відповідно до прикладеного струму, утворюючи симетричні трикутні цикли.

Особливість саме кислотної батареї полягає в її поведінці на графіку напруги. Відразу після подачі навантаження (початок розряду) спостерігається виражене просідання напруги. Це пов'язано з більш високим внутрішнім опором свинцево-кислотного елемента, особливо при роботі на високі струми (2С, синя лінія). Такий ефект особливо помітний під час кожного запуску розрядного циклу.

Значення напруги після досягнення 0% заряду не дорівнює нулю. У моделі задано граничну розрядну напругу (cut-off), що запобігає повному розряду й моделює реальні умови експлуатації. Помітно, що ця залишкова напруга відрізняється залежно від величини струму як і у літій-іонному блоці — за більших струмів вона нижча через збільшене падіння напруги на внутрішньому опорі.

На етапах заряду напруга зростає нелінійно. Свинцево-кислотні батареї мають специфіку газоутворення при перезаряді, тому навіть при однаковому струмі форма графіка в цій зоні є крутішою, ніж для літій-іонних акумуляторів. Особливо при 2С (синій графік) видно значний піковий «сплеск» напруги наприкінці заряду, що імітує перенапругу при швидкому заряджанні. Все це зображено на рисунку 4.26.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

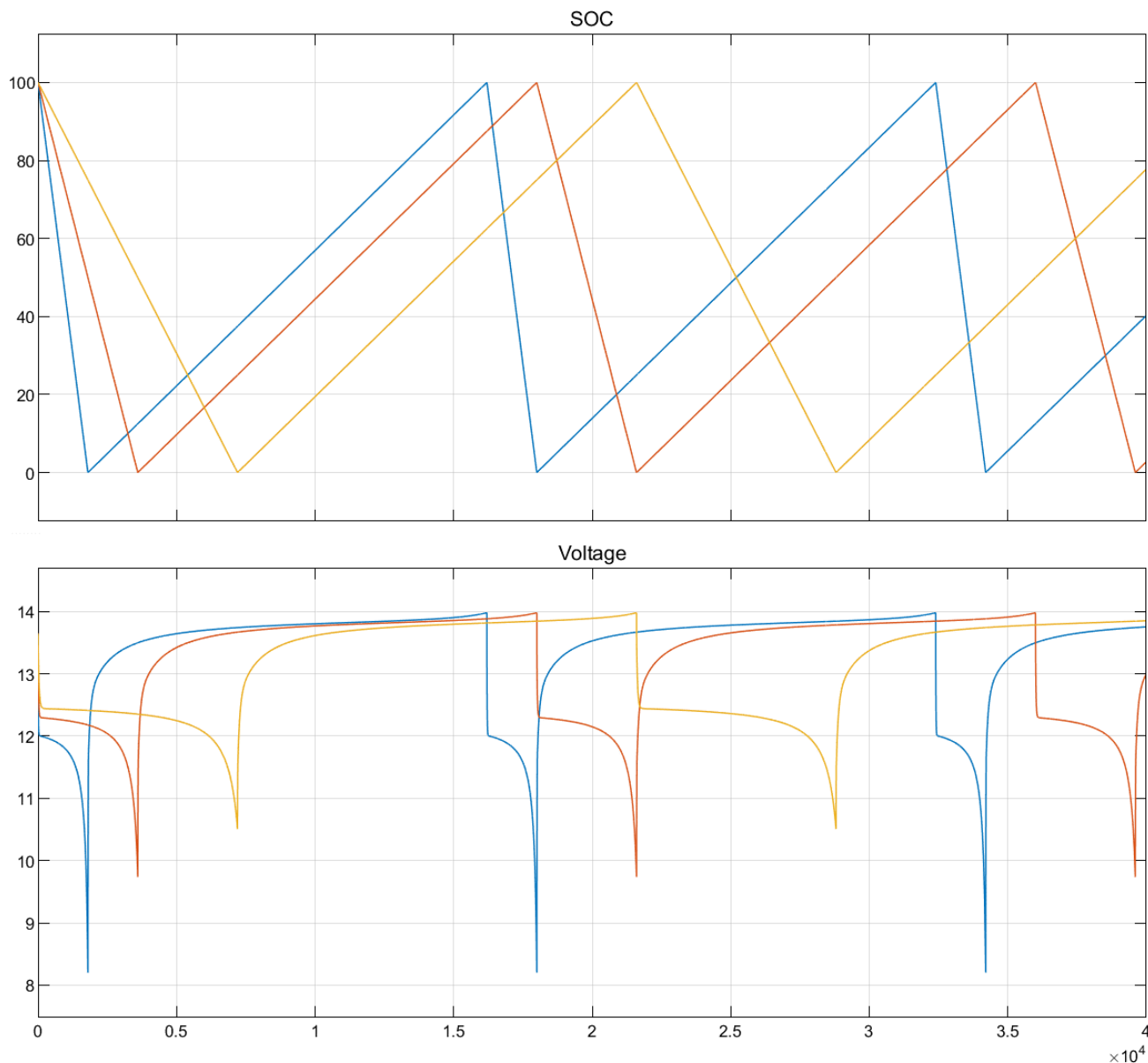


Рисунок 4.26 – Рівень заряду та напруги в свинцево-кислотному блоці

Також варто відзначити, що амплітуда коливань напруги при переході між режимами заряд/розряд є вищою, ніж у літій-іонному випадку. Це зумовлено хімічною інерційністю та більш вираженим внутрішнім опором акумулятора.

Загалом, отримані графіки підтверджують теоретичні уявлення про роботу свинцево-кислотних джерел живлення. Вони добре імітують напругу на клеммах батареї при різних навантаженнях та підтверджують, що такі елементи менш стабільні при високих струмах у порівнянні з літій-іонними або NiMH батареями.

На рисунку 4.27 зображено зміну стану заряду (SOC) та напруги на клеммах нікель-металогідридного блоку батарей (NiMH) протягом циклічної зарядки та

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕВ11.09.141.007.ПЗ

Арк.

88

розрядки при різних струмах: жовта лінія — 0.5C, помаранчева — 1C, синя — 2C. Графік дозволяє простежити характерну реакцію NiMH акумуляторів у порівнянні з іншими типами накопичувачів.

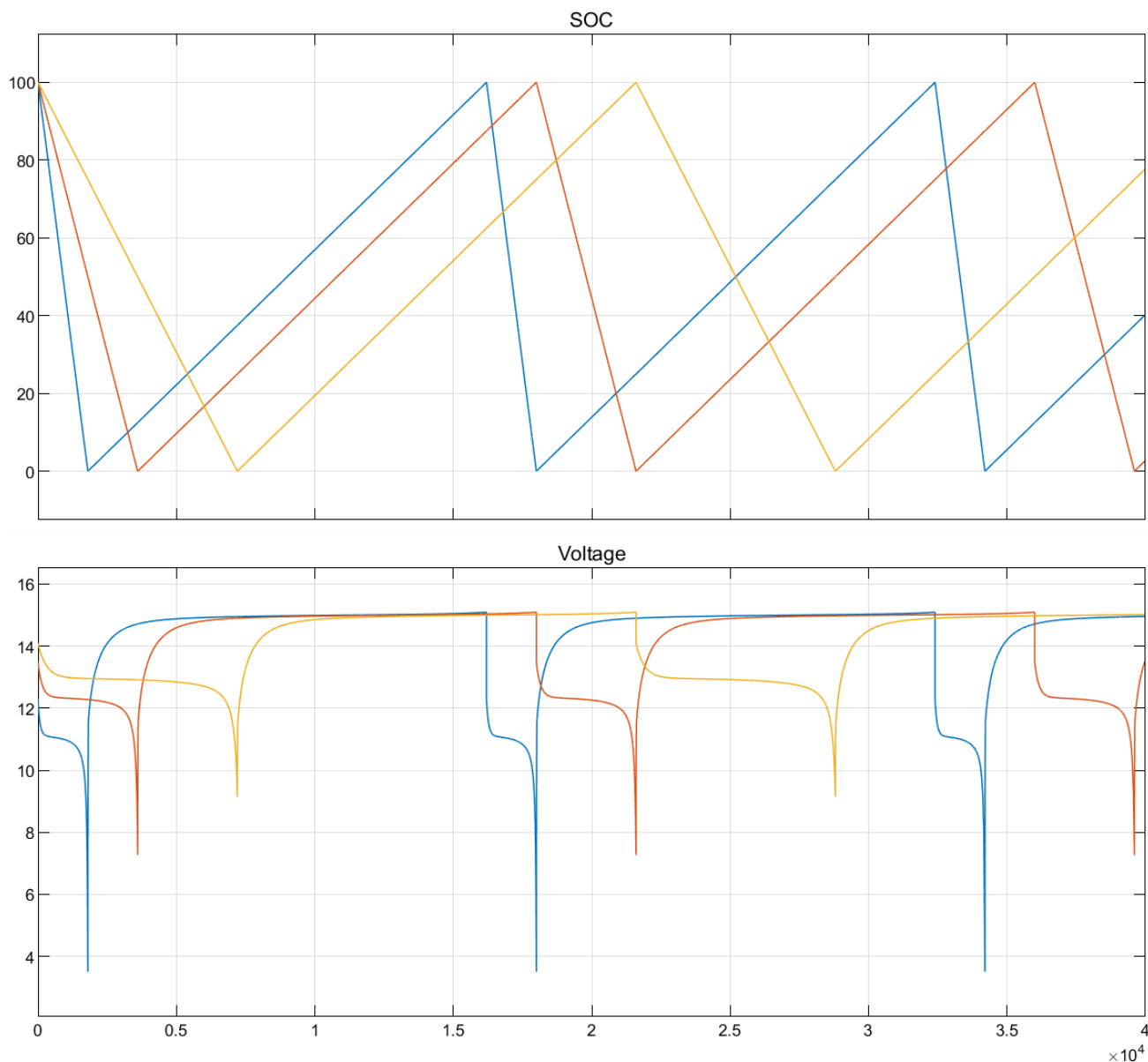


Рисунок 4.27 – Рівень заряду та напруги в нікель-металогідридному блоці

SOC демонструє стабільну лінійну залежність — це типовий і очікуваний результат для моделі, яка не враховує складних деградаційних механізмів або ефектів пам'яті, що властиві NiMH у реальних умовах. Рівні нахилів графіка SOC залежать від величини струму: чим вищий струм, тим швидше заряд або розряд. Це підтверджується більш крутим спадом або підйомом синьої лінії (2C).

На графіку напруги видно, що нікель-металогідридні елементи мають

дещо іншу динаміку порівняно з літій-іонними або кислотними. Зокрема, під час розряду напруга NiMH батарей спадає поступово, без різких провалів. Особливо помітна це для 0.5C (жовта крива), де напруга майже постійна протягом більшої частини циклу. Це відповідає реальній поведінці таких батарей, які відомі своєю стабільною напругою на плато до моменту глибокого розряду.

Примітним є те, що при однаковому 0% SOC залишкова напруга для кожного режиму відрізняється. Наприклад, при високому струмі 2C (синя крива) напруга знижується до мінімального рівня, тоді як при 0.5C вона залишається вищою. Такий ефект пов'язаний з падінням напруги на внутрішньому опорі та температурними впливами, які були змодельовані у Simulink. Крім того, під час зарядки видно, що напруга зростає до певного плато, а потім стабілізується — типовий сценарій для NiMH батарей без перенапруги.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що NiMH-блок у моделюванні демонструє високу стабільність при середніх та низьких струмах і є доволі прогнозованим у поведінці, що робить його привабливим у тих додатках, де потрібна тривала робота з помірним струмом. Водночас, при високих навантаженнях спостерігається істотне зниження напруги, що обмежує їх ефективність у швидкодинамічних системах.

На рисунку 4.28 зображено зміну напруги та температури літій-іонного блоку батарей протягом кількох циклів заряджання й розряджання за трьох різних режимів струму: синім — 1C, помаранчевим — 0.5C, жовтим — 0.25C. З графіка чітко видно, що інтенсивність тепловиділення безпосередньо залежить від величини прикладеного струму: що вищий струм — то стрімкіше зростає температура елемента.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

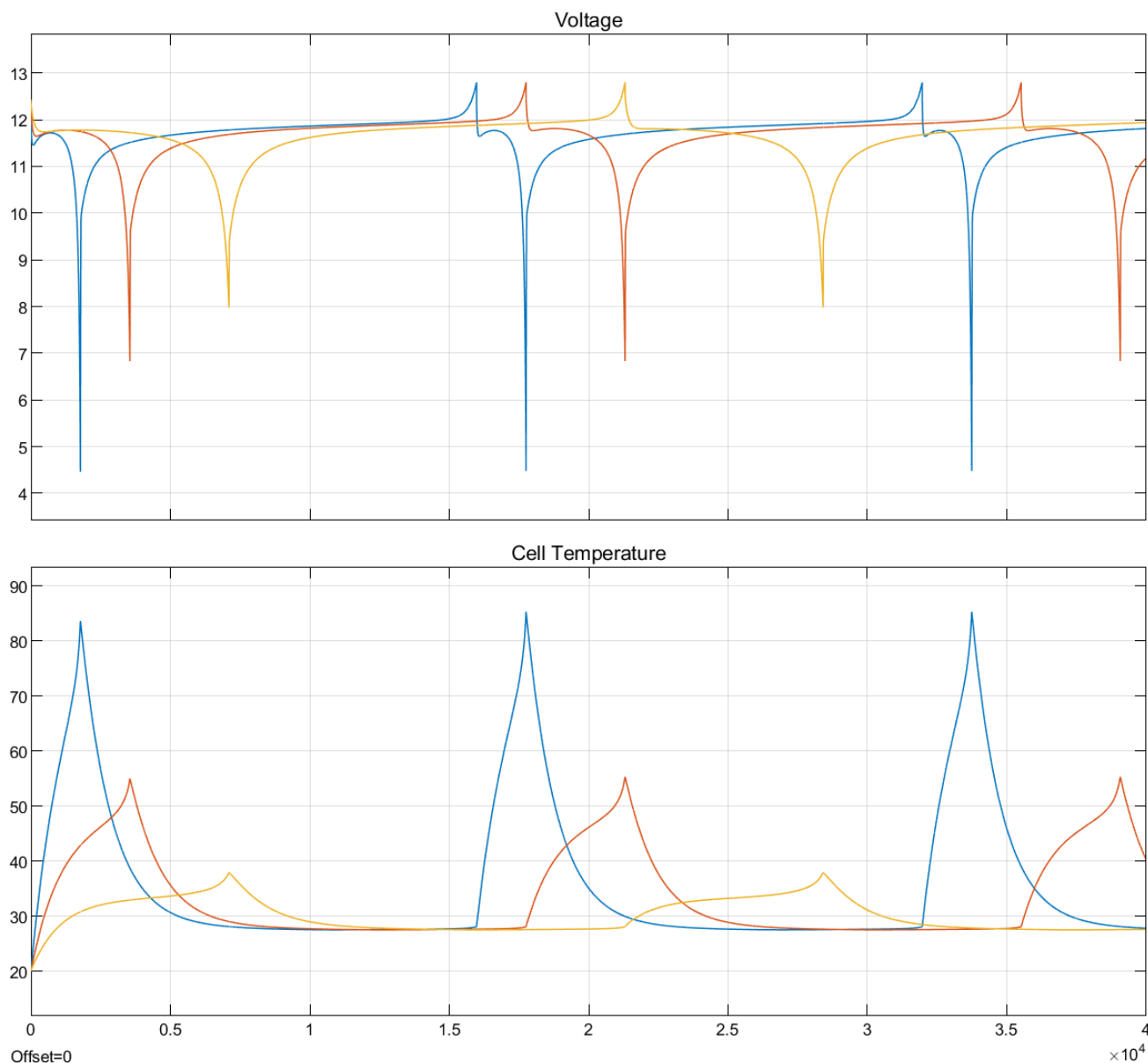


Рисунок 4.28 – Температура та напруга від часу для літій-іонного блоку батарей

У нижньому полі графіка представлено динаміку зміни температури комірки батареї. При найбільшому струмі (2C) піки температури досягають близько 85 °С. Це пов'язано з тим, що у процесі заряду та розряду в батареї виникають внутрішні втрати енергії, які переходять у тепло — переважно за рахунок внутрішнього опору елемента. Тобто, чим вищий струм, тим більше падіння напруги на внутрішньому опорі та, відповідно, тим більше теплове навантаження.

Варто звернути увагу, що при середньому навантаженні (1C) температура підвищується вже менш критично — приблизно до 50 °С – 55 °С, а при мінімальному режимі (0.5C) — до помірних 30 °С – 32 °С, що майже не

перевищує температуру довкілля. Така поведінка є типовою для літій-іонних акумуляторів, у яких ефективність і безпека роботи тісно пов'язані з температурним режимом.

Затримка у зниженні температури після завершення активної фази (заряду чи розряду) пояснюється високою теплоємністю матеріалів батареї — тепло не встигає миттєво відводитись, особливо за відсутності активного охолодження. Це можна побачити за згладженими спадними ділянками графіка після кожного піку.

Отже, графік демонструє, як струм впливає не лише на тривалість роботи батареї, а й на її тепловий стан. Такий аналіз дозволяє зробити висновок про доцільність обмеження струму заряду/розряду, аби уникнути перегріву й зберегти ресурс батарей у системах з високими вимогами до надійності.

Підсумовуючи, можна зазначити, що у підпункті 4.4 було проведено ґрунтовне порівняння результатів моделювання трьох типів енергетичних накопичувачів — літій-іонного, свинцево-кислотного та нікель-металогідридного блоків. Отримані графіки розряду та зарядно-розрядних процесів дозволили виявити характерні особливості кожного типу, визначити їхню поведінку при різному навантаженні, а також оцінити ефективність і стабільність в умовах циклічного режиму роботи.

Літій-іонна батарея, як показано на рис. (4.1, 4.17, 4.22) продемонструвала найбільш стабільну характеристику в зоні плато при середніх струмах (0.5–1С). При струмі 6.7 А вона підтримувала напругу понад 11.5 В майже протягом двох годин, що свідчить про високу ефективність акумулятора NCR18650B. Утім, при підвищенні навантаження до 2С спостерігався стрімкий спад напруги, що вказує на обмеження за струмом. Особливо це помітно на рисунку 4.22, де видно значне просідання напруги під час кожного циклу. Температурний аналіз (рис. 4.28) підтвердив, що літій-іонний блок схильний до перегріву при високих струмах: температура перевищувала 80 °С при 2С, тоді як при 0.5С вона залишалась майже на рівні температури навколишнього середовища. Важливо відзначити, що навіть при повному розряді (SOC = 0%) напруга не падає до

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нуля, оскільки в моделі враховано поріг відключення для запобігання глибокому розряду.

Свинцево-кислотна батарея (рисунки 4.18–4.19, 4.23, 4.26) проявила себе як стабільна лише в умовах помірного навантаження. При розряді струмом 7 А напруга трималась на рівні від 12.5В до 11.5 В майже дві години, однак при 14 А тривалість зменшувалась удвічі, а при 28 А — не перевищувала пів години. Графік струму і напруги (рис. 4.23) чітко демонструє значне стартове просідання напруги через внутрішній опір батареї. Аналіз SOC (рис. 4.26) показав типову симетричну «пилку», однак із більш глибокими просіданнями напруги на 0% заряду, що свідчить про чутливість до глибокого розряду. Також характерним є виражений стрибок напруги в кінці фази зарядки, що обумовлено хімічними властивостями Pb-acid батарей.

Нікель-металогідридна батарея, як видно з рисунків (4.20, 4.21, 4.24 і 4.27), продемонструвала найбільш рівномірну напругу у зоні плато. Навіть при розряді 6 А (0.5C) напруга залишалася стабільною понад 90 % часу. SOC (рис. 4.27) змінювався лінійно, а напруга мала менше коливань у порівнянні з іншими типами. Водночас при 2C спостерігалось суттєве просідання напруги, хоча воно менш різке, ніж у випадку зі свинцево-кислотними батареями. Така поведінка пояснюється більшою внутрішньою стабільністю NiMH хімії при середніх навантаженнях, але недостатньою адаптованістю до пікових струмів. Під час переходів між фазами заряд/розряд видно характерні коливання напруги, що є типовими для NiMH-елементів.

Підсумовуючи, літій-іонний блок виявився найпридатнішим для динамічних систем і режимів із середнім струмом, однак вимагає ефективного теплового керування. Свинцево-кислотна батарея оптимально працює при сталих навантаженнях і помірному струмі, але швидко втрачає ефективність при перевантаженні. Нікель-металогідридна — найстабільніша при середньому навантаженні, особливо у зоні плато, однак її ефективність помітно знижується при високих струмах. Таким чином, моделювання в Simulink повністю підтвердило теоретичні висновки, зроблені у попередніх розділах дипломної

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи, і дозволило наочно оцінити доцільність використання кожного типу накопичувача у конкретних умовах.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Проведено ґрунтовне дослідження чотирьох різних типів накопичувачів енергії низької напруги, які є найбільш поширеними у сучасних електротехнічних системах. До аналізу були включені: літій-іонний акумулятор Panasonic NCR18650B, свинцево-кислотна батарея Yuasa NP7-12, нікель-металогідридний елемент Panasonic BK300SCE та суперконденсатор Maxwell BCAP3000.

На підставі детального аналізу та моделювання всіх зазначених моделей було встановлено, що літій-іонні батареї мають високу питому енергію через їх хімічні властивості, але в той же час, через конструкцію та хімію є чутливими до перегріву. Свинцево-кислотні акумулятори залишаються популярними, попри їх велику вагу, бо мають відносно невелику ціну в порівнянні з лі-іонними блоками, та непоганий ресурс на перенавантаження. Виявлено, що NiMH-акумулятори мають досить стабільну напругу протягом розряду, але все ж таки демонструють зниження ефективності при великих навантаженнях. Суперконденсатори ж узагалі мають інший принцип дії, і хоч їхня ємність невелика, зате потужність вражаюча — особливо у короткострокових пікових режимах.

Результатами розрахунків необхідної кількості елементів кожного типу для забезпечення енергоспоживання у 100 Вт·год визначено реальну доцільність використання кожного типу. Суперконденсаторний блок вийшов в рази важчим і більшим за інші, що наочно показує обмеження цієї технології в системах, де є обмеження на критичні вагу або об'єм.

При оцінці застосування накопичувачів у конкретних сценаріях (системах відновлюваної енергетики, джерелах безперебійного живлення (UPS) та електротранспорті) виявилось, що Li-ion чудово підходить для автономних систем, де потрібна мала вага й стабільна робота. Свинцево-кислотні батареї є ефективними для UPS у випадку, коли несуттєва наявність великої маси, але важлива вартість. Суперконденсатори виявилися перспективними для

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електротранспорту у якості допоміжного, саме через свою здатність швидко віддавати енергію.

Для розроблених моделей у програмному середовищі Matlab/Simulink отримано графіки розряду при різних струмах (0.5C, 1C, 2C), графіки SOC, напруги та температурної поведінки. Результати моделювання показали залежність характеру зміни напруги і температури при збільшенні струму у літій-іонного елемента та стабільність роботи NiMH при середніх навантаженнях.

Зокрема, літій-іонні акумулятори мають найбільший спад напруги при великому струмі (2C), і водночас найвищу температуру — до 85 °C. Свинцево-кислотна батарея швидко просідає на початку розряду, а NiMH демонструє більш рівну напругу, але теж погано реагує на велике навантаження. SOC у всіх моделей мав лінійний характер, однак залишкова напруга при 0% SOC була різною через різні втрати на внутрішньому опорі, що залежало від типу батареї та струму.

На підставі узагальненої оцінки аналізу результатів проведених досліджень можна зробити висновок про те, що літій-іонні батареї є найуніверсальнішими — вони легкі, ємні, добре працюють при циклічних навантаженнях. Свинцево-кислотні елементи виграють у вартості, але програють за ефективністю й температурною стабільністю. NiMH — це певний компроміс щодо основних властивостей за виключенням застосування в системах з наявними високими струмами. Суперконденсатори — це зовсім інша категорія, з унікальними перевагами, але й з обмеженнями, які не дозволяють їх використання як повноцінне джерело енергії.

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Міжнародна енергетична агенція (IEA). Global EV Outlook 2023: Trends in electric mobility. Париж: IEA, 2023. 256 с. Доступно: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
2. Літій-іонні акумулятори: принцип роботи, переваги та недоліки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dv-gazeta.info/news/li-ion-akumulyatori-printsip-roboti-perevagi-ta-nedoliki.html>
3. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, 2015, Vol. 18(5), pp. 252–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
4. Battery University. BU-205: Types of Lithium-ion. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
5. ProBattery. Акумулятор Li-ion 21700 ВАК 3.7V 4800mAh [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://probattery.com.ua/akkumulyatory/akkumulyator-li-ion-21700-bak-37v-4800mah>
6. Battery recycling: Li-ion and more [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-705-how-to-recycle-batteries>
7. Battery University. Lead Acid Battery Information [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201a-overview-of-lead-acid-batteries>
8. Свинцево-кислотний акумулятор – Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Свинцево-кислотний_акумулятор
9. Avtoto. Види автомобільних акумуляторів / Блог компанії «Автото» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://avtoto.com.ua/ua/blog/chasti-pitannya-faq/vidi-avtomobilnih-akumulyatoriv.html>
10. Discover Battery. Lead-acid Battery Performance and Temperature Effects [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://discoverbattery.com>
11. Electro-bike. Свинцево-кислотний акумулятор 12V 12Ah [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electro-bike.com.ua/akkumulyatory/svintsovo-kislotnyj-akkumulyator-12v-12ah>
12. International Energy Agency (IEA). Global lead-acid battery market and recycling [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/global-lead-acid-battery-market-and-recycling>
13. Toyota. Hybrid Battery Technology Overview. Toyota Motor Corporation. Hybrid Battery Technology Overview

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/29167877.html>
14. Battery University. BU-205: Types of Nickel-based batteries. Battery University. BU-205: Types of Nickel-based batteries [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-nickel-based-batteries>
 15. Backpacking Light. Cold Temperature Rechargeable Battery Performance. Backpacking Light. Cold Temperature Rechargeable Battery Performance [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://backpackinglight.com/cold-temperature-rechargeable-battery-performance/>
 16. Wikipedia. Нікель-металогідридний акумулятор. Нікель-металогідридний акумулятор – Wikipedia [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Нікель-металогідридний_акумулятор
 17. Materials Today. Nitta, N. et al., 2015. Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, 2015, Vol. 18(5), pp. 252–264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2014.10.040>
 18. Battery University. BU-209: Supercapacitor Basics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-209-supercapacitor-basics>
 19. Skill-Lync. Week 5 Challenge [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://skill-lync.com/student-projects/week-5-challenge-418>
 20. Huntkey Energy Storage. Зберігання енергії на суперконденсаторах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.huntkeyenergystorage.com/ua/supercapacitor-energy-storage/>
 21. Maxwell Technologies. Product datasheet: BCAP3000 P270 K04 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>
 22. University of Rochester. Performance of EDLCs at low temperatures [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hajim.rochester.edu/me/sites/gonzalez/research.html>
 23. eBay. Maxwell BCAP3000 P270 K04 2.7V 3000F Supercapacitor [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ebay.com/p/2155167862>
 24. IEA. Supercapacitor market forecast 2030 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/global-energy-storage-update-2023>
 25. Panasonic NCR18650B. Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/597043/PANASONICBATTERY/NCR18650B.html>

					ЕВ11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 26.Yuasa NP7-12. Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1456342/GSYUASABATTERY/NP7-12.html>
- 27.Panasonic. BK300SCE NiMH Cell [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.digitec.ch/en/s1/product/panasonic-bk300sce-battery-accu-rechargeable-12v-nimh-battery-11041678>
- 28.Maxwell Technologies. BCAP3000 P270 K04 – Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://maxwell.com/wp-content/uploads/2024/07/3003279-EN.3_DS_2.7V-3000F-Cell-BCAP3000-P270_20240704.pdf
- 29.Battery University. BU-205: Types of Lithium-ion [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion​;contentReference\[oaicite:4\]{index=4}](https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion​;contentReference[oaicite:4]{index=4})
- 30.Lucifer Lights. Li-ion battery capacity in the cold [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://luciferlights.net/en/li-ion-battery-cold>
- 31.Discover Battery. Why does temperature affect a battery’s available capacity? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://discoverbattery.com/support/learning-center/battery-101/why-does-temperature-affect-a-batterys-available-capacity>
- 32.HindlePower Inc. How does temperature affect stationary batteries? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.hindlepowerinc.com/hindle-institute/all-about-stationary-batteries-and-battery-chargers/temperature-effects-on-your-dc-system/how-does-temperature-affect-stationary-batteries>
- 33.Webb, K. Battery Sizing – Section 6. Oregon State University [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ESE471_files/Section%206%20Battery%20Sizing.pdf
- 34.Backpacking Light. Do rechargeable lithium-ion batteries lose charge in the cold? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://backpackinglight.com/forums/topic/do-rechargeable-lithium-ion-batteries-lose-charge-in-the-cold>
- 35.Fahad, S., Sharma, G. State of charge estimation for solar-powered supercapacitor systems // University of Rochester [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hajim.rochester.edu/ece/sites/gsharma/papers/FahadSOLARCapSOC201206398354.pdf>
- 36.Maxwell Technologies. Datasheet BCAP3000-P270-K04-K05 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aepint.nl/wp-content/uploads/2018/11/BCAP3000-P270-K04-K05.pdf>
- 37.Electronics Stack Exchange. How can I find temperature coefficient of a battery? [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

					EB11.09.141.007.ПЗ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

<https://electronics.stackexchange.com/questions/375793/how-can-i-find-temperature-coefficient-of-a-battery>

- 38.MDPI. Thermal behavior and safety challenges in lithium-ion batteries. Batteries, 2024, Vol. 10(7), Art. 220 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2313-0105/10/7/220>
- 39.NCBI / PubMed Central. Challenges in cold-temperature performance of Li-ion batteries [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9698970>
- 40.BatterySpace.com. Panasonic NCR18650B Rechargeable Li-ion Battery. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.batteryspace.com>
- 41.Digitec.ch. Panasonic Sub-C battery HHR300SCE (BK300SCE). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.digitec.ch>
- 42.Smartpowershop.co.uk. Yuasa NP7-12 Batteries Technical Specifications. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://assets.smartpowershop.co.uk/assets/files/15/36/41/yuasa-np7-12-batteries.pdf#:~:text=20hr%20to%201%20,A%29%2040%2F75>
- 43.DigiKey.com. Maxwell BCAP3000 P270 K04 – Supercapacitor Datasheet. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.digikey.com>
- 44.Grepow.com. Maximum Discharge Rate of Ni-MH Batteries. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.grepow.com>
- 45.BatteryBro.com. Panasonic NCR18650B Flat-Top Technical Specs. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.batterybro.com>
- 46.Battery University. BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://batteryuniversity.com>
- 47.Skeletontech.com. Supercapacitors Enable Grid-Friendly Fast Charging. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.skeletontech.com>
- 48.Fomin V. Comprehensive analysis of low-voltage energy storage systems / V. Fomin // Proceedings of the International Scientific Conference. — Warsaw, Poland: International Science Group, 2025. — IST № 250205092.
- 49.My.Avnet.com. Supercapacitors: Making Transport More Efficient. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://my.avnet.com>