

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ЛІПКО ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.314: 621.311.6

ДИСЕРТАЦІЯ
**СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИМИ БАТАРЕЯМИ
З ФУНКЦІЄЮ ЗБІЛЬШЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ**

Спеціальність 171 – Електроніка
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих
ідей, результатів і текстів мають посилання на відповідне джерело

Науковий керівник: Бондаренко Олександр Федорович, кандидат технічних
наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Ліпко Д. О. Системи керування акумуляторними батареями з функцією збільшення їх експлуатаційного ресурсу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 Електроніка – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, МОН України, Київ, 2025.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу продовження терміну експлуатації акумуляторних батарей шляхом використання нових засобів силової та інформаційної електроніки. Отримані нові науково обґрунтовані результати в сукупності є суттєвими для розвитку систем керування акумуляторними батареями з активним методом балансування, що можуть застосовуватись в акумуляторних батареях з модульною структурою.

Останніми роками суттєво зростає виробництво електротранспорту, стаціонарних накопичувачів енергії й різноманітних портативних пристроїв. Це сприяє тому, що виробництво літій-іонних акумуляторних батарей останнім часом дуже стрімко збільшується.

Системи керування акумуляторними батареями застосовуються в усіх сучасних акумуляторних батареях. Їх основною задачею є ефективно й тривале використання акумуляторної батареї. Робота системи керування безпосередньо впливає на ресурс акумуляторних батарей. Модернізація наявних систем керування є одним зі шляхів збільшення загального ресурсу акумуляторних батарей та уповільнення процесу їх деградації.

У першому розділі проведено аналіз типів сучасних акумуляторних батарей на основі літію та досліджено їх характеристики. Виконано огляд еквівалентних схем заміщення АБ. Проаналізовано особливості будови та застосування АБ в електротранспорті та стаціонарних накопичувачах енергії. Досліджено будову та функції систем керування АБ. Проведено класифікацію та порівняльний аналіз методів балансування АБ.

У другому розділі наведено аналіз причин деградації АБ. Проведено аналіз середньо добового пробігу електромобіля. Розглянуто дослідження у яких наводяться експериментальні та розрахункові значення залежності ресурсу АБ від глибини розряду та діапазону рівня заряду у якому відбувається робота АБ. Наведено розраховані значення можливого збільшення ресурсу АБ шляхом вибору оптимального часткового циклу. Запропоновано можливі рішення щодо впровадження інтелектуальної системи вибору часткового циклу на прикладі системи керування АБ електромобіля.

У третьому розділі розглянуто топології активних балансирів на основі DC-DC перетворювача. Запропоновано покращену топологію активного балансира, з можливістю використання в багато секційних АБ. Проведено моделювання часу балансування для можливих методів балансування у покращеній топології активного балансира. Проведено моделювання можливих до використання DC-DC перетворювачів у покращеній топології активного балансира, у програмному середовищі PLECS. Результати моделювання забезпечують підґрунтя для вибору певного типу DC-DC перетворювача для практичного застосування.

У четвертому розділі розроблено схему та друковану плату для прототипу активного балансира з покращеною топологією для застосування в багатосекційних АБ. Створено прототип, який встановлено в АБ електромобіля. Проведено експериментальне дослідження можливого збільшення ресурсу АБ шляхом використання активного балансира з покращеними характеристиками.

Ключові слова: акумуляторна батарея, система керування акумуляторною батареєю, ефективність, електромобіль, гібридний накопичувач електроенергії, зарядний пристрій, джерело струму, активне балансування, система керування, перетворювач електроенергії, інвертор, імпульси керування, діагностика несправностей, комутація транзисторів, потужність втрат.

ABSTRACT

Lipko D. O. Battery Management Systems with Battery Life Extension Functionality. – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 171 Electronics – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2025.

In the dissertation, the actual scientific and practical problem of extending the service life of accumulator batteries through the use of new means of power and information electronics is solved. The obtained new scientifically based results in the aggregate are significant for the development of battery management systems with an active balancing method, which can be used in batteries with a modular structure.

In recent years, the production of electric vehicles, stationary energy storage devices and various portable devices has been growing significantly. This contributes to the fact that the production of lithium-ion batteries has been increasing very rapidly recently.

Battery management systems are used in all modern battery packs. Their main task is the efficient and long-term use of the battery. The operation of the control system directly affects the resource of batteries. Modernization of existing control systems is one of the ways to increase the total life of batteries and slow down the process of their degradation.

The first chapter presents an analysis of modern lithium-based battery types and their characteristics. An overview of equivalent circuit models of battery packs is provided. The structural features and applications of battery packs in electric transport and stationary energy storage systems are analyzed. The design and functions of battery management systems are examined. A classification and comparative analysis of battery balancing methods are conducted.

The second chapter analyzes the causes of battery degradation. An evaluation of the average daily mileage of electric vehicles is provided. Studies presenting experimental and calculated values of battery lifespan dependence on depth of

discharge and charge level range are considered. Estimated values of potential battery lifespan extension through the selection of an optimal partial cycling strategy are presented. Possible solutions for implementing an intelligent partial cycle selection system within an electric vehicle battery management system are proposed.

The third chapter discusses the topologies of active balancers based on DC-DC converters. An improved active balancer topology is proposed, suitable for multicell battery packs. Modeling of balancing time for various balancing methods in the improved active balancer topology is performed. Modeling possible DC-DC converters for use in the improved active balancer topology is conducted, providing justification for selecting a specific DC-DC converter type in further research.

The fourth chapter presents the design and printed circuit board (PCB) layout for a prototype of an active balancer with an improved topology for multicell battery packs. The prototype is assembled and integrated into an electric vehicle battery pack. An experimental study is conducted to evaluate the potential increase in battery lifespan due to the use of the improved active balancer.

Keywords: battery, battery management system, efficiency, electric vehicle, hybrid power storage, charger, current source, active balancing, control system, power converter, inverter, control pulses, fault diagnosis, transistor switching, power loss.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Праці, в яких опубліковано основні результати дисертації:

[1] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3 – 4, с. 9 – 15, DOI: 10.15222/TKEA2023.3-4.09.

[2] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Модифікований активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 11–23. DOI: 10.15222/TKEA2024.1-2.11.

[3] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Розробка DC-DC перетворювача для використання в системах активного балансування акумуляторних батарей в межах студентських змагань. Мікросистеми, електроніка та акустика, 2024, том 30, № 3, С. 1-8, DOI: 10.20535/2523-4455.me.316127.

[4] D. Lipko, and O. Bondarenko, "Modified Active Balancer for Multi-Module Battery Pack," 2024 19th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC), Tallinn, Estonia, 2024, pp. 1-5, DOI: 10.1109/BEC61458.2024.10737985.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[5] D. Lipko, I. Yamnenko, A. Manzhelii, and O. Bondarenko, "Possibilities and Challenges of Partially Using a Charge-Discharge Cycle of Battery to Increase Its Resource," 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312983.

[6] A. Manzhelii, D. Lipko, and O. Bondarenko, "Comparative Analysis of DC-DC Converters for Micro-Mobility Vehicles," 2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE), Kyiv, Ukraine, 2024, pp. 1-5, DOI: 10.1109/STEE63556.2024.10748120.

[7] Ліпко Д.О., Бондаренко О.Ф. Вдосконалений пристрій для діагностування стану акумуляторних батарей. Сучасні інформаційні та

електронні технології (СІЕТ-2022): праці XXIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 23-27 травня 2022 р. Одеса, 2022. С. 32–33.

[8] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Збільшення ресурсу акумуляторної батареї при частковому використанні зарядно-розрядного циклу. Сучасні інформаційні та електронні технології (СІЕТ-2023): праці XXIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 29-31 травня 2023 р. Одеса, 2023. С. 46–47.

[9] Ліпко Д.О., Бондаренко О.Ф. Активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. Сучасні інформаційні та електронні технології (СІЕТ-2024): праці XXV міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 27-29 травня 2024 р. Одеса, 2024. С. 51–52.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АБ – акумуляторна батарея;
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
- МК – мікроконтролер;
- ККД – коефіцієнт корисної дії;
- BMS – система керування акумулятором (battery management system);
- CAN – протокол комунікації між пристроями (controller area network);
- CCM – режим безперервного струму (continuous conduction mode);
- CC – постійний струм заряду (Constant Current);
- CV – постійна напруга заряду (Constant Voltage);
- DC – постійний струм (direct current);
- DC-DC – перетворювач постійного струму (direct current to direct current);
- DCM – режим переривчастого струму (discontinuous conduction mode);
- DOD – глибина розряду (Depth of Discharge);
- I2C – інтерфейс між інтегрального зв'язку (Inter-Integrated Circuit);
- LFP – літій-залізо-фосфатний акумулятор (Lithium iron phosphate battery);
- LMO – літій-марганцево-оксидний акумулятор (Lithium manganese oxide battery);
- LCO – літій-кобальт-оксидний акумулятор (Lithium cobalt oxide battery);
- LTO – літій-титанатний акумулятор (Lithium titanate battery);
- LIN – протокол комунікації між пристроями (Local Interconnect Network);
- MOSFET – польовий транзистор з МОН (метал-оксид-напівпровідник) структурою затвора (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor);
- NMC – Літій-нікель-марганець-кобальт-оксидний акумулятор (Lithium nickel manganese cobalt oxides);
- NCA – літій-нікель-кобальт-алюмінієвий акумулятор (Lithium nickel cobalt aluminum oxide battery);
- OCV – напруги розімкненого ланцюга (open circuit voltage) ;
- OLED – органічний світлодіод (organic light-emitting diode)

PV – Photovoltaic;

PWM – широтно-імпульсна модуляція (Pulse-Width Modulation);

SEPIC – перетворювач з несиметрично навантаженою індуктивністю (Single Ended Primary Inductance Converter);

SPS – одиничний зсув фаз (Single Phase Shift);

SOC – стан заряду (State of Charge);

SOH – стан працездатності (State of Health);

V2G – транспорт у мережу (Vehicle-to-Grid).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НИМИ.....	17
1.1 Характеристики та еквівалентні схеми акумуляторних батарей.....	17
1.2 Особливості будови та застосування акумуляторних батарей в електротранспорті.....	32
1.3 Особливості будови та застосування акумуляторних батарей для стаціонарних накопичувачів енергії.....	35
1.4 Система керування акумуляторними батареями.....	41
1.5 Висновки до розділу 1.....	57
РОЗДІЛ 2. РІШЕННЯ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ.....	58
2.1 Процес деградації акумуляторних батарей.....	58
2.2 Обмежений діапазон заряду-розряду як засіб продовження ресурсу.....	65
2.3 Алгоритм вибору оптимального режиму використання акумуляторної батареї.....	72
2.4 Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3. ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЯК ОСНОВА ПОБУДОВИ СИСТЕМИ БАЛАНСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ.....	78
3.1 Топології активних балансирів на основі перетворювачів.....	78
3.2 Моделювання швидкості балансування в покращеній топології активного балансира.....	91
3.3 Моделювання перетворювача електроенергії для модульної системи активного балансування.....	94
3.4 Висновки до розділу 3.....	110

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ БАЛАНСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ.....	112
4.1 Побудова активного балансира для застосування в модульних аккумуляторних батареях.....	112
4.2 Застосування активного балансира в електромобілі.....	121
4.3 Висновки до розділу 4.....	133
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	137
ДОДАТОК А ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	150
ДОДАТОК Б. ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ СЕРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	152
ДОДАТОК В. ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РІЗНИХ ТИПІВ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ.....	154
ДОДАТОК Г. ПРОГРАМНИЙ КОД МІКРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЧАСТИН СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	156
ДОДАТОК Д. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	159
ДОДАТОК Е. СЕРТИФІКАТИ ПРО УЧАСТЬ У МІЖНАРОДНИХ НАУКОВО- ТЕХНІЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ.....	162

ВСТУП

Актуальність теми. В останні роки активно зростає виробництво акумуляторних батарей на основі літію, через широке застосування їх в побутових та промислових портативних пристроях, стаціонарних накопичувачах енергії та електротранспорті. Ресурс акумуляторних батарей обмежений, та з часом потребує їх заміни. Доступної та ефективної технології перероблення на цей час не існує, а утилізація шляхом захованням акумуляторних батарей в землю наносить дуже великої шкоди навколишньому середовищу. Продовження ресурсу вже наявних акумуляторних батарей є досить актуальною задачею, оскільки може відтермінувати процесу перероблення або утилізації їх, а також це дає додатковий час на розробку нових сучасних та ефективних методів перероблення акумуляторних батарей.

Системи керування акумуляторними батареями застосовуються в усіх сучасних акумуляторних батареях. Їх основною задачею є ефективно й тривале використання акумуляторної батареї. Робота системи керування безпосередньо впливає на ресурс акумуляторних батарей. Модернізація наявних систем керування є одним зі шляхів збільшення загального ресурсу акумуляторних батарей та уповільнення процесу їх деградації.

Значний внесок у дослідження ефективної роботи акумуляторних батарей й відповідних перетворювачів електроенергії для електротранспорту та стаціонарних накопичувачів зробили вчені Юрченко О.М., Волківський В.Б., Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Вербицький Є.В., Blinov A., Vinnikov D., Xu B., Oudalov A., Andersson G. та інші.

Ресурс акумуляторних батарей напряму залежить від системи керування ними. Модернізація системи керування акумуляторними батареями, що спроможна продовжувати їх ресурс є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря

Сікорського» МОН України відповідно до пріоритетного напрямку розвитку науки і техніки України “Енергетика та енергоефективність” і планів виконання науково-дослідних робіт кафедри електронних пристроїв та систем за темами:

- ДБ № 0120U101285 “Енергоефективні системи швидкого заряду комбінованих ємнісних накопичувачів енергії типу суперконденсатор-аккумуляторна батарея”;

- ДБ № 0122U001522 “Наукові засади створення портативних електронних приладів контактного зварювання біологічних тканин з автономним живленням”;

- ДБ № 0124U001411 “Модульні перетворювачі для систем накопичення енергії автономних мікро- та наномереж постійного струму”.

У перерахованих науково-дослідних роботах автором запропоновано методи продовження ресурсу АБ шляхом обмеження діапазону розрядно-зарядного циклу; розроблено прототип активного балансира з покращеними характеристиками.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є продовження терміну експлуатації акумуляторних батарей шляхом використання нових засобів силової та інформаційної електроніки. Для успішного досягнення поставленої мети роботи були розв’язані такі завдання:

1. Огляд та аналіз особливостей характеристик сучасних акумуляторних батарей та областей їх застосування;

2. Визначення шляхів продовження терміну експлуатації акумуляторних батарей;

3. Розробка рішень для реалізації роботи акумуляторних батарей у частковому циклі заряду-розряду;

4. Розробка рішень для побудови складових частин систем балансування акумуляторних батарей;

5. Експериментальна перевірка та аналіз ефективності запропонованих рішень та розробка рекомендацій з їх практичного використання.

Об’єктом дослідження є процес експлуатації акумуляторних батарей та явище деградації, яке супроводжує цей процес.

Предметом дослідження є засоби силової та інформаційної електроніки, які дозволяють збільшити ресурс акумуляторних батарей в процесі їх експлуатації.

Методи дослідження: Для виконання поставлених у роботі завдань використано такі методи дослідження: теорія електричних і електронних кіл, теорія транзисторних перетворювачів електроенергії, метааналіз. Розрахунки та моделювання проводились з використанням програмного середовища PLECS. Для програмування МК, що використовується у прототипі покращеного пристрою активного балансування, використано середовище програмування Visual Studio та мову програмування C++.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Вперше було визначено область на зарядно-розрядних характеристиках акумуляторних батарей при роботі в якій можливий приріст загального ресурсу на 114%, шляхом вибору ділянки на якій реалізується частковий цикл, а саме при глибині розряду 30-50% в діапазоні рівнів заряду 75-25%.

2. Вперше запропоновано топологію активного балансира з покращеними властивостями, а саме з дубльованою системою комутаторів та можливістю підключення додаткового джерела живлення, що дає змогу проводити активне балансування на всіх ієрархічних рівнях багатомодульних акумуляторних батарей.

3. Вперше показано що запропонована топологія балансира має відмовостійкі властивості, що при виході з ладу декількох комутаторів забезпечує працездатність балансира, а також вибір найвищої швидкості балансування шляхом вибору найкращого із доступних методів балансування.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Запропоновано рекомендації щодо модернізації бортових електронних систем електротранспорту, що дозволяє утримувати акумуляторну батарею максимальний проміжок часу в зарядно-розрядній області, в якій забезпечується приріст загального ресурсу.

2. Запропонована схема покращеного активного балансира може використовуватись у наявних акумуляторних батареях електротранспорту,

шляхом заміни пасивної системи балансування, яка використовується зараз, без внесення змін в конструкцію цих акумуляторних батарей.

3. Запропонована схема покращеного активного балансира може використовуватись в системах де необхідна підвищена надійність, яка досягається шляхом дублювання системи комутаторів, що дає змогу забезпечувати працездатність при виході з ладу певної кількості комутаторів.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, проведених автором самостійно. Автору належать обґрунтування задачі, проведення досліджень, аналіз і обробка результатів, висновки за отриманими результатами роботи. У роботах, опублікованих зі співавторами, дисертанту належать: [1], [2], [3] – дослідження впливу часткового циклу на ресурс АБ; [4] – створення удосконаленої топології активного балансира для застосування в модульних акумуляторних батареях; [5], [6] – моделювання часу балансування модульного активного балансира з покращеною топологією в різних режимах роботи; [7] – практична реалізація DC-DC перетворювача для застосування в модульному активному балансири; [8] – було зроблено аналіз DC-DC перетворювачів для застосування в мікромобільному транспорті; [9] – було запропоновано вдосконалений пристрій для діагностування стану акумуляторних батарей електромобілів.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях: XXIII міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2022) (м. Одеса, 2022); XXIV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2023) (м. Одеса, 2023); XXV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2024) (м. Одеса, 2024); 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (2023, м. Харків); 2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE) (м. Київ, 2024); на наукових семінарах НАН України

«Аналіз процесів у приладах, пристроях та системах електроніки», секція 1 «Перетворення параметрів електричної енергії» у 2022, 2023 та 2024 роках.

Публікації. Основний зміст роботи відображено у 9 публікаціях, з них: 3 статті у фахових виданнях України категорії Б, 1 стаття у виданні, яке проіндексоване в наукометричній базі Scopus, 5 конференційних публікацій, з яких 2 входять до бібліотеки спільноти IEEE Xplore Digital Library та проіндексовані в Scopus.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 164 сторінки, у тому числі 120 сторінок основного тексту, 66 рисунків, 8 таблиць, списку використаних джерел зі 106 найменувань і 6 додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НИМИ

1.1 Характеристики та еквівалентні схеми акумуляторних батарей

В сучасному світі АБ відіграють критичну роль, та мають багато областей застосування. АБ малої ємності широко використовуються в побутових пристроях, в портативних персональних пристроях, електроінструменті, в транспортних засобах мікромобільності. АБ середньої ємності знайшли своє застосування в електромобілях, побутових накопичувачах енергії. АБ великої ємності застосовуються в великому електротранспорті (вантажівки та автобуси) та великих енергетичних системах з використанням альтернативних джерел енергії.

Класифікація акумуляторних батарей ґрунтується на електрохімічних системах, що визначаються матеріалами електродів та електролітів, а також принципами їх функціонування (рис. 1.1). Історично, широке розповсюдження отримали свинцево-кислотні акумулятори (Pb), завдяки своїй надійності та низькій вартості. Нікель-кадмієві (Ni-Cd) та нікель-метал-гідридні (Ni-MH) акумулятори знайшли своє застосування там, де критичними параметрами є термічна стабільність та тривалий термін служби в циклах заряду-розряду. Інтенсивно досліджуються твердотільні акумулятори, які потенційно можуть забезпечити суттєве підвищення безпеки експлуатації та енергоємності. Однак технологія твердотільних акумуляторів наразі перебуває на етапі лабораторних досліджень та пілотних проектах, а її широке комерційне впровадження стримується високою вартістю та технологічними викликами виробництва.

Кожна з перелічених електрохімічних систем володіє унікальним набором характеристик, що визначає доцільність її використання в конкретних галузях. Однак, зважаючи на сучасні вимоги до енергоємності, екологічності та експлуатаційних параметрів, саме літій-іонні акумулятори вважаються сучасними, а також актуальними як об'єкт досліджень та впровадження. Вони знаходять широке застосування в портативній електроніці, електротранспорті та

стаціонарних системах накопичення енергії. Літій-іонні акумулятори майже всюди витіснили із застосування інші типи акумуляторів. У цьому розділі основна увага буде привернута до шести основних типів літій-іонних акумуляторів, що активно використовуються в даний час. Розглянемо їх конструкцію, принцип дії, основні характеристики, сфери застосування, а також перспективи розвитку та вдосконалення систем керування ними.

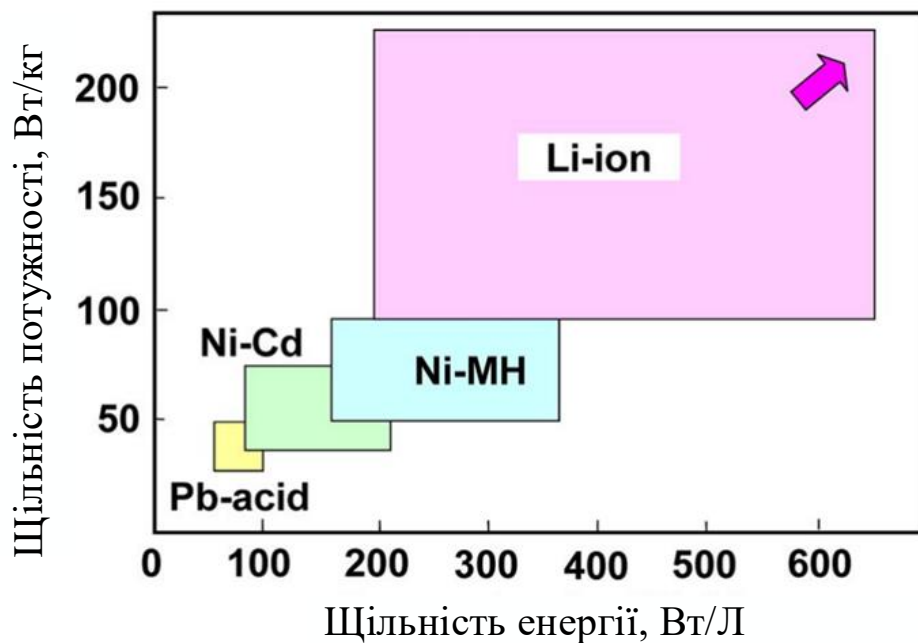


Рисунок 1.1 – Порівняння щільності акумуляторів [10], [11], [12]

Літій-іонні акумулятори (Li-ion) є найпоширенішими в електротранспорті завдяки їхнім високим показникам щільності енергії, тривалому терміну служби та можливості швидкої зарядки. Основні переваги цього типу акумуляторів: висока енергетична щільність, низький саморозряд та тривалий життєвий цикл. Літій-іонні акумулятори здатні зберігати більше енергії на одиницю маси або об'єму, що дозволяє збільшити дальність поїздки електротранспорту. Також вони мають низький рівень саморозряду, тобто зберігають заряд навіть після тривалого простою. Li-ion акумулятори можуть витримувати багато циклів зарядки і розрядки, зберігаючи до 80% своєї початкової ємності навіть після 1000 циклів. Однак, Li-ion батареї мають свої

недоліки, такі як підвищена пожежонебезпека через використання рідкого електроліту та чутливість до екстремальних температур [13].

ЛСО є одним із найстаріших типів літій-іонних акумуляторів, що знайшли широке застосування в портативній електроніці, такій як смартфони та ноутбуки, але рідше використовуються в електромобілях. Ключова особливість ЛСО акумуляторів полягає у використанні оксиду літію-кобальту (LiCoO_2) як матеріалу катода. Основною перевагою ЛСО акумуляторів є дуже висока енергетична щільність, що дозволяє забезпечити компактні розміри та невелику вагу батареї при збереженні значного запасу енергії. Це робить їх ідеальними для портативних пристроїв, де простір і маса критично важливі. Проте, ЛСО акумулятори мають ряд суттєвих недоліків. Вони мають відносно короткий термін служби (зазвичай 500-1000 циклів) і є менш безпечними порівняно з іншими типами літій-іонних акумуляторів. ЛСО акумулятори більш схильні до термічного розгону (перегріву та потенційного займання), особливо при перезаряді або пошкодженні. Крім того, високий вміст кобальту робить їх дорогими та створює етичні проблеми, пов'язані з видобутком цього металу. Саме через проблеми з безпекою та обмежений термін служби ЛСО акумулятори рідко застосовуються в електромобілях, де перевага надається більш безпечним і довговічним хімічним складам, таким як NMC або LFP.

ЛМО є різновидом літій-іонних акумуляторів, що характеризуються використанням кристалічної структури оксиду літію-марганцю (LiMn_2O_4) як матеріалу катода. Хоча вони й не настільки поширені, як NMC чи LFP, ЛМО акумулятори знаходять застосування в деяких електромобілях та гібридних транспортних засобах. Основною перевагою ЛМО акумуляторів є їхня висока термостабільність та безпека. Завдяки своїй структурі, шпінель марганцю забезпечує кращу стійкість до перегріву та термічного розгону порівняно з ЛСО або навіть NMC акумуляторами. Вони також здатні забезпечувати високу потужність, що робить їх придатними для застосувань, де потрібні швидкі розряди. Вартість ЛМО акумуляторів, як правило, нижча, ніж NMC, оскільки марганець є більш доступним матеріалом, ніж кобальт. Проте, ЛМО акумулятори

мають нижчу енергетичну щільність, ніж NMC або LCO, що обмежує запас ходу електромобіля на одному заряді. Їхній термін служби також, як правило, коротший, ніж у LFP акумуляторів, хоча й може бути порівнянним з NMC, залежно від умов експлуатації. Часто LMO хімію комбінують з NMC для отримання оптимального балансу між безпекою, потужністю, енергетичною щільністю та терміном служби, використовуючи переваги обох типів катодних матеріалів.

LFP є одним із різновидів літій-іонних акумуляторів. Ключова відмінність LFP від інших літій-іонних акумуляторів полягає в матеріалі катода. У той час як багато інших літій-іонних акумуляторів використовують оксиди кобальту, нікелю або марганцю, LFP акумулятори використовують літій-залізо-фосфат (LiFePO_4) як катодний матеріал. Основні переваги LFP - це безпека та довговічність. LFP батареї є більш термостійкими і менш схильними до перегріву чи займання порівняно з традиційними літій-іонними батареями. Також ці акумулятори мають триваліший термін служби (до 2000 циклів і більше) і вищу стабільність при тривалій експлуатації. Проте їхня енергетична щільність нижча, ніж у класичних літій-іонних акумуляторів, тому вони не забезпечують такої великої дальності поїздки на одному заряді.

NMC є одним із найпоширеніших різновидів літій-іонних акумуляторів, що широко використовуються в електромобілях. Ключовою особливістю NMC акумуляторів є складний матеріал катода, який містить комбінацію нікелю, марганцю та кобальту (LiNiMnCoO_2). Співвідношення цих металів може варіюватися, що дозволяє оптимізувати характеристики акумулятора для різних застосувань. Основна перевага NMC акумуляторів - це висока енергетична щільність. Завдяки цьому NMC акумулятори забезпечують більший запас ходу електромобіля на одному заряді порівняно з LFP акумуляторами. Вони також мають досить тривалий термін служби (зазвичай 1000-2000 циклів), але поступаються за цим показником LFP. Проте, NMC акумулятори є менш термостабільними ніж LFP, та потребують складніших систем керування батареєю (BMS) для забезпечення безпеки та запобігання перегріву чи

перезаряду. Також, використання кобальту, який є дорогим та має етичні проблеми, пов'язані з його видобутком, є одним із недоліків NMC акумуляторів.

NCA - тип літій-іонних акумуляторів, що характеризуються використанням складного оксиду літію, нікелю, кобальту та алюмінію (LiNiCoAlO_2) як катодного матеріалу. Алюміній у складі сприяє підвищенню структурної стабільності. NCA акумулятори відрізняються дуже високою енергетичною щільністю, що дозволяє зберігати значну кількість енергії в одиниці маси та об'єму. Це забезпечує великий запас ходу для пристроїв, що їх використовують. Крім високої енергетичної щільності, NCA акумулятори здатні видавати високу потужність, що є критично важливим для забезпечення динамічних характеристик, наприклад, швидкого прискорення. Однак, NCA акумулятори мають певні обмеження. Вони демонструють меншу термостабільність порівняно з деякими іншими типами літій-іонних акумуляторів, що підвищує ризик термічного розгону при несприятливих умовах, таких як пошкодження, перезаряд або коротке замикання. Тому для безпечної експлуатації необхідні складні та надійні системи керування батареєю. Термін служби NCA акумуляторів, хоча і є достатньо тривалим для багатьох застосувань, все ж може бути меншим за деякі інші хімічні склади. Вартість NCA акумуляторів, як правило, вища, ніж у акумуляторів, що не використовують кобальт. Додатково, існують етичні та екологічні занепокоєння, пов'язані з видобутком кобальту.

LTO акумулятори використовують титанові нанокристали в якості аноду замість вуглецевих матеріалів. Вони мають декілька важливих переваг: швидка зарядка, тривалий життєвий цикл, низька пожежонебезпека. LTO акумулятори можуть заряджатися значно швидше, ніж традиційні Li-ion акумулятори, що робить їх привабливими для використання в електричних автобусах або іншому транспорті з високими вимогами до швидкості зарядки. Тривалий життєвий цикл: LTO батареї можуть витримувати до 10 000 циклів зарядки-розрядки, що значно перевищує можливості інших типів батарей. Низька пожежонебезпека: Вони менш чутливі до екстремальних температур та механічних пошкоджень, що робить їх безпечнішими. Однак через нижчу енергетичну щільність, LTO

аккумулятори використовуються в меншій кількості, оскільки вони потребують більше місця для зберігання тієї ж кількості енергії. На даний час, цей тип аккумуляторів мають найвищу ринкову ціну в порівнянні з усіма іншими типами, через що набагато рідше використовуються в електротранспорті.

Вибір конкретного типу літій-іонного аккумулятора визначається балансом між вимогами до енергетичної щільності, потужності, безпеки, терміну служби та вартості, залежно від конкретної сфери застосування (рис. 1.2).

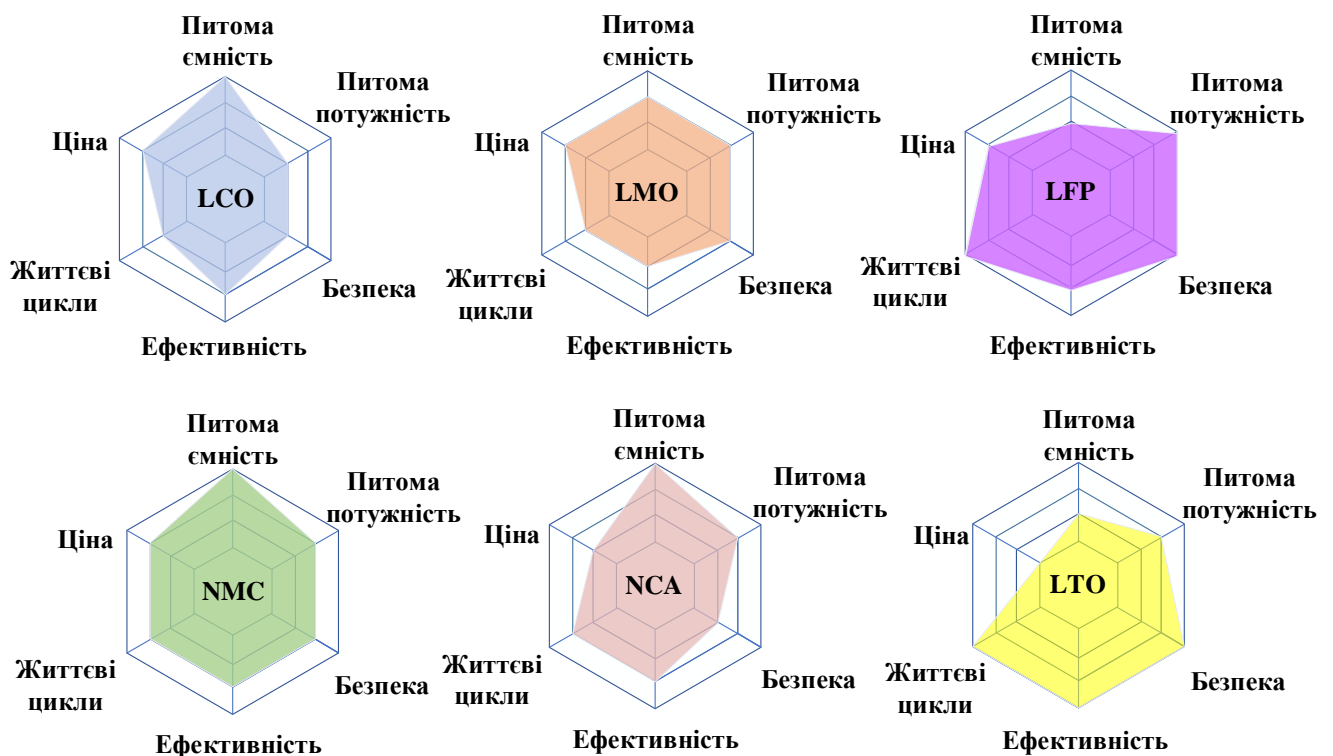


Рисунок 1.2 – Порівняння характеристик різних типів аккумуляторів [14]

Кожен тип аккумуляторів характеризується унікальною залежністю напруги розімкненого ланцюга (OCV) від SOC. Ця залежність, що описується кривою розряду, є ключовою електрохімічною характеристикою, яка визначається матеріалами електродів та електроліту, а також внутрішньою структурою аккумуляторного елемента, і відображає термодинамічний стан системи. Форма кривої OCV-SOC суттєво впливає на точність оцінки стану заряду та доступної енергії аккумуляторної батареї. Форми кривих OCV-SOC для кожного з

розглянутих раніше акумуляторів були отримані з досліджень [15] та об'єднанні в один графік на рис. 1.3.

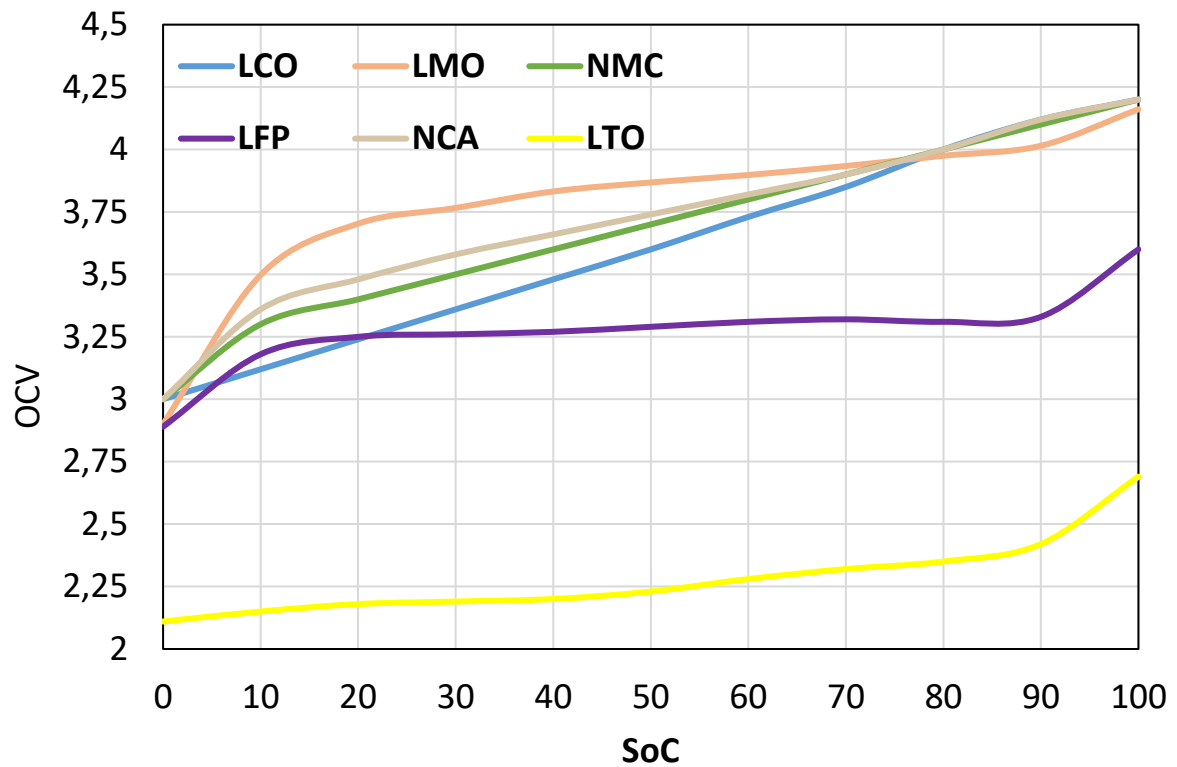


Рисунок 1.3 – Залежність напруги акумуляторів різних типів від рівня заряду

Зарядження літій-іонних акумуляторів зазвичай здійснюється за допомогою комбінованого режиму постійного струму – постійної напруги (CC-CV), який забезпечує оптимальну ефективність процесу, продовжує термін служби батареї та мінімізує ризики деградації активних матеріалів, рис. 1.4. На першому етапі зарядження підтримується постійний струм, що дозволяє швидко накопичити енергію в акумуляторі, при цьому напруга поступово зростає до заданого порогового значення. У цій фазі переважаючим механізмом є лінійне збільшення рівня заряду при максимальному струмі, обмеженому зарядним пристроєм, що дозволяє забезпечити ефективне заповнення ємності комірок без перегріву та надмірного навантаження на елементи акумулятора [16], [17], [18].

Коли напруга досягає встановленого порогу, розпочинається другий етап – підтримання постійної напруги. На цій фазі зарядний струм поступово

знижується в міру наближення акумулятора до повного стану заряду. Цей процес є критично важливим для забезпечення стабільності електрохімічних процесів у комірках і запобігання надмірній зарядці, що може призвести до утворення побічних реакцій, зокрема виділення газів та розкладання електроліту. Таким чином, режим CC-CV дозволяє досягти майже 100% ємності батареї з мінімізацією ризиків її деградації.

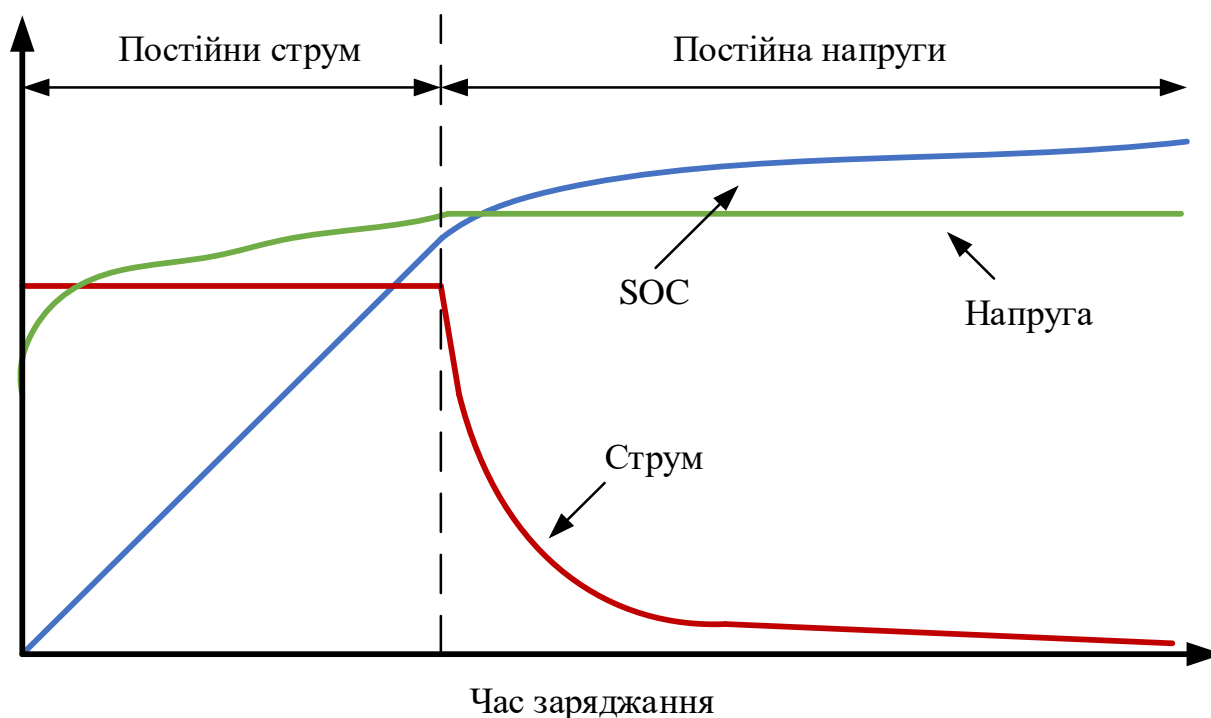


Рисунок 1.4 – CC-CV режим заряджання акумуляторів на основі літію [19], [20], [21]

Розуміння характеристик АБ та еквівалентних схем є принципово важливим для забезпечення точного моделювання, ефективного управління та оптимізації роботи електрохімічних систем. Еквівалентні схеми АБ становлять потужний інструментарій дослідження електричних характеристик, що дозволяє не лише детально прогнозувати поведінку накопичувачів енергії в різноманітних режимах експлуатації, але й вирішувати ключові дослідницькі завдання: визначати параметри внутрішньої структури АБ, прогнозувати електричні характеристики, здійснювати оцінку деградаційних процесів та розробляти ефективні системи управління батареями.

У сучасній науці виділяють три принципово різні класи еквівалентних схем заміщення акумуляторних батарей, кожен з яких відрізняється рівнем складності та глибиною математичного опису електрохімічних процесів.

Статичні моделі являють собою найпростіший клас еквівалентних схем, що характеризуються мінімальною складністю електричної схеми та використанням постійних незмінних параметрів. Такі моделі мають обмежену точність відтворення реальних характеристик акумуляторних батарей і переважно призначені для первинної приблизної оцінки параметрів електрохімічного джерела струму.

Динамічні моделі представляють більш складний рівень математичного опису акумуляторних батарей. На відміну від статичних моделей, вони враховують часові залежності електрохімічних процесів, що дозволяє більш точно описувати перехідні режими роботи. Характерною особливістю динамічних моделей є наявність диференціальних рівнянь, які описують нелінійну поведінку електрохімічної системи, та суттєво складніша електрична схема заміщення.

Найвищий рівень складності мають фізико-хімічні моделі, які становлять найдетальніший клас математичного опису акумуляторних батарей. Ці моделі базуються на глибокому врахуванні внутрішніх електрохімічних процесів, що відбуваються на мікрорівні. Фізико-хімічні моделі дозволяють не лише відтворювати електричні характеристики, але й прогнозувати процеси деградації батарей. Водночас, висока деталізація та складність таких моделей призводить до значних обчислювальних затрат і потребує потужного математичного апарату для реалізації.

Кожен з цих класів моделей має свою сферу застосування та обмеження, вибір конкретної моделі залежить від поставлених дослідницьких завдань, наявних обчислювальних ресурсів та необхідного рівня точності моделювання.

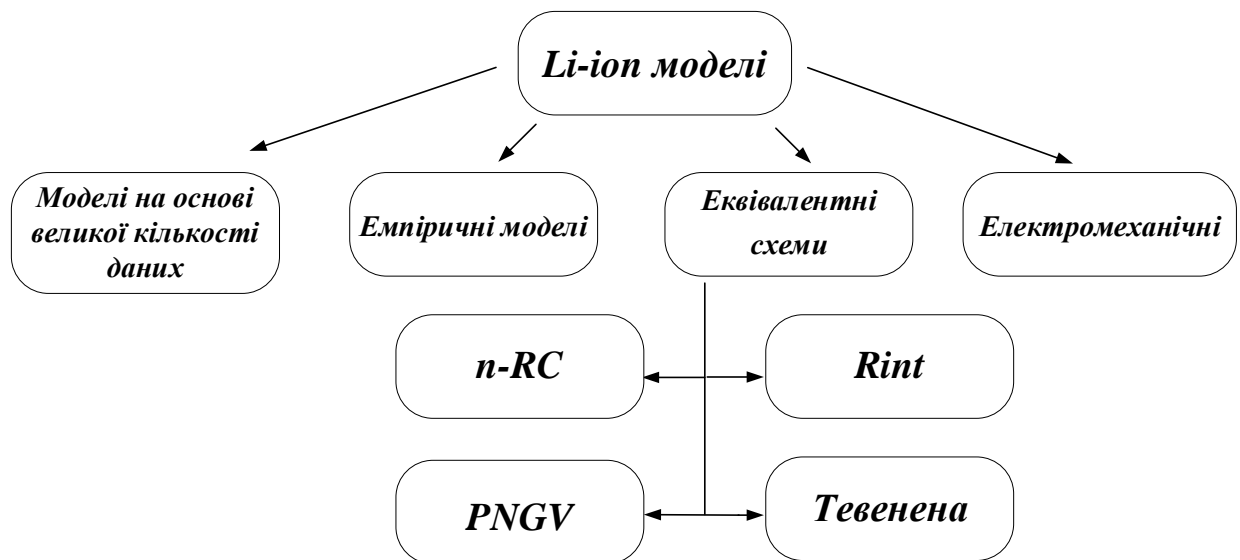


Рисунок 1.5 – Класифікація моделей акумуляторів на основі літію

Розглянемо основні характеристики АБ, що наведено нижче.

Ємність (C) – це кількість енергії, яку батарея може зберігати і віддавати. Ємність вимірюється в ампер-годинах (Аг) або ват-годинах (Вт·г). Ємність зменшується з часом через старіння батареї та кількість циклів зарядки/розрядки.

$$C = I \cdot t. \quad (1.1)$$

ЕРС акумулятора (E) – це фундаментальна характеристика, яка визначається його електрохімічною системою: матеріалами електродів, типом електрохімічної реакції, а також концентрацією електроліту (в деяких випадках) та температурою. ЕРС є максимально можливою напругою акумулятора в стані розімкнутого ланцюга і тісно пов'язана з напругою розімкнутого ланцюга (OCV)

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln(Q), \quad (1.2)$$

де: E° – стандартна ЕРС (ЕРС при стандартних умовах: 298 К (25°C), тиск 1 атм, концентрації реагентів і продуктів 1 моль/л);

R – універсальна газова стала (8.314 Дж/(моль·К));

T – абсолютна температура (в Кельвінах);

n – кількість електронів, що беруть участь в електрохімічній реакції;

F – стала Фарадея (96485 Кл/моль);

Q – коефіцієнт реакції, який відображає відношення активностей продуктів реакції до активностей реагентів у даний момент часу.

Внутрішній опір ($R_{\text{вн}}$) батареї включає в себе опір як електроліту, так і матеріалів електродів. Високий внутрішній опір призводить до нагрівання батареї під час розряду, що знижує її ефективність.

$$R_{\text{вн}} = \frac{V_{\text{без}} - V_{\text{під}}}{I}, \quad (1.3)$$

де: $V_{\text{без}}$ – напруга батареї без навантаження;

$V_{\text{під}}$ – напруга батареї під навантаженням;

I – струм навантаження.

Термін служби: Це кількість циклів зарядки/розрядки, які акумулятор може витримати до значної деградації. Більшість літій-іонних батарей мають термін служби від 1000 до 5000 циклів, залежно від умов експлуатації.

ККД (η) – це відношення енергії, яка віддається під час розряду, до енергії, яка була отримана під час зарядки. ККД літій-іонних батарей зазвичай знаходиться в межах 90-95%.

$$\eta = \frac{E_{\text{вив}}}{E_{\text{ввод}}} \times 100\%. \quad (1.4)$$

SOC відображає, скільки енергії залишилося в акумуляторі щодо його загальної ємності. Відсоток SOC вказує на поточний стан заряду акумулятора, де 100% відповідає повністю зарядженій батареї, а 0% – повністю розрядженій.

SOC може бути оцінений за різними підходами – від простих методів на основі інтеграції струму до складніших алгоритмів, що поєднують вимірювання напруги та струму. Для сучасних акумуляторних систем найбільш точними є

комбіновані методи, які враховують динамічні процеси та внутрішні властивості акумулятора.

Модель R_{int} , як показано на рис. 1.6 та у рівнянні (1.5), реалізує ідеальне джерело напруги U_{oc} для визначення напруги холостого ходу акумулятора [22], [23], [24]. Як опір R_o , так і напруга холостого ходу U_{oc} є функціями SOC (ступеня заряду), SOH (стану здоров'я) та температури. I_L – струм навантаження з позитивним значенням при розряді та негативним значенням при заряді, U_L – напруга на клеммах. Вимірювання внутрішнього опору R_o для системи керування напрямку залежить від точності вимірювання напруги комірки, та струму що протікає через неї.

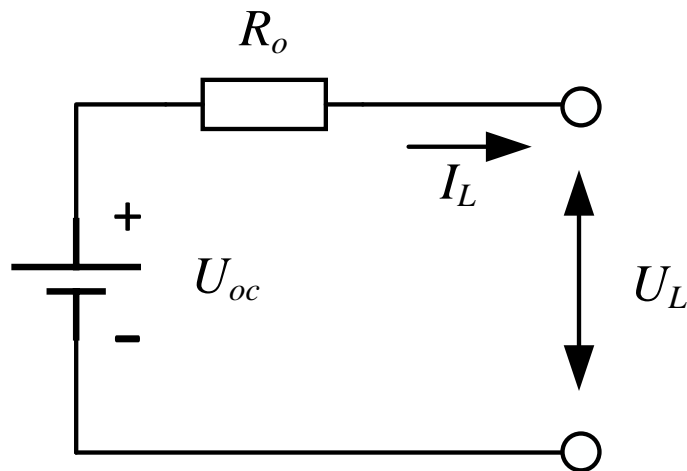


Рисунок 1.6 – Схема моделі R_{int} [25]

$$U_L = U_{oc} - I_L R_o. \quad (1.5)$$

Модель Тевенена підключає паралельне RC-коло послідовно на основі моделі R_{int} , описуючи динамічні характеристики акумулятора. Як показано на рис. 1.7, вона в основному складається з трьох частин, включаючи напругу холостого ходу U_{oc} , внутрішні опори та еквівалентні ємності. Внутрішні опори включають омичний опір R_o та поляризаційний опір. Еквівалентна ємність C_1 використовується для опису перехідної характеристики під час заряджання та розряджання. U_1 – це напруга на C_1 , а I_L – струм витоку з акумулятора. Електричну поведінку моделі Тевена можна виразити рівнянням (1.6).

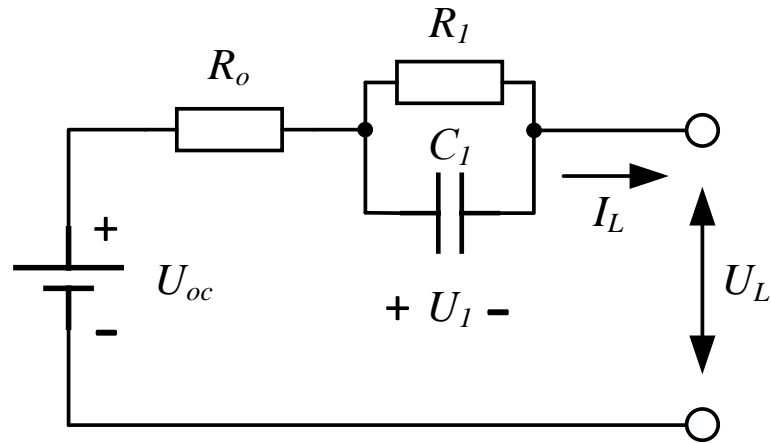


Рисунок 1.7 – Схема моделі Тевенена [26]

$$U_t = U_{oc} - U_1 - I_L \cdot R_0, \quad (1.6)$$

де R_0 – це опір поляризації; C_1 – ємність поляризації; U_1 – напруга на RC-ланці.

PNGV модель – еквівалентна схема батареї (рис. 1.8). Ємність описує накопичену зміну напруги холостого ходу під час струму навантаження і його значення відображає ємність АБ, математично цю модель описує рівняння (1.7).

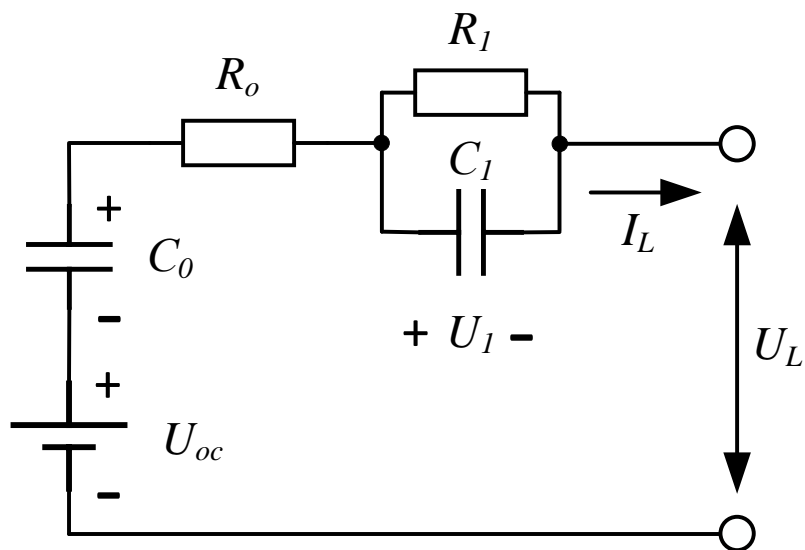


Рисунок 1.8 – Схема моделі PNGV

$$U_L = U_{oc} - U_0 - U_1 - I_L \cdot R_0. \quad (1.7)$$

Недоліком можна вважати не врахування ефекту температури або старіння батареї без додаткових модифікацій, а також зменшення точності при високих динамічних змінах навантаження [27].

Модель n-RC була розроблена відомою компанією SAFT Battery Company та успішно застосовується в програмному забезпеченні Advisor. Як показано на рис. 1.9, вона складається з двох конденсаторів C_1 та C_2 та трьох резисторів (R_0 , R_1 , R_2). Конденсатор C_2 , який має малу ємність і здебільшого представляє поверхневі ефекти акумулятора, називається поверхневим конденсатором. Конденсатор C_1 , який має дуже велику ємність і представляє значну здатність акумулятора хімічно зберігати заряд, називається об'ємним конденсатором. SOC можна визначити за напругою на об'ємному конденсаторі [25]. Резистори R_1 та R_2 називаються клемовим резистором, кінцевим резистором та резистором конденсатора відповідно. U_1 та U_2 – це напруги на C_1 та C_2 відповідно [27]. Електричну поведінку кола можна виразити рівняннями (1.8)

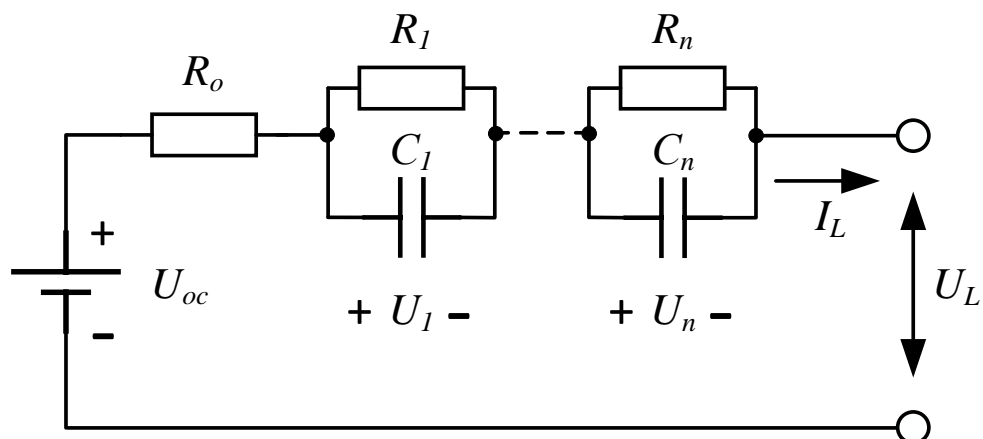


Рисунок 1.9 – Схема моделі n-RC [28]

$$U_t = U_{oc} - U_1 - I \cdot R_0. \quad (1.8)$$

Модель подвійної поляризації (DP Модель), різновид **n-RC** моделі. На основі аналізу результатів тестування характеристик літій-іонної батареї живлення можна спостерігати явну поляризацію. Поляризаційну характеристику можна до певної міри змодельовати за допомогою моделі Тевеніна, однак різниця між концентраційною поляризацією та електрохімічною поляризацією призводить до неточного моделювання в моменти закінчення заряду або розряду [29]. На рис. 1.10 представлена вдосконалена схемна модель, призначена для уточнення опису характеристик поляризації та окремого моделювання концентраційної та електрохімічної поляризації.

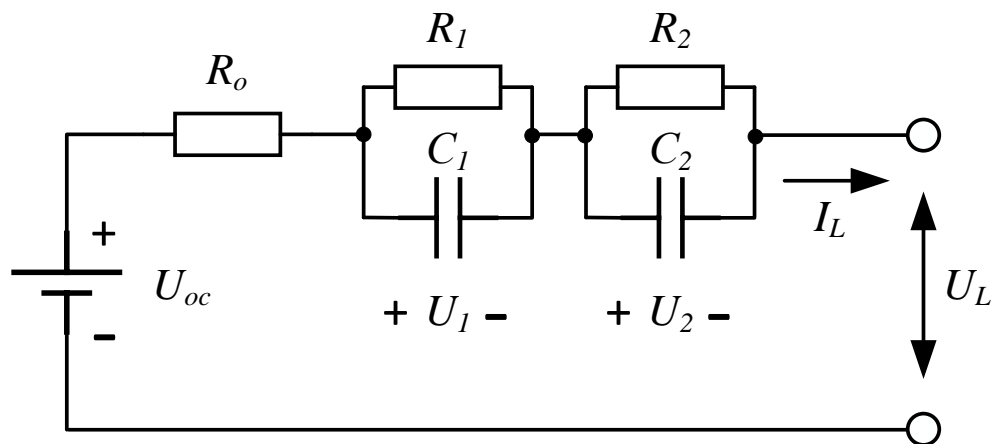


Рисунок 1.10 – Принципова схема DP моделі [30]

DP модель складається з трьох частин: (1) Напруга розімкнутого ланцюга U_{oc} ; (2) Внутрішні опори, такі як омичний опір R_o та поляризаційні опори, які включають R_1 для представлення ефективного опору, що характеризує електрохімічну поляризацію, і R_2 для представлення ефективного опору, що характеризує концентраційну поляризацію; (3) Ефективні ємності, такі як C_1 і C_2 , які використовуються для характеристики перехідних процесів під час передачі

енергії до/від акумулятора і для окремого опису електрохімічної поляризації та концентраційної поляризації. U_1 та U_2 – це напруги на C_1 та C_2 відповідно. I_1 та I_2 – це струми, що протікають через C_1 та C_2 відповідно. Електричний опис кола може бути представлений рівнянням (1.9):

$$\begin{cases} U_1 = -\frac{I_1}{C_1} + \frac{U_1}{R_1 C_2} \\ U_2 = -\frac{I_2}{C_2} + \frac{U_2}{R_2 C_2} \\ U_L = U_{oc} - U_1 - U_2 - I_L R_o \end{cases} \quad (1.9)$$

Отже, хімічний склад Li-ion акумуляторів сильно впливає на характеристики та області їх застосування. Еквівалентні схеми заміщення дають змогу моделювати поведінку АБ в різних умовах. Прості еквівалентні схеми дають змогу моделювати статичні параметри, в той час як більш складні еквівалентні схеми дають змогу моделювати більш точно динамічні характеристики.

1.2 Особливості будови та застосування акумуляторних батарей в електротранспорті

АБ електромобіля складається з великої кількості окремих одиничних комірок, увімкнених послідовно або паралельно. Ці комірки складаються у модулі, а модулі, своєю чергою, в акумуляторну батарею (рис. 1.11), конфігурація якої залежить від того, який тип комірок застосовується [31]. Комірки відрізняються між собою за формфактором і за типом хімічного складу компонентів.

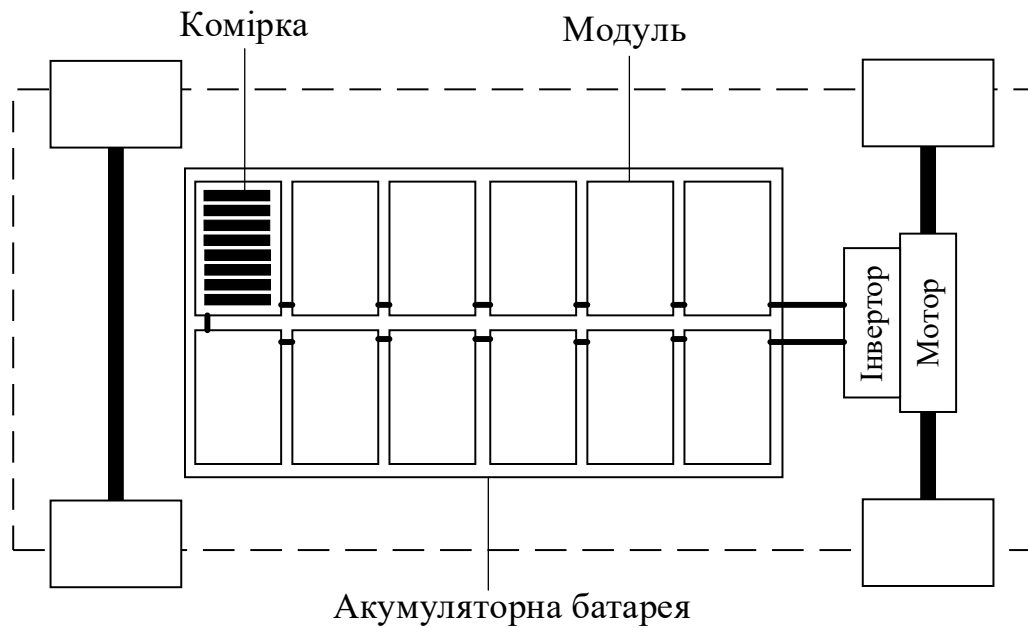


Рисунок 1.11 – АБ електромобіля [32]

Вибір акумуляторів для електротранспорту є критично важливим рішенням, яке впливає на продуктивність, дальність поїздки, безпеку та вартість транспортного засобу. Основними типами акумуляторів, що використовуються в електромобілях та інших електричних транспортних засобах, є Li-ion та їх похідні. Проте активно розробляються та вдосконалюються нові типи акумуляторів, які ще не досягли застосування в серійних моделях електротранспорту.

В електромобілях застосовуються три основні формфактори комірок (табл. 1.1):

- циліндричні: листи компонентів згорнуто у рулон всередині металевого циліндричного корпусу;
- призматичні: складені кілька разів листи розміщуються у корпусі прямокутної форми;
- пакети: комірки формуються з бажаної кількості однакових шарів листів, накладених один на інший, такі акумулятори є найбільш гнучкими.

Ці три формфактори можуть мати різні розміри, що й впливає на можливий об'єм накопиченої енергії.

Таблиця 1.1. Характеристики АБ в залежності від формфактору [14]

Формфактор	Циліндричний	Призматичний	Пакет
Зображення			
Тип електродів	Рулонний	Рулонний	Листовий
Механічна міцність	Висока	Середня	Низька
Тепло-відведення	Низька	Середня	Середня
Питома енергія	Середня	Середня	Висока
Щільність енергії	Середня	Висока	Середня

Окрім розміру, на параметри акумулятора сильно впливає хімічний склад його компонентів. Наразі існує багато типів акумуляторів за видом хімічного складу, однак в сучасних електромобілях застосовуються три основні типи літійєвих акумуляторів [33], [34]: NMC, LFP і NCA .

В акумуляторній батареї електромобіля кількість комірок та модулів відповідає напрузі та ємності, які хоче отримати виробник електромобіля з врахуванням певного простору для батареї всередині електромобіля. Ця кількість залежить від розміру комірок і їхньої енергетичної щільності. У більшості сучасних електромобілів (Tesla, Nissan [35], Renault) напруга тягової АБ лежить в межах 300 – 400 В, іноді напруга батареї складає 800 В, але може перекомутуватись у 400 В для станцій швидкої зарядки. Батарея може складатися з 96 послідовно з'єднаних комірок NCA або NMC або з 112 LFP.

Кількість комірок 96 використовується виробниками через те, що це число має багато варіантів парного ділення націло, тобто є багато варіантів конфігурації модулів АБ. Започаткувала цей підхід компанія Tesla у своєму першому серійному електромобілі на NCA-комірках. В батареях на елементах LFP кількість комірок більша через те, що номінальна напруга такої комірки нижча, ніж NCA або NMC. Слід зазначити, що описані варіанти не є стандартом, в електромобілях можна побачити батарею, наприклад, як з 84 послідовно підключених комірок, так і зі 198. У Додатку А зведено інформацію щодо характеристик акумуляторних батарей різних серійних електромобілів, складену на основі [36] й доповнену з власних спостережень.

Отже, для електротранспорту використовуються різноманітні типи акумуляторів, кожен із яких має свої переваги та недоліки. Літій-іонні батареї залишаються найпопулярнішими завдяки їхній збалансованій продуктивності, але нові типи акумуляторів, такі як твердотільні або літій-сірчисті, мають потенціал суттєво покращити характеристики електромобілів у майбутньому. Вибір конкретного типу акумулятора залежить від потреб конкретного транспортного засобу, зокрема від вимог до дальності поїздки, вартості та безпеки.

1.3 Особливості будови та застосування акумуляторних батарей для стаціонарних накопичувачів енергії

АБ в стаціонарних накопичувачів енергії, як приклад застосовується у Microgrid або електростанція, та мають специфічну конструкцію та вимоги, які відрізняються від акумуляторів (рис. 1.12), що використовуються в електротранспорті.

Стаціонарні системи накопичення енергії зазвичай мають більші ємності порівняно з мобільними рішеннями. Вони мають зберігати великі об'єми енергії та забезпечувати її тривале використання, інколи – протягом кількох діб. Це вимагає використання спеціальних конструкцій з великими модулями батарей, які можуть витримувати постійні цикли зарядки/розрядки протягом довгих років.

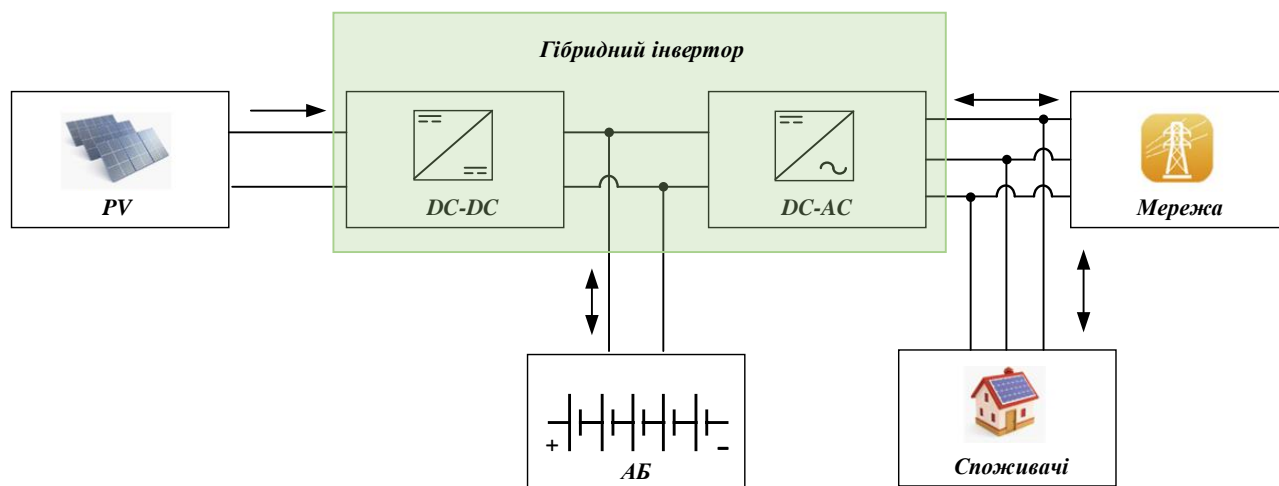


Рисунок 1.12 – Будова побутової стаціонарної систем накопичення енергії [37]

Стаціонарні системи часто мають триваліші цикли зарядки/розрядки, тому важливо, щоб вони мали високий ККД і здатність витримувати тисячі циклів зарядки без значної втрати продуктивності. У цьому аспекті особливо популярні NMC та LFP батареї через їхню стійкість до деградації та високу енергетичну щільність

Для стаціонарних накопичувачів енергії безпека є ключовим аспектом. Оскільки ці системи можуть зберігати величезні об'єми енергії, ризик загоряння або перегріву завжди є важливим фактором. LFP АБ зазвичай обираються завдяки їх високій стабільності, адже вони менш схильні до перегріву і пожеж, порівняно з іншими типами.

Стаціонарні системи накопичення енергії часто використовують модульну архітектуру. Це означає, що батареї складаються з багатьох окремих модулів, які можуть працювати разом або бути замінені окремо у разі виходу з ладу. Це полегшує обслуговування та масштабування системи.

Microgrid – це локальна енергетична система, яка може працювати як автономно, так і бути підключеною до основної електричної мережі (On-Grid). Microgrid дозволяє генерувати, зберігати і споживати електроенергію на рівні локальної громади, підприємства або навіть будівлі. Такі системи відіграють

важливу роль у забезпеченні енергетичної незалежності, підвищенні ефективності використання відновлюваних джерел енергії, а також у підвищенні надійності енергопостачання [38], .

Основними компонентами Microgrid системи є:

- Відновлювані джерела енергії: сонячні батареї, вітрові турбіни та інші джерела відновлюваної енергії. Використання цих джерел є основною перевагою мікромереж, оскільки вони дозволяють виробляти чисту енергію з мінімальними викидами вуглецю.
- Традиційні генератори: резервні генератори на основі викопного палива можуть використовуватись як резервне джерело енергії для забезпечення стабільності в періоди пікових навантажень або коли відновлювані джерела енергії недоступні.
- Малі енергетичні установки: мікрогрід також може включати генерацію з малих комбінованих теплоелектростанцій, що забезпечують як електроенергію, так і тепло.
- Накопичувачі енергії: Акумуляторні системи: літій-іонні та інші батарейні системи для зберігання енергії є важливим елементом microgrid. Вони забезпечують стабільність енергопостачання, дозволяючи зберігати надлишок енергії, згенерованої вітром або сонцем, і використовувати його в періоди високого попиту або коли генерація недоступна.
- Інші технології зберігання – крім акумуляторів, у microgrid можуть використовуватись системи зберігання на основі водневих технологій або гідроакумуляуючих станцій.
- Системи управління та контролю – система управління енергоспоживанням (EMS): ключовий елемент microgrid, що контролює виробництво, зберігання та споживання енергії. EMS оптимізує роботу джерел енергії та накопичувачів, балансує попит та пропозицію в режимі реального часу.

- Системи моніторингу – відстежують потоки енергії, стан зарядки акумуляторів, генерацію відновлюваної енергії та стан підключення до основної електромережі. Ці системи дозволяють мікрогрід працювати автономно, при цьому забезпечуючи стабільність електропостачання.
- Навантаження – житлові будівлі, комерційні та промислові об'єкти, microgrid забезпечує електроенергією різні типи споживачів. Важливою характеристикою таких систем є можливість керування навантаженням, що дозволяє знизити споживання енергії у пікові моменти.

Microgrid може працювати в двох основних режимах On-Grid та Off-Grid. У On-Grid режимі мікромережа підключена до основної електричної мережі і працює в координації з нею. Надлишок згенерованої енергії може бути переданий в основну мережу, а в разі дефіциту – мікромережа може отримувати енергію з основної мережі. Це дозволяє максимально ефективно використовувати доступні ресурси.

В Off-Grid режимі Microgrid працює автономно, не підключаючись до основної мережі. Цей режим особливо корисний для віддалених або ізольованих спільнот, які не мають доступу до централізованої мережі, або в разі відключення живлення в основній мережі. В такому випадку система самостійно забезпечує стабільність енергопостачання [39].

Перевагами Microgrid систем є незалежність та надійність. Microgrid забезпечує енергетичну незалежність від основної мережі, що є важливим у випадках аварій, природних катастроф або відключень електроенергії. Microgrid може автоматично перемикатися на автономний режим і продовжувати постачати енергію до споживачів [40].

Вітрові та PV джерела можуть працювати нестабільно через змінність погоди. Завдяки системам зберігання та управління microgrid дозволяє зберігати надлишкову енергію для використання в періоди зменшення генерації.

Завдяки системам управління microgrid дозволяє оптимізувати використання енергії, що може призвести до зменшення витрат на енергопостачання для користувачів. Наприклад, можна зменшувати навантаження у пікові години або використовувати накопичену енергію, коли тарифи на електроенергію високі.

Microgrid можна адаптувати для різних потреб – від окремої будівлі до великих громад або підприємств. Це робить їх особливо привабливими для майбутніх енергетичних стратегій, де гнучкість та стійкість до змін є важливими факторами.

Інтеграція з основною мережею: Забезпечення ефективної роботи мікромережі в On-Grid режимі потребує точного налаштування для уникнення конфліктів з основною електричною мережею.

У сфері альтернативної енергетики літєві батареї виконують ключову роль. Вони використовуються для зберігання електроенергії, виробленої сонячними панелями вдень, і її подальшого використання вночі або під час несприятливих погодних умов. Це дозволяє мінімізувати залежність від нестабільності генерації відновлюваних джерел енергії та забезпечити надійне постачання електроенергії у будь-який час. Зокрема, у випадку з вітровими електростанціями, АБ дозволяють накопичувати надлишкову енергію під час періодів сильного вітру, яка може бути використана у моменти, коли вітрова генерація недостатня.

Ключовим аспектом використання стаціонарних накопичувачів на основі літєвих батарей є їхнє застосування в енергетичних системах типу On-Grid, Off-Grid та гібридних системах. Системи On-Grid – це такі системи, які підключені до загальної електромережі і працюють спільно з нею. Вони використовують літєві батареї для зберігання надлишкової енергії, виробленої сонячними або вітровими станціями, і передають її назад в мережу або споживають у моменти підвищеного попиту (рис. 1.13). Це дозволяє оптимізувати витрати на електроенергію, зменшуючи залежність від централізованих постачальників електроенергії. Крім того, такі системи дозволяють використовувати модель роботи постачальників електроенергії, де користувачі можуть віддавати

надлишки енергії, що виробляються їхніми відновлюваними джерелами, в загальну мережу, отримуючи компенсацію або знижуючи власні рахунки за електроенергію [41].

Особливістю великих стаціонарних систем накопичення енергії є можливість підключення електротранспорту до мережі. V2G технологія дозволяє підключати електромобілі до мережі, що робить АБ електромобіля тимчасово накопичувачем енергії стаціонарної системи. Підключення відбувається через штатний порт швидкої зарядки електромобіля. Електромобіль може заряджатись у час коли навантаження на мережу низьке, а в час пікового навантаження віддавати свою енергію в мережу, тим самим зменшуючи навантаження на неї [42], [43], [44], [45].

На відміну від On-Grid, системи Off-Grid працюють незалежно від загальної мережі. Вони є автономними і можуть забезпечити повну незалежність від зовнішнього енергопостачання, що особливо важливо для віддалених або ізолюваних районів, де підключення до електромережі неможливе або економічно не вигідне. У таких системах літєві батареї накопичують електроенергію, вироблену сонячними або вітровими установками, для її подальшого використання протягом ночі або в періоди відсутності генерації.



Рисунок 1.13 – Будова промислової стаціонарної систем накопичення енергії

Гібридні системи поєднують в собі переваги як On-Grid, так і Off-Grid рішень. Вони можуть бути підключені до загальної мережі, але при цьому забезпечують автономність під час відключень або нестабільного електропостачання. У таких системах літєві батареї зберігають електроенергію для власного споживання, а надлишки можуть бути передані в загальну мережу. Це забезпечує гнучкість у використанні енергії та максимальну ефективність роботи системи. Гібридні системи є ідеальним вибором для систем, де можна мати резервну енергосистему, але залишатись підключеним до загальної електромережі.

1.4 Система керування акумуляторними батареями

Система керування акумуляторними батареями (Battery Management System, BMS) є ключовим компонентом у будь-якій акумуляторній системі, особливо у високопродуктивних системах, таких як електромобілі, стаціонарні енергетичні накопичувачі та різні промислові пристрої. Основне завдання BMS полягає в тому, щоб забезпечити безпечну, надійну та ефективну роботу батарейного блоку, запобігаючи можливим несправностям, таким як перезарядка, надмірна розрядка або перегрів (рис. 1.14). BMS контролює і керує різними аспектами роботи акумуляторів, щоб забезпечити їхню довговічність та максимальну продуктивність [46].

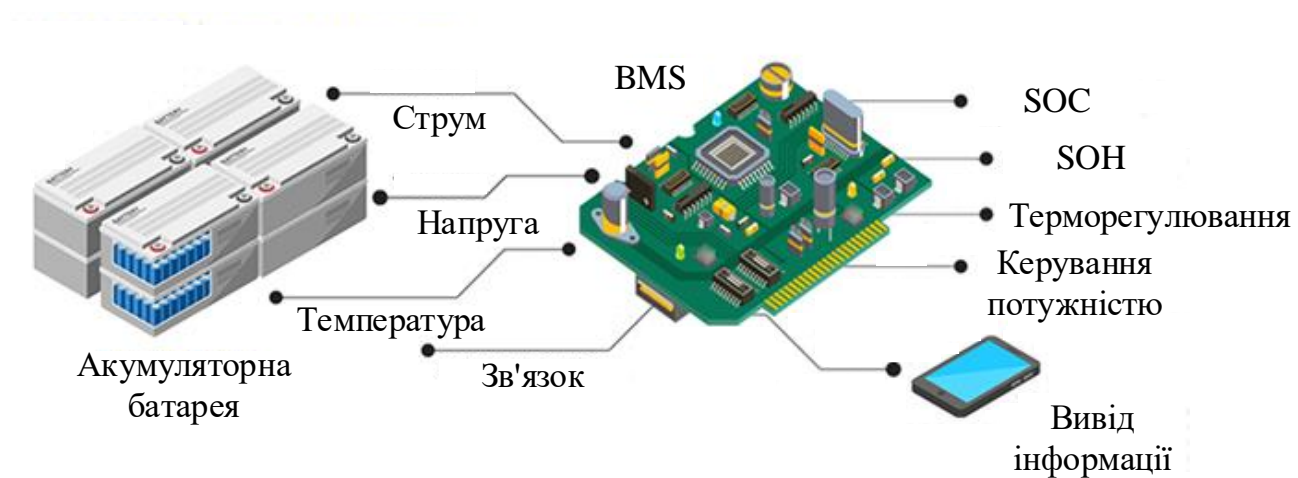


Рисунок 1.14 – Структура та функції BMS [47]

Основні функції BMS. Одна з найважливіших функцій BMS – це моніторинг параметрів батареї в режимі реального часу, таких як:

- напруга на кожній комірці або групі комірок;
- струм зарядки та розрядки;
- температура батарейного блоку або окремих комірок;
- SOC;
- SOH;
- опір ізоляції відносно корпусу АБ.

SOC АБ визначається як відношення поточної ємності АБ ($C_{\text{зал}}$) до залишкової максимальної ємності АБ ($C_{\text{макс}}$):

$$\text{SOC} = \frac{C_{\text{пот}}}{C_{\text{макс}}} \cdot 100\%. \quad (1.10)$$

Метод інтеграції струму базується на обчисленні кількості заряду, що входить або виходить з акумулятора. Він передбачає інтегрування струму:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) - \frac{1}{C_{\text{ном}}} \int_{t_0}^t I(t) dt, \quad (1.11)$$

де: $\text{SOC}(t)$ – стан заряду на момент часу t ;

$\text{SOC}(t_0)$ - початковий стан заряду на момент часу t_0 ;

$C_{\text{ном}}$ – номінальна ємність АБ;

$I(t)$ – струм на момент часу t (позитивний при заряді та негативний при розряді);

t_0 – початковий час;

t – поточний час.

Цей метод має переваги у вигляді простої реалізації, та швидкої реакції на зміну навантаження. Проте даний метод має недоліки у вигляді похибки що збільшується з часом, через похибку вимірювання струму. Також точність даного

метода сильно залежить від точності вимірювання $SOC(t_0)$, що також можна вважати недоліком.

Напруговий метод є одним із найпростіших підходів до визначення SOC. Основою цього методу є взаємозв'язок між напругою АБ та SOC:

$$SOC = f(V_{AB}), \quad (1.12)$$

де $f(V_{AB})$ – це функція залежності SOC від напруги АБ [48]. Через нелінійність залежності напруги від SOC, особливо в деяких діапазонах SOC, точність методу значно варіюється. Для покращення точності визначення V_{AB} під час роботи АБ, можна скористатись формулою (1.13), що враховує внутрішній опір ($R_{вн}$) та струм (I), що протікає через АБ.

$$V_{AB} = V_{\text{виміряне}} + I \cdot R_{\text{вн}}. \quad (1.13)$$

Фільтр Калмана застосовує математичні алгоритми для оцінки стану батареї за наявності шумів та невизначеностей у вимірюваннях. Використання фільтра Калмана дозволяє отримувати більш точні значення SOC, оскільки він коригує похибки та згладжує випадкові відхилення.

Штучний інтелект, зокрема, нейронні мережі дають змогу прогнозувати SOC, використовуючи дані попередніх циклів заряду-розряду. Ці алгоритми самонавчаються і з часом підвищують точність оцінювання, що робить їх перспективними для використання в сучасних системах управління акумуляторами.

Електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS). У цьому методі застосовується змінний струм малої амплітуди, а аналіз реакції батареї дозволяє з високою точністю визначати SOC. Хоча цей підхід широко використовується у наукових дослідженнях, його складність і вартість обмежують застосування у споживчих системах.

Процес визначення SOC ускладнюється тим, що характеристики АБ з часом змінюються через втрату загального ресурсу. Додаткові труднощі спричиняють вплив температури та струмових навантажень, що змінюють поведінку акумулятора і вимагають адаптивних алгоритмів для корекції точності визначення SOC.

SOH показник загального стану батареї від початкового, що враховує деградацію АБ, та визначається як відношення ($C_{\text{макс}}$) до номінальної ємності батареї при її виготовленні ($C_{\text{ном}}$):

$$\text{SOH} = \frac{C_{\text{макс}}}{C_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (1.14)$$

Моніторинг параметрів АБ дозволяє системі контролювати стан батареї та швидко реагувати на можливі небезпечні ситуації, такі як перевищення напруги або струму, що можуть призвести до пошкоджень або аварій.

Модулі АБ складаються з певної кількості окремих послідовно підключених комірок, важливо підтримувати рівномірний заряд між ними. Нерівномірний заряд може призводити до передчасної втрати ресурсу АБ а також зниження її продуктивності, оскільки обмежується доступна для використання ємність АБ. BMS може використовувати два методи балансування, такі як:

- Пасивне балансування, яке розсіює надлишкову енергію з більш заряджених комірок.
- Активне балансування, яке перерозподіляє енергію між комірками для вирівнювання їхнього стану заряду.

Балансування важливе для максимального використання ємності батареї та продовження її терміну служби.

BMS виконує функції захисту батареї від небезпечних умов експлуатації, які можуть викликати пошкодження або скоротити термін служби батареї. Ці функції включають:

Захист від перезарядки: Якщо напруга на комірці перевищує безпечний рівень, BMS автоматично припиняє зарядку або знижує її струм.

Захист від надмірної розрядки: Коли напруга на комірці падає нижче мінімального допустимого рівня, BMS може відключити навантаження, щоб запобігти пошкодженню комірки.

Захист від короткого замикання: BMS миттєво реагує на коротке замикання, відключаючи батарею від зовнішнього кола, щоб уникнути перегріву або пожежі.

При надмірному нагріванні комірок (через високе навантаження або несправності) BMS може знизити потужність або відключити батарею для охолодження.

SOC і SOH є критично важливими показниками для оцінки поточної ефективності та тривалості роботи батареї. SOC визначає поточний рівень заряду батареї, а SOH показує, наскільки сильно деградувала батарея з часом.

BMS використовує різні алгоритми, такі як кулонівський підрахунок (відстеження струму, що входить та виходить з батареї) та модельні підходи для точного визначення SOC та SOH. Ці параметри допомагають користувачеві або системі управління визначити, коли батарею потрібно заряджати або коли її ефективність починає суттєво знижуватися.

Температурний контроль є однією з основних функцій BMS, оскільки температура має вирішальний вплив на продуктивність та безпеку батареї. BMS відстежує температуру батарейного блоку та активує системи охолодження (рідинні або повітряні) при необхідності. У випадку надмірного нагріву, наприклад, під час швидкої зарядки або високих навантажень, BMS може знижувати потужність батареї для стабілізації температури або відключати її повністю, якщо температурні межі виходять за допустимі межі.

BMS також відповідає за комунікацію з іншими системами, наприклад, з інвертором або зарядним пристроєм у електромобілях. В сучасних BMS застосовуються такі комунікаційні стандарти: CAN, LIN, UART, RS-485, WI-FI. BMS передає дані про стан батареї, SOC, SOH, температуру та інші параметри. Це дозволяє ефективно інтегрувати батарею у систему транспортного засобу або інший пристрій та керувати її роботою відповідно до поточних потреб.

CAN – стандарт, призначений для організації високонадійних та недорогих каналів зв'язку у розподілених системах керування. Стандарт CAN відіграє ключову роль у BMS, що використовуються в електротранспорті та системах накопичення енергії, оскільки є найбільш поширеним протоколом комунікації між пристроями в таких системах.

CAN створений компанією Robert Bosch GmbH в середині 1980-х і знайшов широке застосування у промисловій автоматизації, технологіях розумного будинку, автомобільній промисловості та інших галузях. Найчастіше CAN-інтерфейс використовується як зв'язна ланка між головною магістраллю та багатьма допоміжними датчиками, механізмами і т. д., підключення яких до центральної магістралі не завжди доцільне [49].

CAN є послідовною шиною, що підтримує одночасну роботу багатьох ведучих пристроїв. Це означає, що всі вузли CAN-мережі мають можливість передавати дані і декілька вузлів одночасно можуть давати запит на шину. На ринку CAN присутній у двох версіях: версія 2.0A задає 11-бітову ідентифікацію повідомлень (тобто в системі може бути 2048 учасників), версія 2.0B – 29-бітову (536 млн. учасників). Слід відзначити, що версія 2.0B, яку часто називають FullCAN, поступово витісняє версію 2.0A, яку називають, також, BasicCAN [50].

Шина даних CAN використовує виту пару провідників і працює з максимальною швидкістю трансляції 1 Мбіт/с на довжині до 40 м. Із збільшенням відстані зменшується максимальна швидкість трансляції (напр. 250 кбіт/с до 250 м) [51], [52].

У будь-якій реалізації мережа CAN – фізичне середовище передачі даних інтерпретується як ефір, в якому контролери, працюють як приймачі-передавачі. При цьому, розпочавши передачу, контролер не перериває прослуховування ефіру, зокрема він відстежує і контролює процес передачі поточних даних. Це означає, що усі вузли мережі одночасно приймають сигнали, що передаються по шині. Неможливо послати повідомлення якомусь конкретному вузлу. Проте, CAN-контролери надають апаратну можливість фільтрації CAN-повідомлень.

CAN мережа призначена для комунікації так званих вузлів. Кожен вузол складається з двох складових. Це власне CAN-контролер, який забезпечує взаємодію з мережею і реалізує протокол, і мікропроцесор (CPU).

Режим зниженого енергоспоживання, в якому приймачі продовжують повідомляти контролер про стан шини для того, щоб при виявленні на шині інформаційних сигналів він міг вивести приймачі в нормальний режим роботи. Приклад кадру з ID:0x95 DLC: 3 Дані: 0x03 0xFF 0x55 можна побачити на рис. 1.15.

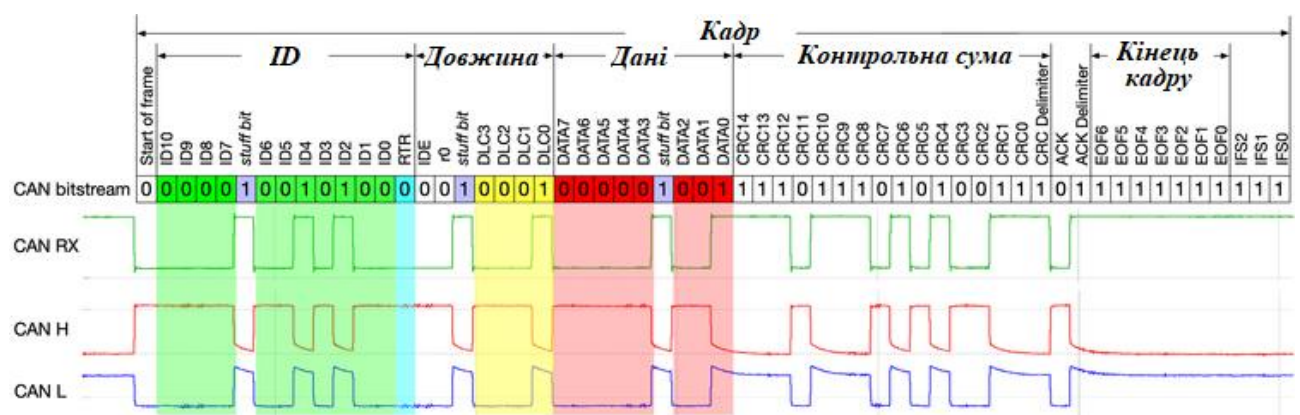


Рисунок 1.15 – Структура стандартного кадру CAN [51]

Шина CAN-FD є наступним етапом розвитку класичної шини CAN. CAN-FD забезпечує підвищену швидкість передачі даних та збільшений обсяг даних, що передаються в одному кадрі. Для шини CAN-FD необхідно використовувати спеціалізовані мікросхеми-трансивери з підвищеною швидкодією. Основні відмінності CAN-FD від класичної шини CAN [53]:

- Двошвидкісний режим роботи: CAN-FD функціонує одночасно на двох швидкостях. Поле арбітражу (заголовок кадру) передається з такою ж швидкістю, як і в класичному варіанті, наприклад, 500 кбіт/с. Однак поле даних передається зі швидкістю, що в рази перевищує швидкість передачі заголовка, і може досягати 12 Мбіт/с.

- Збільшена довжина кадру: CAN-FD може передавати до 64 байт даних в одному пакеті, тоді як класичний CAN обмежений максимум 8 байтами.
- Сумісність: Контролер CAN-FD здатний приймати класичні CAN-пакети, але класичний CAN-контролер не може обробляти пакети формату CAN-FD.

BMS забезпечує діагностичні функції, дозволяючи виявляти проблеми в роботі батареї на ранніх стадіях. Це може включати виявлення дефектних комірок, перевірку електричних ланцюгів та моніторинг загального стану батарейного блоку.

Крім того, деякі сучасні BMS використовують алгоритми прогнозування, щоб оцінювати залишковий термін служби батареї (RUL) на основі поточних даних про її експлуатацію. Це дозволяє прогнозувати, коли батарею потрібно буде замінити або провести технічне обслуговування.

Оскільки АБ може мати складну модульну структуру, BMS може складатись з одного модуля або ж мати модульну структуру, де є головний модуль і другорядні, якими він керує (рис. 1.16).

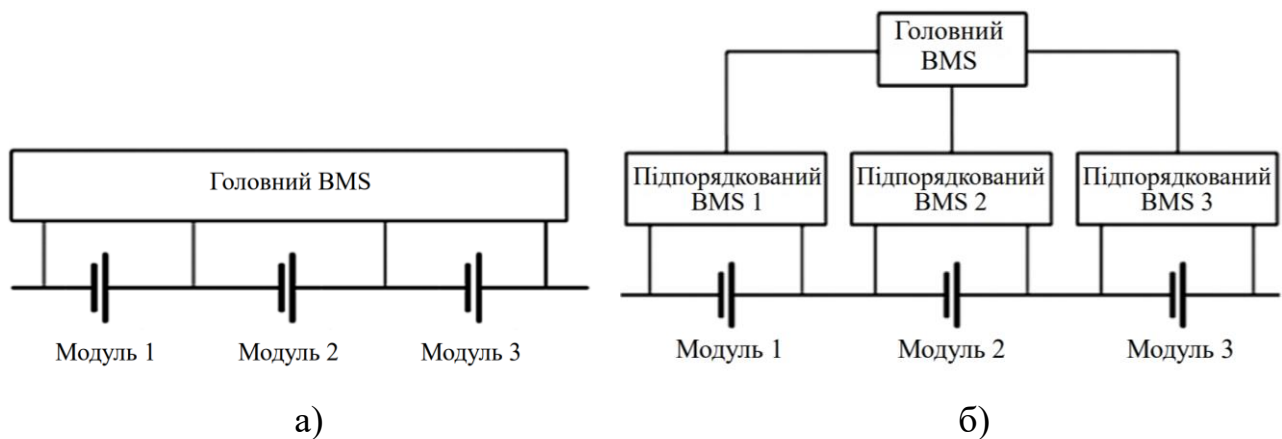


Рисунок 1.16 – Структурна схема, централізованої системи BMS (а)
та модульної системи BMS (б)

Дисбаланс між елементами негативно впливає на загальну продуктивність, термін служби та безпеку батареї. Зокрема, елемент з найнижчою ємністю або найвищим ступенем розряду стає "слабкою ланкою", обмежуючи загальну доступну ємність батареї (рис. 1.17). Більше того, дисбаланс може призвести до перезаряду або перерозряду окремих елементів під час циклів заряду-розряду. Перезаряд прискорює деградацію елемента, скорочуючи його термін служби та підвищуючи ризик перегріву і навіть займання. Перерозряд, у свою чергу, може призвести до незворотного пошкодження елемента та втрати його працездатності [54]. Балансування запобігає цим негативним явищам, забезпечуючи рівномірний розподіл заряду між елементами та оптимізуючи роботу батареї.

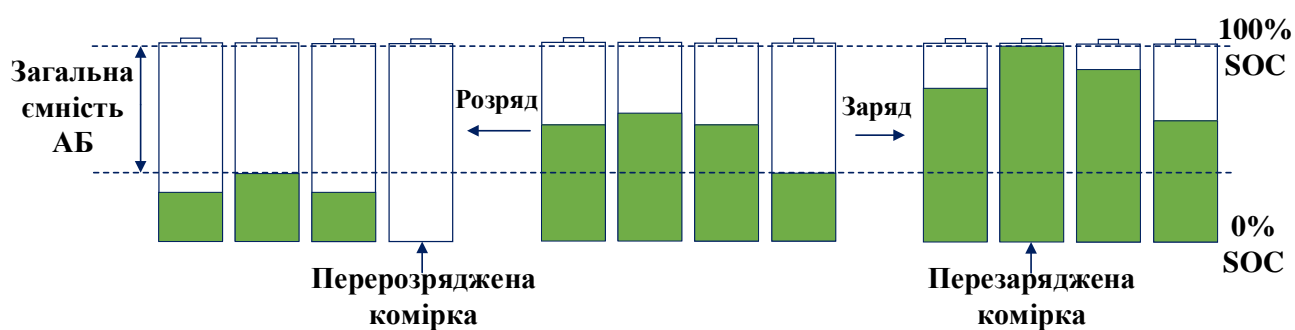


Рисунок 1.17 – Схема впливу дисбалансу на загальну ємність АБ [2], [55]

Пасивне балансування є одним із ключових методів вирівнювання зарядів між комірками акумуляторних батарей, особливо у великих батарейних системах, які використовуються в електромобілях. Враховуючи складність багатокomпонентних акумуляторних систем, важливо забезпечити рівномірний заряд усіх комірок для оптимізації продуктивності, продовження терміну служби акумулятора та запобігання перегріву або деградації окремих комірок. У цьому розділі детально розглянемо принципи роботи пасивного балансування, математичні аспекти процесу та його застосування в електромобілях.

АБ електромобіля складається з багатьох комірок, які з'єднані послідовно та паралельно для формування необхідної напруги та ємності. Під час експлуатації комірки не завжди працюють ідеально рівномірно через внутрішні

фактори, такі як різниця у внутрішньому опорі або ємності комірок, що може призводити до нерівномірного рівня заряду. Якщо не врівноважити заряд, деякі комірки можуть перезаряджатися або розряджатися занадто швидко, що призведе до їхньої деградації.

Пасивне балансування вирівнює напругу між комірками шляхом розсіювання надлишкової енергії у тих комірках, які мають вищий заряд. У найпростішому вигляді це досягається шляхом підключення резистора паралельно до кожної комірки або групи комірок. Коли напруга на комірці перевищує певний поріг, через резистор починає протікати струм, який розсіює надлишкову енергію у вигляді тепла. Це знижує напругу на комірці, вирівнюючи її із загальним рівнем.

Балансування з постійно підключеними резисторами, або статичне пасивне балансування, є одним із найбільш простих методів балансування акумуляторних батарей, зокрема літій-іонних (рис. 1.18). У цьому підході до кожної комірки батареї паралельно підключається резистор постійного опору, який постійно розсіює надлишкову енергію. Хоча цей метод балансування є менш ефективним порівняно з активними підходами, він має деякі специфічні застосування.

У статичному пасивному балансуванні резистори підключаються до кожної комірки або групи комірок батареї, і ці резистори постійно відводять невелику кількість енергії у вигляді тепла. Цей підхід дозволяє вирівнювати напругу на різних комірках, оскільки більш заряджені комірки віддають більше енергії через резистори, ніж комірки з меншим зарядом.

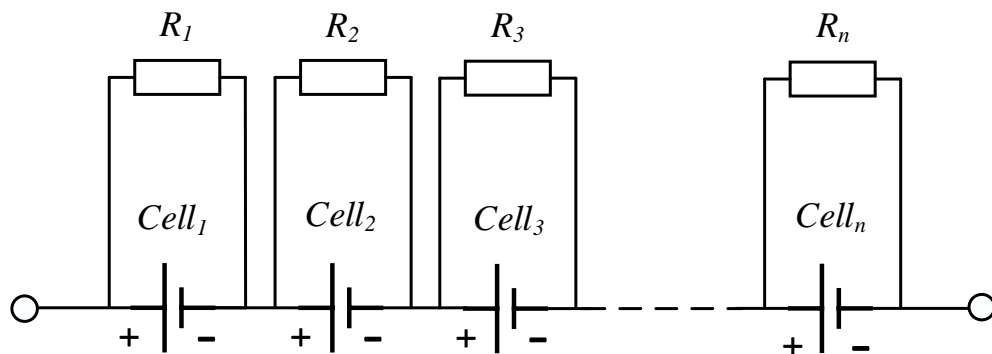


Рисунок 1.18 – Схема пасивного балансування елементів АБ, на основі фіксованих шунтів [56]

Оскільки напруга на кожній комірці змінюється в залежності від рівня SOC, більш заряджені комірки матимуть вищий струм через резистор, і, відповідно, більша кількість енергії розсіюватиметься через резистор у вигляді тепла. Цей процес допомагає поступово знизити напругу на перенаповнених комірках і вирівняти їх із менш зарядженими.

Переваги – простота та низька вартість: Це один із найбільш простих методів балансування, оскільки він не потребує складних електронних схем. Системи з постійно підключеними резисторами можуть бути виготовлені з мінімумом компонентів, що робить їх дешевшими у виробництві.

Оскільки цей метод не залежить від складних елементів управління, він досить надійний і рідко піддається збоєм. Постійно підключені резистори не вимагають активації або складної логіки контролю.

Недоліки - постійна втрата енергії. Основним недоліком цього підходу є постійні енергетичні втрати через резистори, які розсіюють енергію у вигляді тепла. Це робить систему менш ефективною, оскільки частина енергії батареї витрачається не на живлення навантаження, а просто на нагрівання.

Постійне розсіювання енергії через резистори може суттєво знизити загальну ефективність системи, особливо у великих батарейних масивах. Це може бути неприйнятним для сучасних високоефективних електромобілів або інших пристроїв, де важливим є кожен відсоток енергоефективності.

Неповна корекція: Статичне пасивне балансування не здатне повністю вирівняти напругу на всіх комірках у складних системах, оскільки резистори не можуть адаптуватися до різниць у напрузі. У системах з великим розбіжностями в заряді між комірками цей метод може виявитися недостатньо ефективним.

Теплове навантаження: Постійне виділення тепла через резистори може спричиняти локальні підвищення температури всередині батарейного модуля, що вимагає додаткових систем охолодження для забезпечення безпеки.

Пасивне балансування, яким керує BMS, починається, коли напруга на окремій комірці досягає визначеного порога (зазвичай це близько 4,2 В для NMC

або 3,6 В для LFP). Як тільки цей поріг досягнуто, BMS підключає резистор до цієї комірки (рис. 1.19).

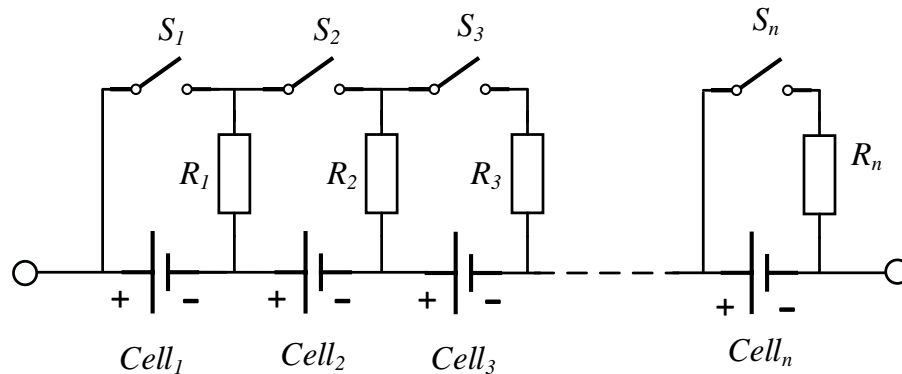


Рисунок 1.19 – Схема пасивного балансування елементів АБ [56], [57], [58]

Процес триває, доки напруга на цій комірці не знизиться до рівня інших комірок, після чого резистор відключається. Це відбувається циклічно для кожної комірки, поки всі не будуть збалансовані. Важливо відзначити, що пасивне балансування зазвичай відбувається на етапі завершення зарядки, коли більшість комірок вже майже заряджені, а різниця в напрузі між ними стає значущою.

Однією з основних переваг методу пасивного балансування є простота та надійність. Система не вимагає складних схем або управління. Резистори, що використовуються для розсіювання надлишкової енергії, є простими компонентами, які не часто виходять з ладу.

Оскільки система не потребує складних електронних схем або контролерів, пасивне балансування є дешевшим у реалізації порівняно з активним балансуванням. Це робить його привабливим варіантом для застосування в бюджетних електромобілях або менш складних акумуляторних системах.

Основний недолік пасивного балансування полягає в тому, що надлишкова енергія просто розсіюється у вигляді тепла. Це може призводити до втрат енергії та зниження загальної ефективності АБ. У випадку великих АБ або систем із частим циклом зарядки/розрядки ці втрати можуть стати значущими.

Енергетичні втрати на одному елементі через шунтуючий резистор можуть бути виражені як:

$$P_s = \frac{(V_i - V_{\max})^2}{R_s}, \quad (1.15)$$

де P_s – потужність, що розсіюється на шунтуючому резисторі;

V_i – напруга на елементі;

V_{\max} – порогове значення напруги;

R_s – опір резистора.

Пасивне балансування працює повільніше порівняно з активним балансуванням, оскільки потужність, що розсіюється через резистори, є обмеженою. Це може збільшувати загальний час зарядки акумулятора, особливо у випадку, якщо різниця в зарядах між комірками є значною. Розсіювання енергії у вигляді тепла може призводити до локального перегріву комірок, особливо якщо система охолодження батарей недостатньо ефективна. Це може негативно вплинути на термін служби акумулятора.

Пасивне балансування широко застосовується в електромобілях, особливо в бюджетних моделях або в електромобілях з невеликим запасом ходу. Цей метод дозволяє підтримувати стабільність АБ при мінімальних витратах на реалізацію. У поєднанні з іншими стратегіями управління батареями, такими як контроль температури та моніторинг стану комірок, пасивне балансування забезпечує достатню надійність для багатьох моделей електромобілів.

Зазвичай пасивне балансування використовується на етапі завершення зарядки батареї. Під час цього етапу система балансування відслідковує напругу на кожній комірці та активує резистори для вирівнювання напруги. У таких випадках балансування дозволяє запобігти перезарядженню окремих комірок, що важливо для довготривалої надійності батареї.

Водночас пасивне балансування рідше використовується в високопродуктивних електромобілях, де важлива максимальна ефективність і

мінімальні втрати енергії. У таких моделях переважно застосовуються активні методи балансування, які перерозподіляють енергію між комірками без теплових втрат, або комбіновані системи, де пасивне балансування працює разом з активним.

Активне балансування акумуляторних батарей є одним із найефективніших підходів для підтримки рівного заряду між елементами батареї. Цей метод дозволяє не лише розсіювати надлишкову енергію, як у пасивному балансуванні, але й переносити її від більш заряджених елементів до менш заряджених, що забезпечує кращу енергоефективність та зменшує втрати енергії (рис. 1.20). Активне балансування має особливе значення для великих акумуляторних систем, таких як електромобілі, накопичувачі енергії та інші системи, де важлива максимальна ефективність використання заряду кожного елемента. Мета активного балансування полягає в передачі енергії між елементами АБ за допомогою різних електронних схем, таких як перетворювачі напруги, ємнісні та індуктивні схеми. Це дозволяє уникнути розсіювання енергії у вигляді тепла, як це відбувається в пасивних схемах, і забезпечити рівномірний заряд елементів акумуляторної системи.

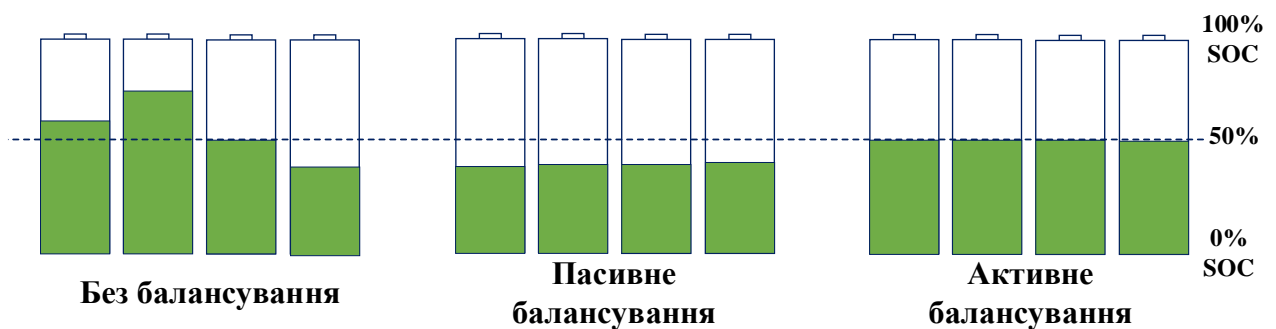


Рисунок 1.20 – Принцип роботи активного методу балансування [5], [56]

Індуктивне балансування – метод використовує індуктивні компоненти для передачі енергії між елементами батареї. Найчастіше це котушки індуктивності, які працюють як трансформатори або перемикачі енергії між елементами з різними рівнями заряду. Основна перевага цього методу – висока

ефективність і здатність переносити великі обсяги енергії з мінімальними втратами.

Принцип роботи полягає у передачі енергії від одного елемента до іншого за допомогою індуктивного зберігання енергії. Коли заряд одного елемента перевищує заряд іншого, різниця в напрузі спричиняє струм через індуктивний елемент, що передає енергію менш зарядженому елементу. Перевагами індуктивного балансування є його ефективність та здатність працювати з великими струмами.

Ємнісне балансування – для передачі енергії використовуються конденсатори, які можуть тимчасово накопичувати заряд від одного елемента батареї та передавати його іншому. Ємнісне балансування підходить для систем із відносно невеликим різновидом напруги між елементами, оскільки конденсатори можуть швидко заряджатися і розряджатися, передаючи енергію між елементами.

Основний процес полягає в тому, що конденсатор підключається до елемента з вищою напругою, де він заряджається, а потім підключається до менш зарядженого елемента для передачі енергії. Цей метод має дещо нижчу ефективність порівняно з індуктивним балансуванням, але підходить для швидкої передачі невеликих кількостей енергії.

Балансування за допомогою DC-DC перетворювачів. Один з найбільш універсальних методів активного балансування. Використання DC-DC перетворювачів дозволяє ефективно регулювати потоки енергії між елементами з різними рівнями заряду. Перетворювачі напруги можуть підвищувати або знижувати напругу на окремих елементах, забезпечуючи точну передачу енергії.

DC-DC перетворювачі можуть бути інтегровані у системи балансування для точного контролю над рівнями заряду. Наприклад, якщо один елемент батареї має вищу напругу, перетворювач може знижувати напругу цього елемента і передавати енергію іншому елементу, де напруга нижча. Такий підхід дозволяє підтримувати ефективне балансування незалежно від кількості елементів та потужності системи.

Активне балансування акумуляторних батарей має суттєві переваги, але й певні недоліки. До переваг відноситься висока енергоефективність: завдяки перерозподілу енергії між комірками, а не розсіюванню надлишку у вигляді тепла, досягається мінімізація втрат. Збільшення терміну служби батареї є наслідком рівномірного розподілу заряду, що знижує деградацію окремих елементів. Гнучкість та масштабованість дозволяють застосовувати активні системи у великомасштабних системах, а швидкість балансування забезпечує високу продуктивність. Також покращується загальна ємність за рахунок повнішого використання заряду кожної комірки. Часто наявна можливість детального моніторингу.

Недоліками активного балансування є складність та вища вартість, що зумовлено використанням складних електронних схем та додаткових компонентів (індуктивностей, конденсаторів, DC-DC перетворювачів). Це веде до збільшення розміру, ваги системи, а іноді потребує додаткового тепловідведення. Також присутнє власне енергоспоживання системи балансування.

Розглянемо математичну модель активного балансування акумуляторної системи з n комірками. Нехай напруга на i -му елементі дорівнює $V_i(t)$, а струм балансування між елементами – $I_{ij}(t)$, де i та j – індекси елементів, між якими відбувається передача енергії.

Потужність, яка передається від елемента i до елемента j , обчислюється за різницею напруг цих елементів, помноженою на струм, що протікає між ними.

$$P_{ij}(t) = V_i(t) \cdot I_i(t) - V_j(t) \cdot I_j(t), \quad (1.16)$$

де: $P_{ij}(t)$ – потужність, що передається від елемента i до елемента j ;

$V_i(t)$ та $V_j(t)$ – напруги на відповідних комірках;

$I_i(t)$ та $I_j(t)$ – струм що протікає через відповідні комірки.

Отже, BMS виконують дуже важливі функції захисту АБ, що напряму впливає на ресурс АБ. На даний час більшість BMS має пасивний спосіб

балансування, що має низьку ефективність. Використання BMS з активним способом балансування, є більш ефективним, та може бути наступним етапом розвитку BMS.

1.5 Висновки до розділу 1

1. АБ на основі літію мають широке застосування, основні напрямки це: портативні пристрої, електротранспорт та стаціонарні накопичувачі енергії. Існує шість основних типів Li-ion акумуляторів, які масово використовуються. З огляду на задачі які має виконувати акумуляторна батарея, необхідно обирати певний тип Li-ion акумуляторів, враховуючи переваги і недоліки кожного з них.

2. АБ формується з модулів, які, в свою чергу, складаються з окремих комірок, з'єднаних послідовно або паралельно. Кінцева конфігурація з'єднань комірок і модулів визначається необхідними значеннями ємності та напруги батареї.

3. BMS є незамінним компонентом у будь-якій сучасній батарейній системі, зокрема у складних акумуляторних модулях електромобілів. Вона забезпечує безпеку, захист від несправностей, точний моніторинг, балансування комірок та оптимізацію роботи батареї. Завдяки BMS, акумулятори можуть працювати більш ефективно та довго, що є критично важливим у системах, де надійність та тривалість роботи мають ключове значення.

4. Існує два методи балансування акумуляторних батарей: активний та пасивний. Незважаючи на недоліки пасивного методу порівняно з активним, саме він використовується в сучасних серійних електромобілях. Застосування активного балансування потенційно може підвищити ефективність та ресурс акумуляторних батарей.

РОЗДІЛ 2. РІШЕННЯ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

2.1 Процес деградації акумуляторних батарей

Літій-іонні акумулятори відіграють критичну роль у сучасних електромобілях та інших електронних пристроях завдяки їхній високій енергоємності та тривалому терміну служби. Однак, як і будь-яка інша батарея, вони піддаються поступовій деградації під час використання, що призводить до втрати ємності, збільшення внутрішнього опору, зменшення терміну служби і зниження загальної ефективності. Деградація акумуляторів – це багатофакторний процес, що включає хімічні, механічні, електричні та температурні чинники [59]. У цьому розділі розглянемо основні механізми деградації, включаючи хімічну деградацію, вплив температури, режими зарядки та розрядки, а також інші важливі фактори.

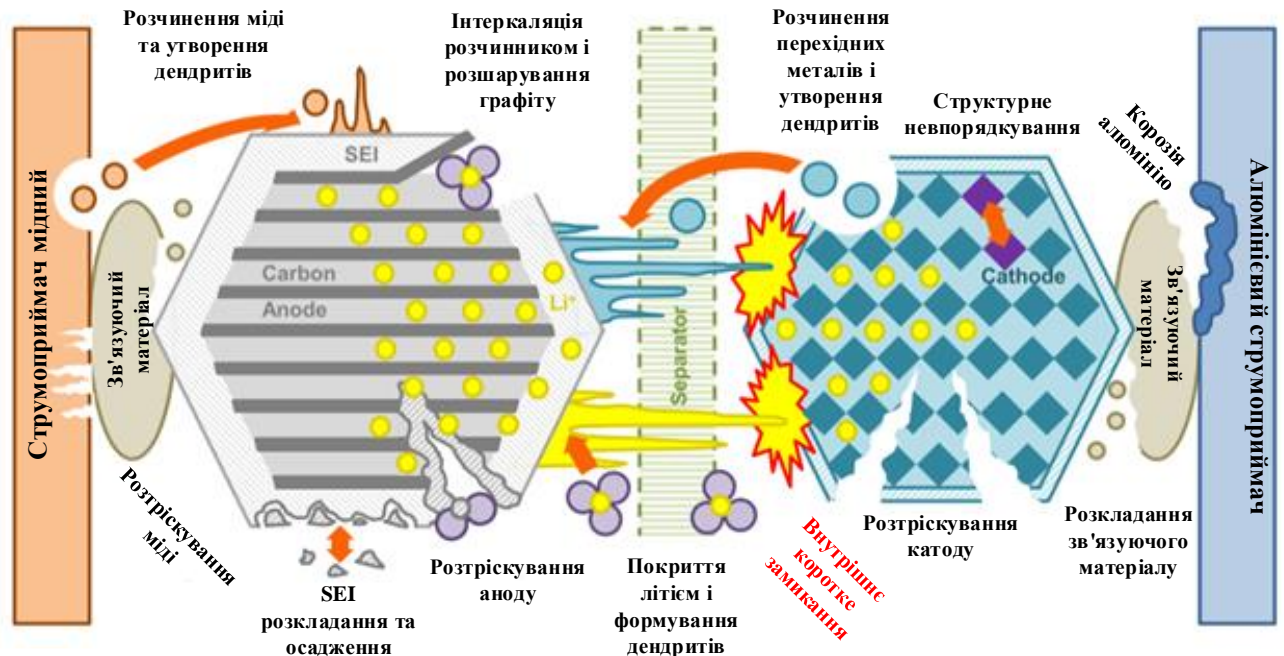


Рисунок 2.1 – Процеси деградації в літійових акумуляторах [60]

Одним із головних чинників деградації літєвих акумуляторів є хімічний розклад електроліту. Під час зарядки та розрядки акумулятора електроліт бере участь у перенесенні літій-іонів між анодом і катодом. Однак, з часом електроліт поступово розкладається, утворюючи побічні продукти, які можуть призводити до утворення твердого електролітного інтерфейсу (SEI) на поверхні анода.

Плівка SEI початково формується на ранніх циклах зарядки і є важливою для стабільної роботи акумулятора, оскільки вона запобігає подальшій деградації електроліту. Проте, надмірне зростання SEI призводить до збільшення внутрішнього опору батареї, оскільки плівка погіршує рух літій-іонів між електродами. Це призводить до втрати ємності та підвищення тепловиділення під час роботи.

Крім того, на катоді може відбуватися окислення металів, що викликає втрату активного матеріалу і також сприяє деградації акумулятора. Наприклад, у літій-іонних батареях з катодами на основі оксидів нікелю, марганцю або кобальту, окислення металевих компонентів сприяє втраті структурної стабільності катода. Формула для опису втрати ємності через збільшення внутрішнього опору може бути записана так:

$$C_{\text{зал}} = C_{\text{поч}} - I \cdot R, \quad (2.1)$$

де $C_{\text{зал}}$ – залишкова ємність акумулятора після певного циклу;

$C_{\text{поч}}$ – початкова ємність акумулятора;

I – струм, що протікає через акумулятор;

R – внутрішній опір, що зростає через утворення SEI.

Температура є одним з найважливіших чинників, що впливають на деградацію літєвих акумуляторів. Як високі, так і низькі температури можуть негативно вплинути на ефективність і термін служби батареї.

Високі температури прискорюють хімічні реакції всередині акумулятора, що сприяє швидшому розкладу електроліту, збільшенню SEI-плівки, а також виділенню газів, які можуть призвести до збільшення тиску всередині

акумулятора. Крім того, високі температури можуть викликати термічний розгін (thermal runaway), при якому температура акумулятора неконтрольовано зростає, що може призвести до займання або вибуху батареї.

Низькі температури, навпаки, знижують швидкість хімічних реакцій всередині батареї, що обмежує здатність батареї видавати необхідну кількість енергії. У холодних умовах внутрішній опір батареї зростає, що також може знизити ємність батареї. Це явище тимчасове, але постійна робота в таких умовах може прискорити деградацію електродів і електроліту.

При експлуатації літій-іонних акумуляторів температурні коливання створюють значне механічне навантаження на електродні матеріали. Це призводить до формування мікротріщин в структурі як анодного, так і катодного матеріалу. Експлуатація акумуляторів при підвищених температурах суттєво пришвидшує деградацію. Зокрема, інтенсивніше відбувається утворення побічних продуктів електрохімічних реакцій, що також негативно впливає на стабільність матеріалів електродів. Спостерігається прискорений ріст плівки (SEI), внаслідок чого знижується доступність активної поверхні електродів та підвищується внутрішній опір комірки.

При перевищенні робочої температури вище 40°C значно пришвидшуються процеси окислювальної деградації електроліту, що призводить до суттєвого скорочення ресурсу акумулятора. Особливо небезпечним є режим термічного розгону, який може виникати при температурах понад 60°C що спричиняє критичні пошкодження акумулятору. Формула, яка описує деградацію ємності батареї за впливу температури, може бути наближено виражена за допомогою закону Арреніуса:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}. \quad (2.2)$$

де: k – швидкість деградації,

A – передекспоненційний множник (константа),

E_a – енергія активації процесу деградації (в Дж/моль).

У контексті батарей ця залежність показує, що при підвищенні температури швидкість деградації значно зростає. Для акумуляторів часто використовують модифіковану форму:

$$C(T) = C_0 e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}. \quad (2.3)$$

де: $C(T)$ – залишкова ємність при температурі T ,

C_0 – початкова ємність при референтній температурі T_0 .

Ця формула показує, що з підвищенням температури швидкість реакцій, які призводять до деградації акумулятора, зростає експоненційно. Це також пояснює, чому акумулятори, що працюють при вищих температурах, деградують набагато швидше, ніж ті, що працюють при оптимальних температурах (20-25°C).

Механічне навантаження та структурні зміни. Механічне навантаження всередині акумулятора виникає через повторне заряджання і розряджання, яке викликає циклічне розширення і стиснення матеріалів електродів. Зокрема, при зарядці літій-іони вставляються в графітовий анод, що призводить до його розширення, тоді як під час розрядки вони залишають анод, викликаючи його стиснення. Ці цикли призводять до утворення мікротріщин у структурах матеріалів, що збільшує внутрішній опір і зменшує ємність акумулятора.

Механічні пошкодження матеріалів електродів сприяють втраті електропровідності в цих зонах, що призводить до зменшення кількості активних ділянок, які можуть брати участь у зарядці і розрядці. Особливо це стосується анодів на основі кремнію, які мають велику схильність до розширення і стиснення під час циклів зарядки.

Продовжуючи розгляд механічного навантаження та структурних змін, варто зазначити, що постійні цикли розширення і стиснення матеріалів електродів призводять до появи мікротріщин, які, з часом, можуть стати значущими і суттєво вплинути на роботу акумулятора. Ці структурні пошкодження порушують цілісність матеріалів анода і катода, що зменшує кількість доступних активних зон для хімічних реакцій.

Аноди на основі графіту, які використовуються у більшості літій-іонних акумуляторів, схильні до менших механічних змін, але навіть у таких системах можливе накопичення мікротріщин після багатьох циклів зарядки/розрядки. У більш передових технологіях, таких як кремнієві аноди, проблема ще більш виражена, оскільки кремній розширюється майже в три рази під час процесу зарядки, що значно збільшує механічний тиск на структуру. Хоча кремній має вищу ємність порівняно з графітом, його схильність до руйнування через механічні цикли зарядки обмежує його використання без додаткових інженерних рішень для стабілізації матеріалу.

Окрім тріщин, під час зарядки та розрядки відбувається електрохімічна корозія струмоз'ємів, особливо на катодах. Це може призводити до зниження електропровідності всередині батареї та появи додаткового внутрішнього опору, що також сприяє деградації.

Режими зарядки та розрядки. Неправильні режими зарядки та розрядки, такі як швидка зарядка, також можуть суттєво пришвидшувати деградацію акумуляторних батарей. Швидка зарядка призводить до високих струмів, які викликають значне нагрівання батареї і підвищують ризик перегріву. Це, у свою чергу, пришвидшує утворення SEI-плівки на аноді та призводить до значної втрати ємності батареї.

Крім того, під час швидкої зарядки може виникати літіювання анода, коли літій-іони не встигають інтегруватися в графітову структуру і осідають на поверхні анода у вигляді металевого літію. Це явище є незворотним і призводить до необоротної втрати ємності. Металевий літій на аноді також може створювати ризики для безпеки, включаючи можливість короткого замикання і загоряння батареї.

Глибокі цикли розрядки також негативно впливають на термін служби батареї. Якщо батарея постійно розряджається до дуже низьких рівнів (менше 10% SOC), це створює додаткове механічне та електрохімічне навантаження на комірки, що пришвидшує деградацію активних матеріалів. Тому для збереження

тривалого терміну служби літій-іонних батарей рекомендується уникати глибоких циклів розрядки та заряджати їх, коли рівень заряду падає до 20–30%.

Постійна експлуатація літій-іонних батарей у режимах високих струмів, як під час швидкої зарядки, так і при інтенсивній розрядці, призводить до зниження загальної ефективності і швидшої деградації. Високі струми створюють значне навантаження на електрохімічну структуру батареї. Як результат, відбувається нерівномірний розподіл літій-іонів у електродах, що сприяє нерівномірній деградації окремих комірок. Крім того, швидкі цикли зарядки можуть викликати надмірне тепло, що прискорює хімічні реакції розпаду електроліту.

Негативний вплив має також перезаряджання акумуляторів. Якщо батарею заряджати понад встановлений рівень напруги (приблизно 4,2 В для літій-іонних комірок), це може спричинити прискорену деградацію катода через структурну нестабільність, що веде до втрати активних матеріалів. Це також підвищує ймовірність утворення побічних продуктів, які осідають на електродах і збільшують внутрішній опір. У крайніх випадках перезаряджання може призвести до термічної нестабільності та навіть вибуху батареї через термічний розгін.

Ще однією поширеною причиною деградації є часткова зарядка та зберігання акумуляторів при низьких або високих рівнях заряду. Наприклад, зберігання батареї на повному заряді при високій температурі призводить до прискореного зростання SEI-плівки на аноді, що сприяє втраті ємності. Оптимальний рівень заряду для тривалого зберігання зазвичай становить близько 50%. Зберігання батареї на низькому рівні заряду також може знизити її загальну ємність, особливо якщо батарея перебуває в такому стані протягом тривалого часу.

Для мінімізації деградації рекомендується застосовувати оптимальні режими зарядки і розрядки. Наприклад, використання повільної зарядки може значно продовжити термін служби батареї, оскільки зменшується кількість тепла, що генерується під час зарядки, і знижується ймовірність утворення металевого літію на аноді. Важливо також підтримувати батарею в межах оптимальних

рівнів заряду, уникаючи як глибоких циклів розрядки, так і тривалого зберігання на повному заряді.

Окрім правильних режимів зарядки та розрядки, важливу роль у зниженні деградації відіграє температурний контроль. Багато сучасних електромобілів мають системи активного охолодження батареї, що допомагають підтримувати її робочу температуру в оптимальних межах. Наприклад, електромобілі Tesla використовують систему рідинного охолодження, яка забезпечує рівномірний розподіл температури по всій батареї. Це дозволяє мінімізувати перегрів і знизити ризик термічної деградації.

Розпад електроліту під час роботи батареї може призводити до утворення газів, що збільшує внутрішній тиск у комірках. Це явище посилюється за високих температур або внаслідок перезаряджання. Утворення газів може спричинити збільшення внутрішнього тиску в комірках, що в екстремальних випадках призводить до їхнього механічного пошкодження або навіть розриву.

Утрата електроліту через побічні реакції або витікання з комірок також сприяє підвищенню внутрішнього опору і зниженню загальної ємності батареї. Це особливо небезпечно для герметичних комірок, які використовуються в більшості сучасних літій-іонних батарей. Втрата електроліту знижує здатність акумулятора до ефективного перенесення літій-іонів, що призводить до зниження його ефективності та швидшої деградації [61].

Деградація літій-іонних акумуляторів є складним багатофакторним процесом, який залежить від хімічних, електрохімічних, температурних та механічних чинників. Хімічний розклад електроліту, утворення SEI-плівки, збільшення внутрішнього опору, структурні пошкодження електродів, неправильні режими зарядки та розрядки, а також температурні впливи – всі ці чинники впливають на продуктивність і тривалість життя акумулятора. Оптимальні режими роботи, ефективне охолодження та контроль за станом заряду можуть значно зменшити вплив деградації і продовжити термін служби батареї [60], [62], [63], [64], [65].

2.2 Обмежений діапазон заряду-розряду як засіб продовження ресурсу

В ході роботи, було проаналізовано статистику пробігу автомобілів залежно від віку, використовуючи дані інтернет-ресурсу з продажу автомобілів в Україні, оскільки офіційні статистичні дані відсутні. З наведених на рис. 2.2 видно, що автомобілі віком 2 роки мають середній показник загального пробігу 30 тис. км, віком 20 років – 300 тис. км, з чого можна зробити висновок, що в Україні середньодобовий пробіг слабо залежить від віку автомобіля й становить орієнтовно 41 км. Статистика інших країн підтверджує той факт, що і там середньодобовий пробіг автомобіля теж не перевищує 50 км, наприклад у Великобританії він складає 25 миль, тобто 40 км [66]. У США від 19 до 46 миль в залежності від штату [67].

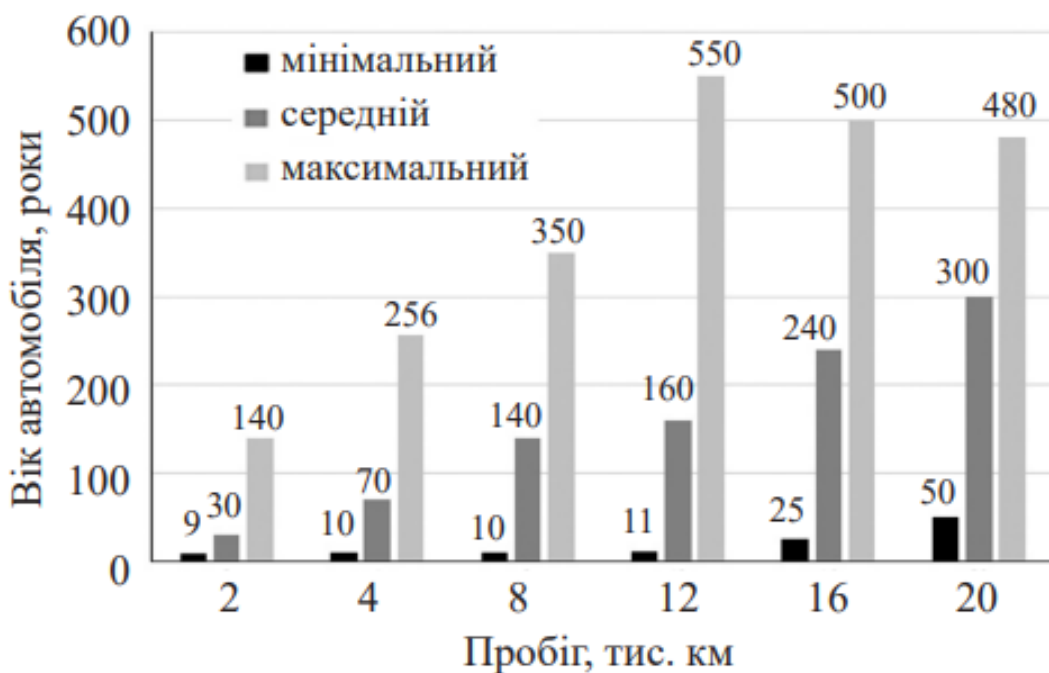


Рисунок 2.2 – Статистика пробігу автомобілів в Україні залежно від віку [68]

Отже, бачимо, що запас ходу будь-якого серійного електромобіля більший за середньодобовий пробіг середньостатистичного автомобіля. Ресурс акумулятора на основі літію характеризується кількістю циклів розряд-заряд [69], яка може бути отримана за умови дотримання умов експлуатації електромобіля,

визначених виробником. Для сучасних акумуляторів кількість гарантованих циклів розряд-заряд становить мінімум 2000 при втраті до 30% ємності від номінальної. Але на деградацію впливають також інші фактори, такі як температура акумулятора, струм та напруга його заряду та розряду. Чим менше навантаження на акумулятор, тим повільніше відбувається деградація.

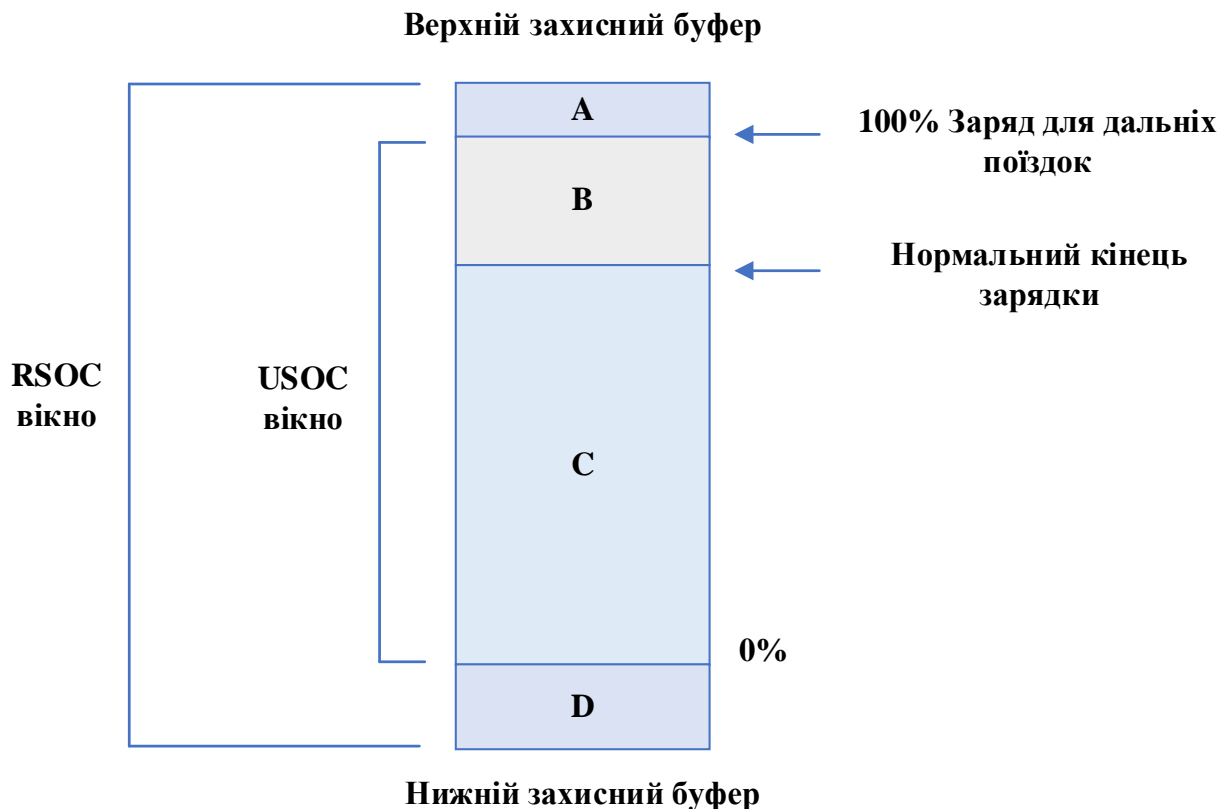


Рисунок 2.3 – Зони розподілу ємності акумуляторної батареї

- A – резерв ємності батареї, заблокований для користувача;
- B – ємність, яку користувач може використовувати для дальніх поїздок;
- C – доступна користувачеві “повсякденна” ємність;
- D – нижній резерв ємності, недоступний користувачеві.

Таким чином, на панелі приладів користувача відображається рівень заряду USOC (usable state of charge), що знаходиться в межах зон B та C, а дійсний рівень

заряду акумулятора RSOC (real state of charge) може знаходитись в діапазоні зон від А до D, але не відображатися для користувача [70].

Ресурс акумуляторів – це кількість циклів заряду-розряду акумулятора до втрати певної ємності, що може сильно коливатися в більшу або меншу сторону залежно від умов експлуатації. Виробником акумуляторів гарантується певна кількість повних циклів заряду-розряду, тобто ресурс при $DOD = 100\%$, за якої SoH не впаде нижче встановленого значення за умови використання акумулятора в заданих виробником режимах роботи, що надаються в технічній документації до кожної моделі. Виробник вказує максимальну напругу заряду та розряду акумулятора, і при функціонуванні акумулятора в цьому діапазоні напруги буде використана його повна ємність, а значить глибину розряду (depth of discharge, DOD) слід вважати 100%. Загальний ресурс акумуляторної батареї можна вимірювати кількістю повних циклів заряду-розряду, тобто при глибині розряду 100%. Якщо $DOD < 100\%$, то кількість часткових циклів перераховується по відношенню до повних.

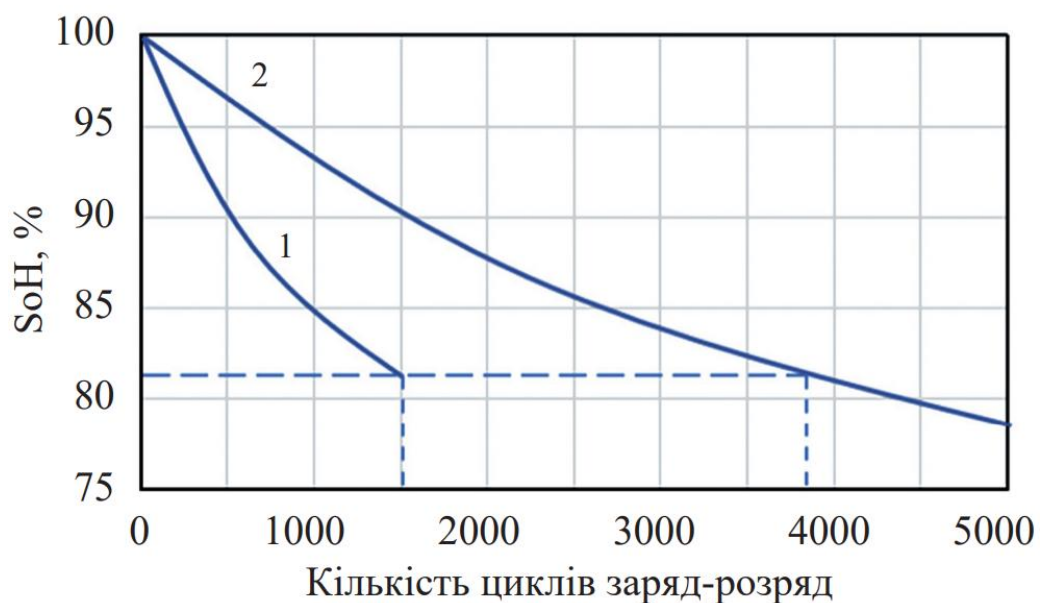


Рисунок 2.4 – Залежність SoH акумуляторної батареї від кількості циклів заряд-розряд при DOD 100% (1) та 50% (2) [71]

Дослідження показали, що SOH літійового акумулятора залежить від кількості циклів заряду та розряду акумулятора та DOD. З рис. 2.4 видно, що за однакового рівня SoH при меншому рівні DOD кількість циклів заряд-розряд акумулятора є більшою. При функціонуванні з DOD = 50% доступна ємність акумуляторної батареї, як і запас ходу, удвічі менша порівняно з експлуатацією при DOD = 100%, але за таких умов у понад два рази збільшується кількість циклів зарядрозряд, а отже ресурс батареї також збільшується. Як можна побачити на рис. 2.4, після 1500 повних циклів заряду-розряду втрата ємності складає 18% від номінальної (SOH = 82%). При частковому циклі заряд-розряд з DOD = 50%, тобто при використанні половини ємності акумулятора, втрата 18% ємності настає після 3750 таких циклів. Оскільки за кількістю енергії повний цикл дорівнює двом неповним з DOD = 50%, то наявний приріст у 750 таких неповних циклів, або ж 375 повних. Приріст ресурсу акумуляторної батареї при такому частковому циклі складає 20%.

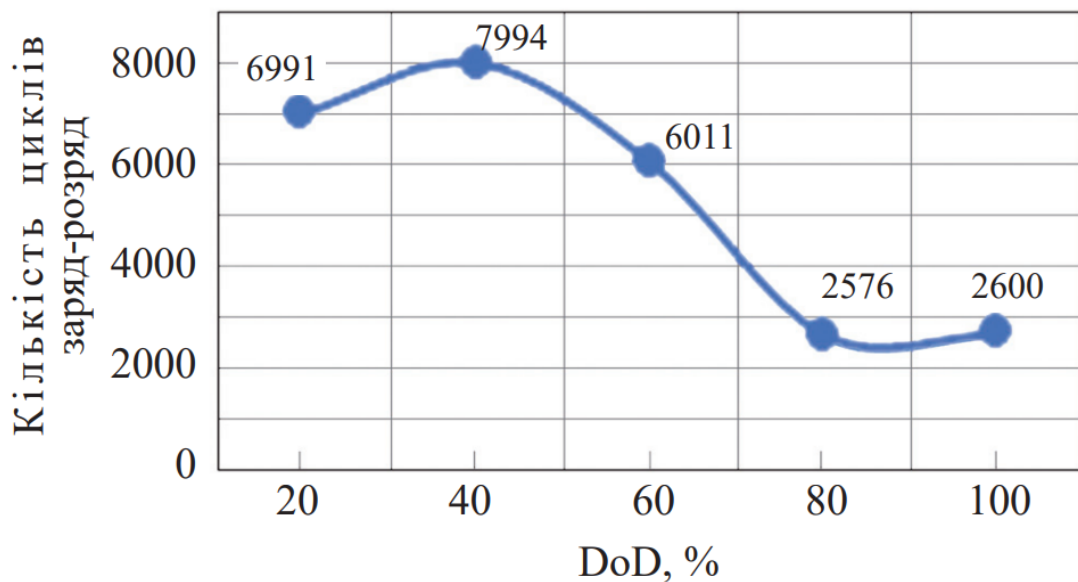


Рисунок 2.5 – Залежність кількості циклів заряд-розряд АБ до втрати певної ємності від глибини розряду [72]

Результати дослідження [72] показали, що кількість повних циклів заряд-розряд акумулятора до втрати певної ємності становить 2600 (рис. 2.5). За таких самих умов експлуатації акумулятора, але при $DOD = 60\%$ кількість циклів до втрати такої самої ємності дорівнює 6011, тобто при обмеженні робочої ємності величиною 40% від повної ємності приріст складає 3411 циклів. Максимально ефективною є експлуатація при $DOD = 40\%$, коли досягається найбільша кількість циклів заряд-розряд, що відповідає максимальному ресурсу батареї. На основі попереднього аналізу можна зробити висновок, що збільшити ресурс акумуляторної батареї електромобіля можна шляхом обмеження рівня заряду-розряду. В електромобілі, запас ходу якого в декілька разів більший за необхідний денний запас, можна обмежувати рівень заряду шляхом обмеження заряду батареї і таким чином регулювати доступну користувачеві ємність залежно від його потреб.

Дослідження [73] виявили що циклічна деградація зменшується з температурою, тоді як календарна деградація збільшується. Крім того, результати дослідження календарного життя продемонстрували прискорену деградацію комірок при $SOC > 60\%$. Таким чином, оптимізація умов експлуатації необхідна для максимального збільшення терміну служби акумулятора.

Визначення меж часткового зарядно-розрядного циклу. Виробники електромобілів з великим запасом ходу з самого початку обмежують програмно ємність батареї, створюючи зони A та D (див. рис. 2.3) для того, аби з часом, коли батарея починає деградувати, використовувати цей резерв для компенсації втраченої ємності. Але, як показало дослідження [72], зниження доступної для використання ємності на 20% ($DOD = 80\%$) не призводить до збільшення ресурсу акумулятора. Найефективнішим виявилось використання акумуляторної батареї в межах 40 – 80% від повної ємності. Отже, якщо у користувача немає потреби у використанні всієї доступної ємності, можна обмежувати рівень заряду батареї верхнім рівнем зони C або навіть нижче. Таке обмеження, скоріш за все, не завдаватиме проблем переважній більшості користувачів. Також слід враховувати, що для кожного типу акумулятора є рекомендована виробником напруга

зберігання, за якої акумулятор найменше деградуватиме у часі. Календарну деградацію необхідно брати до уваги при виборі діапазону доступної користувачеві ємності, оптимізувавши її так, щоб під час простою електромобіля рівень заряду максимально довго знаходився на рівні напруги зберігання, яка зазвичай близька до половини рівня заряду. Таке рішення створює передумови для збільшення терміну експлуатації батареї на десятки років незалежно від кількості циклів заряд-розряд. Вікно RSOC охоплює діапазон рівня заряду SoC від 0 до 100%. Розмір вікна USOC, яке лежить в межах вікна RSOC, накладає деяке обмеження на доступну для користування ємність. Цей розмір залежить від базових налаштувань BMS, встановлених виробником електротранспорту. В подальшому він може змінюватися системою BMS з огляду на такі фактори, як температура та SOH батареї. В межах вікна USOC знаходиться діапазон DOD, який залежить від того, як саме користувач електромобіля заряджає та розряджає батарею. Зі зменшенням діапазона DOD збільшується кількість можливих варіантів його розміщення відносно SOC (див. рис. 2.3). Як показує дослідження [72], на кількість циклів окрім DOD впливає також діапазон SOC, в якому використовується акумулятор. На рис. 2.6 наведено графіки залежності рівня втрат ємності акумулятора від кількості циклів заряду-розряду при використанні акумулятора в певних межах рівня заряду за однакової температури. З цих залежностей видно, що в умовах однакового рівня деградації батареї кількість циклів заряду-розряду залежить від діапазону рівня заряду, причому різниця може бути суттєвою. Оскільки один повний цикл розряду-заряду акумулятора відповідає певному пройденому шляху електромобіля, кількість таких циклів акумулятора відбиває загальну величину пройденого шляху електромобіля в кілометрах. З рис. 2.6 було взято інформацію про кількість циклів акумулятора до настання рівня SOH = 90% при використанні у різних діапазонах рівня заряду. Як можна побачити з наведених у табл. 2.1 результатів, за однакової глибини розряду акумулятора у різних діапазонах рівня заряду кількість циклів заряд-розряд буде різною. Так, при DOD = 60% кількість циклів заряд-розряд у діапазоні рівня заряду 85 – 25% буде більшою, ніж у діапазоні 100 – 40%, а при

DOD = 50% вона буде більшою у діапазоні 75 – 25%, ніж у діапазоні 100 – 50%. Тобто можна зробити висновок, що недозарядження акумулятора позитивно впливає на його ресурс.

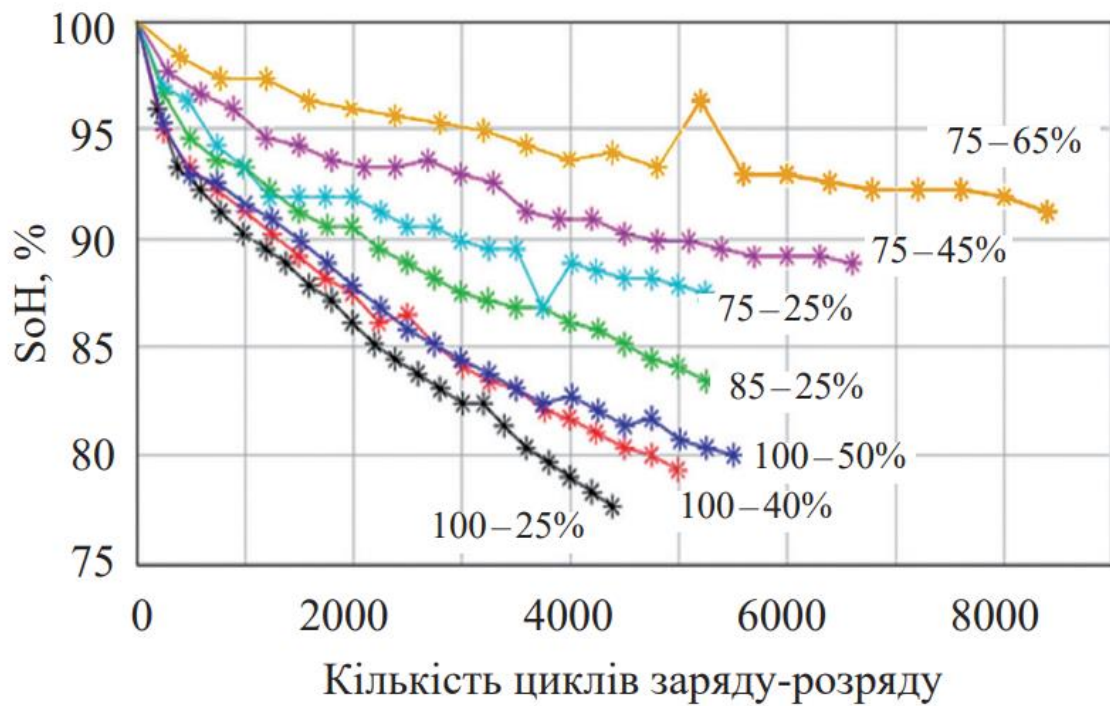


Рисунок 2.6 – Залежність рівня деградації АБ від кількості циклів заряду-розряду в різних діапазонах рівня заряду за температури 20°C [74]

Таблиця 2.1 – Вплив умов реалізації зарядо-розрядних циклів акумуляторних батарей на їхній ресурс до втрати 10% ємності [2],[3],

DoD, %	Діапазон заряду батареї, %	Кількість циклів до втрати ємності 10%	Запас ходу на одному заряді, км	Середній пробіг, тис. км	Приріст пробігу, %
100	100-0	700*	300	210	0
75	100-25	1000	225	225	7,1
60	100-40	1250	180	225	7,1
	85-25	2000	180	360	71,4
50	100-50	1500	150	225	7,1
	75-25	3000	150	450	114,3
30	75-45	5000	90	450	114,3
10	75-65	9000	30	270	28,6

Отже, обмеження діапазону рівня заряду-розряду акумулятора позитивно впливає на продовження його ресурсу, що призводить до приросту кількості повних циклів заряду-розряду. Власники електромобілів з запасом ходу, більшим їхнього добового пробігу, можуть використовувати не повний цикл акумуляторної батареї, а частковий, залежно від потреб, тим самим значно продовжуючи її ресурс. Частковий цикл може знаходитися в різних діапазонах рівня заряду, і вибір цього діапазону також впливає на ресурс акумулятора. На ресурс акумуляторної батареї електромобіля також може суттєво впливати система BMS, оскільки дисбаланс між величинами напруги комірок призводить до використання акумулятора у ширшому діапазоні рівня заряду: комірки з напругою, вищою за середню, довше працюють у більш високому діапазоні рівня заряду, а з меншою напругою – у більш низькому. Отже, необхідно шукати шляхи модернізації BMS для поліпшення показників точності вимірювання напруги комірок та струму балансування [1], [3].

Надалі потрібно розробляти автоматичні системи, які без участі користувача прогнозуватимуть дальність поїздки й на основі цього регулювати доступну для користувача ємність шляхом автоматичного припинення заряджання електромобіля.

2.3 Алгоритм вибору оптимального режиму використання акумуляторної батареї

Вибір оптимального режиму зарядно-розрядного циклу може значно збільшити ресурс акумуляторних батарей. В електротранспорті можливе обмеження тільки рівня до якого заряджати акумуляторну батарею, оскільки обмеження рівня розряду акумулятора може негативно вплинути на зручність його використання. У стаціонарних накопичувачах енергії, в залежності від об'єму батарей та режиму роботи більша варіативність дій для вибору оптимального діапазону зарядно-розрядного циклу.

Розглянемо можливі шляхи впровадження системи що буде реалізовувати оптимальний частковий цикл в електротранспорті. Електротранспорт можна поділити на 2 категорії, персональний електротранспорт та громадський. В першу категорію входять, електромобілі та мікромобільний електротранспорт. До громадського електротранспорту можна віднести автобуси та тролейбуси які їздять по заданому маршруту без постійного підключення до мережі. Застосування даної системи прогнозування можливе у випадках, коли АБ не використовується на повну ємність, а отже в мікромобільному електротранспорті застосування такої системи неможливо.

Для роботи системи вибору оптимального режиму зарядно-розрядного циклу, необхідно мати значення прогнозованого запасу ходу в даний момент, та прогнозований необхідний

більш точне прогнозування запасу ходу часто не враховують споживання кліматичної установки, чи не роблять поправку на стиль водіння, а значить штатна система прогнозування запасу ходу може мати досить велику похибку.

Сучасний електротранспорт оснащений бортовими комп'ютерами та різноманітними сенсорами, які збирають велику кількість даних про його роботу та взаємодію з навколишнім середовищем. Запас ходу (D) зазвичай в електротранспорті розраховується:

$$D = \frac{C_{nom} \cdot SoH}{(C_{сп} \cdot K_{св}) + C_{ку}}, \quad (2.4)$$

де: $C_{сп}$ - середнє споживання енергії (кВт·год/км);

$C_{ку}$ – споживання кліматичної установки;

$K_{св}$ – коефіцієнт, що враховує вплив стилю водіння на запас ходу.

Проте в усіх електричних транспортних засобах штатна система прогнозування запасу ходу не враховує більшість доступних факторів, що впливає на запас ходу.

На запас ходу електромобіля впливають багато факторів, які можна поділити на внутрішні та зовнішні. До внутрішніх можна віднести все, що стосується будови транспортного засобу: ємність акумуляторної батареї, ефективність двигуна, кількість двигунів, вага транспортного засобу, коефіцієнт аеродинамічного опору, опір коченню шин, можливість рекуперативного гальмування. На внутрішні фактори користувач не може вплинути, проте зовнішні фактори частково залежать від нього, до них можна віднести: швидкість руху, стиль водіння, додаткова вага, рельєф та тип покриття дороги, зовнішня температура.

Ці дані є джерелом інформації для навчання і налаштування системи вибору часткового циклу, на основі прогнозування необхідного користувачу запасу ходу. Система повинна збирати данні про стан батареї: SOC, температуру, напругу, струм, SOH, історію попередніх циклів заряду-розряду. Цю інформацію можна отримати від BMS. Окрім цього, в електромобілі є мультимедійна система з функцією навігації, яка також має данні про місцезнаходження транспортного засобу, швидкість пересування, маршрут поїздки, рельєф місцевості, знаходження зарядних станцій. Також, в більшості сучасних електромобілів, є функція доступу до глобальної мережі інтернет, що дає змогу отримувати данні прогнозу погоди, що також необхідно для системи прогнозування запасу ходу. Отже, збираючи всю цю інформацію система вибору оптимального часткового циклу, повинна прогнозувати необхідний запас ходу для користувача опираючись на зібрані данні і обирати рівень заряду достатній для користувача. Система повинна бути гнучкою, та швидко підлаштовуватись під користувача. Для виконання цієї задачі можливе застосування нейронної мережі.

В ході роботи розглянуто приклад простої нейронної мережі, яка може прогнозувати запас ходу необхідний для користувача в певний момент часу (рис. 2.7). Запропонована нейронна мережа має п'ять шарів входу, які отримують інформацію: дані про попередню поїздку, стан АБ, погодні умови, день тижня, рельєф місцевості. Наступним етапом, дані передаються в прихований шар через вагові коефіцієнти, де відбувається нелінійна трансформація цих даних.

Результати прихованого шару передаються у вихідний нейрон, який видає прогноз запасу ходу.

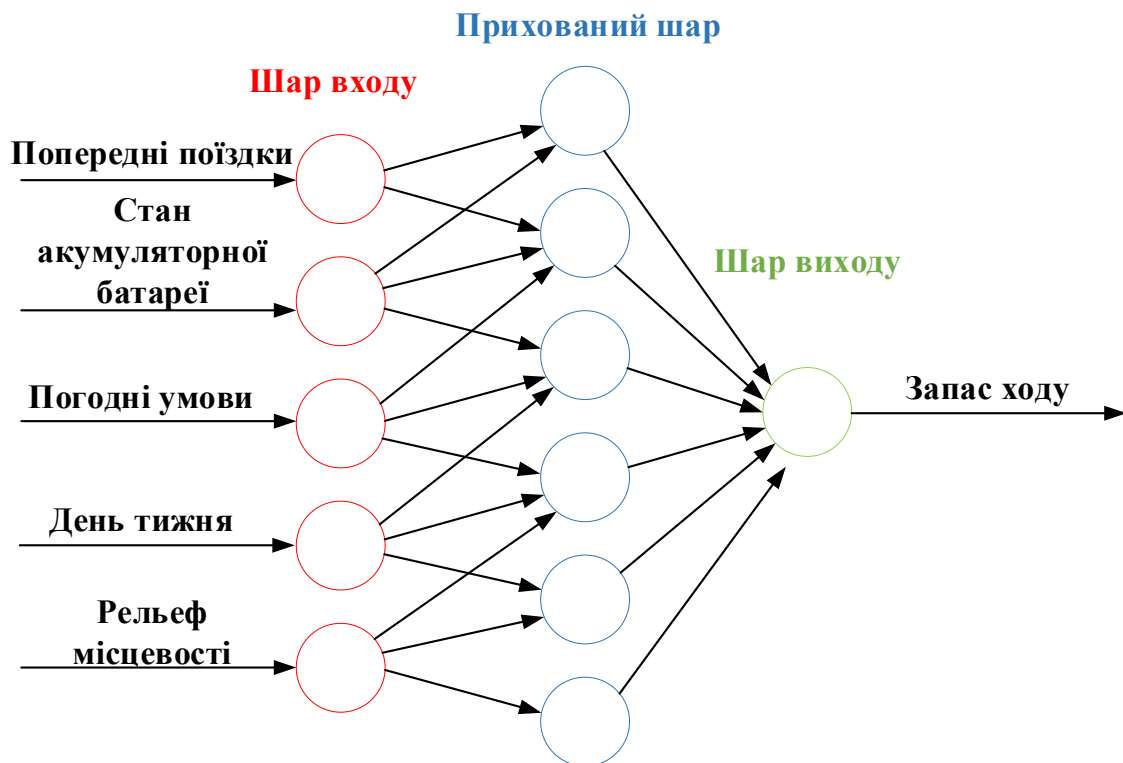


Рисунок 2.7 – Приклад нейронної мережі системи прогнозування запасу ходу

Для підвищення точності та надійності запропонованої моделі прогнозування запасу ходу електромобіля, побудованої на основі нейронної мережі, можливий ряд удосконалень в подальшому. Розширення кількості вхідних даних є основним напрямком. Включення інформації про стиль водіння, який характеризується як агресивний або економний, дозволить врахувати індивідуальні особливості керування транспортним засобом, що суттєво впливають на енергоспоживання. Дані про інтенсивність використання кліматичної установки (охолодження або обігрів салону) також є важливим фактором, оскільки ці системи споживають значну кількість енергії. Врахування тиску в шинах, який впливає на опір коченню, та завантаженості автомобіля (кількість пасажирів і маса багажу), що безпосередньо впливає на загальну масу транспортного засобу, дозволить підвищити точність прогнозу.

Застосування більш складних архітектур нейронних мереж відкриває нові можливості для моделювання. Рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема, завдяки своїй здатності обробляти послідовності даних, є особливо перспективними для аналізу історії поїздок. Це дозволяє виявляти складні часові залежності та патерни у споживанні енергії, що неможливо при використанні традиційних архітектур прямого поширення.

Альтернативним підходом є використання ансамблів моделей. Об'єднання декількох різних нейронних мереж, кожна з яких навчена на різних підмножинах даних або з використанням різних архітектур, дозволяє отримати більш стійкий та узагальнений прогноз. Такий підхід зменшує ризик перенавчання та підвищує загальну точність моделі.

Реалізація механізму онлайн-навчання є важливим кроком для забезпечення адаптивності моделі до змінних умов. Постійне додаткове навчання мережі на нових даних, що надходять під час експлуатації електромобіля, дозволяє їй враховувати зміни в стилі водіння, стані акумуляторної батареї, а також інші фактори, що можуть змінюватися з часом. Це забезпечує підтримку високої точності прогнозування протягом усього терміну служби автомобіля.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Деградація АБ складний процес, на який впливає багато факторів. Процес деградації АБ напряму залежить від умов експлуатації та від старіння з часом. Для мінімізування впливу часу, виробники АБ дають рекомендації умови їх зберігання, це певна температура та напруга заряду, що допомагає зменшити деградацію від впливу часу. Проте, більше впливу на ресурс АБ мають умови експлуатації. Інтенсивність зносу визначається такими факторами, як температурний режим, глибина розряду, величина струмів заряду/розряду та кількість циклів роботи. Недотримання оптимальних умов призводить до прискореної втрати ємності та потужності АБ, скорочуючи її загальний ресурс. Отже, оптимізація умов експлуатації АБ може збільшити її загальний ресурс.

2. Багато досліджень показують, що обмеження глибини розряду АБ позитивно впливає на ресурс. Аналіз таких досліджень показав, що в більшості з них не береться до уваги діапазон рівня заряду в якому відбувається цикл з обмеженою глибиною розряду. На основі досліджень в яких зазначався, діапазон рівня заряду в якому відбувалось циклювання АБ, було зроблено висновки, що при однаковій глибині розряду, але різних діапазонах рівня заряду, дуже суттєво може відрізнятись загальний ресурс АБ. Було зроблено аналіз, згідного якого вибір оптимального діапазону рівня заряду-розряду АБ дуже позитивно впливає на її ресурс, що може призвести до збільшення її ресурсу на 114%. Також, слід зауважити, що пошук найоптимальніша точка середини часткового циклу може бути пов'язаним із рекомендованою напругою зберігання АБ, яка різна для кожної моделі.

3. Розглянуто можливі технічні рішення розробки та впровадження в електромобілі адаптивної системи вибору оптимального діапазону в якому відбувається частковий цикл. Для приватних користувачів електромобілів, з можливістю зарядки вночі, одним із таких рішень може бути розробка нейронної мережі яка на основі вхідних даних прогнозує необхідний для користувача запас ходу на день, та обмежує рівень до якого відбувається заряд АБ електромобіля.

4. Основні наукові результати представлені у другому розділі опубліковано у роботах [1], [2], [3].

РОЗДІЛ 3. ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЯК ОСНОВА ПОБУДОВИ СИСТЕМИ БАЛАНСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

3.1 Топології активних балансірів на основі перетворювачів

У цьому розділі буде розглянуто топології активних балансірів на основі перетворювачів. Активні балансири можна класифікувати за напрямком перетікання енергії, загальна класифікація представлена на рис. 3.1.

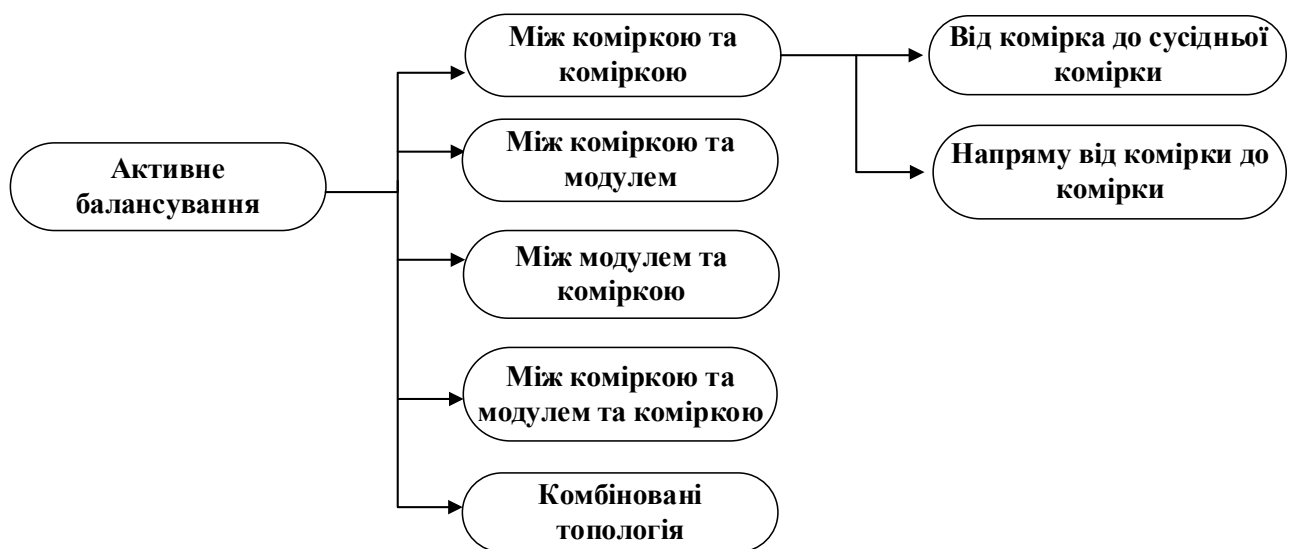


Рисунок 3.1 – Методи активного балансування [75], [76], [77]

Методи передачі енергії між комірками (Cell to cell) переносять надлишкову енергію, накопичену в найбільш заряджених комірках, до сусідніх найменш заряджених. Методи передачі енергії від комірки до батареї (Cell to pack) передають енергію від комірки з найвищою напругою до всієї батареї. Методи передачі енергії від батареї до комірки (Pack to cell) передають енергію від всієї батареї до окремої комірки за допомогою гальванічно-розв'язаних DC/DC перетворювачів. Нарешті, методи передачі енергії від комірки до батареї і до комірки (Cell to pack to cell) передають енергію від обраної комірки (або комірок)

до всієї батареї, від всієї батареї до цільової комірки (або комірок) або від обраної комірки (або комірок) до цільової комірки (або комірок).

DC/DC перетворювачі поділяються на два основні види, ізолювані та неізолювані. Перетворювачі із гальванічною ізоляцією, забезпечують розділення вхідних та вихідних ланцюгів, запобігаючи протіканню струму між ними. Це досягається за допомогою трансформатора, оптопари або іншого гальванічно-розв'язуючого компонента, загальна класифікація перетворювачів представлена на рис. 3.2.

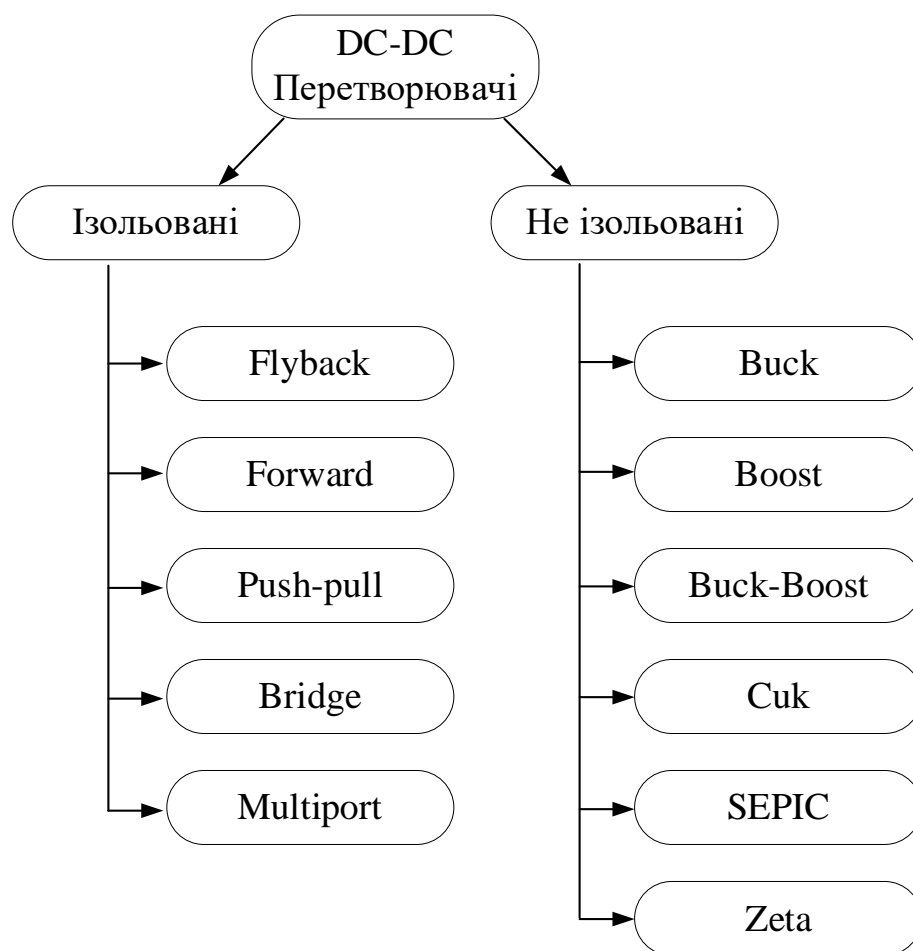


Рисунок 3.2 – Класифікація DC-DC перетворювачів [8], [78]

В залежності від методу перетікання енергії, в активному балансірі можуть застосовуватись різні типи перетворювачів. Неізолювані перетворювачі можуть застосовуватись для перетікання енергії між сусідніми комірками. Ізолювані

перетворювачі можуть більш широко застосовуватись в активних балансирах, оскільки дозволяють робити обмін енергією між двома будь-якими джерелами енергії. Далі розглянемо приклади топологій активних балансирів.

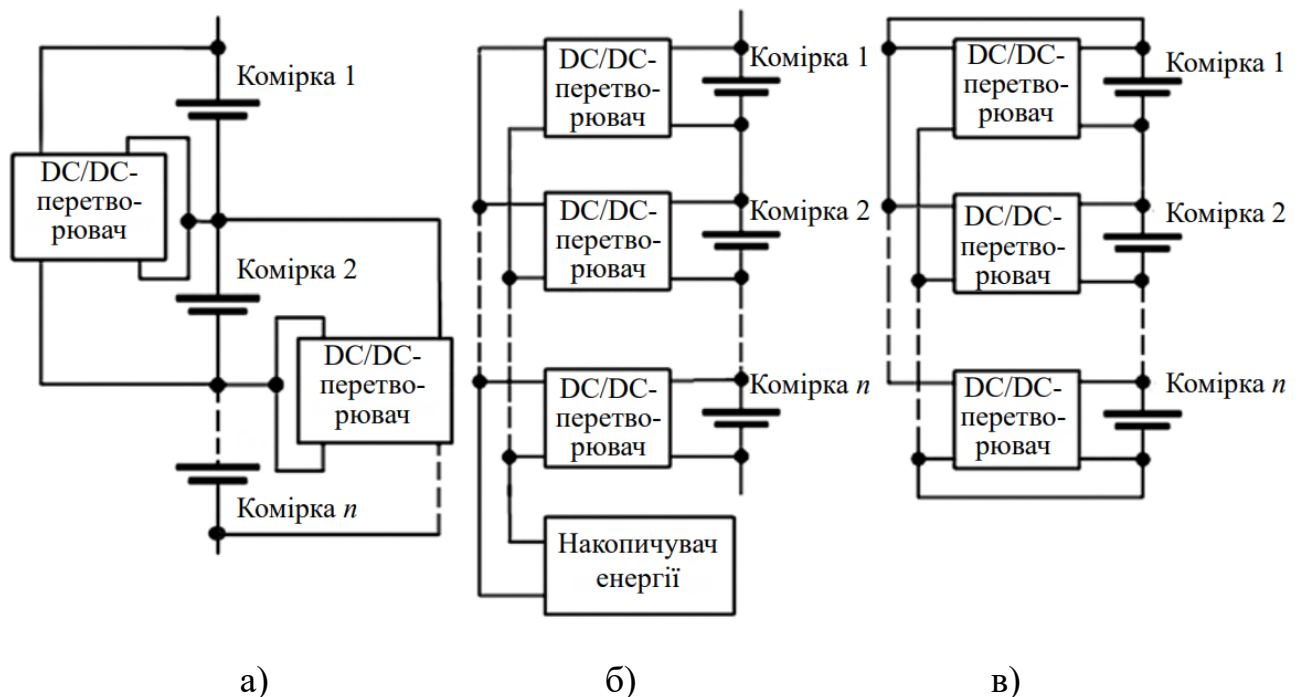


Рисунок 3.3 – Топології активних балансирів на основі перетворювачів

На рис. 3.3 (а) проілюстровано топологію активного балансира, що реалізує метод перетікання енергії "комірка-сусідня комірка". Принцип роботи полягає у перерозподілі енергії від комірки з вищим рівнем заряду до сусідньої комірки з нижчим рівнем. Дана топологія характеризується відносною простотою схемотехнічною реалізацією та можливістю використання гальванічно-неізованих перетворювачів. Для повноцінної роботи такого балансира, перетворювач повинен бути двонаправленим. Проте, слід зазначити суттєвий недолік: балансування не сусідніх комірок потребує передачі енергії через проміжні комірки, що призводить до їх зайвого циклування (заряд-розряд) та негативно впливає на термін служби і загальну ефективність балансування. Зі збільшенням кількості комірок у батареї спостерігається зниження швидкості балансування та зростання втрат енергії під час її передачі [79]. Кількість

перетворювачів в такій топології залежить від кількості комірок, і можна представити як $n-1$, де n кількість комірок.

На рис. 3.3 (б) представлено топологію активного балансування "комірка-додатковий накопичувач-комірка" [80]. Вона передбачає використання двонаправленого ізолюваного перетворювача, що дозволяє кожній комірці батареї заряджатись або розряджатись від додаткового накопичувача енергії. Перевагою даної топології є можливість обміну енергією між будь-якими комірками, а не лише сусідніми, що підвищує швидкість та ефективність балансування. Також забезпечується балансування всього акумуляторного модуля відносно інших модулів, якщо АБ має модульну структуру, шляхом заряду або розряду всіх комірок модуля до заданого рівня від додаткового накопичувача, що неможливо для інших топологій. Проте напруга загальної шини через яку відбувається обмін енергією, напряму залежить від напруги додаткового накопичувача, що в деяких випадках може бути недоліком. Слід зазначити, що схемотехніка цієї топології вирізняється підвищеною складністю та вартістю у порівнянні з розглянутими раніше [81]. Кількість перетворювачів в даній топології дорівнює кількості комірок.

На рис. 3.3 (в) зображено топологію активного балансування "комірка-модуль-комірка" [82]. Дана топологія передбачає використання двонаправленого ізолюваного перетворювача, що забезпечує заряджання або розряджання комірки від модуля, в якому вона знаходиться. Подібно до топології з додатковим накопичувачем енергії, ця схема дозволяє здійснювати обмін енергією між будь-якими комірками. Відсутність додаткового накопичувача сприяє зменшенню втрат енергії, проте робить меншим функціонал. Як і в попередній топології, кількість перетворювачів дорівнює кількості комірок. Недоліком даної топології є відсутність можливості балансування акумуляторного модуля відносно інших модулів [83].

На рис. 3.4 представлено топологію активного балансира, що базується на використанні DC-DC перетворювача та матриці ключів. Схема характеризується одним рівнем ключів та наявністю двонаправленого ізолюваного DC-DC

перетворювача. Запропонована топологія реалізує метод "комірка-модуль-комірка", де комірка, що потребує балансування, комутується до загального акумуляторного блоку за допомогою DC-DC перетворювача.

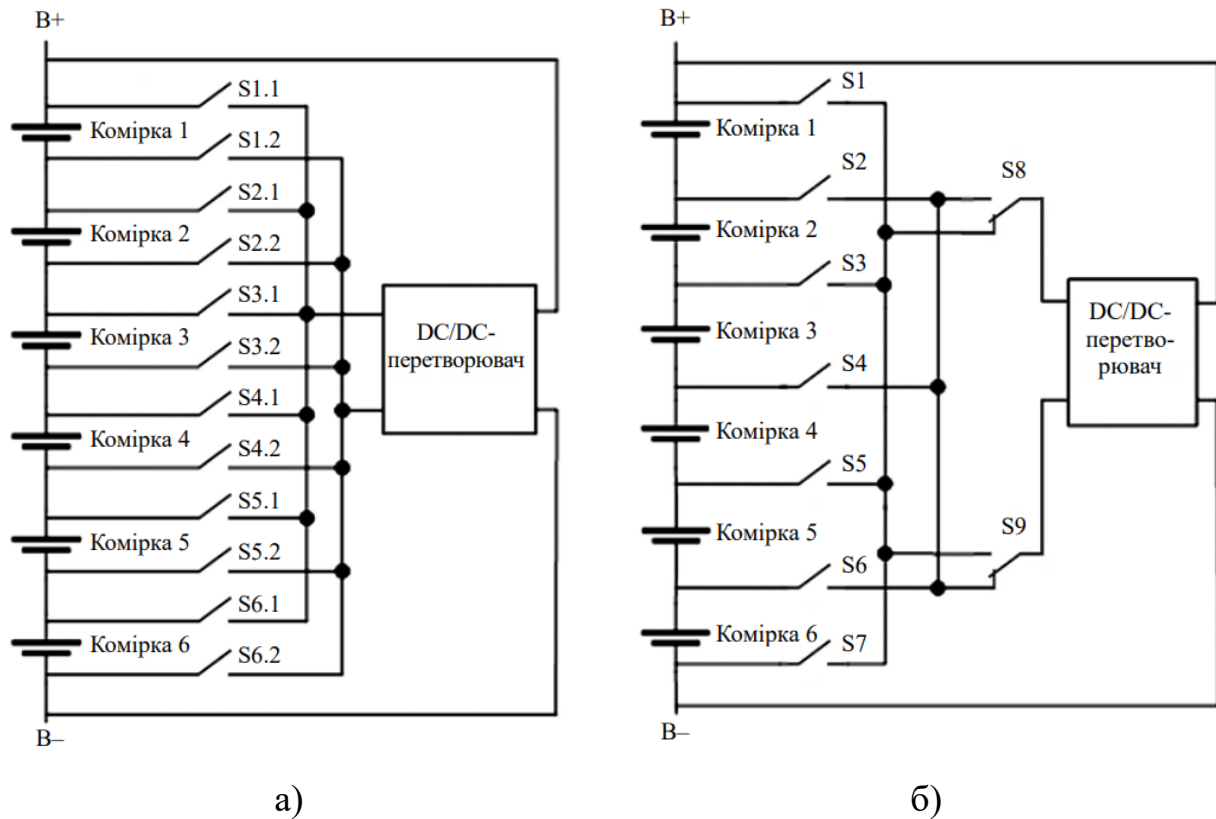


Рисунок 3.4 – Топології активних балансирів на основі DC-DC перетворювача

а) з одним рівнем ключів [83], [84], [85], [86], [87];

б) з двома рівнями ключів [88], [89]

Напрямок потоку енергії (зарядження або розрядження комірки) визначається станом ключів. Кількість комутаційних ключів у даній схемі прямо пропорційна кількості комірок (n) і може бути виражена як $2n$.

На рис. 3.4 (б) представлено топологію активного балансира з двонаправленим ізольованим DC-DC перетворювачем та двома рівнями комутуючих ключів. У порівнянні з топологією з одним рівнем ключів, дана схема вимагає меншої кількості комутаційних елементів для підключення комірки до перетворювача. Недоліком є неможливість одночасного підключення

декількох сусідніх комірок до перетворювача, що могло б потенційно збільшити швидкість балансування. Кількість комутаційних ключів для даної топології може бути описана співвідношенням $n+4$, де n - кількість комірок. Використання даного типу балансира є доцільним для модулів з кількістю послідовно з'єднаних комірок більше чотирьох. При меншій кількості комірок раціональніше використовувати схему з одним рівнем ключів.

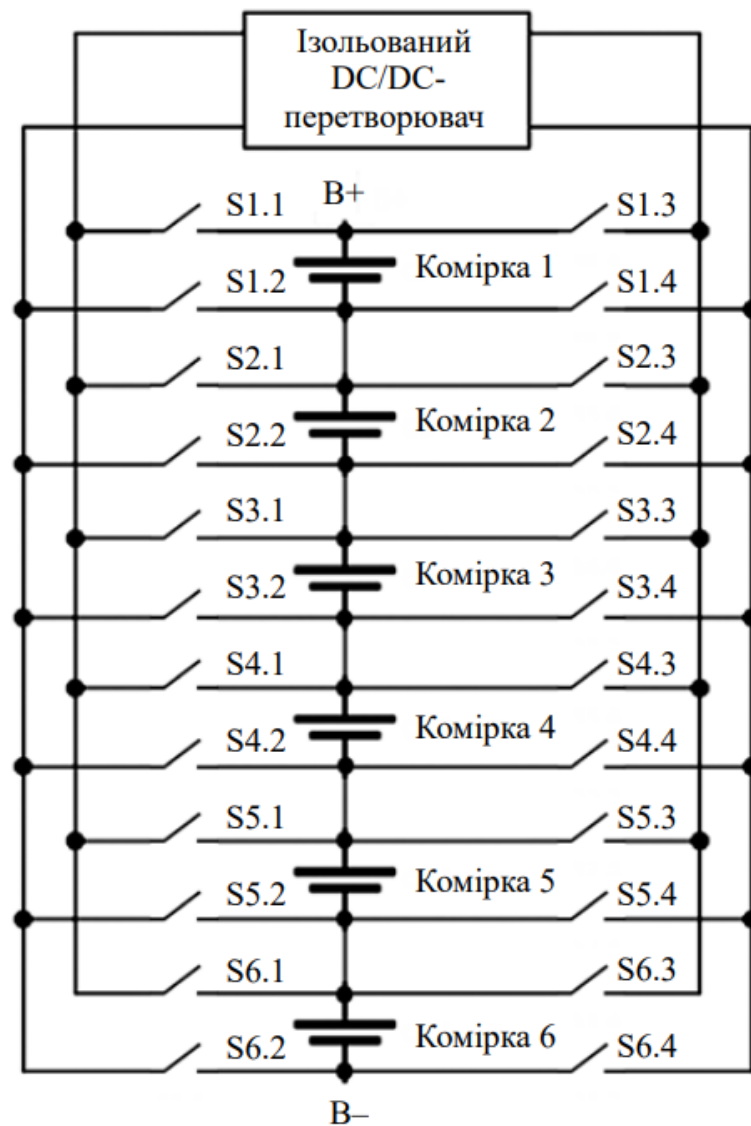


Рисунок 3.5 – Топологія активного балансира на основі DC-DC перетворювача з двома однорівневими ключами [90]

Схема активного балансира на основі DC-DC перетворювача з двома однорівневими ключами (рис. 3.5) демонструє ряд переваг у порівнянні з розглянутими раніше топологіями. Використання як двонаправленого, так і однонаправленого перетворювача забезпечує підвищену швидкість балансування за рахунок можливості перетікання енергії не лише між комітками, а й між коміткою та модулем. Така варіативність методів комутації дозволяє балансиру обирати оптимальний режим роботи залежно від стану заряду коміток. Наприклад, при дисбалансі однієї комітки доцільно підключити її до перетворювача, а перетворювач – до загальної напруги модуля, що забезпечить одночасне заряджання/розряджання всіх коміток і балансування цільової комітки. Кількість ключів у даній схемі становить $4n$, де n - кількість коміток. Незважаючи на збільшену кількість комутаційних ключів, дана топологія вирізняється підвищеною надійністю. У разі виходу з ладу однієї пари ключів, що комутують комітку, можливе підключення резервного комутатора, що забезпечить безперебійну роботу балансира. Слід зазначити, що в дослідженні [91] розглянуто подібну схему, але з дворівневою системою комутуючих ключів, аналогічно до топології на рис. 3.4 (б). Застосування дворівневої системи дозволяє зменшити кількість ключів при роботі з більш ніж 4-ма комітками, проте обмежує можливість одночасного підключення декількох коміток до перетворювача.

На рис. 3.6 представлено модифіковану схему активного балансира, що відрізняється наявністю додаткової пари ключів для комутації додаткового накопичувача енергії до DC-DC перетворювача. Таке схемне рішення розширює функціональні можливості балансира, дозволяючи здійснювати балансування коміток в межах модуля, а також балансувати модуль відносно інших модулів шляхом перетікання енергії між модулем і додаткового накопичувача енергії. Кількість комутаційних ключів у даній схемі визначається як $4n+2$, де n - кількість коміток. Важливо зазначити, що DC-DC перетворювач повинен бути гальванічно-ізолюваним. Хоча можливе використання як однонаправленого, так

і двонаправленого перетворювача, застосування останнього значно розширює функціональні можливості балансира.

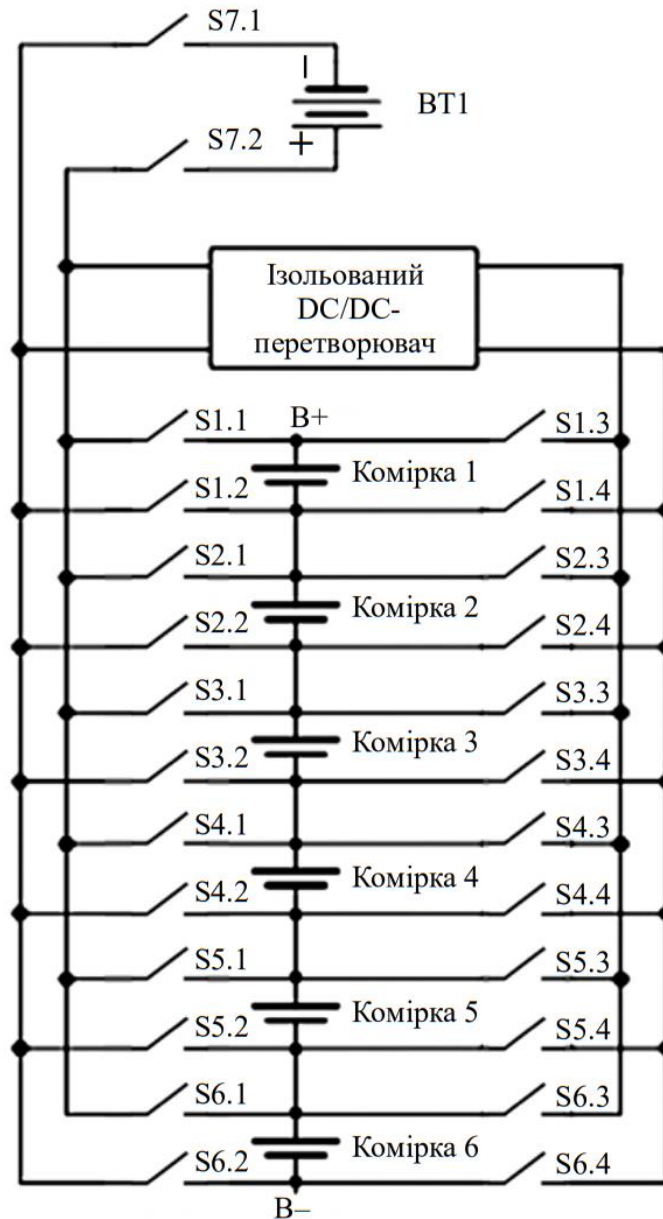


Рисунок 3.6 – Топологія активного балансира на основі DC-DC перетворювача з двома однорівневими ключами, та додатковим зовнішнім накопичувачем енергії

На рис. 3.7 представлена схема активного балансира, що базується на використанні DC-DC перетворювача та двох однорівневих ключів. Схема має

додаткову пару ключів, що дозволяє комутувати бортовий 12-вольтовий акумулятор з двох боків DC-DC перетворювача. Загальна кількість комутаційних ключів у схемі становить $4n+4$. Дана схема забезпечує підвищену надійність балансира завдяки повністю дубльованій системі ключів. Вихід з ладу одного з комутаторів не впливає на роботу балансира, що дозволяє продовжувати його функціонування. Така особливість схеми може знайти застосування в галузях, де вимоги до надійності системи є критичними, наприклад, в авіації.

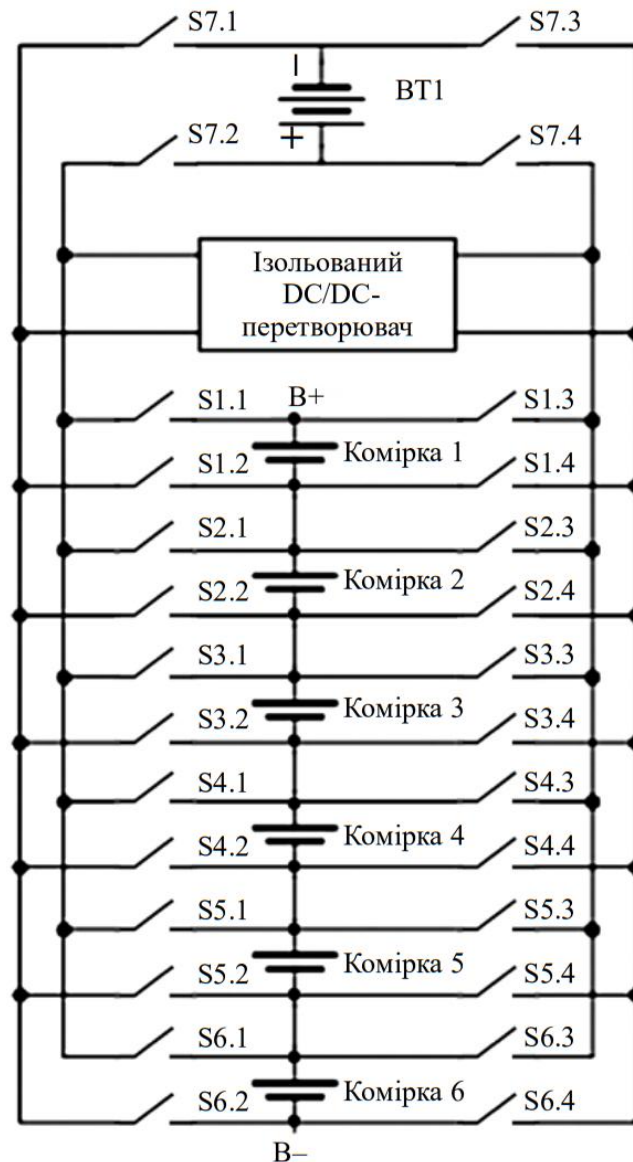


Рисунок 3.7 – Топологія активного балансира на основі DC-DC перетворювача з двома однорівневими ключами, та зовнішнім накопичувачем енергії [4], [5], [6]

Розглянемо варіанти АБ балансиrom на базі топології, представленої на рис. 3.7. Однією з головних переваг цієї схеми є можливість балансування комірок різними способами. Зокрема, можливе перетікання енергії між двома комірками, між коміркою та модулем, між коміркою та групою комірок, а також між коміркою та бортовим акумулятором, між групою комірок та акумулятором, та між модулем та бортовим акумулятором (рис. 3.8). Така різноманітність шляхів балансування дозволяє збільшити його швидкість, оскільки за один цикл перетікання енергії можна заряджати або розряджати відразу декілька комірок. Крім того, перетікання енергії від однієї або декількох комірок до бортового акумулятора не впливає на баланс інших комірок, що також позитивно впливає на швидкість процесу. Зважаючи на велику кількість варіантів балансування, в подальшому необхідно розробити алгоритм, який би автоматично визначав найшвидший шлях.

Важливо зазначити, що для систем з високими вимогами до надійності, наприклад, літальних апаратів, дана топологія має ряд переваг. По-перше, вона забезпечує повне дублювання комутаторів. По-друге, у разі виходу з ладу основного DC-DC перетворювача, балансир може взяти на себе його функції, перейшовши в режим перетікання енергії від модуля до бортового акумулятора, тим самим підтримуючи роботу системи в аварійному режимі. Надійність також підвищується завдяки дублюванню комутаційних ключів: у разі несправності одного з них, його може замінити інший без втрати функціональності [7].

Основним недоліком цієї схеми є велика кількість комутаційних ключів, що може бути критичним для застосувань, де це суттєво вплине на собівартість.

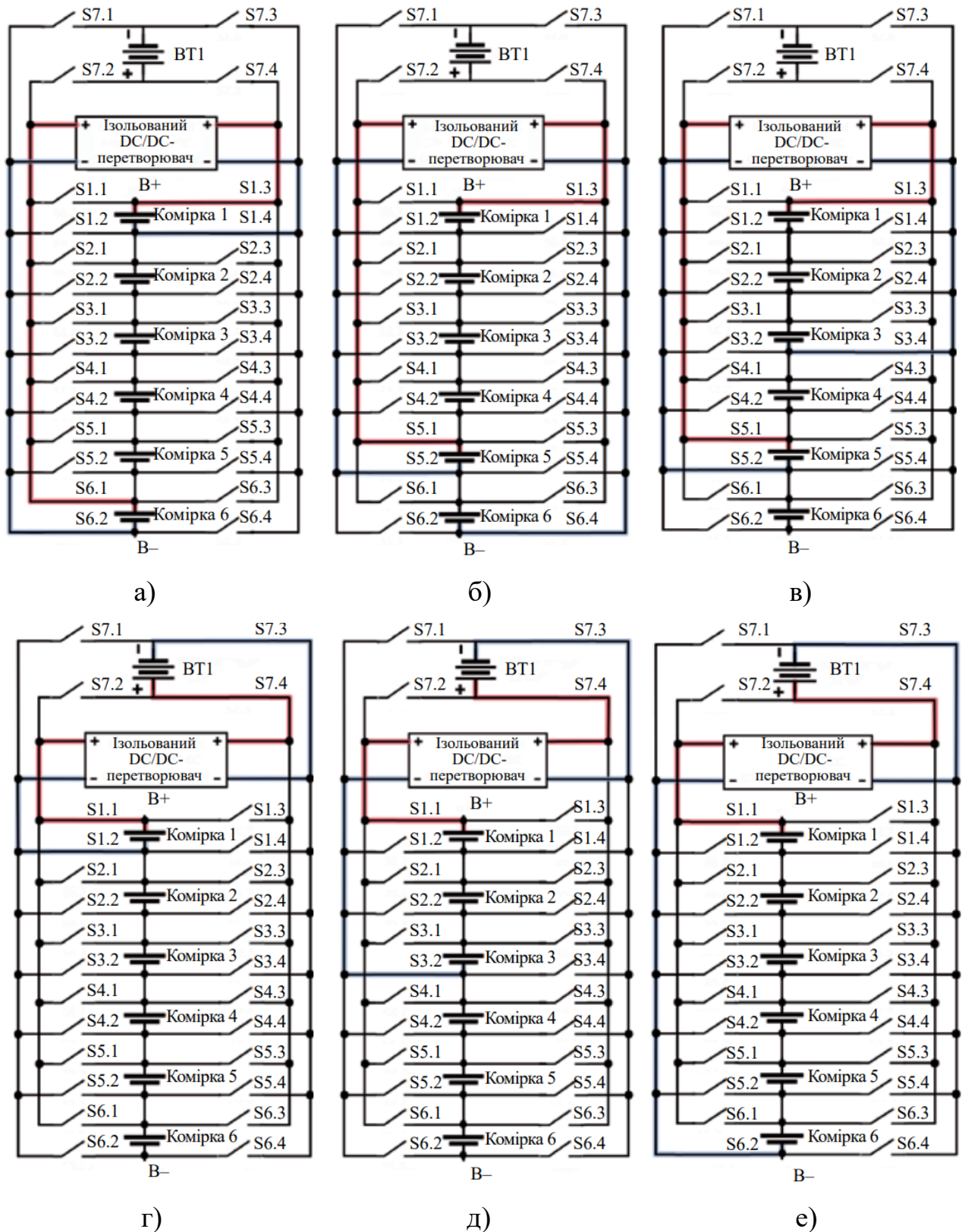


Рисунок 3.8 – Перетікання енергії в балансири

а) між комірками, б) між коміркою та модулем, в) між коміркою та декількома комірками, г) між коміркою та бортовим акумулятором, д) декількома комірками та бортовим акумулятором, е) між модулем та бортовим акумулятором

Розглянуті раніше схеми активних балансирів на основі перетворювача, передбачають використання ключів, що комутують комірки з перетворювачем. На даний час існує ряд компонентів, що можуть виконувати цю функцію. Особливість комутатора полягає, в необхідності гальванічної розв'язки між комутатором, та системою керування. Найпростіший спосіб реалізації комутатора, використання електромеханічного реле, проте використання реле має досить вагомні недоліки. Електромеханічне реле має рухомі частини, що мають досить обмежений ресурс, в порівнянні з напівпровідниковими компонентами. Швидкість перемикання, у електромеханічних реле невисока, а також створюються електромагнітні завади під час роботи. Габаритні розміри електромеханічних реле більші ніж у напівпровідникових компонентів. До переваг застосування можна віднести невисоку ціну.

Для комутації комірок до перетворювача в активному балансири можливо використовувати двонаправлений напівпровідниковий ключ, що складається з двох транзисторів. Можливі варіанти реалізації двонаправленого напівпровідникового ключ наведено на рис. 3.9. В його будові можливе застосування різних типів силових напівпровідникових елементів: біполярних транзисторів, MOSFET транзисторів та біполярних транзисторів з ізольованим затвором (IGBT).

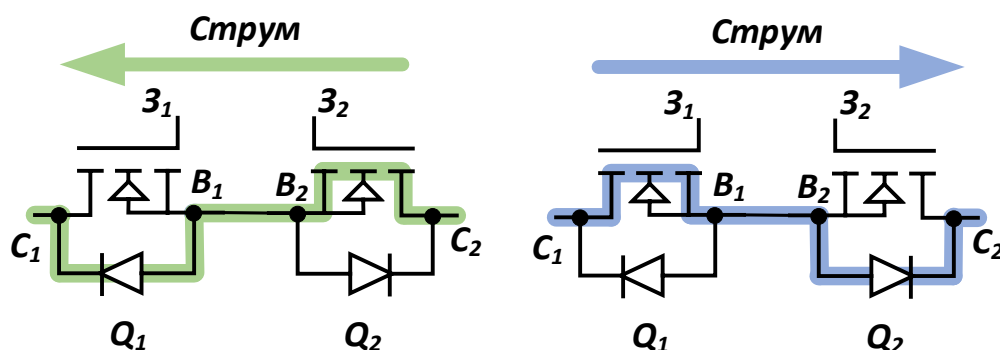


Рисунок 3.9 – Будова двонаправленого напівпровідникового ключа на основі MOSFET транзисторів [92]

В залежності від сигналів керування, двонаправлений напівпровідниковий ключ може мати чотири стани провідності, що наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Режими роботи двонаправленого напівпровідникового ключа

Q1	Q2	Режим роботи	Напрямок протікання струму
Вимкнено	Вимкнено	Розімкнений ключ	Двосторонній
Увімкнено	Увімкнено	Замкнений ключ	Двосторонній
Увімкнено	Вимкнено	Діод	Односторонній
Вимкнено	Увімкнено	Діод	Односторонній

PhotoMOS реле є електронним комутаційним пристроєм, що використовує оптичну ізоляцію між вхідним та вихідним каскадами, де керування перемиканням здійснюється за допомогою світлодіода та MOSFET-транзисторів. Фізико-математична модель такого реле включає два основних процеси: генерацію фотоструму світлодіодом та керування провідним станом MOSFET.

Світлодіод у вхідному каскаді PhotoMOS реле є джерелом фотоструму, що активує вихідний каскад. Його вольт-амперна характеристика описується рівнянням Шоклі:

$$I_{LED} = I_s \left(e^{\frac{V_{LED}}{nV_T}} - 1 \right), \quad (3.1)$$

де: I_s – зворотний насичений струм;

V_{LED} – падіння напруги на світлодіоді;

n – коефіцієнт ідеальності, що зазвичай має значення близько 1.8;

V_T – тепловий потенціал.

Вихідний каскад реле зазвичай містить два MOSFET, з'єднані в зворотному включенні, що забезпечує комутацію як постійного, так і змінного струму.

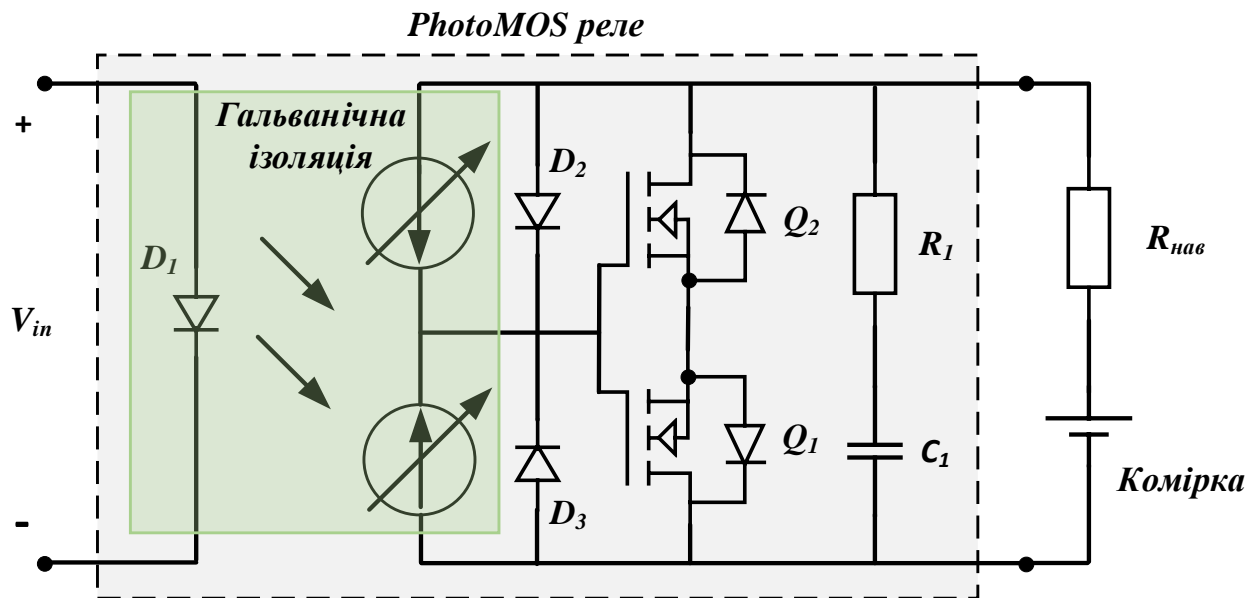


Рисунок 3.10 – Внутрішня будова PhotoMOS реле [93]

Застосування PhotoMOS реле в якості комутатора, збільшує надійність та простоту конструкції активного балансира, оскільки об'єднує в собі велику кількість компонентів. Однією із переваг даної топології активного балансира, є висока надійність. Оскільки при виходу із ладу одного комутатора, його може замінити інший, з іншої сторони перетворювача.

3.2 Моделювання швидкості балансування в покращеній топології активного балансира

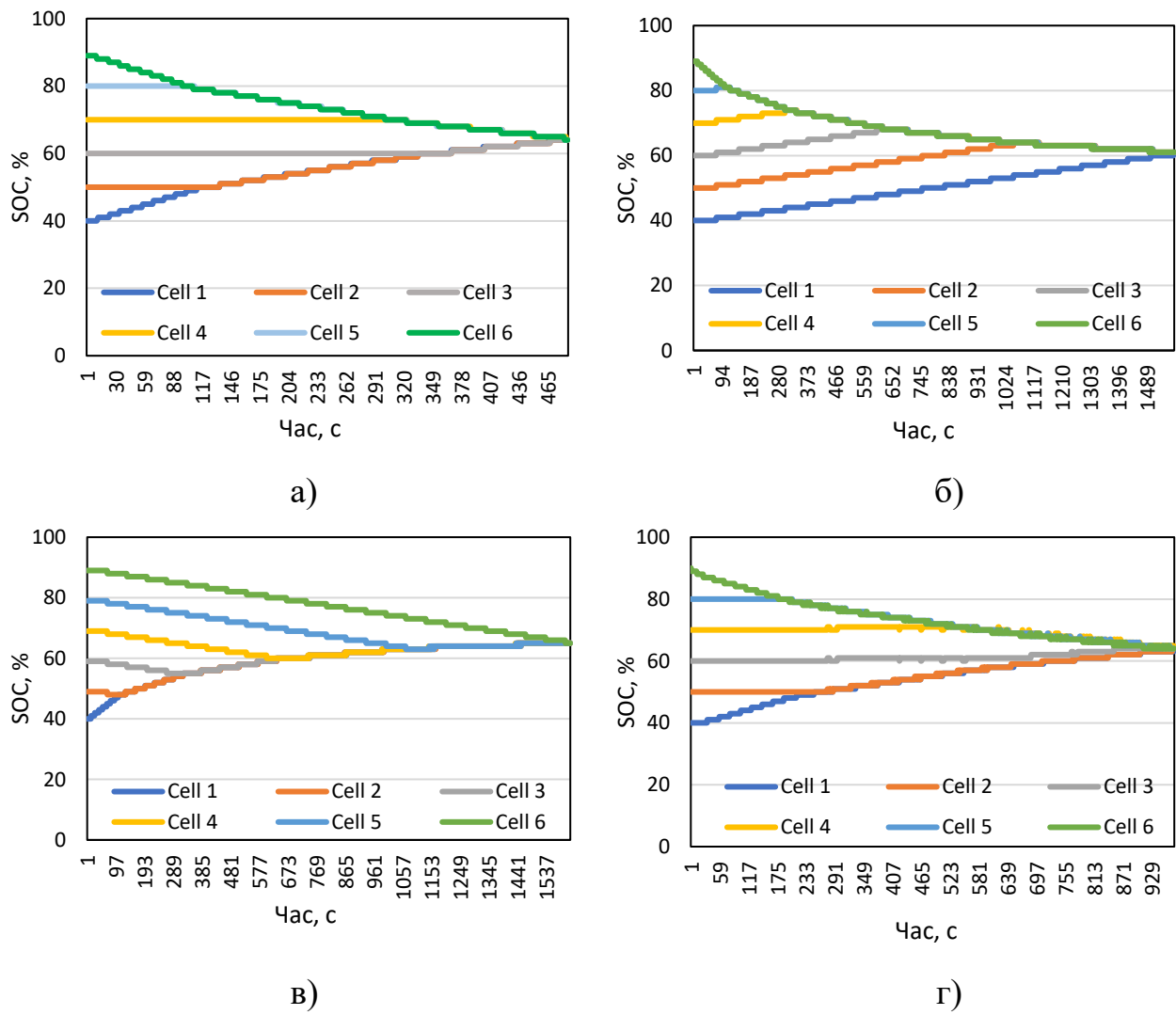
Моделювання проводилося для семи методів балансування, які використовуються у розглянутій вище топології активного балансира, за початкових умов, наведених у табл. 3.2. Моделювання відбувалось за умови, що перетворювач працює в режимі СС та має максимальну потужність 4 Вт, а значить, струм балансування змінювався залежно від вхідної та вихідної напруги. Балансування зупинялось, коли різниця між коміркою з максимальною та мінімальною ємністю досягала 10 мА·год.

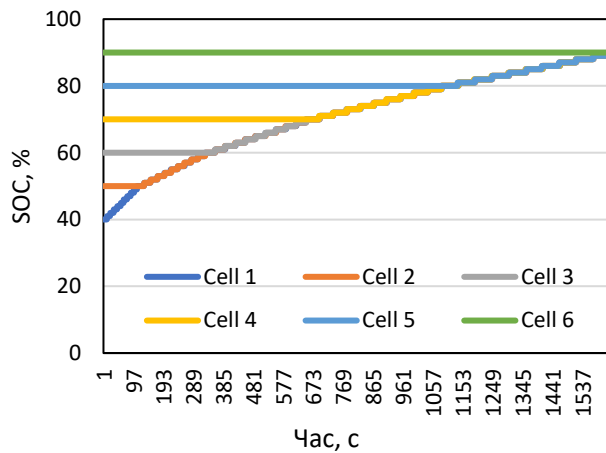
Отримані результати моделювання представлено у вигляді графіків на рис. 3.2, а числові значення наведено в табл. 3.3. Із семи методів балансування

найбільшу швидкість показав метод від комірки до комірки (рис. 3.11, а), наступним за швидкістю були методи від модуля до комірки і навпаки (рис. 3.11, г), від зовнішньої батареї до комірки і навпаки (рис. 3.11, е), в інших вона була майже втричі меншою.

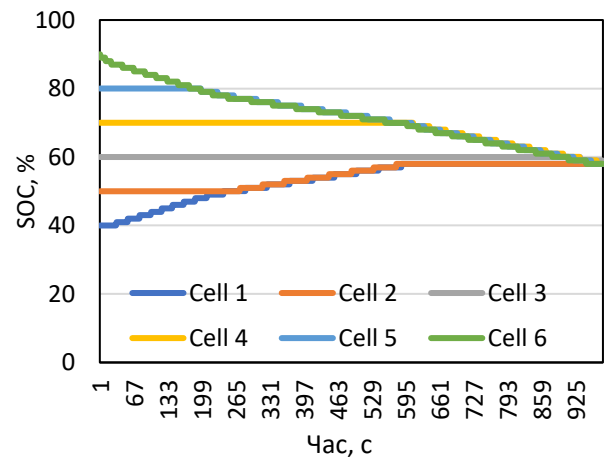
Таблиця 3.2 - Початкові умови змодельованої системи

Кількість комірок	Потужність перетворювача, Вт	Ємність комірки, мА·год	SOC комірки, %					
			1	2	3	4	5	6
6	4	3000	40	50	60	70	80	90

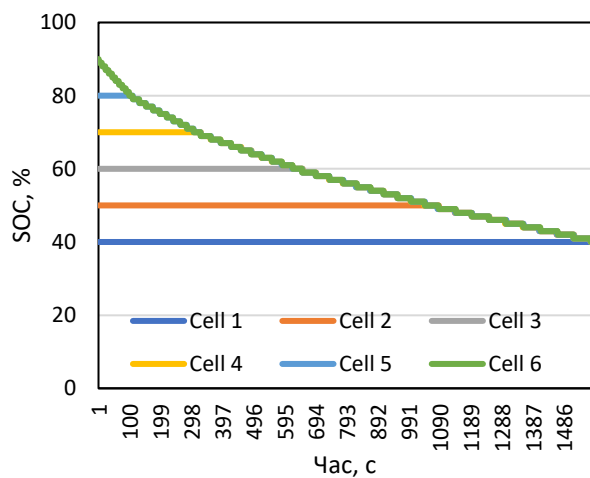




д)



е)



є)

Рисунок 3.11 – Залежність рівня заряду шести комірок від часу балансування для різних методів балансування:
 від комірки до комірки (від К до К) (а); від комірки до модуля (від К до М) (б);
 від модуля до комірки (від М до К) (в); від модуля до комірки і навпаки (від М до К і навпаки) (г); від комірки до зовнішньої батареї (від К до ЗБ) (д); від зовнішньої батареї до комірки і навпаки (від К до ЗБ і навпаки) (е); від комірки до зовнішньої батареї (від ЗБ до К) (є)

Отже, за результатами моделювання можна зробити висновок, що для модульного активного балансира за базовий треба брати метод від комірки до комірки. При цьому у випадку виходу з ладу одного з ключів, що робить

неможливим використання методу балансування від комірки до комірки, можна застосовувати інші методи балансування – тоді, хоча швидкість балансування буде нижчою, сам процес балансування продовжуватиметься.

Таблиця 3.3 – Порівняння швидкості балансування методів балансування

Параметр	Метод балансування						
	від К до К	від К до М	від М до К	від М до К і навпаки	від К до ЗБ	від ЗБ до К	від ЗБ до К і навпаки
Час балансування V _{бал} , с	465	1489	1531	929	1535	1486	913
Приріст V _{бал} відносно найповільнішого методу, %	230,1	3,08	0,26	65,2	0	3,29	68,1

3.3 Моделювання перетворювача електроенергії для модульної системи активного балансування

Літій-іонні акумулятори часто моделюються як ідеальні джерела постійної напруги в таких схемах. Однак під час заряджання та розряджання акумулятора струм та напруга на ньому змінюються. Ці ефекти не враховуються у моделях з джерелом постійної напруги. Для оптимізації загальної продуктивності системи необхідно враховувати вольт-амперні характеристики акумулятора.

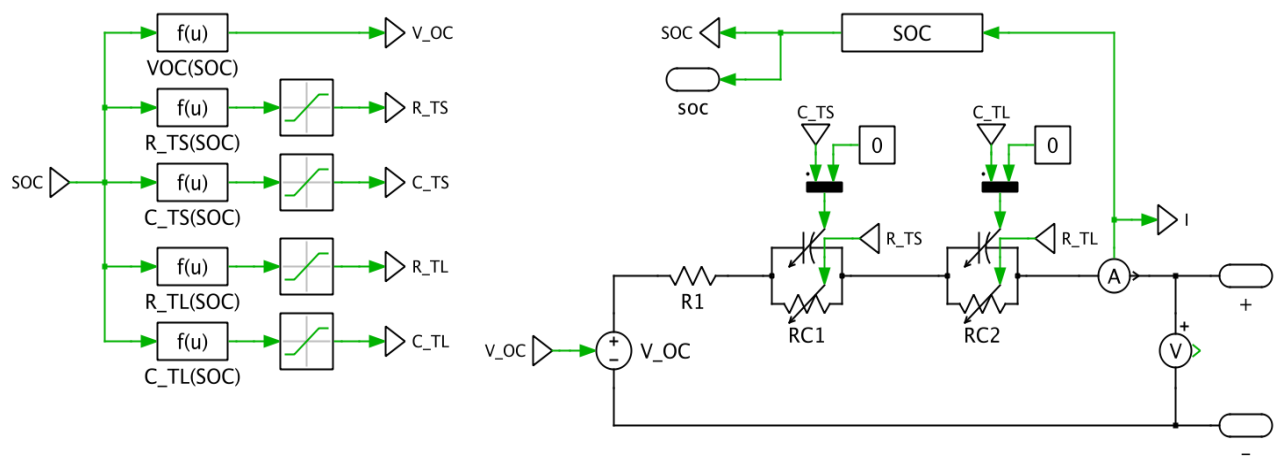


Рисунок 3.12 – Імітаційна модель АБ в середовищі PLECS

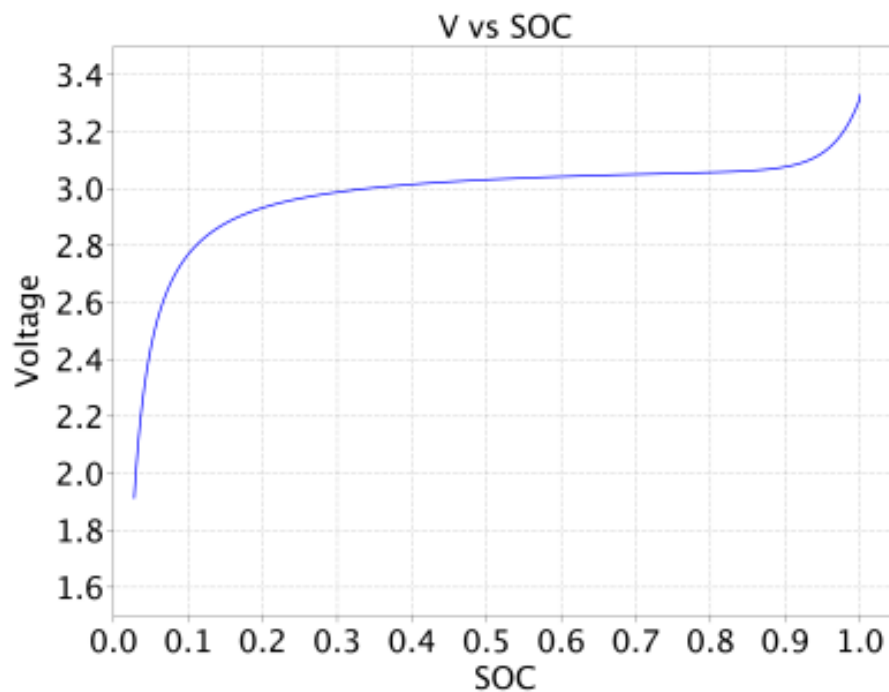


Рисунок 3.13 – Залежність OCV від SOC моделі АБ в середовищі PLECS

Крім того, ці моделі можуть використовуватися для оцінки різних алгоритмів заряджання та визначення SOC на рівні системи. Середовище для моделювання було обрано PLECS. В ньому спочатку було створено імітаційну модель АБ, яку в подальшому було використано для моделювання роботи перетворювачів.

Було обрано 5 топологій перетворювачів для моделювання процесу балансування:

- Forward;
- Flyback;
- Sepic;
- Push-Pull;
- DAB.

Змодельований процес роботи перетворювачів відбувався в режимі перетікання енергії від одної комірки до іншої комірки. Вхідна напруга перетворювачів відповідала напрузі зарядженої комірки, а саме 4.12в. Вихідна напруга перетворювача була обрана 5в, а струм в діапазоні 0,5 – 2 А. Частота PWM для керування транзисторами перетворювача була обрана 100кГц для всіх перетворювачі. У змодельованих перетворювачах рахувались втрати, на основі яких було пораховано ККП кожного перетворювача. Транзистори було використано CSD18510Q5B, діоди SS48. Параметри трансформаторів, та індуктивностей підбирались для кожного перетворювача окремо, так само як і скважність PWM сигналу керування (D).

Forward DC-DC перетворювач, топологія перетворювача на наведено на рис. 3.14. Залежність вихідної напруги, залежить від D , від коефіцієнта трансформації (N) та вхідної напруги (V_{in}), що наведено в рівнянні (3.2).

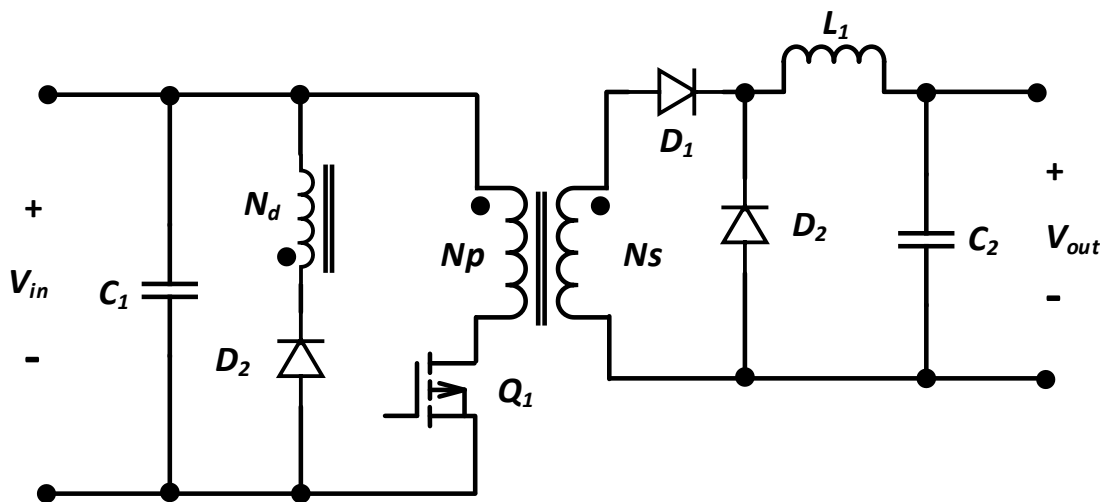
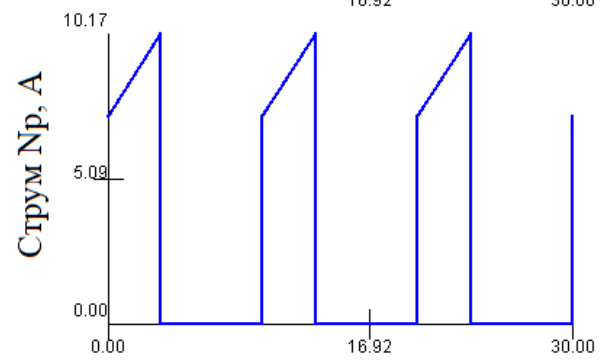
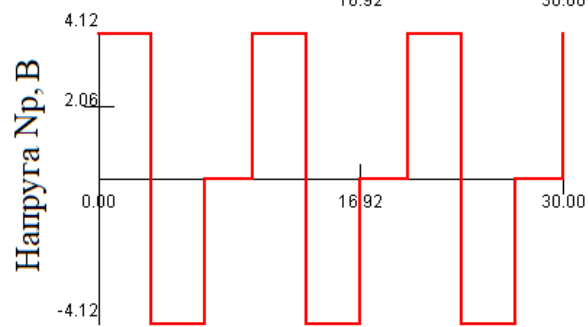
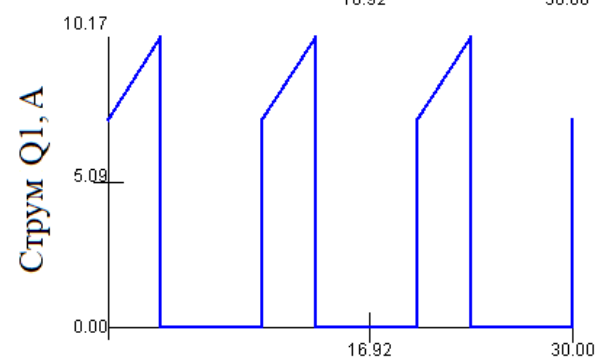
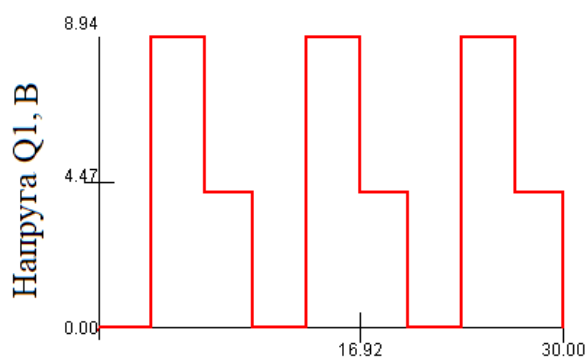
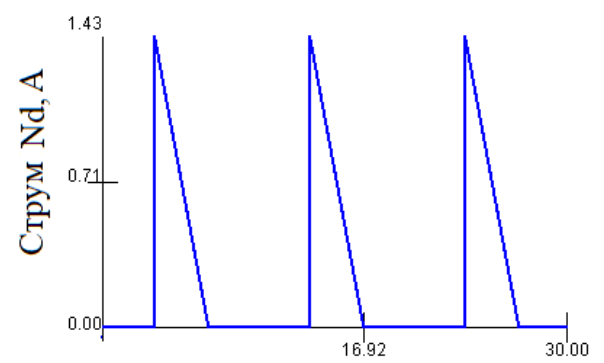
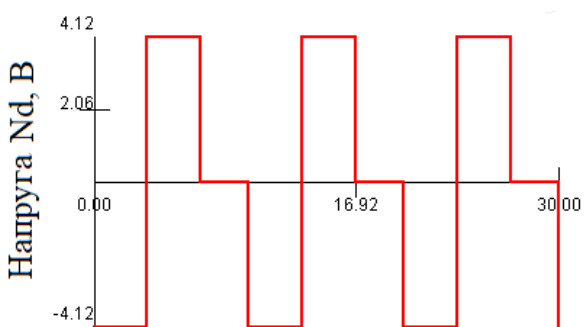
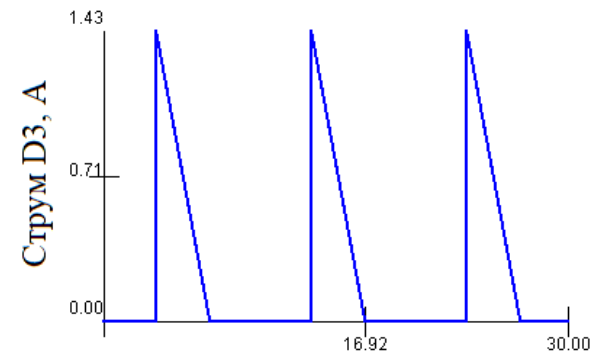
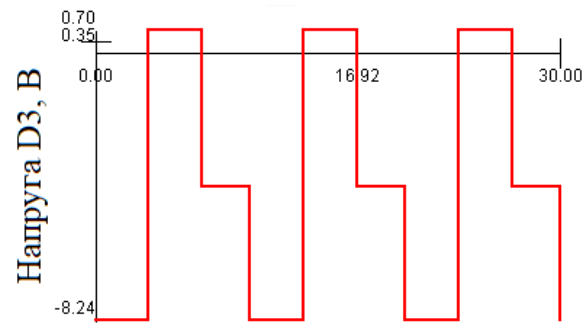
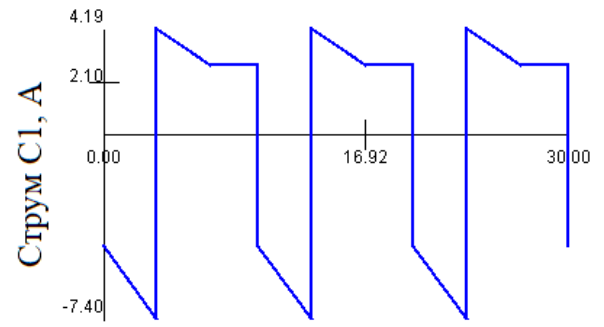
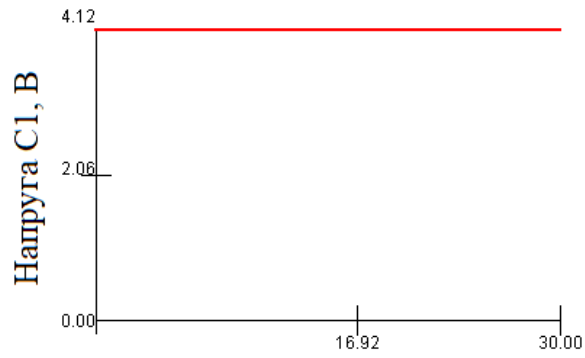


Рисунок 3.14 – Схема Forward DC-DC перетворювача з гальванічною розв'язкою

$$V_{out} = D \cdot N \cdot V_{in}. \quad (3.2)$$



Час, мкс

Час, мкс

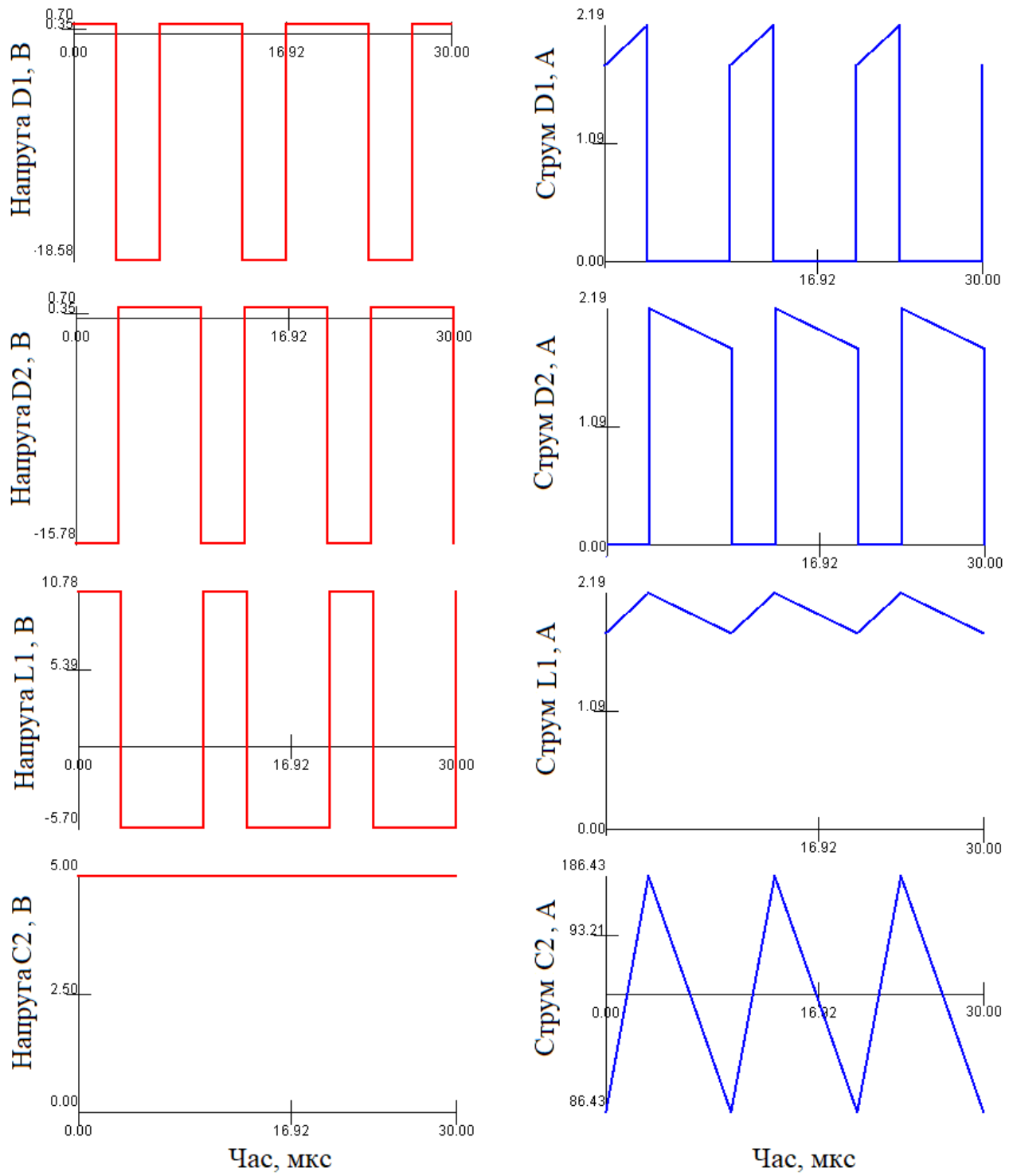


Рисунок 3.15 – Змодельовані параметри Forward DC-DC перетворювача

Flyback DC-DC перетворювач, топологію перетворювача наведено на рис. 3.16, а залежність вхідної напруги описано в рівнянні (3.3).

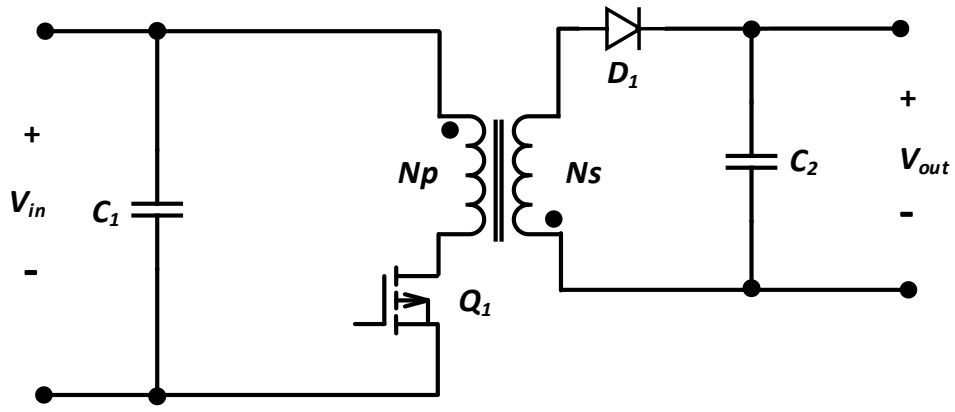
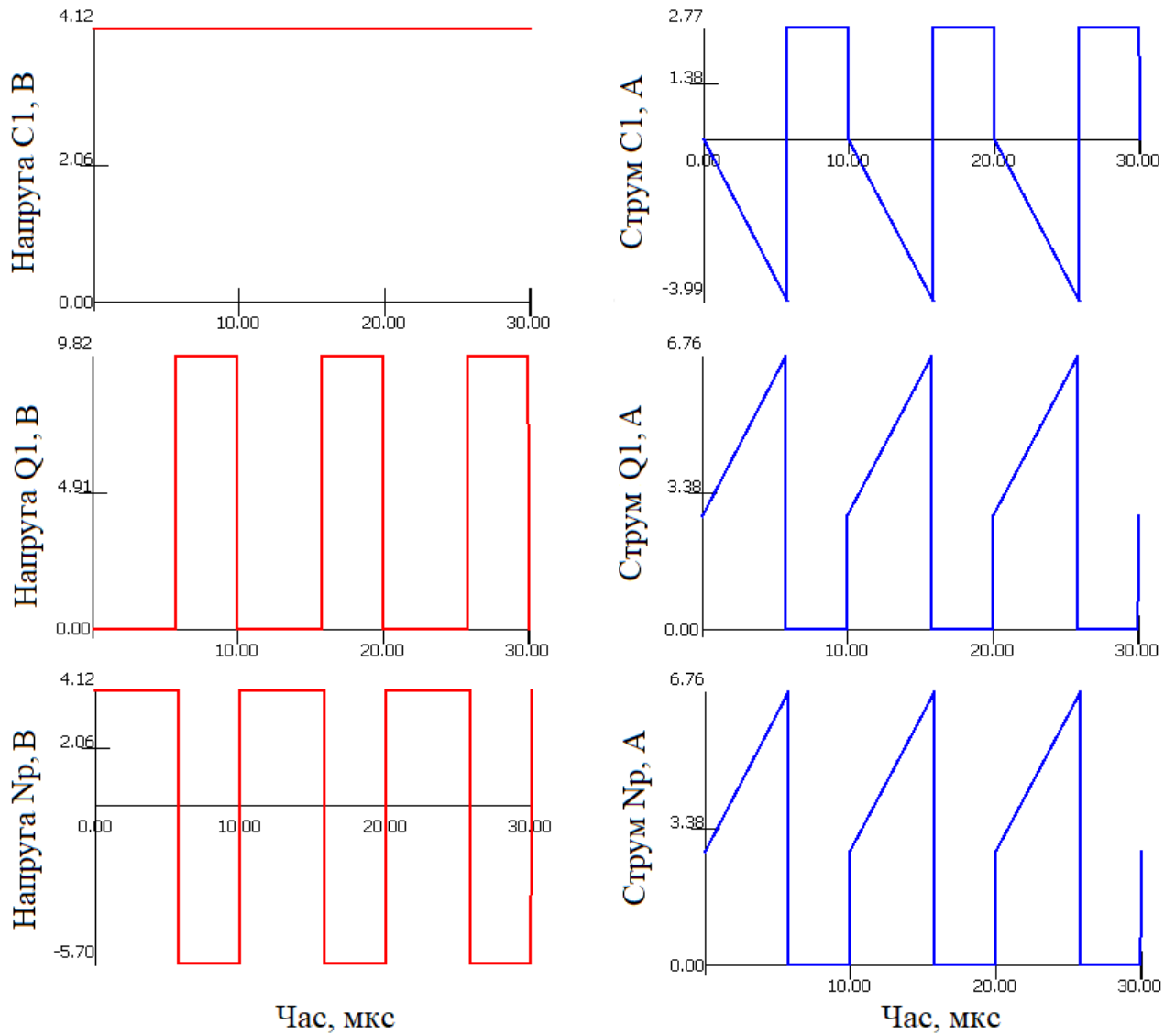


Рисунок 3.16 – Схема Flyback DC-DC перетворювача

$$V_{out} = N \cdot V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right). \quad (3.3)$$



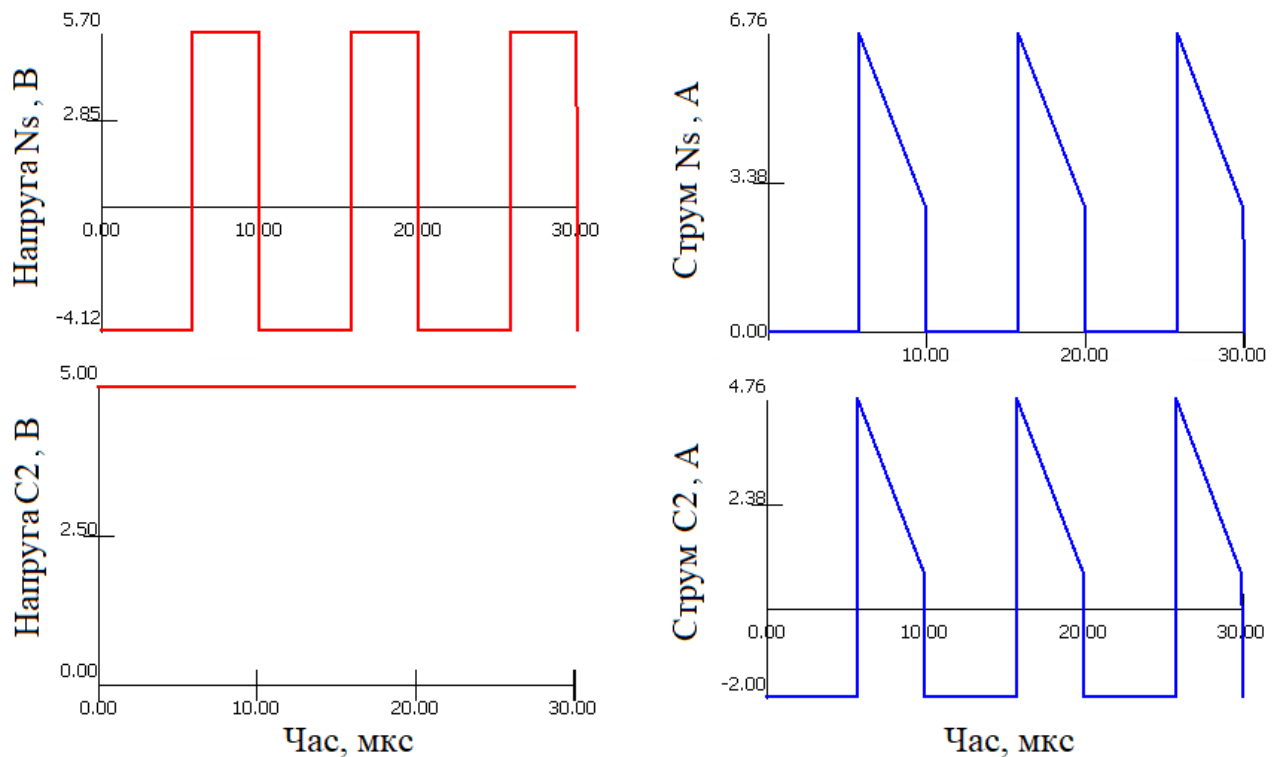


Рисунок 3.17 – Часові діаграми Flyback DC-DC перетворювача

SEPIC DC-DC перетворювач є однотактним, який може забезпечувати як підвищення, так і зниження вихідної напруги. Це робить SEPIC особливо корисним у системах активного балансування акумуляторів, де існує велика варіативність заряду між окремими комірками [94]. Основною перевагою SEPIC є його здатність підтримувати стабільну роботу при коливаннях вхідної напруги. Це важливо для акумуляторних систем, оскільки умови експлуатації можуть змінюватися, і напруга в системі може коливатися [95], [96]. Модель SEPIC перетворювача можливо побачити на рис. 3.18.

$$V_{out} = \frac{D \cdot N \cdot V_{in}}{1-D}. \quad (3.4)$$

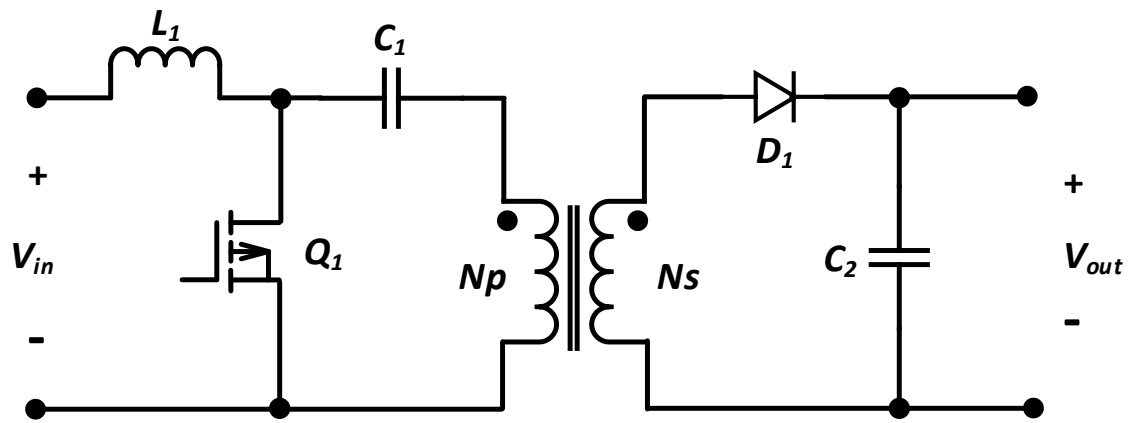
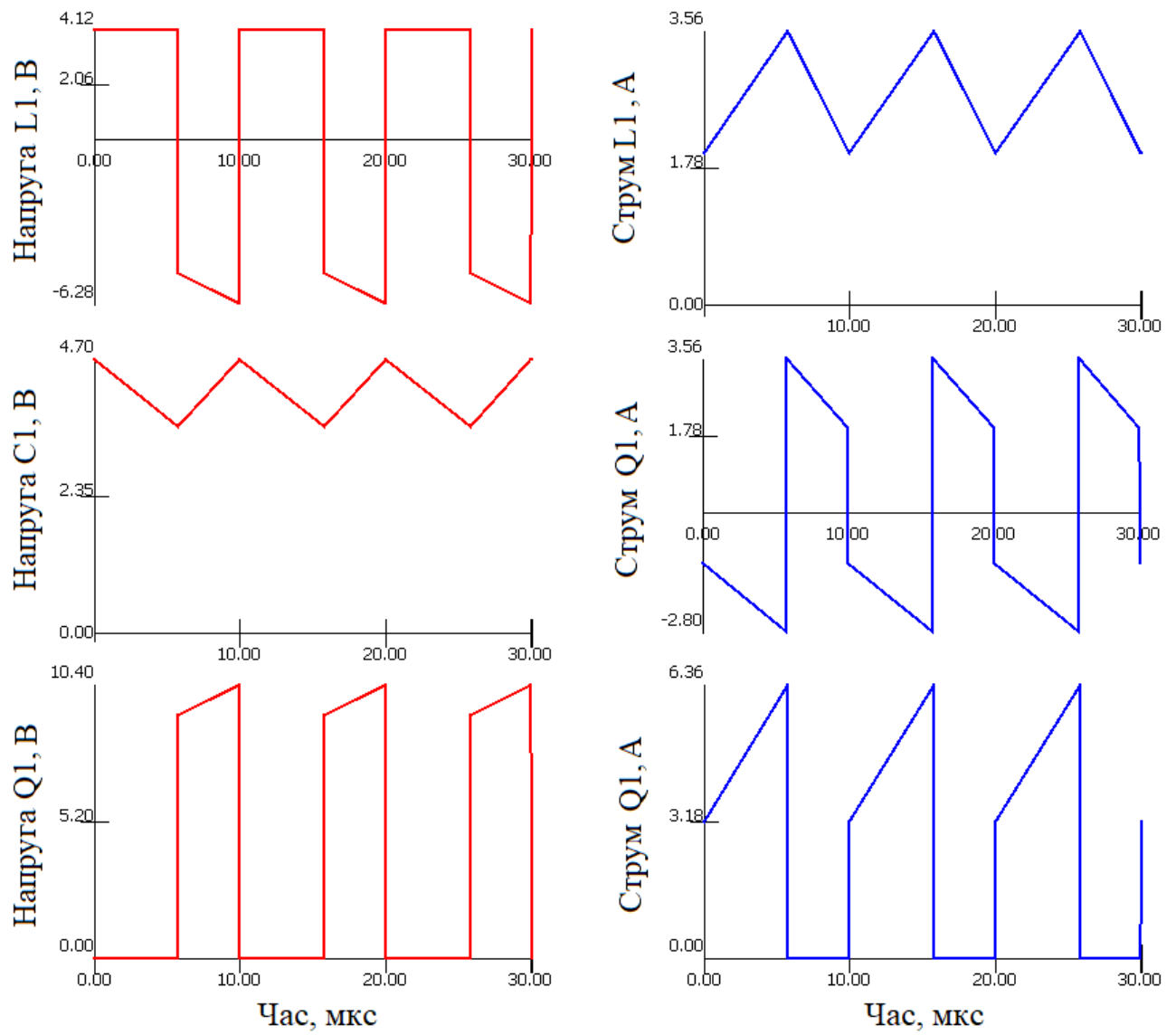


Рисунок 3.18 – Схема SEPIC DC-DC перетворювача з гальванічною розв'язкою [97]



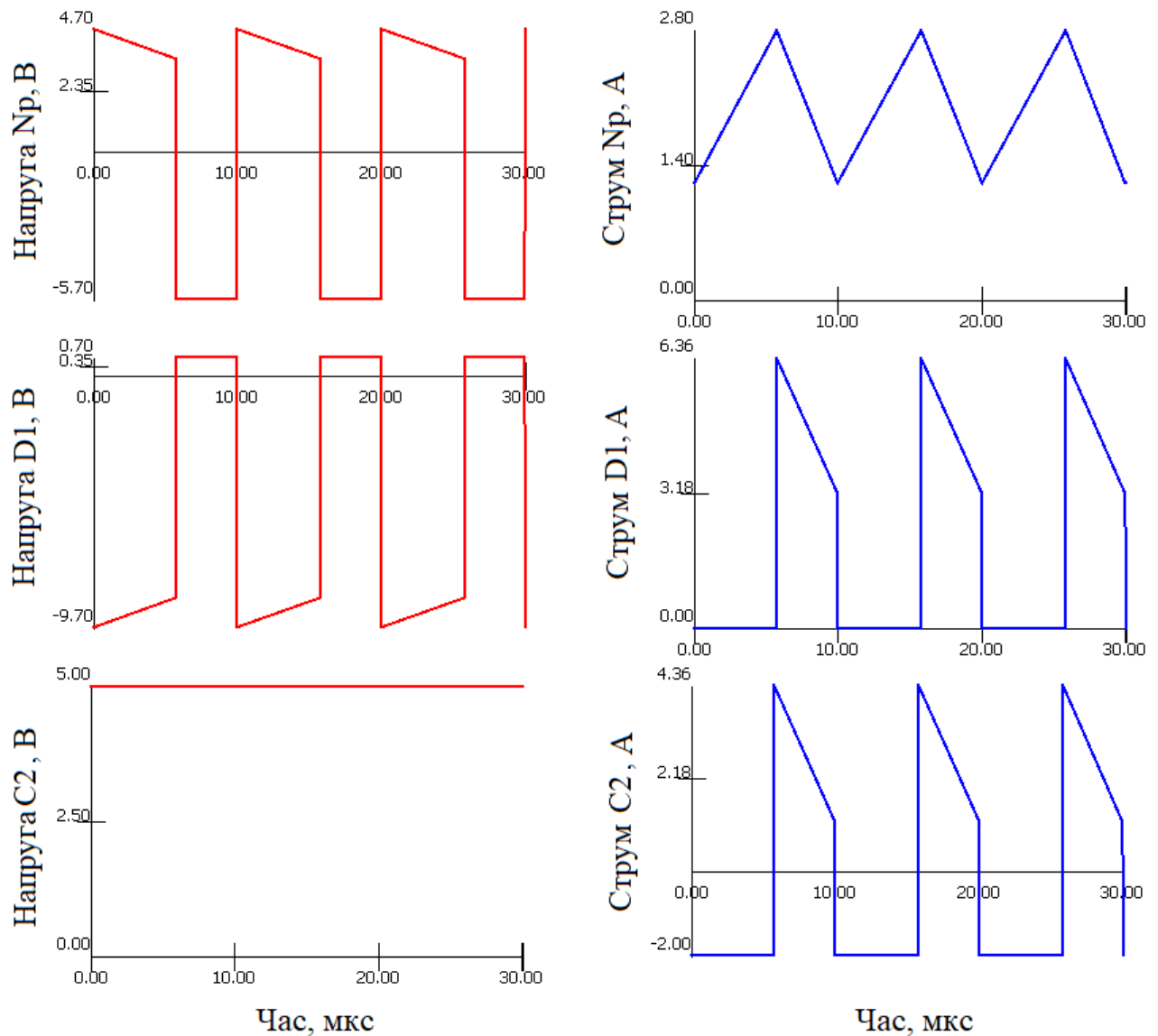


Рисунок 3.19 – Часові діаграми змодельованого SEPIC DC-DC перетворювача

Push-Pull перетворювач (рис. 3.20) використовує трансформатор із центральним відводом на первинній обмотці, що дозволяє двом ключам (транзисторам) по чергово працювати для передачі енергії від вхідного джерела до трансформатора. Також важливу роль відіграють діоди, що використовуються на вихідній стороні для випрямлення змінного струму, який передається від вторинної обмотки трансформатора [98].

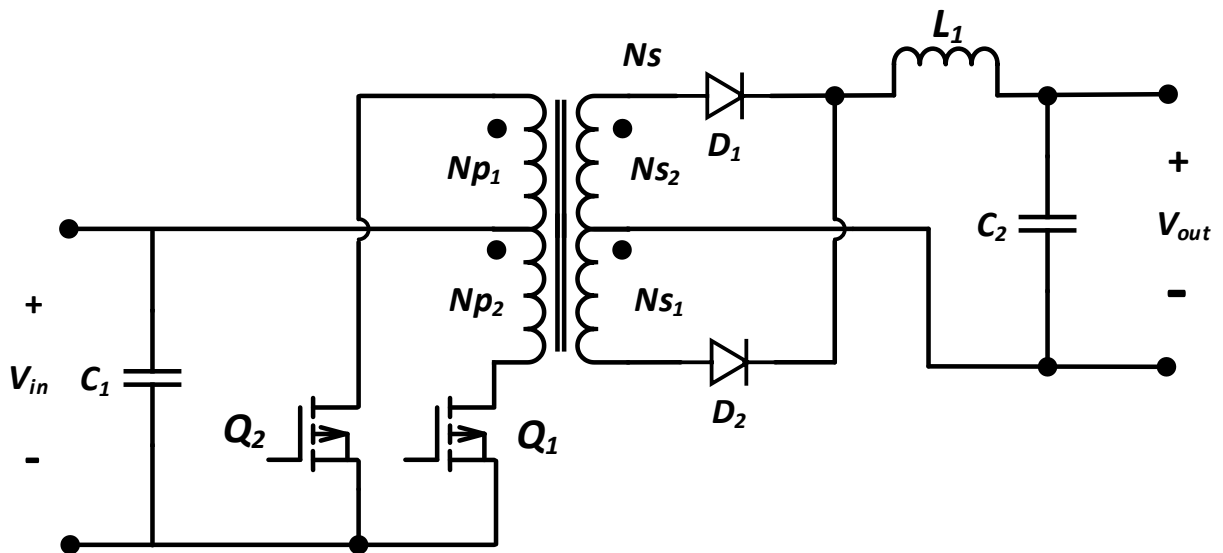
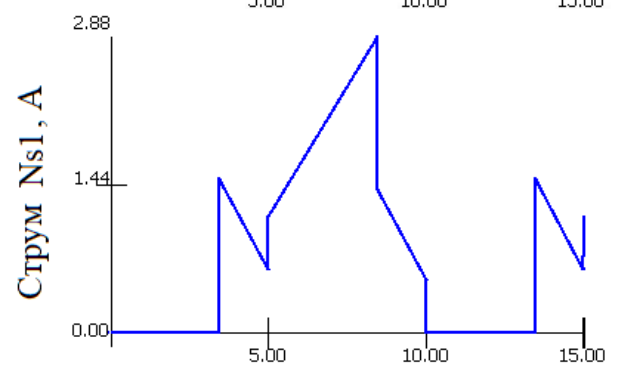
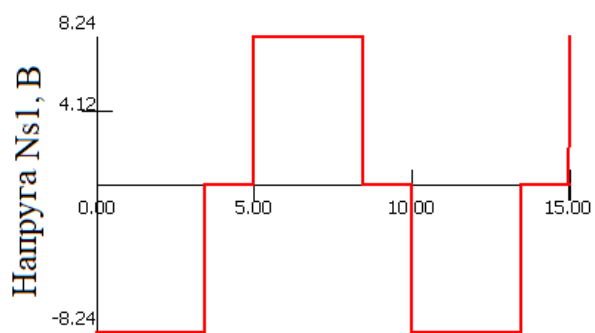
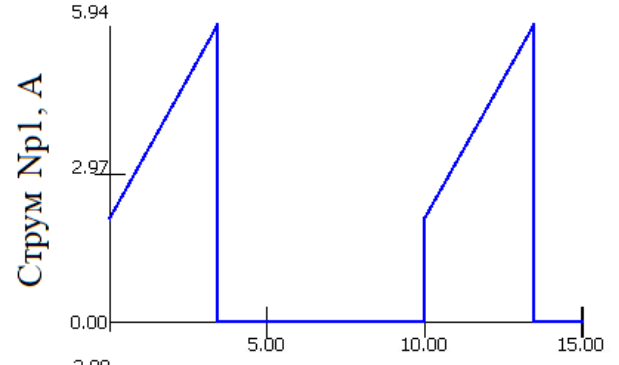
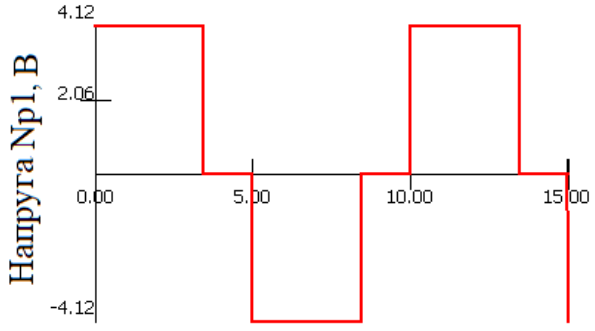
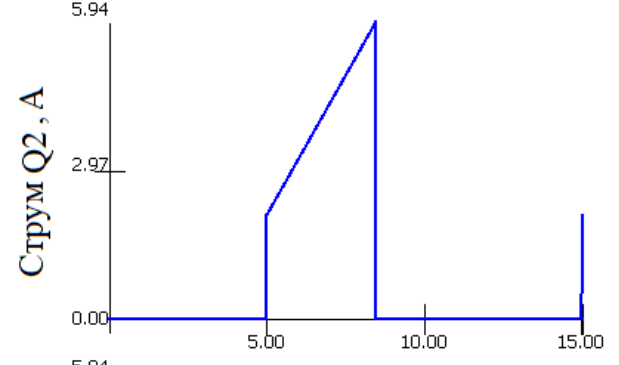
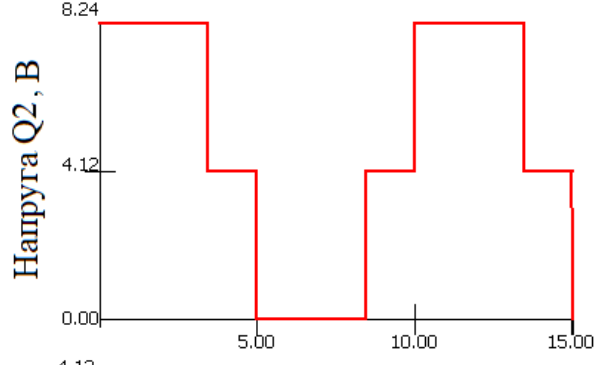
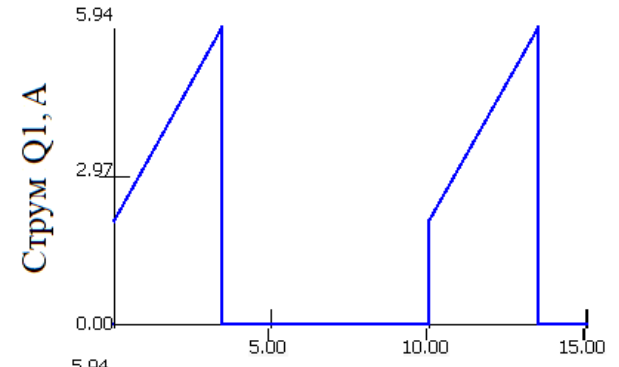
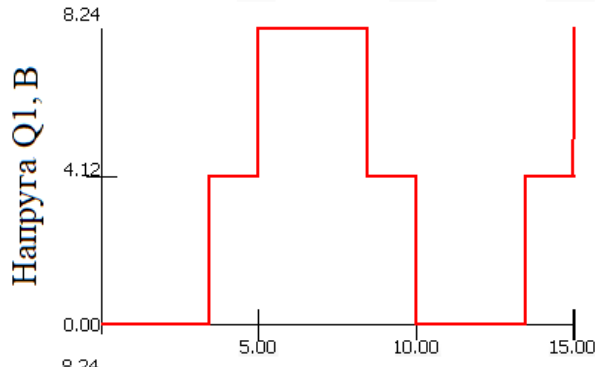
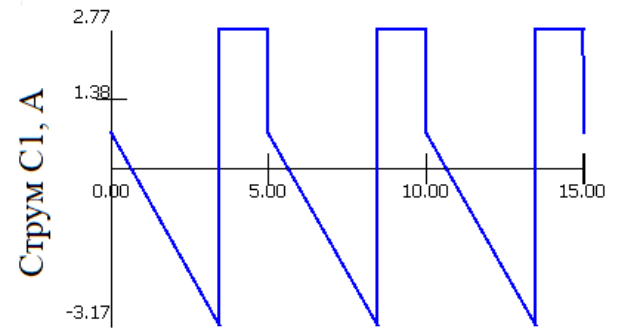
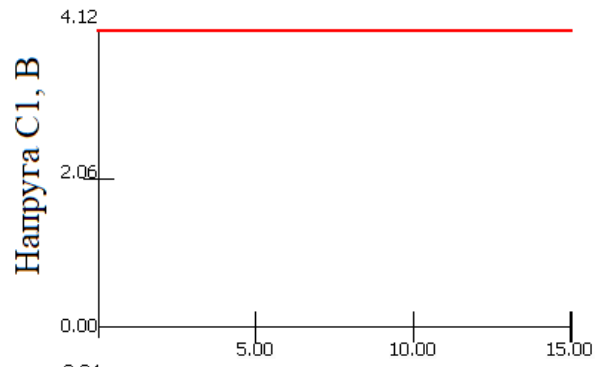


Рисунок 3.20 – Схема Push-pull DC-DC перетворювача

Для розрахунку вихідної напруги в Push-Pull використовується наступна формула [99]:

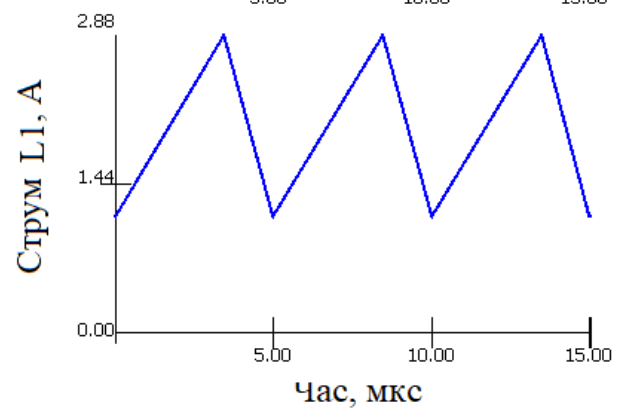
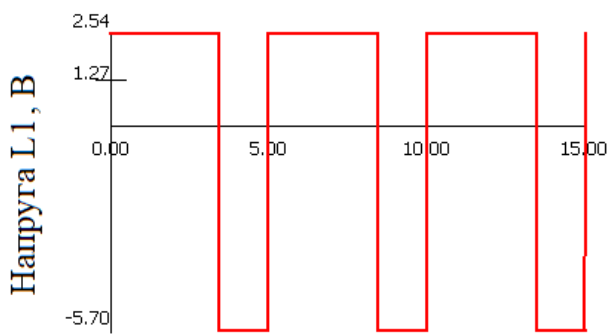
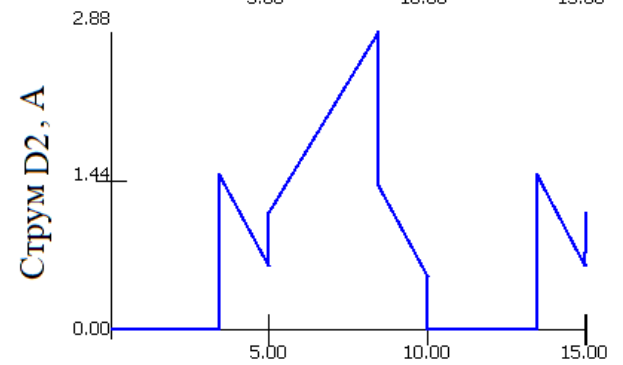
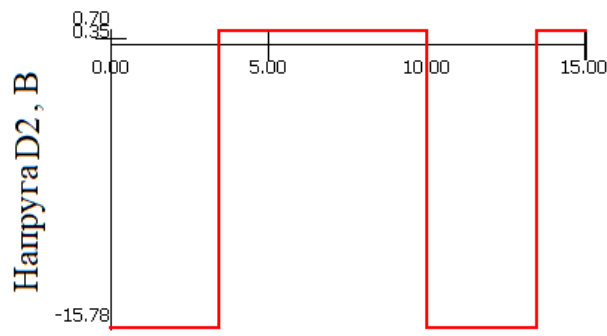
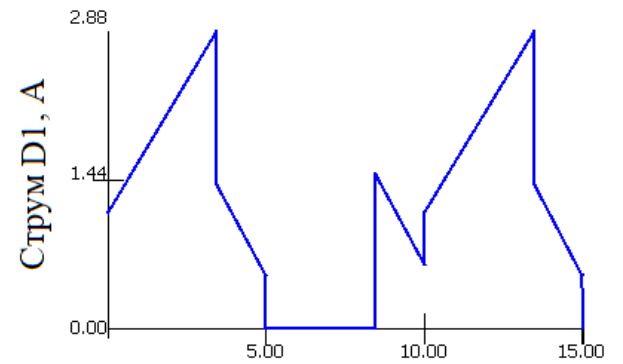
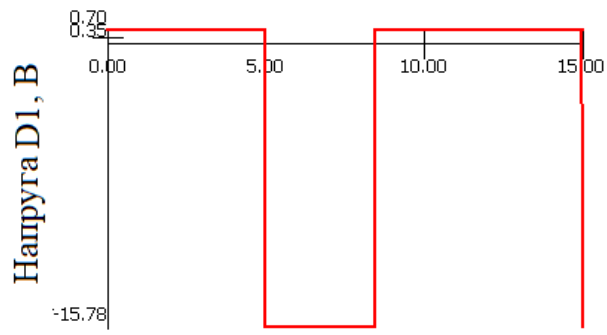
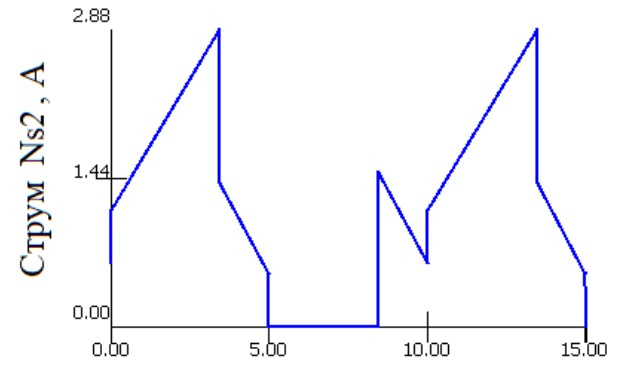
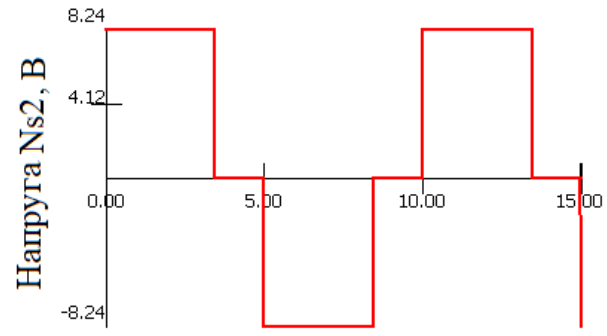
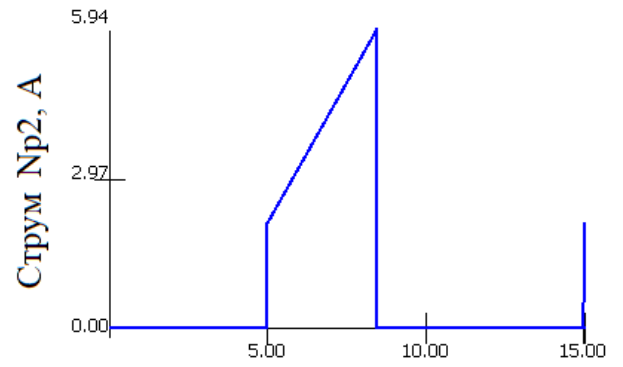
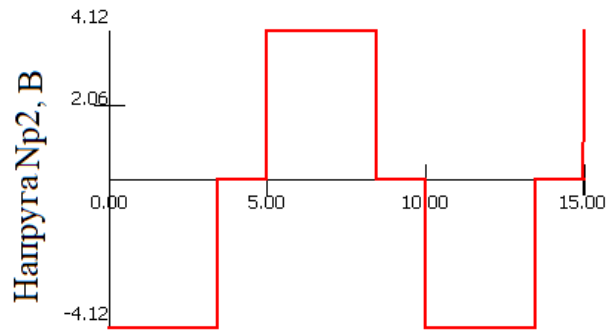
$$V_{out} = 2 \cdot N \cdot D \cdot V_{in}. \quad (3.5)$$

Первинна обмотка трансформатора розділена на дві рівні частини з центральним відводом. Коли один з ключів (транзисторів) вмикається, струм проходить через половину первинної обмотки трансформатора, генеруючи магнітний потік у ядрі. Під час роботи першого ключа одна частина трансформатора намагнічується, і це забезпечує зростання магнітного потоку в осерді. Потім перший ключ вимикається, а другий ключ вмикається, і струм проходить через іншу половину первинної обмотки, генеруючи потік у протилежному напрямку. Це забезпечує симетричне використання магнітного матеріалу осердя, що робить трансформатор більш ефективним. Вторинна обмотка трансформатора сприймає енергію як під час роботи першого ключа, так і другого, і, таким чином, відбувається безперервне постачання енергії до виходу [76].



Час, мкс

Час, мкс



Час, мкс

Час, мкс

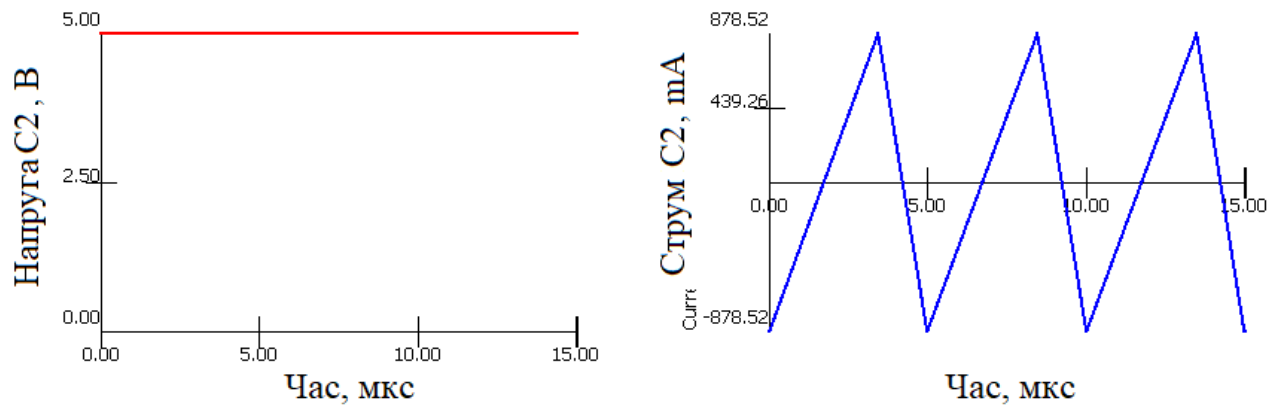


Рисунок 3.21 – Часові діаграми Push-Pull DC-DC перетворювача

DAB DC-DC перетворювачем складається з двох повномостових інверторів, що розділені високочастотним трансформатором. На рис. 3.22 представлена структурна схема цього перетворювача.

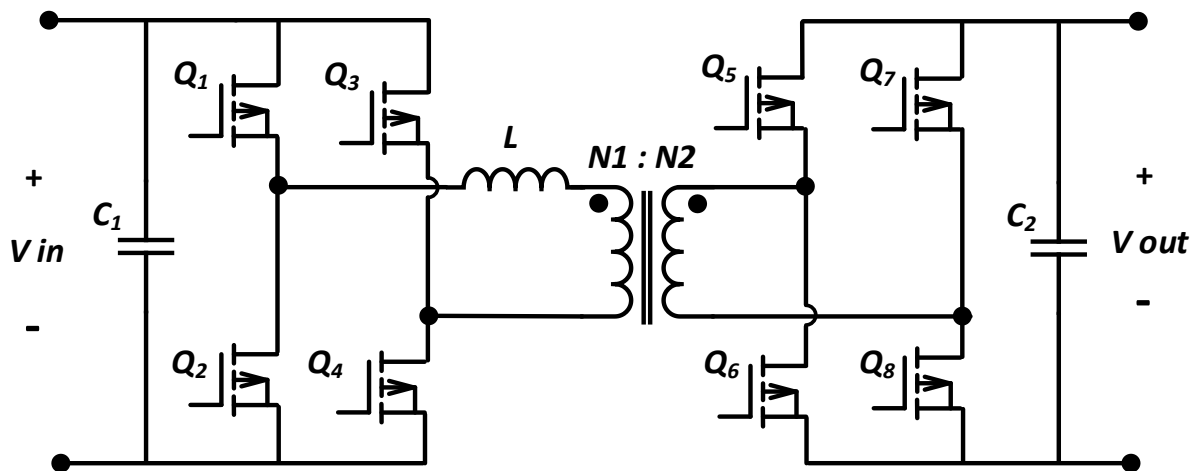


Рисунок 3.22 Схема DAB DC-DC перетворювача

Два активні мостові інвертори - один на стороні первинної обмотки трансформатора, другий – на стороні вторинної. Кожен з них складається з чотирьох ключів, що дозволяють керувати напрямом і рівнем потоку енергії. Первинний інвертор перетворює постійну напругу у високочастотний змінний сигнал, що подається на первинну обмотку трансформатора. Вторинний інвертор

відновлює постійну напругу на виході перетворювача, яка може бути вищою або нижчою за вхідну напругу [100], [101], [102], [103].

Існує декілька режимів керування DAB, для моделювання було обрано режим зсуву фаз (SPS). Він базується на регулюванні фазового зсуву між сигналами ключів інверторів на первинній і вторинній стороні трансформатора для керування передачею енергії [104], [105]. В такому режимі вихідна напруга визначається як:

$$V_{out} = N \cdot \left(V_{in} - \frac{L \cdot P}{f \cdot \Phi \cdot (1 - \Phi)} \right), \quad (3.6)$$

де: L – індуктивність розсіювання трансформатор;

P – потужність передачі енергії;

f – частота комутації ключів;

Φ - фазовий зсув між сигналами первинного та вторинного інвертора.

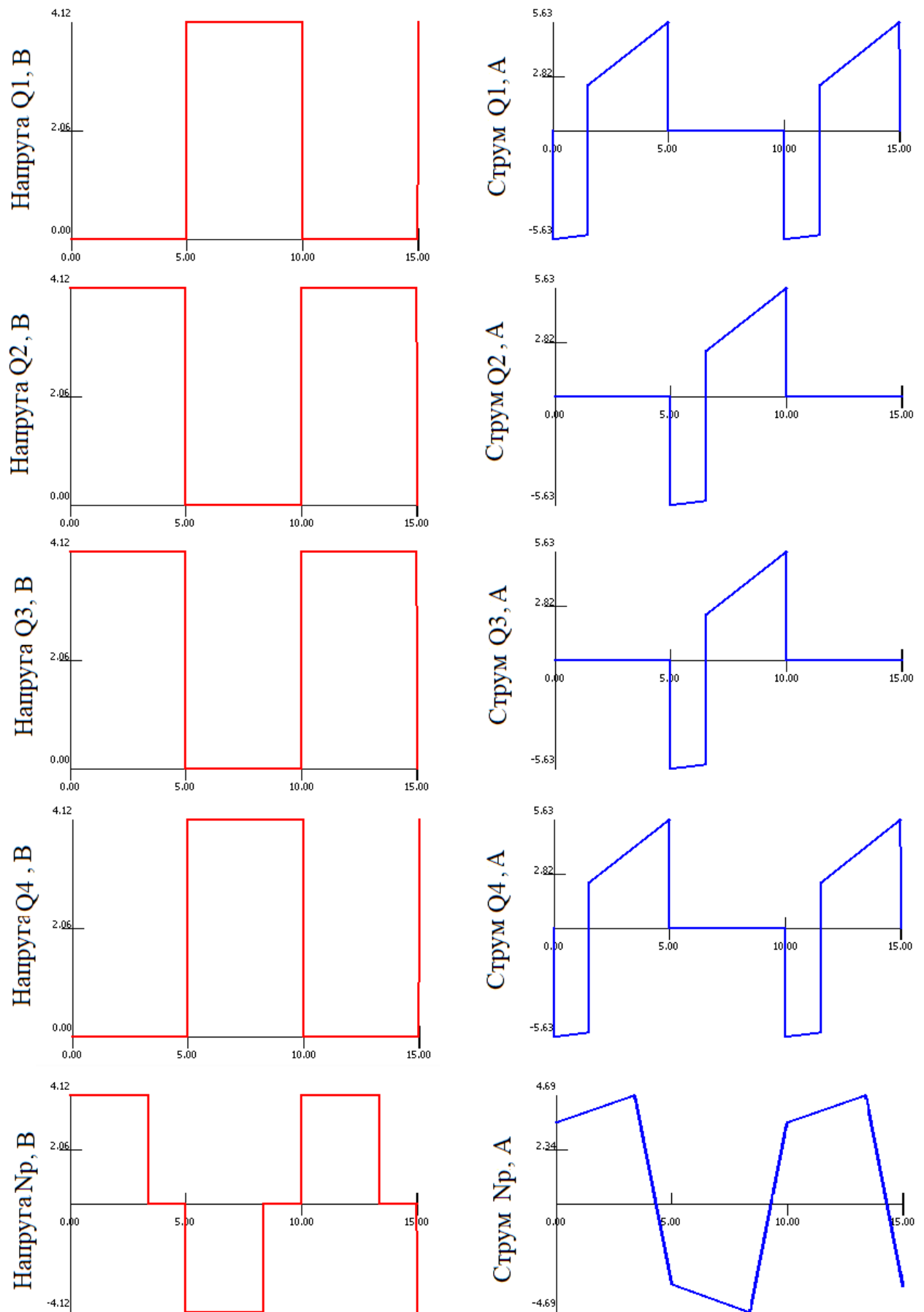


Рисунок 3.23 – Результати моделювання роботи DAB DC-DC перетворювача.

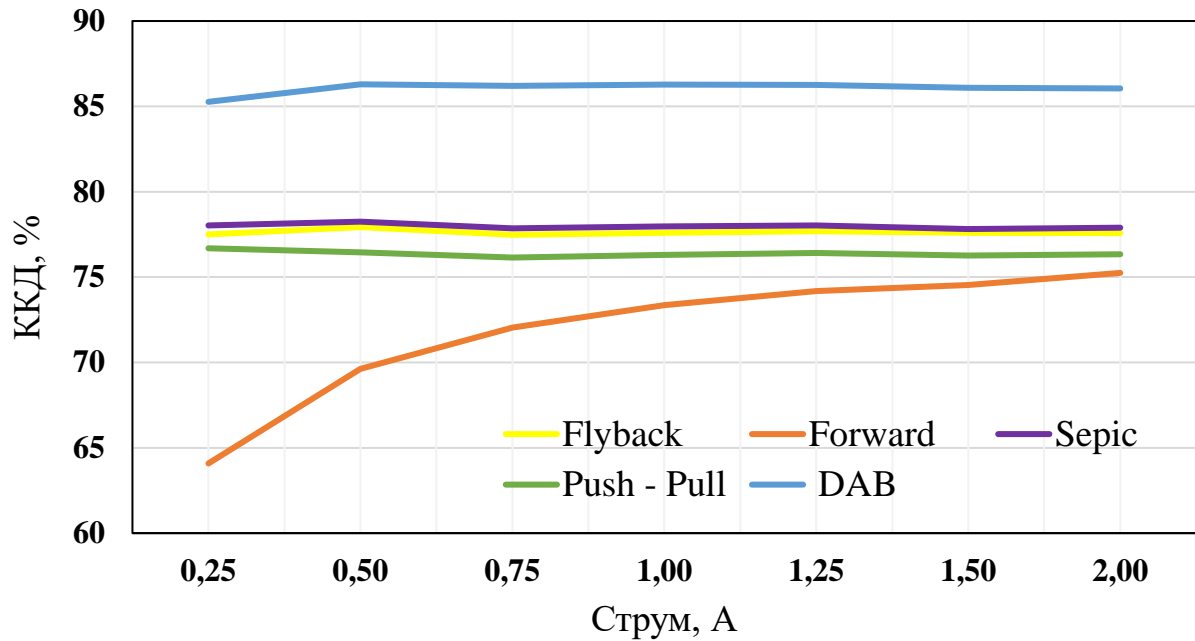


Рисунок 3.24 – Графік залежності ККД від струму змодельованих DC-DC перетворювачів

Загальні характеристики досліджуваних перетворювачів зведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння характеристик досліджуваних перетворювачів

	Flyback	Forward	Sepic	Push-pull	DAB
Складність керування	Проста	Проста	Середня	Висока	Дуже висока
Двонаправленість	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Кількість ключів	1	1	1	2	8
Складність схемотехніки	Низька	Низька	Низька	Середня	Висока
Ефективність	Низька	Низька	Середня	Середня	Висока

Ціна	Низька	Низька	Низька	Середня	Висока
Діапазон вхідної напруги	Вузький	Вузький	Широкий	Вузький	Дуже широкий

DAV топологія DC-DC перетворювача, показала свою перевагу для використання в даній топології активного балансира в порівнянні з іншими топологіями перетворювачів. Можливості роботи в широкому діапазоні вхідних – вихідних напруг, високу ефективність, двонаправленість. Сукупність цих факторів дозволяє максимально реалізувати функціонал даного активного балансира.

Отже, результати моделювання можуть бути обґрунтуванням вибору певної топології DC-DC перетворювача для активного балансира зважаючи на переваги та недоліки кожного типу перетворювачів. Дослідження інших топологій, або покращення чи оптимізація топологій які вже було досліджено, в подальшому є актуальною задачею, що може збільшити ефективність самого активного балансира.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Запропоновано покращену топологію активного балансира, що можна використовувати в АБ, що має багатомодульну структуру. За рахунок додавання додаткових комутаторів та зовнішнього накопичувача енергії, активний балансир має змогу проводити балансування не тільки на рівні комірок в модулі, а також між модулями АБ.

2. Проведено моделювання часу можливих способів балансування в запропонованій топології активного балансира. Результати моделювання показали, що найкращий час балансування при однаковому початково заданому дисбалансі встановив метод від комірки до комірки. В подальшому цей метод необхідно використовувати як базовий.

3. Проведено моделювання характеристик п'яти типів DC-DC перетворювачів при однакових початково заданих параметрах, встановлено що найкращу ефективність має DC-DC перетворювач топології DAB.

4. Основні наукові результати представлені у другому розділі опубліковано у роботах [4], [5], [6].

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ БАЛАНСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

4.1 Побудова активного балансира для застосування в модульних акумуляторних батареях

Топологія модульного активний балансира що розгадалась раніше, була використана для практичної реалізації та перевірки параметрів в реальних умовах експлуатації в електромобілі. В ході роботи було розроблено два прототипи. Перший прототип активного балансира для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях, та прототип системи керування з функцією активного балансування.

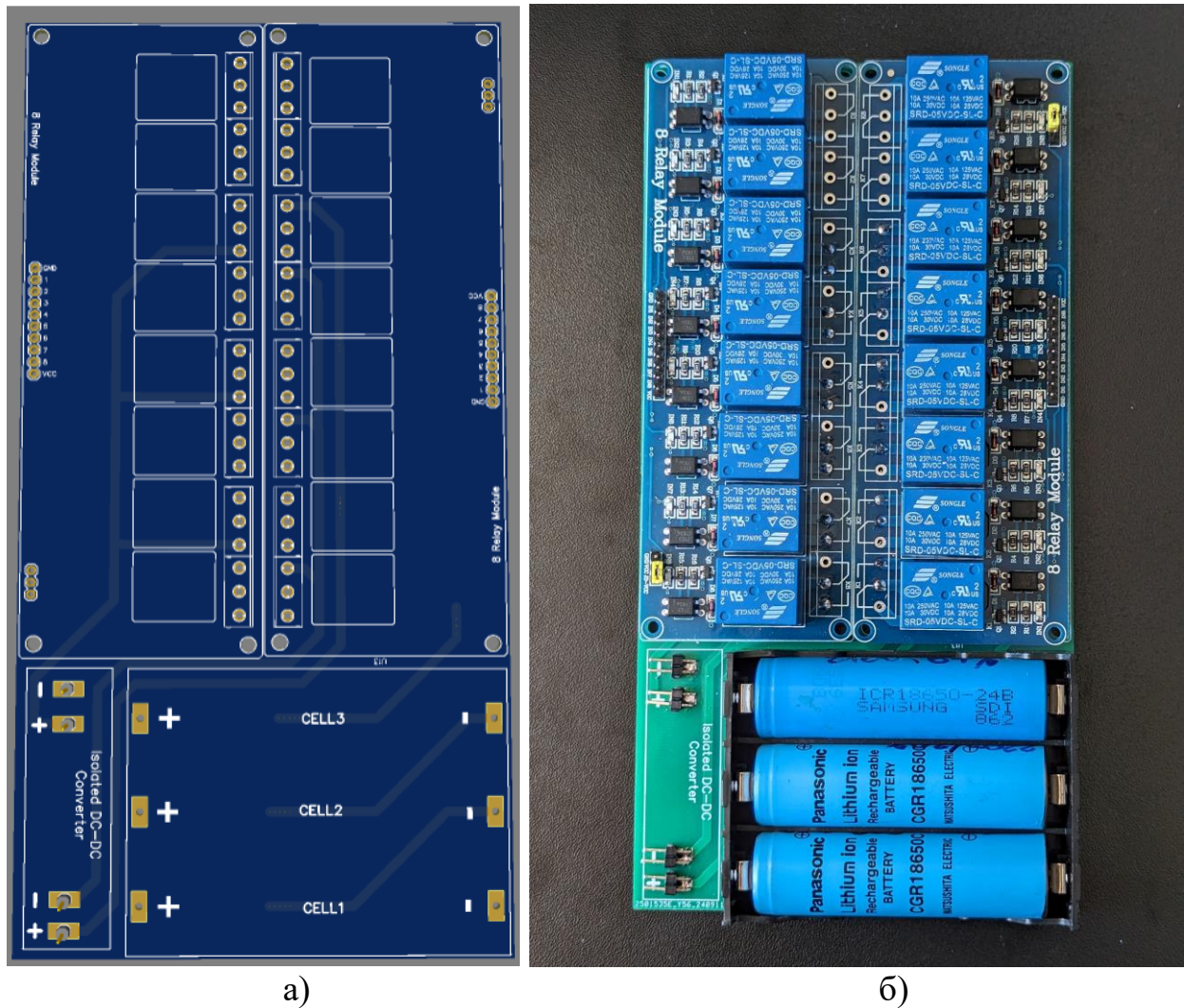


Рисунок 4.1 – Активного балансира для АБ з трьох комірок, друкована плата (а) та зібраний прототип (б)

Перший прототип представлено рис. 4.1. Його розраховано на роботу з трьома послідовно підключеними комітками. Прототип складається з основної плати, на якій розміщено тримач коміток формфактору 18650, місцем для встановлення двох плат комутатора на основі реле, та місцем для встановлення перетворювача, що знаходиться на додатковій платі, яка може підключатись дротами, або безпосередньо впаюватись в основну плату. Така модульна конструкція прототипу має переваги швидкої заміни модулів у випадку їх виходу з ладу, а також дозволяє підключати модулі з DC-DC перетворювачами різних типів. Керування комутаторами відбувається зовнішнім мікроконтролером. Перший прототип був розроблений для тестування DC-DC перетворювачів у роботі активного балансування коміток. Використання комутаторів на базі електромеханічних реле, має переваги у вигляді більшого струму балансування та низької собівартості. У випадку неправильної комутації коміток можливе коротке замикання, яке може призвести до пошкодження комутаторів, тому на платі встановлені запобіжники на струм 2А.

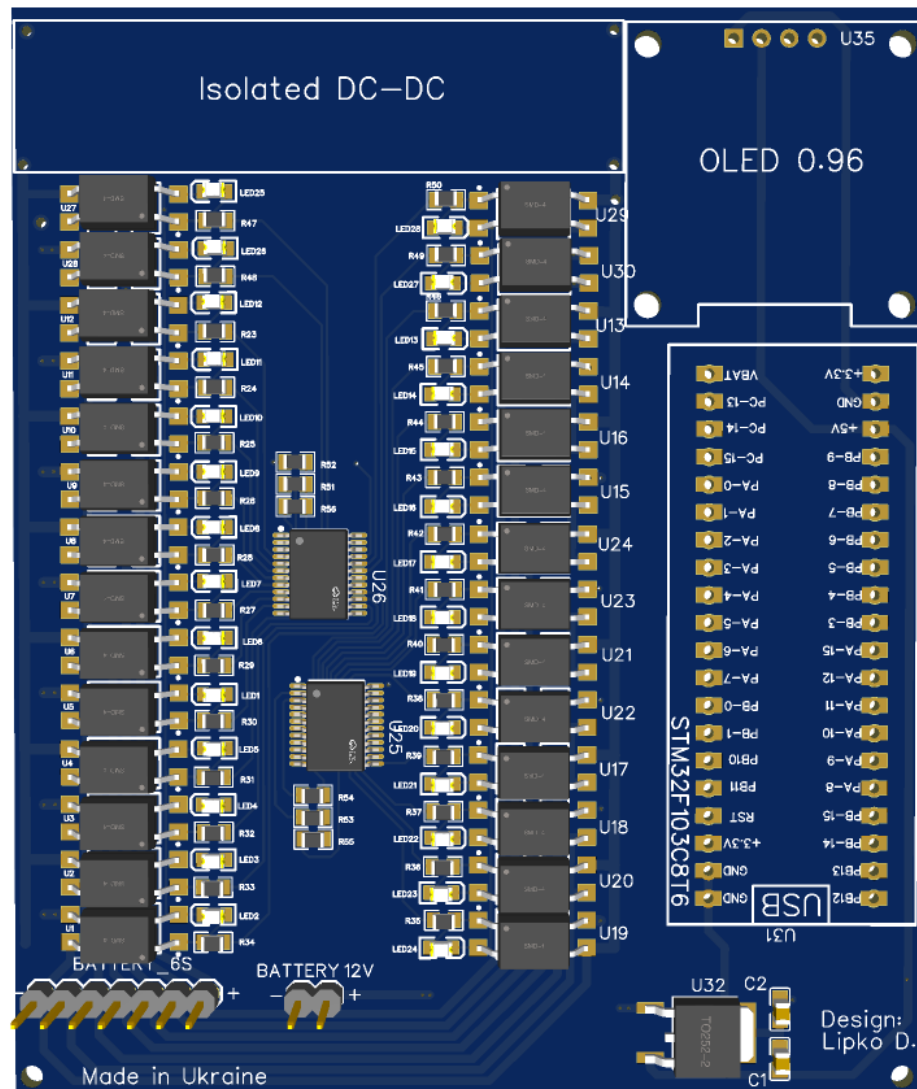


Рисунок 4.2 – Прототип системи керування з функцією активного балансування

Другий прототип вже можна вважати повноцінною системою керування, що має функцію активного балансування. Його побудовано на основі комутаторів з використанням PhotoMOS реле та підтримує роботу з шістьма послідовно підключеними комірками. Відмінність від першого прототипа активного балансира, в тому що додано схеми вимірювання напруги комірок, інтерфейс обміну даними CAN та графічний OLED дисплей для виводу інформації, що робить його повноцінною системою керування АБ. В прототипі застосовано 24 PhotoMOS реле AQY211EH, для керування ними використано розширювач портів PCF8574, що підключений до мікроконтролера STM32F103C8T6 через

I2C шину даних. Для індикації сигналу включення реле паралельно до них встановлено світлодіоди.

Даний прототип має схема вимірювання напруги шести комірок, яка реалізована з використанням двох зовнішніх АЦП ads1115, що підключенні до мікроконтролера через гальванічну розв'язку ISO1050. АЦП має 4 канали вимірювання з розрядністю 16 біт, а значить що АЦП може розрізняти $2^{16} = 65536$ дискретних рівнів сигналу. Для живлення АЦП використано додатковий модуль гальванічно-ізолюваного DC-DC перетворювача, що робить. Гальванічна розв'язка необхідна, оскільки живлення мікроконтролера відбувається від додаткового зовнішнього джерела, що не повинно бути пов'язано з основною акумуляторною батареєю. Також, використання гальванічної розв'язки позитивно впливає на зменшення шумів на АЦП.

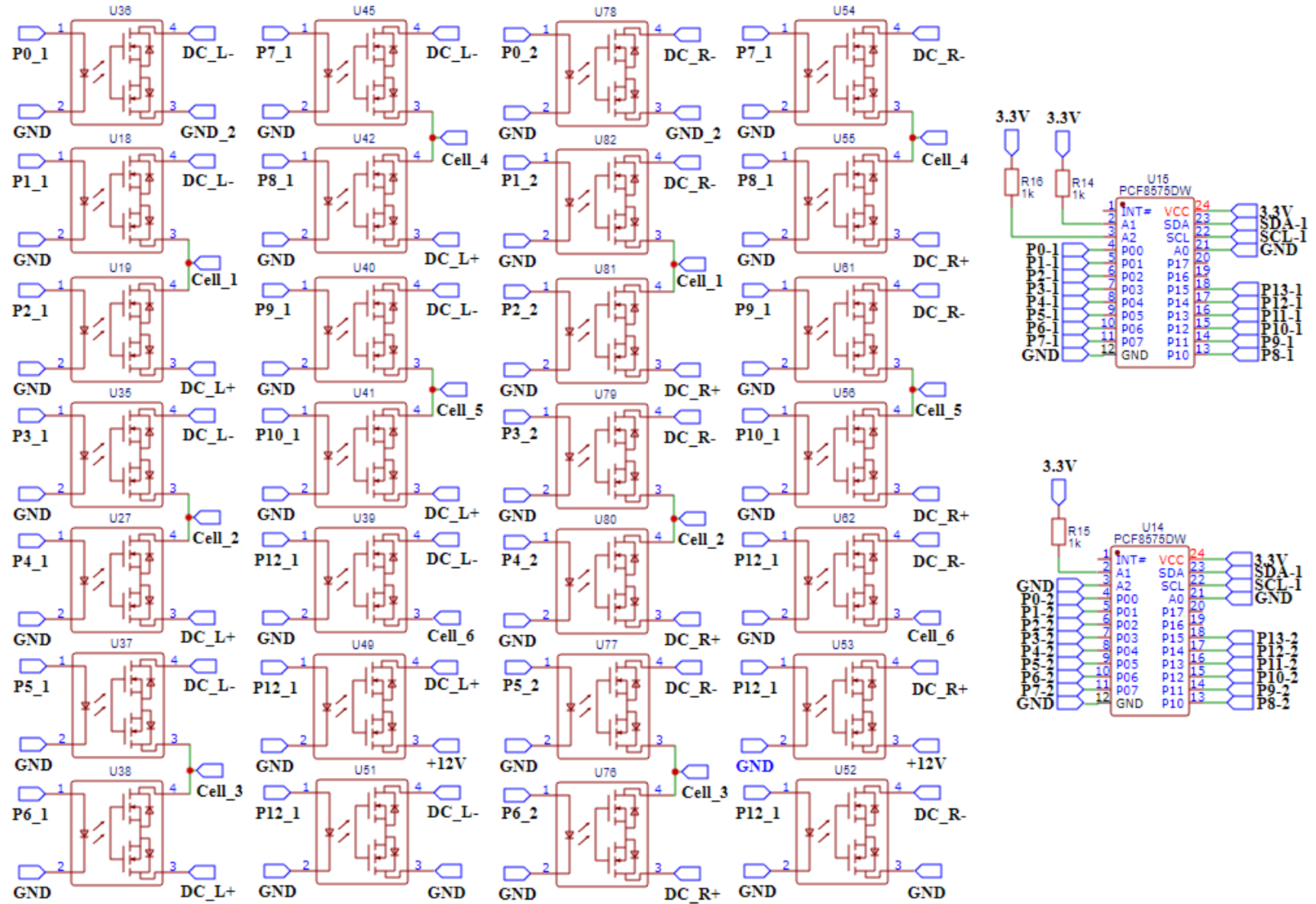


Рисунок 4.4 – Схема комутаторів прототипу системи керування

Для роботи прототипу, було створено програмний код, який виконує мікроконтролер STM32F103C8T6. Алгоритм роботи даного програмного забезпечення зображено на рис. 4.5.

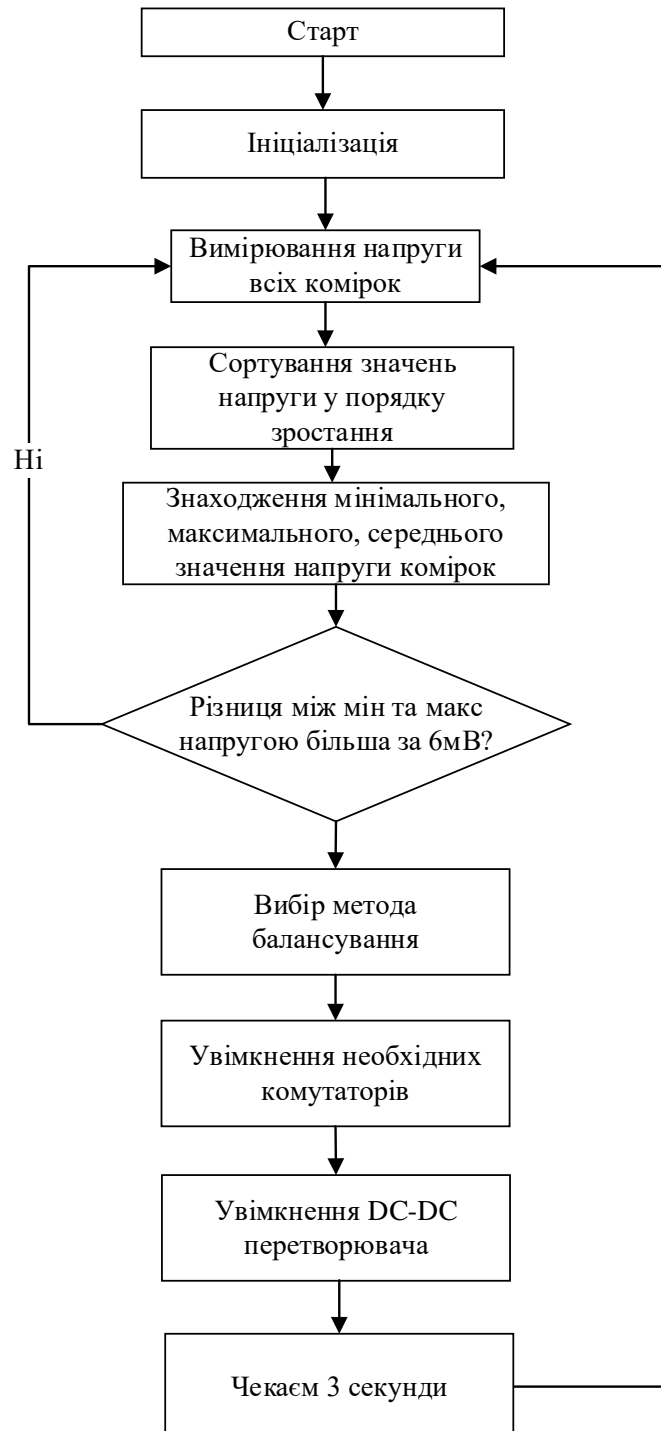


Рисунок 4.5 – Алгоритм програмного забезпечення роботи системи керування в режимі балансування

В середовищі програмування Visual Studio та додатковому розширенню PlatformIO було створено код для прототипу активного балансира на мові програмування C++, що реалізує даний алгоритм. Програмний код для перевірки компонентів наведено в Додатку В. За допомогою програматора ST-Link V2 було завантажено скомпільований код в мікроконтролер STM32F103C8T6.

Після того як прототип було зібрано. Першим етапом перевірки правильності роботи прототипа, була перевірка роботи комутаторів. Для цього було зроблено окреме програмне забезпечення, що перемикало парами комутатори, емітуючи підключення комірок до перетворювача. Після того, як керування комутаторами було налаштовано, наступним етапом була перевірка частини прототипа, що вимірюю напруги комірок. За допомогою зовнішнього джерела живлення, була по черзі подана напруга на кожний вхід підключення комірок АБ, та було зроблено в програмному забезпеченні корекцію лінійної похибки вимірювання напруги. Останнім етапом налаштувань було додано в програмне забезпечення вивід інформації напруги комірок та стан комутаторів на дисплей та дублювання цієї інформації в CAN шину, за допомогою чого відбувалось записування даних дослідження.

Для прототипа пристрою було зроблено Flyback DC-DC перетворювач, що має гальванічну ізоляцію. Попереднє моделювання показало, що ця топологія перетворювача менш ефективна ніж DAB, проте для даного дослідження параметр ефективності не має вагомого значення, оскільки основна задача даного дослідження перевірка працездатності запропонованої топології системи керування з функцією активного балансування.

Після того, як програмне забезпечення було повністю готово та перевірено працездатність окремих частин прототипа, було зібрано експериментальну дослідну установку (рис. 4.6), яка складалась:

- Прототип досліджуваного пристрою;
- АБ конфігурації 6s1p з LFP комірок IFR26650 ємністю 3,4 А*г;
- АБ конфігурації 3s1p з NCA комірок ємністю 2,4 А*г;
- ПК Acer Swift 3;

- Аналізатор CAN шини CANable V1;
- Мультиметр UNIT UT136C+;
- Осцилограф Siglent SDS1102DL+;
- Лабораторний блок живлення RIDEN DPS5005.

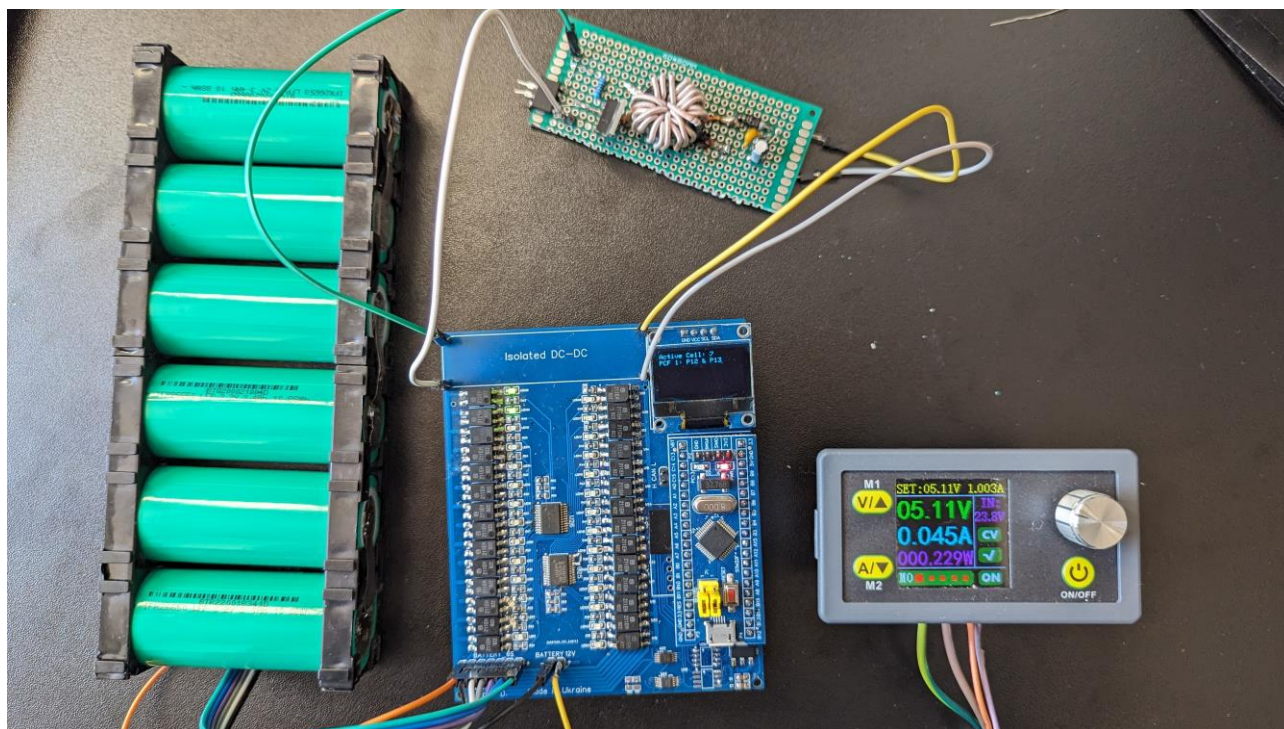


Рисунок 4.6 – Експериментальна дослідницька установка

АБ конфігурації 6s1p була використана як основна АБ, яку обслуговує дана система керування, а АБ конфігурації 3s1p була використана, як зовнішнє джерело живлення.

В ході дослідження було штучно зроблено дисбаланс наближений до початкових умов моделювання часу балансування (табл. 3.2).

На прототипі було досліджено функціональні можливості пристрою, а також підтверджено його працездатність в усіх режимах роботи. Експериментальне дослідження, також виявило і недоліки в прототипі та помилки допущені під час проектування друкованої плати. До основних недоліків можна віднести, відсутність вимірювання напруги зовнішнього

джерела живлення, та відсутність вимірювання струму вхідної та вихідної частини перетворювача. Із можливих покращень в подальшому, додати підключення термодатчиків, для вимірювання температури АБ.

4.2 Застосування активного балансира в електромобілі

Для перевірки можливостей практичного застосування покращеного модульного активного балансира в електротранспорті було проведено дослідження на серійному електромобілі Renault Fluence ZE, 2012 року виготовлення. Перевагою даної моделі для досліджень є розташування акумуляторної батареї в задній частині електромобіля, та можливість доступу до неї з багажного відділення. Електромобіль має таку особливість через те що, конструкторами закладалась можливість швидкої заміни батареї, на спеціальних станціях. Також АБ кріпиться до електромобіля за допомогою чотирьох спеціальних кріплень, що дозволяє швидко її демонтувати, та встановити назад.

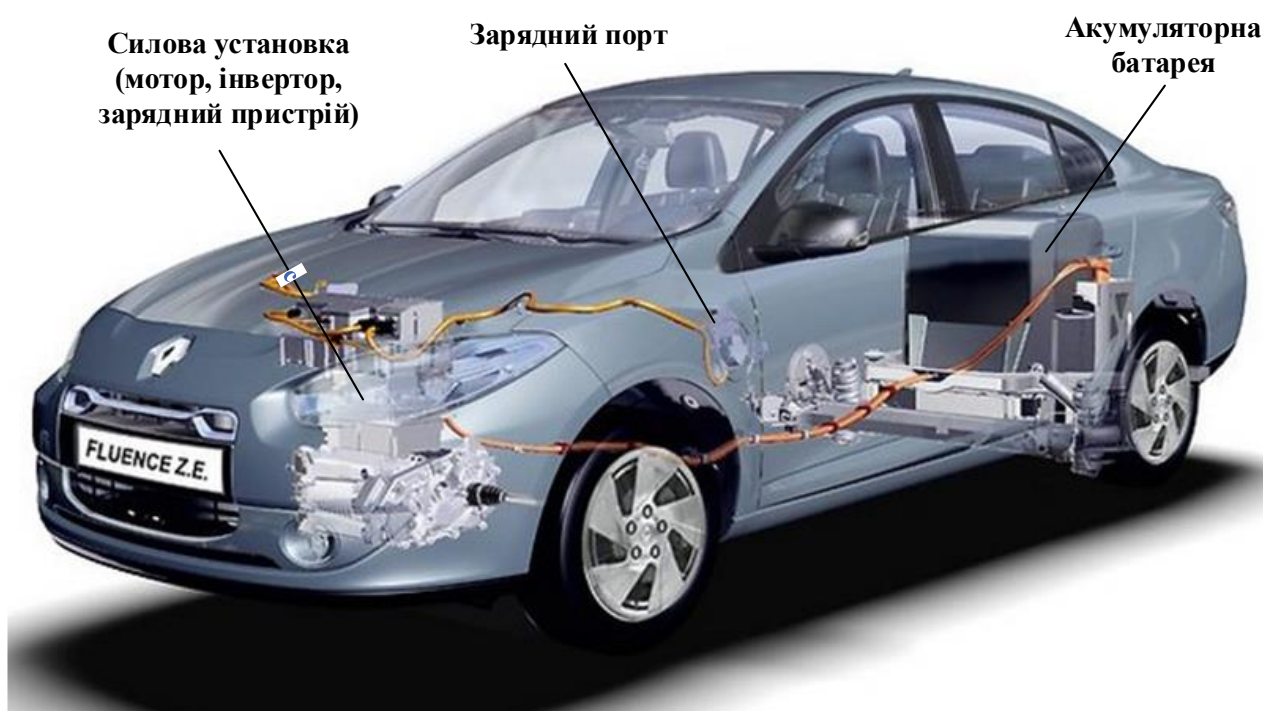


Рисунок 4.7 – Конструкція електромобіля Renault Fluence ZE.

АБ що була встановлена виробником, мала низький ресурс вже через перші 5 років експлуатації, і тому була демонтована. Замість оригінальної АБ була

встановлена АБ на елементах LG Chem. Батарея складається з 16ти модулів, кожен з яких має конфігурацію 12с3п. Загальна кількість комірок 288, а конфігурація батареї 96с3р. BMS складається з 5 модулів, 1 головний та 4 підпорядкованих. Кожен підпорядкований модуль обслуговує 4 модулі, та вимірює напругу 24х послідовно підключених комірок та вимірює температуру за допомогою 2х термодатчиків.

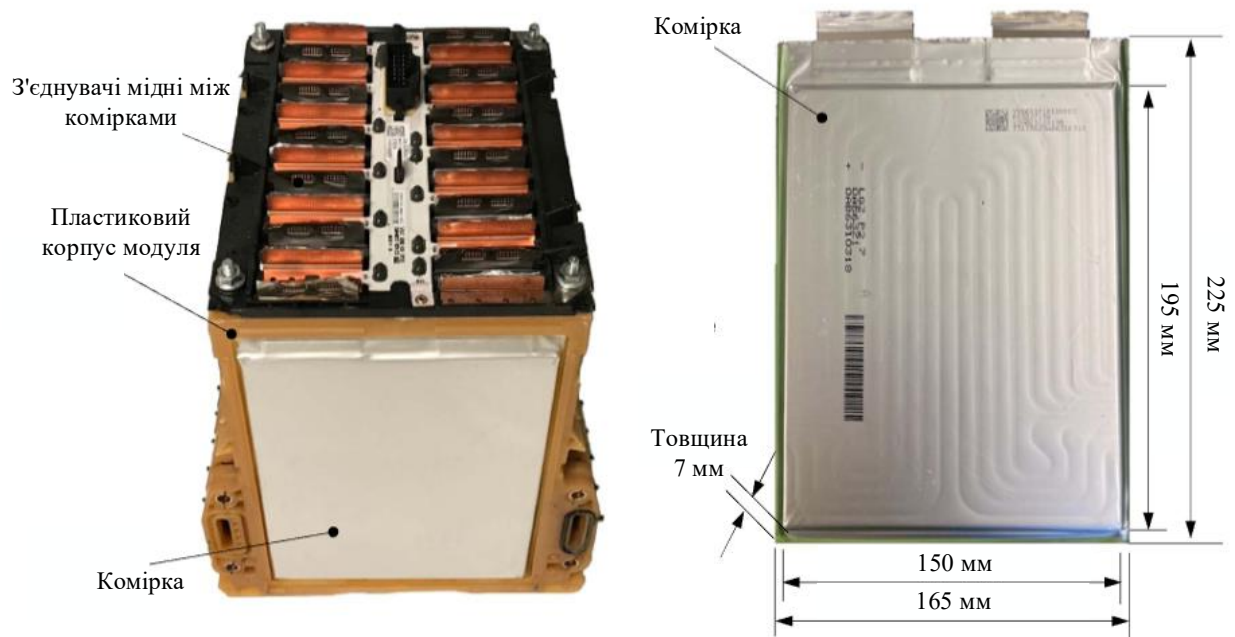


Рисунок 4.8 – Будова модуля 12с3р досліджуваної АБ [106]

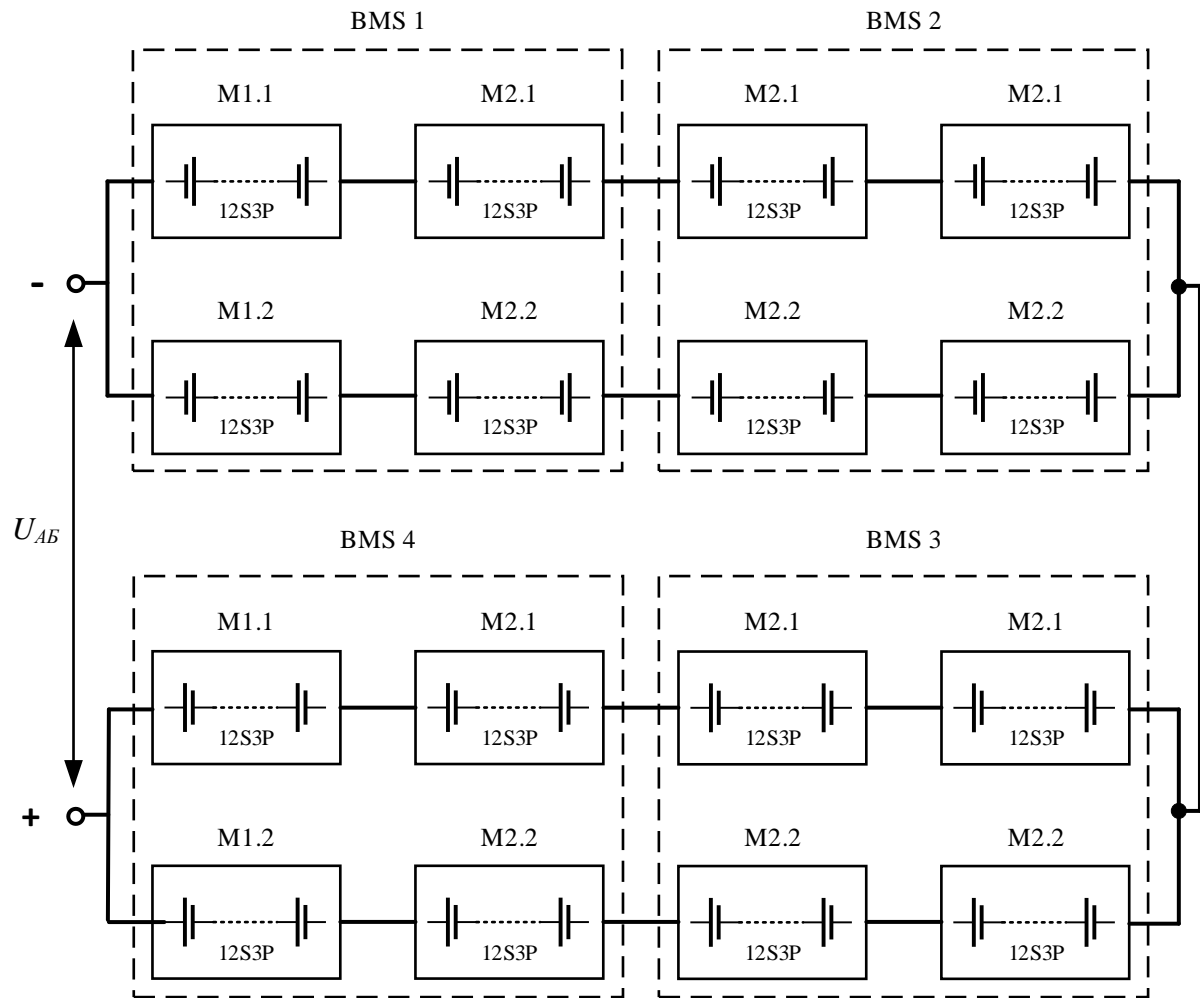


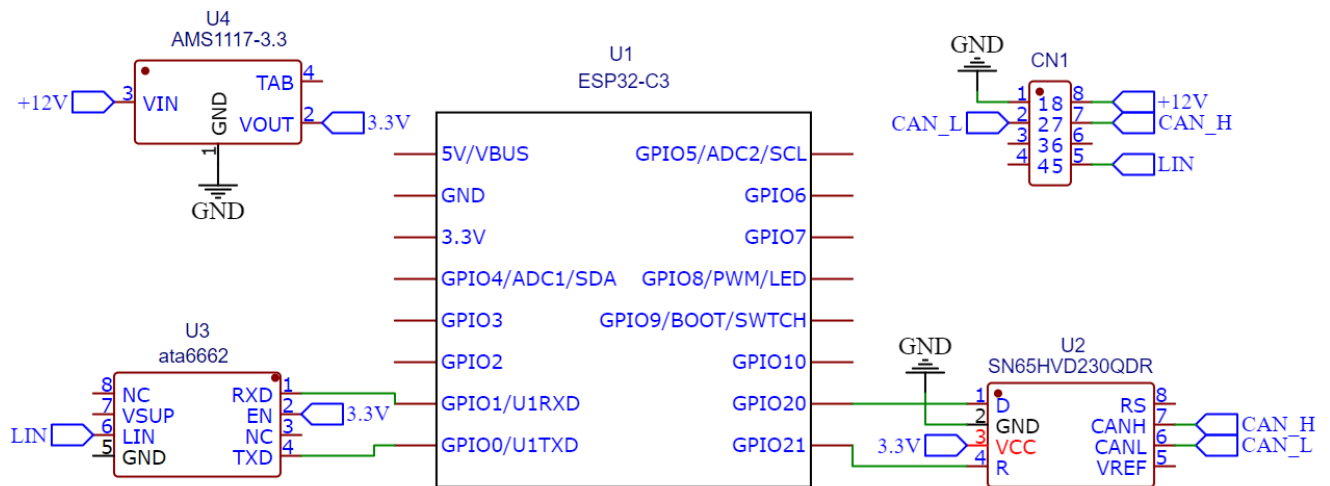
Рисунок 4.9 – Структурна схема АБ експериментального досліджуваного електромобіля

АБ над якою проводились дослідження, на даний час має низький SOH, та високий внутрішній опір, у зв'язку із календарної деградацією та кількістю циклів заряд-розряду. На початку дослідження SOH акумуляторної батареї складав 68%, а запас ходу на одному заряді становив до 80 км в теплу пору року і 55 км в холодно пору року. Слід зауважити, АБ з високим внутрішнім опіром, віддають меншу кількість енергії, при експлуатацію у низьких температурах, оскільки частина енергії розсіюється під час протікання струму через комірки. Даний запас ходу, значно менший, ніж запас ходу на початку експлуатації даної АБ в даному електромобілі.

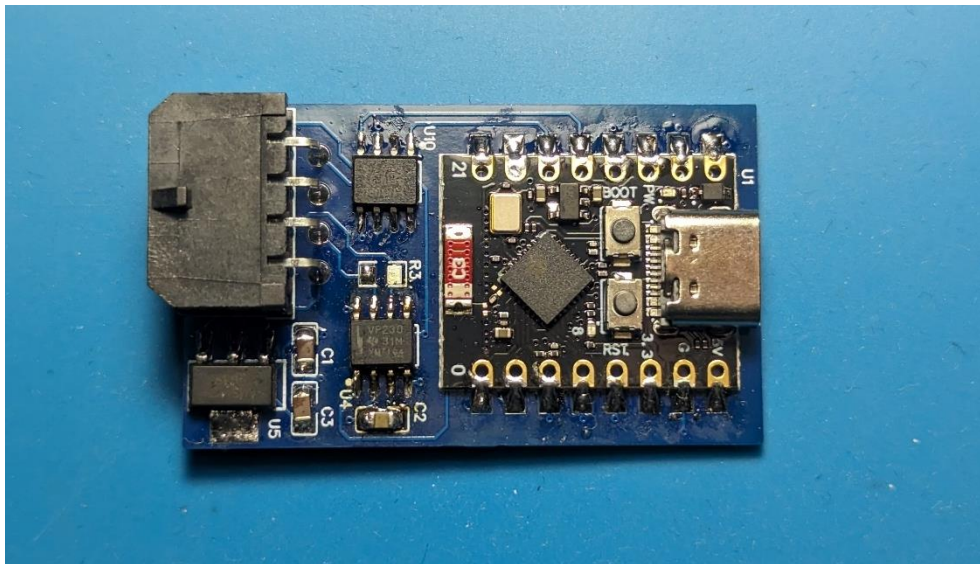
Для визначення параметрів під час поїздок в рамках експериментальних досліджень, було використано діагностичне обладнання ELM327 та програмне забезпечення CanZE. ELM327 підключається в штатний діагностичний OBD-2 роз'єм електромобіля, та через CAN шину отримує всі необхідні параметри для дослідження в режимі реально часу. Запис цих даних відбувається на планшет на базі операційної системи Андроїд, отримані карти напруг на комірках батареї відображена на рис. 4.12 та 4.14.

CanZE має зручне відображення параметрів батареї, проте не містить логування даних, через це не підходить для запису параметрів під час їзди. Для логування даних було зібрано пристрій для збору та аналізу даних CAN шини на базі плати ESP32, який працює з програмним забезпеченням SavvyCAN, що має відкритий програмний код. Це допомогло збирати дані під час поїздки, та зберігати їх в МК ESP32.

Мікроконтролер ESP32 було обрано, оскільки він має вбудований контролер для роботи з CAN шиною. До ESP32 підключено CAN трансивер SN65HVD230. Живиться CAN аналізатор від бортової мережі електромобіля напругою 12 В, через що в пристрої присутній понижуючий лінійний стабілізатор напруги AMS1117-3.3, що перетворює вхідну напругу 12 В у 3,3 В для живлення ESP32 та sn65hvd230. Оскільки в даному електромобілі присутня LIN шина, в CAN аналізаторі встановлено трансивер LIN шини ATA6662, який необхідний для отримання та аналізу даних з цієї шини даних, що також може допомогти в дослідженні. Загальна схема та фото CAN аналізатора представлено на рис. 4.10. Програмне забезпечення було використано готове, що має ліцензію відкритого коду.



a)



б)

Рисунок 4.10 – Схема пристрою для запису даних шини CAN (а) та зібраний пристрій для запису даних шини CAN (б)

Підключивши CAN аналізатор до CAN шини електромобіля через діагностичний роз'єм, експериментальним шляхом було встановлено, що швидкість з якою працює CAN шина 500 кБіт/с. Після чого було отримано доступ до даних якими обмінюються між собою різні внутрішні модулі електромобіля. Проблема обробки та аналізу цих даних полягає в тому, що данні закодовані та знаходяться в шістнадцятковій системі числення, отриманні данні з CAN

аналізатора можна побачити на рис. 4.11. За допомогою зворотної інженерії, та знайденої інформації у мережі інтернет, було частково декодовано данні CAN шини [9]. В подальшому для декодування даних з CAN шини у фізичні значення, було створено DBC (англ. Data Base CAN) файл на основі реверсивної інженерії та інформації з відкритих джерел. Для його створення, було використано програмне забезпечення Kvaser. У цьому файлі визначається формат і призначення кожного типу повідомлень, включаючи ідентифікатори повідомлень, назви сигналів, масштабування, зсуви та типи даних. Як приклад, блок керування двигуном передає в CAN шину данні в ідентифікаторі 0x19F для інших модулів електромобіля, про швидкість обертання електродвигуна на основі чого було розраховано швидкість руху електромобіля. BMS передає данні в шести ідентифікаторах, наприклад ідентифікатор 0x155, довжина якого 8 байт, містить інформацію про струм, напругу та SOC АБ. Застосування DBC файлу декодування, автоматизує процес декодування, що дає змогу одразу бачити на ПК фактичні значення (рис. 4.11).

The screenshot displays the SavvyCAN V213 software interface. The main window shows a list of captured CAN messages with columns for Timestamp, ID, Ext, RTR, Dir, Bus, Len, ASCII, and Data. The data column is expanded for message 44614, showing decoded values for various parameters.

Message ID	Timestamp	ID	Ext	RTR	Dir	Bus	Len	ASCII	Data
44608	71.79098	0x1A1	0	0	Rx	0	8	...T...	B1 CA 7A 34 65 8C 80 20
44609	71.79985	0x155	0	0	Rx	0	8	...T...	82 87 BC 54 98 60 02 C8 <x155>...
44610	71.80196	0x19F	0	0	Rx	0	8	...jP.	E1 E1 7D 01 00 6A 50 FE <x19F> RPM: 0 RPM Speed_Fluence: 0 Kmh
44611	71.80222	0x157	0	0	Rx	0	8	D5 CB 09 C4 FF E0 00 80
44612	71.80370	0x1C7	0	0	Rx	0	4	AA A0 FF C0
44613	71.80696	0x1A1	0	0	Rx	0	8	...T...	B1 CA 7A 34 65 8C 80 20
44614	71.80981	0x155	0	0	Rx	0	8	...T...	82 87 BC 54 98 60 02 C8 <x155> Max_charge_rate: 65 Amps SoC: 97.52 % power_charge: 130 Current: -5 A charger_state: 84 Voltage: 386 V
44615	71.81001	0x424	0	0	Rx	0	8	..@V.?^U@	11 40 56 C8 3F 5E 55 40 <x424>...
44616	71.81026	0x425	0	0	Rx	0	8	*.D.B...	2A D3 44 9C 42 1E FD 0E <x425>...
44617	71.81191	0x157	0	0	Rx	0	8	D5 1B 09 C4 FF E0 00 80
44618	71.81216	0x19F	0	0	Rx	0	8	...jP.	E1 E1 7D 06 00 6A 50 FE <x19F>...
44619	71.81372	0x1C7	0	0	Rx	0	4	AA A0 FF C0
44620	71.81693	0x1A1	0	0	Rx	0	8	...T...	B1 CA 7A 34 65 8C 80 20

On the right side, there are controls for capturing frames, including 'Total Frames Captured: 3841437', 'Frames Per Second: 0', and buttons for 'Suspend Capturing', 'Normalize Frame Timing', 'Clear Frames', 'Keep Filters When Clearing', 'Auto Scroll Window', 'Overwrite Mode', 'Interpret Frames', 'Expand All Rows', and 'Collapse All Rows'. Below these are 'Bus Filtering' and 'Frame Filtering' options.

At the bottom, it shows 'Connected to 0 buses', 'Test drive 1.csv loaded (X)', and a prompt 'Press F1 on any screen for help'.

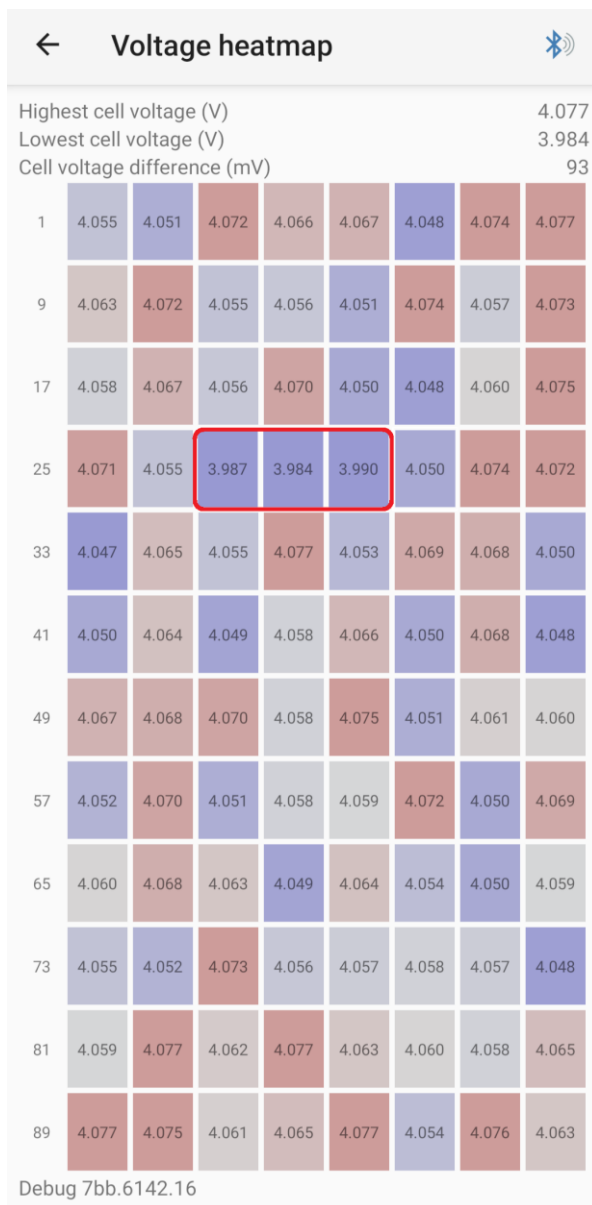
Рисунок 4.11 – Дані CAN шини електромобіля Renault Fluence ZE в програмному забезпеченні SavvyCAN

Отже, було отримано змогу записувати та декодувати параметри швидкості руху електромобіля, заряд батареї, напругу батареї, струм батареї, SOC, температуру батареї, в режимі реально часу. Зарядивши електромобіль до максимального рівня заряду було розпочато першу тестову поїзду із записом даних CAN шини на ПК за допомогою ESP32. Перед поїздкою, а також після неї, було зафіксовано мапу напруги комірок АБ за допомогою програмного забезпечення CanZE.

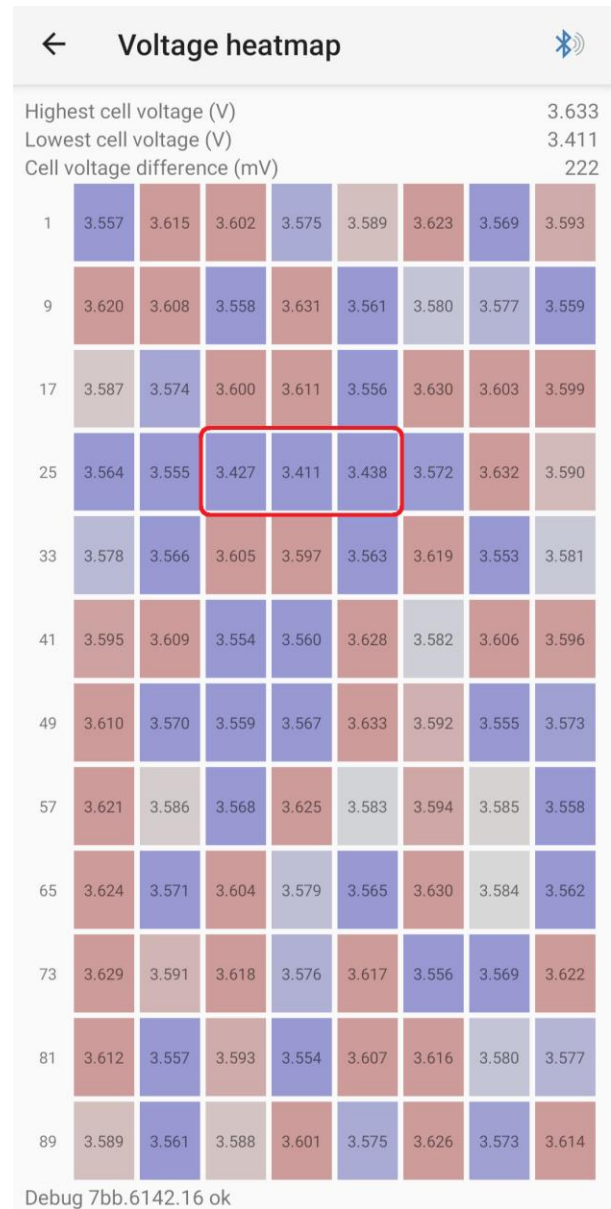
Під час першої поїздки було зібрано великий масив даних з CAN шини які потім було декодовано, та на основі них побудовано графіки даних поїздки (рис. 4.6). Окрім низького SOH, АБ має проблему із дисбалансом комірок. На початку дослідження було виміряно наступні параметри АБ, та наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати першого дослідження АБ під час тестової поїздки

Пройдений шлях, км	Середнє споживання, кВт*г на 100км	Загальна ємність, А*г	Дисбаланс максимальний, мВ	SOH, %	Внутрішній опір АБ, мОм
82	16,3	33	220	69	121

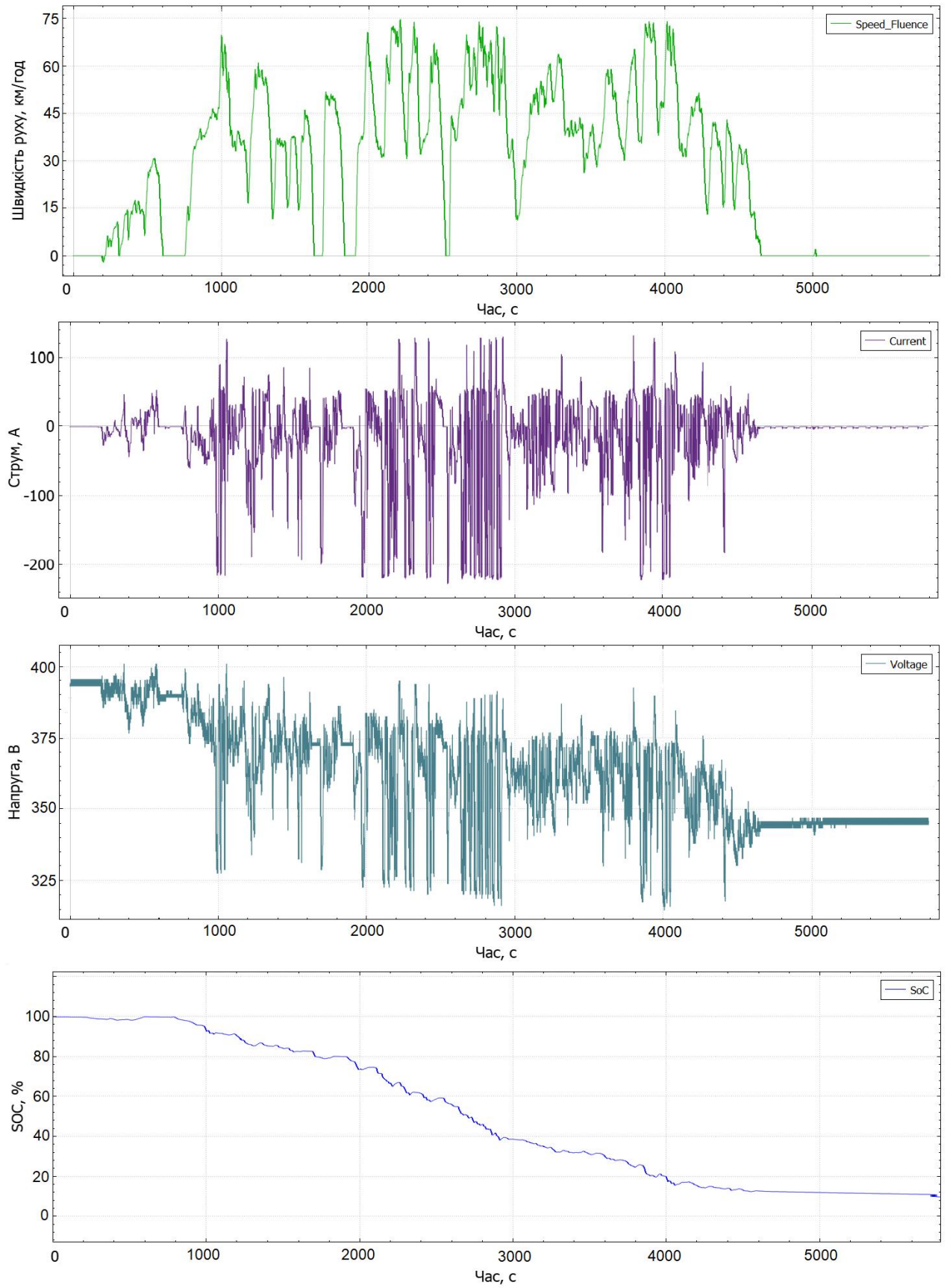


а)



б)

Рисунок 4.12 – Карта комірок до встановлення активного балансира, зарядженої батареї (а) та розрядженої батареї (б)



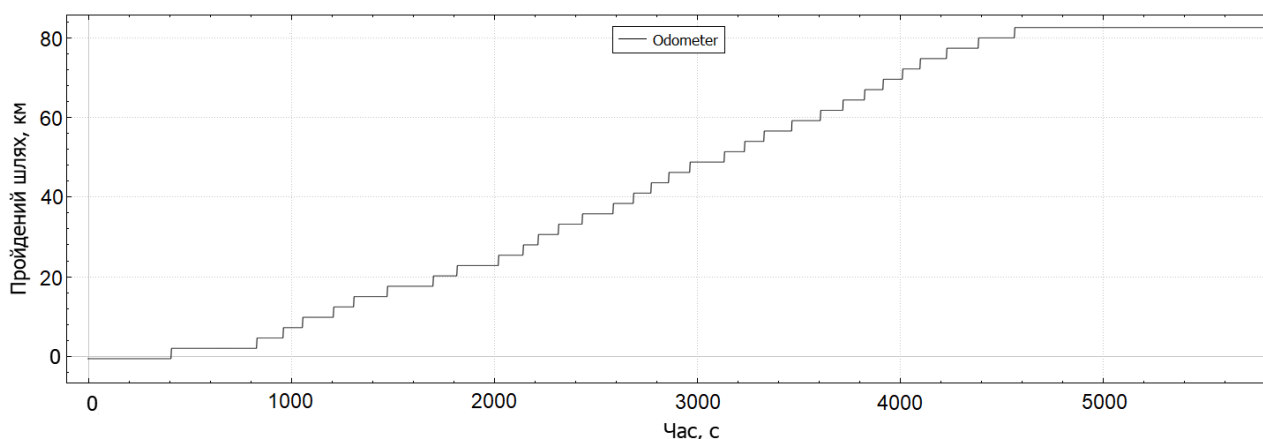


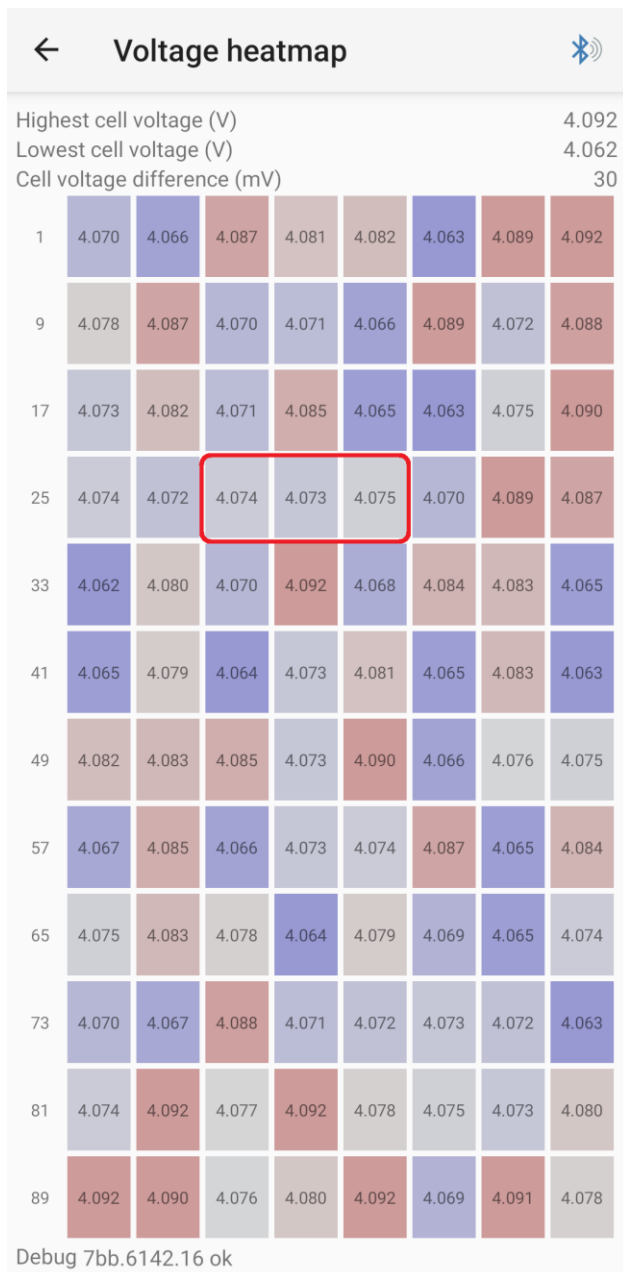
Рисунок 4.13 – Графік даних отриманих під час першої тестової поїздки

Встановлення активного балансира відбулося на 6 з 12 комірок модуля M2.1 АБ де було видно 3 комірки з нижчим рівнем заряду ніж інші, та які мали великий дисбаланс в порівнянні з іншими комірками АБ. Оригінальна BMS з пасивним методом балансування лишалась підключена також. Балансування відбувалось за алгоритмом заряджання в першу чергу комірок з найбільшим дисбалансом.

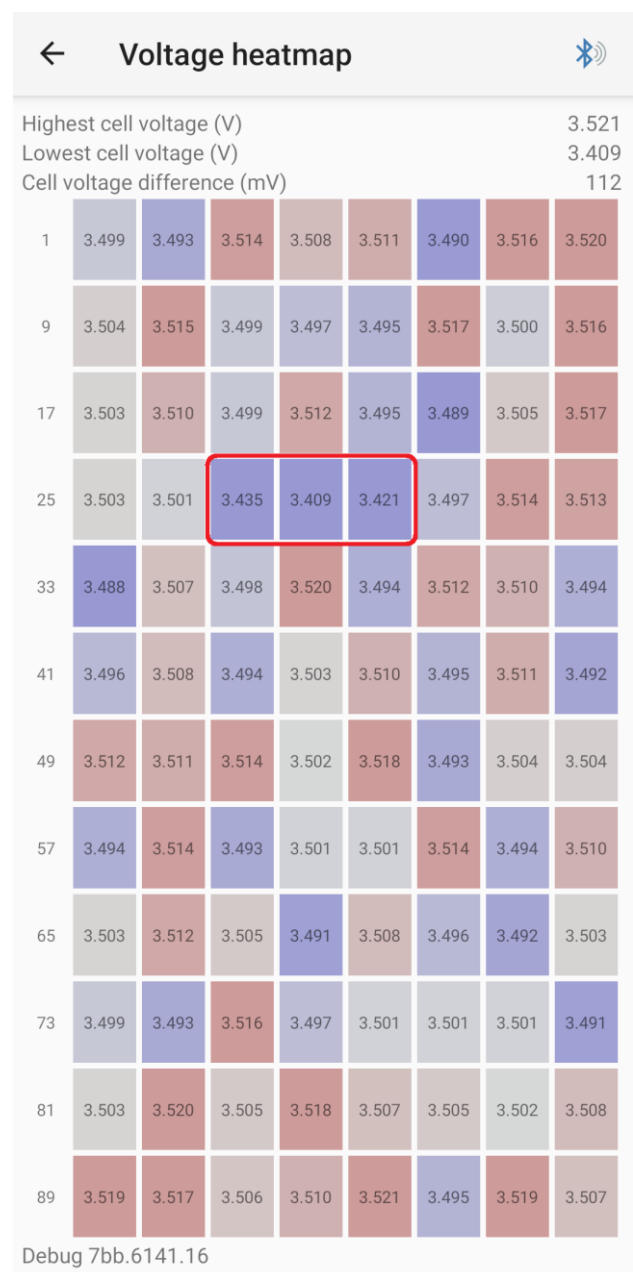
Після роботи активного балансира протягом 24-х годин було зроблено другу тестову поїздку, під час якої зібрано новий масив даних з CAN шини, на основі якого отримано мапу напруги комірок до та після поїздки (рис. 4.14), а також побудовано графік руху (рис. 4.15). Оброблені дані та результати експерименту наведено у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати першого дослідження АБ під час тестової поїздки

Пройдений шлях, км	Середнє споживання, кВт*г на 100км	Загальна ємність, А*г	Дисбаланс максимальний, мВ	SOH, %	Внутрішній опір АБ, мОм
128	16,3	43	112	81	121

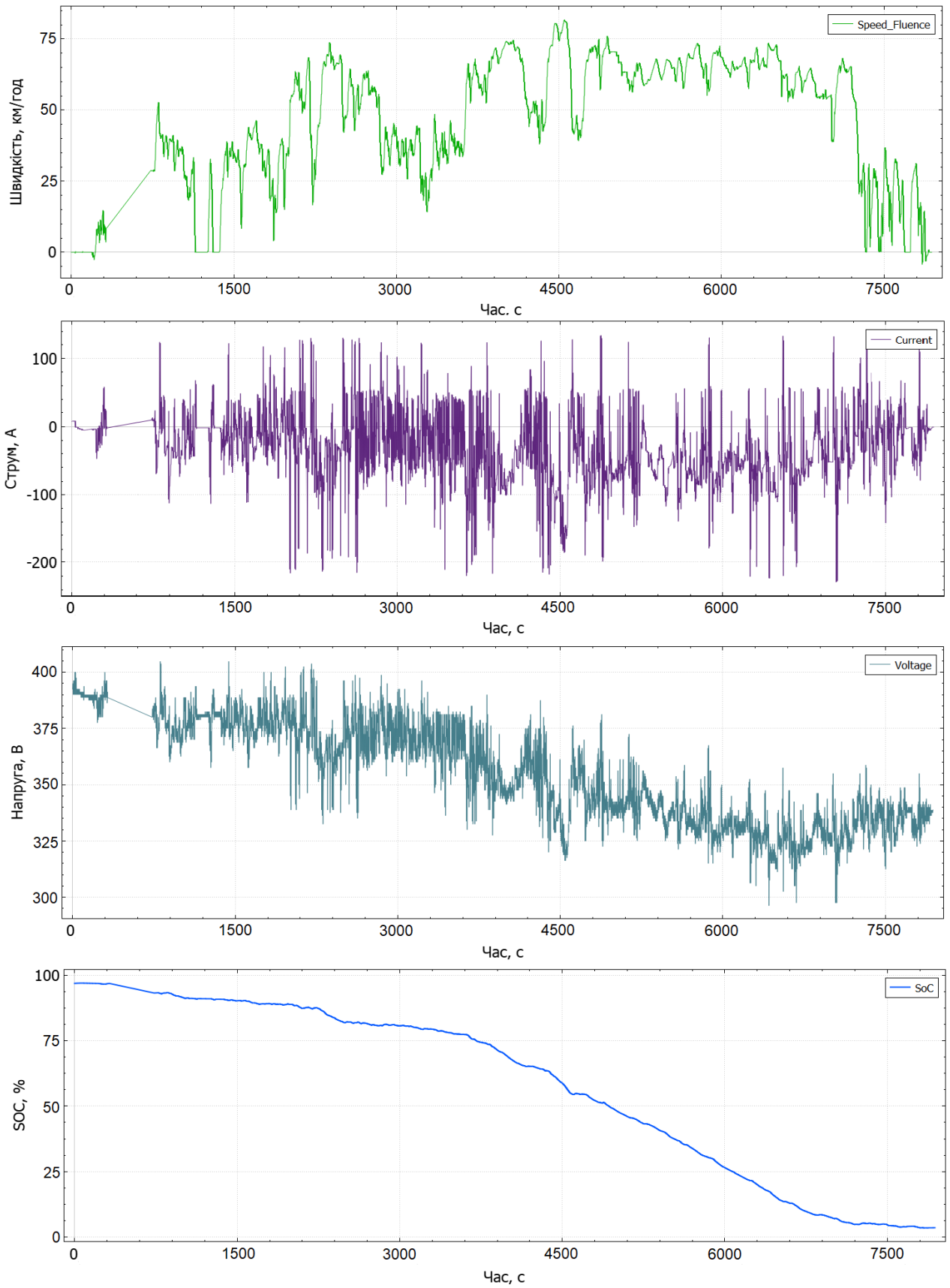


а)



б)

Рисунок 4.14 – Карта комірок після встановлення активного балансира, зарядженої батареї (а) та розрядженої батареї (б)



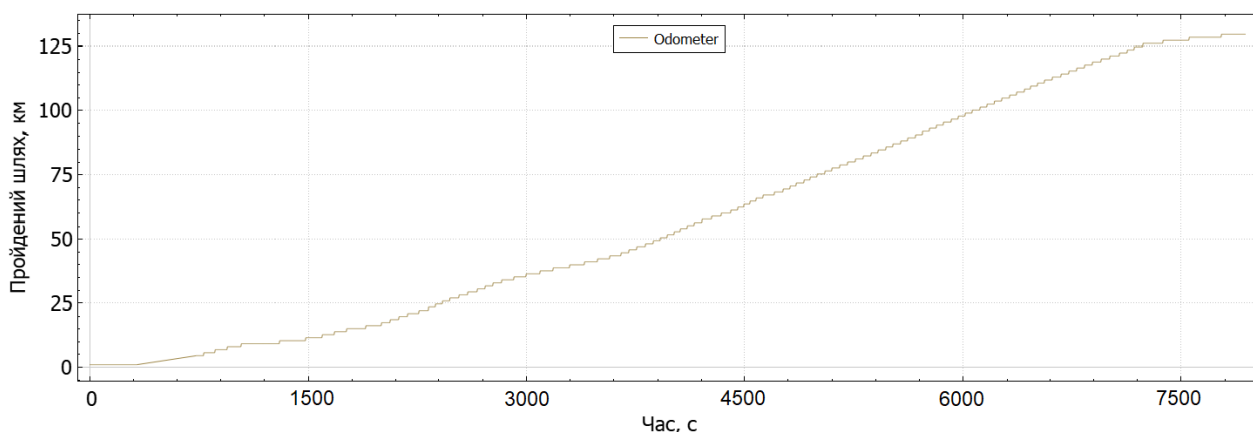


Рисунок 4.15 – Графік даних отриманих під час другої тестової поїздки

За результатами дослідження, можна зробити висновок, що після встановлення системи керування з активним способом балансування пробіг на одному заряді збільшився на 46 км, що на 35% більше ніж було до заміни. Проте, даний результат не можна віднести до всіх електромобілів, оскільки дуже впливає початковий стан АБ, а тому позитивний вплив від такої модернізації може сильно відрізнятись.

Отже, АБ що використовується з оригінальною BMS встановленою виробником, що має пасивний метод балансування, при певному рівні деградації АБ перестає справлятися з функцією балансування. BMS з активним методом балансування має кращі характеристики за рахунок більшого струму балансування, а також можливості балансування шляхом заряджання комірки, робить цей процес набагато швидше. Покращений активний балансир, виконує функцію балансування АБ, що має багатомодульну структуру, краще ніж оригінальна BMS з пасивним методом балансування.

4.3 Висновки до розділу 4

1. Експериментальна перевірка підтвердила, що прототип покращеного активного балансира дозволяє проводити балансування в багатосекційних АБ. Підтверджено правильність схемотехнічних рішень.

2. Здійснено заміну штатної системи керування АБ серійного електромобіля, що має функцію балансування пасивним методом, на прототип покращеного активного балансира.

3. Експериментально встановлено, що використання покращеного активного балансира дає збільшення запасу ходу електромобіля на 35%, що в свою чергу збільшує загальний ресурс.

4. Основні наукові результати представлені у другому розділі опубліковано у роботах [4], [7], [8], [9].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу продовження терміну експлуатації акумуляторних батарей шляхом використання нових засобів силової та інформаційної електроніки. Отримані нові науково обґрунтовані результати в сукупності є суттєвими для розвитку систем керування акумуляторними батареями з активним методом балансування, що можуть застосовуватись в акумуляторних батареях з модульною структурою.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. Досліджено вплив вибору оптимального діапазону рівня заряду-розряду акумуляторної батареї при частковому циклі. Метааналіз показав, що вибір оптимального діапазону рівня заряду-розряду акумуляторної батареї при частковому циклі, що може призвести до збільшення ресурсу на 114%.

2. Досліджено особливості роботи систем керування акумуляторними батареями з пасивним та активним методом балансування. Пасивний метод балансування широко застосовується в електротранспорті та стаціонарних накопичувачах енергії, проте цей метод дуже не ефективний в порівнянні з активним методом балансування. На основі результатів аналізу топологій активних балансирів запропоновано власну покращену топологію активного балансира, що має можливість застосування в акумуляторних батареях з модульною структурою.

3. Проведено моделювання часу балансування комірок для перспективних способів балансування в покращеному модульному активному балансірі. Результати моделювання, показали що метод обміну енергії від комірки до комірки має найменший час балансування, а також є найефективнішим та найшвидшим методом. Встановлено, що метод обміну енергією між модулем і коміркою має найбільший час балансування та є на 230% повільніший за метод обміну енергією між коміркою та коміркою. На основі отриманих результатів моделювання побудовано алгоритм роботи системи керування акумуляторною батареєю.

4. Розроблено та виготовлено друковану плату для прототипа системи керування акумуляторною батареєю, з функцією модульного активного балансира. На мові програмування C++ розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера STM32F103C8T6, що реалізує вимірювання напруги кожної із шести комірок акумуляторної батареї, а також керування ключами та перетворювачем, на основі яких відбувається процес балансування комірок. Створено експериментальну установку, на якій в лабораторних умовах було перевірено працездатність розробленої топології активного балансира.

5. Вперше було застосовано розроблену систему керування акумуляторною батареєю з функцією активного балансування та модульною архітектурою в електромобілі. Для експериментального підтвердження ефективності запропонованої топології активного балансування було використано електромобіль з проблемною акумуляторною батареєю, а саме з дисбалансом комірок, й, відповідно, низький запас ходу. Заміна оригінальної системи керування з пасивною функцією балансування, яка не забезпечувала в повній мірі компенсацію дисбалансу, на розроблений прототип системи, збільшила запас ходу даного електромобіля, що своєю чергою збільшило ресурс акумуляторної батареї цього електромобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] D. Lipko and O. Bondarenko, “Using partial charge-discharge cycle of battery to increase its lifespan,” *Technology and design in electronic equipment*, no. 3–4, pp. 9–14, 2023.
- [2] D. Lipko, A. Manzhelii, I. Yamnenko, and O. Bondarenko, “Possibilities and Challenges of Partially Using a Charge-Discharge Cycle of Battery to Increase Its Resource,” in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023 - Conference Proceedings*, 2023. doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312983.
- [3] Д. Ліпко and О. Бондаренко, “Збільшення ресурсу акумуляторної батареї при частковому використанні зарядно-розрядного циклу,” in *24-та міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, 2023, pp. 46–47.
- [4] D. Lipko and O. Bondarenko, “Modified Active Balancer for Multi-Module Battery Pack,” *Proceedings of the Biennial Baltic Electronics Conference, BEC*, pp. 1–5, 2024, doi: 10.1109/BEC61458.2024.10737985.
- [5] D. O. Lipko and O. F. Bondarenko, “Modified active balancer for use in multi-module batteries,” *Technology and design in electronic equipment*, no. 1–2, pp. 11–23, 2024, doi: 10.15222/TKEA2024.1-2.11.
- [6] Д. Ліпко and О. Бондаренко, “Активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях,” in *25-га міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, 2024, pp. 51–52.
- [7] D. Lipko and O. Bondarenko, “Development of a DC-DC Converter for Active Battery Balancing Systems in a Format of Student Competition,” *Microsystems, Electronics and Acoustics*, vol. 29, no. 3, pp. 1–8, Dec. 2024, doi: 10.20535/2523-4455.me.316127.
- [8] D. Lipko, A. Manzhelii, and O. Bondarenko, “Comparative Analysis of DC-DC Converters for Micro-Mobility Vehicles,” in *2024 IEEE 7th International*

- Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE)*, IEEE, Sep. 2024, p. TT1.45.1-TT1.45.5. doi: 10.1109/STEE63556.2024.10748120.
- [9] Д. Ліпко and О. Бондаренко, “Вдосконалений пристрій для діагностування стану акумуляторних батарей,” in *23-тя міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології»*, 2022, pp. 32–33.
- [10] T. Horiba, “Lithium-Ion Battery Systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 939–950, Jun. 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2319832.
- [11] A. A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, and M. Berecibar, “A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, no. February, p. 112213, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112213.
- [12] В. Б. Волківський, “Напівпровідникові перетворювачі з підвищеною ефективністю заряду акумуляторів імпульсними асиметричними струмами,” *Національний технічний Університет України “Київський політехнічний інститут*, 2007.
- [13] Y. Miao, P. Hynan, A. Von Jouanne, and A. Yokochi, “Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements,” Mar. 20, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en12061074.
- [14] Y. Miao, P. Hynan, A. von Jouanne, and A. Yokochi, “Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 6, p. 1074, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12061074.
- [15] L. Zhang, H. Peng, Z. Ning, Z. Mu, and C. Sun, “Comparative research on RC equivalent circuit models for lithium-ion batteries of electric vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 7, no. 10, 2017, doi: 10.3390/app7101002.
- [16] A. Sassone, D. Shin, A. Bocca, A. Macii, E. Macii, and M. Poncino, “Modeling of the charging behavior of Li-ion batteries based on manufacturer’s data,”

- Proceedings of the ACM Great Lakes Symposium on VLSI, GLSVLSI*, no. January 2020, pp. 39–44, 2014, doi: 10.1145/2591513.2591592.
- [17] A. Amin, K. Ismail, and A. Hapid, “Implementation of a LiFePO₄ battery charger for cell balancing application,” *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 81–88, 2018, doi: 10.14203/j.mev.2018.v9.81-88.
 - [18] W. Shen, T. T. Vo, and A. Kapoor, “Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview,” *Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2012*, pp. 1567–1572, 2012, doi: 10.1109/ICIEA.2012.6360973.
 - [19] Y. Gao, X. Zhang, Q. Cheng, B. Guo, and J. Yang, “Classification and Review of the Charging Strategies for Commercial Lithium-Ion Batteries,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 43511–43524, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906117.
 - [20] H. Liu *et al.*, “An analytical model for the CC-CV charge of Li-ion batteries with application to degradation analysis,” *J Energy Storage*, vol. 29, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101342.
 - [21] S. H. Hwang, Y. Chen, H. Zhang, K. Y. Lee, and D. H. Kim, “Reconfigurable hybrid resonant topology for constant current/voltage wireless power transfer of electric vehicles,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/electronics9081323.
 - [22] W. Kai, F. Xiao, P. Jinbo, R. Jun, D. Chongxiong, and L. Liwei, “State of charge (SOC) estimation of lithium-ion battery based on adaptive square root Unscented Kalman Filter,” *Int J Electrochem Sci*, vol. 15, no. 9, pp. 9499–9516, 2020, doi: 10.20964/2020.09.84.
 - [23] H. Rezk, A. G. Olabi, T. Wilberforce, and E. T. Sayed, “A Comprehensive Review and Application of Metaheuristics in Solving the Optimal Parameter Identification Problems,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, 2023, doi: 10.3390/su15075732.
 - [24] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D. I. Stroe, and R. Teodorescu, “Overview of Lithium-Ion battery modeling methods for state-of-charge

- estimation in electrical vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 5, 2018, doi: 10.3390/app8050659.
- [25] W. Zhou, Y. Zheng, Z. Pan, and Q. Lu, “Review on the battery model and SOC estimation method,” *Processes*, vol. 9, no. 9, 2021, doi: 10.3390/pr9091685.
- [26] R. R. Thakkar, “Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery,” in *Management and Applications of Energy Storage Devices*, vol. 11, no. tourism, IntechOpen, 2022, p. 13. doi: 10.5772/intechopen.99851.
- [27] H. He, R. Xiong, and J. Fan, “Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach,” *Energies (Basel)*, vol. 4, no. 4, pp. 582–598, 2011, doi: 10.3390/en4040582.
- [28] S. S. Madani, E. Schaltz, and S. K. Kær, “An electrical equivalent circuit model of a lithium titanate oxide battery,” *Batteries*, vol. 5, no. 1, 2019, doi: 10.3390/batteries5010031.
- [29] W. Chen, J. Liang, Z. Yang, and G. Li, “A review of lithium-ion battery for electric vehicle applications and beyond,” *Energy Procedia*, vol. 158, no. February, pp. 4363–4368, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.783.
- [30] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, and M. Y. Chow, “Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 4–16, 2013, doi: 10.1109/MIE.2013.2250351.
- [31] X. M. Pham, G. Van Bui, H. Pham, and L. H. P. Pham, “Design Process of Electric Vehicle Power System,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 907, no. October, pp. 101–114, 2022, doi: 10.4028/p-vkvz26.
- [32] S. Arora, W. Shen, and A. Kapoor, “Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1319–1331, 2016.
- [33] P. Ayuso, H. Beltran, J. Segarra-Tamarit, and E. Pérez, “Optimized profitability of LFP and NMC Li-ion batteries in residential PV applications,” *Math Comput Simul*, vol. 183, pp. 97–115, 2021, doi: 10.1016/j.matcom.2020.02.011.

- [34] A. Nikolian *et al.*, “Complete cell-level lithium-ion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (– 5 C to 45 C)– Optimized modelling techniques,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 133–146, 2018.
- [35] A. Rastegarpanah *et al.*, “Towards robotizing the processes of testing lithium-ion batteries,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 235, no. 8, pp. 1309–1325, 2021.
- [36] Lima Pedro, “Comparison of different EV batteries in 2020,” <https://pushevs.com/2020/04/04/comparison-of-different-ev-batteries-in-2020/>. Accessed: Mar. 08, 2024. [Online]. Available: <https://pushevs.com/2020/04/04/comparison-of-different-ev-batteries-in-2020/>
- [37] M. Bortolini, M. Gamberi, and A. Graziani, “Technical and economic design of photovoltaic and battery energy storage system,” *Energy Convers Manag*, vol. 86, pp. 81–92, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.04.089.
- [38] M. H. Saeed, W. Fangzong, B. A. Kalwar, and S. Iqbal, “A Review on Microgrids’ Challenges Perspectives,” 2021, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135083.
- [39] D. E. Olivares *et al.*, “Trends in microgrid control,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [40] J. Hu, Y. Shan, J. M. Guerrero, A. Ioinovici, K. W. Chan, and J. Rodriguez, “Model predictive control of microgrids – An overview,” Feb. 01, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2020.110422.
- [41] X. Zhang, Z. Wang, and Z. Lu, “Multi-objective load dispatch for microgrid with electric vehicles using modified gravitational search and particle swarm optimization algorithm,” *Appl Energy*, vol. 306, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118018.
- [42] Y. Ota, H. Taniguchi, T. Nakajima, K. M. Liyanage, J. Baba, and A. Yokoyama, “Autonomous distributed V2G (vehicle-to-grid) satisfying scheduled charging,”

- IEEE Trans Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 559–564, Mar. 2012, doi: 10.1109/TSG.2011.2167993.
- [43] J. D. K. Bishop, C. J. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, and M. D. McCulloch, “Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV,” *Appl Energy*, vol. 111, pp. 206–218, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.094.
- [44] H. Lund and W. Kempton, “Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 9, pp. 3578–3587, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2008.06.007.
- [45] T. S. Ustun, C. R. Ozansoy, and A. Zayegh, “Implementing vehicle-to-grid (V2G) technology with IEC 61850-7-420,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 1180–1187, 2013, doi: 10.1109/TSG.2012.2227515.
- [46] A. K. M. A. Habib, M. K. Hasan, G. F. Issa, D. Singh, S. Islam, and T. M. Ghazal, “Lithium-Ion Battery Management System for Electric Vehicles: Constraints, Challenges, and Recommendations,” Mar. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/batteries9030152.
- [47] “Battery Management System for Electric Vehicles: Overview.” Accessed: Mar. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.srmtech.com/knowledge-base/blogs/battery-management-system-for-electric-vehicles-overview/>
- [48] X. Wang, H. He, F. Sun, and J. Zhang, “Application study on the dynamic programming algorithm for energy management of plug-in hybrid electric vehicles,” *Energies (Basel)*, vol. 8, no. 4, pp. 3225–3244, 2015, doi: 10.3390/en8043225.
- [49] M. Bozdal, M. Samie, and I. Jennions, “A Survey on CAN Bus Protocol: Attacks, Challenges, and Potential Solutions,” in *Proceedings - 2018 International Conference on Computing, Electronics and Communications Engineering, iCCECE 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2018, pp. 201–205. doi: 10.1109/iCCECOME.2018.8658720.
- [50] Li Ran, Wu Junfeng, Wang Haiying, and Li Gechen, “Design method of CAN BUS network communication structure for electric vehicle,” in *International*

- Forum on Strategic Technology 2010*, IEEE, Oct. 2010, pp. 326–329. doi: 10.1109/IFOST.2010.5668017.
- [51] “Controller Area Network — Вікіпедія.” Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: https://uk.wikipedia.org/wiki/Controller_Area_Network
- [52] Д. Ліпко, “Прилад для контролю параметрів акумуляторної батареї,” *Національний технічний Університет України “Київський політехнічний інститут*, 2020.
- [53] M. Bozdal, M. Samie, S. Aslam, and I. Jennions, “Evaluation of can bus security challenges,” Apr. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/s20082364.
- [54] C. Bonfiglio and W. Roessler, “A cost optimized battery management system with active cell balancing for lithium ion battery stacks,” *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, pp. 304–309, 2009, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289837.
- [55] Y. Di Yang, K. Y. Hu, and C. H. Tsai, “Digital Battery Management Design for Point-of-Load Applications with Cell Balancing,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6365–6375, Aug. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2940001.
- [56] H. S, “Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology,” *Energy Storage*, vol. 3, no. 2, Apr. 2021, doi: 10.1002/est2.203.
- [57] J. V. Barreras, C. Pinto, R. De Castro, E. Schaltz, S. J. Andreasen, and R. E. Araújo, “Multi-objective control of balancing systems for li-ion battery packs: A paradigm shift?,” in *2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. doi: 10.1109/VPPC.2014.7007107.
- [58] P. A. Cassani and S. S. Williamson, “Design, testing, and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3956–3962, Dec. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2050750.
- [59] T. Li, X. Z. Yuan, L. Zhang, D. Song, K. Shi, and C. Bock, *Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies of Nickel-Rich NMC-Based Lithium-Ion*

- Batteries*, vol. 3, no. 1. Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/s41918-019-00053-3.
- [60] C. R. Birkel, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, and D. A. Howey, “Degradation diagnostics for lithium ion cells,” *J Power Sources*, vol. 341, pp. 373–386, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [61] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery,” Jun. 15, 2012, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.02.038.
- [62] S. Shahid and M. Agelin-Chaab, “A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries,” Dec. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100310.
- [63] I. Bloom *et al.*, “An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells,” *J Power Sources*, vol. 101, no. 2, pp. 238–247, 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00783-2.
- [64] W. Li, E. M. Erickson, and A. Manthiram, “High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries,” *Nat Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 26–34, 2020, doi: 10.1038/s41560-019-0500-5.
- [65] J. Vetter *et al.*, “Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,” *J Power Sources*, vol. 147, no. 1–2, pp. 269–281, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
- [66] B. Dalla Chiara, F. Deflorio, M. Pellicelli, L. Castello, and M. Eid, “Perspectives on electrification for the automotive sector: A critical review of average daily distances by light-duty vehicles, required range, and economic outcomes,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 20, Oct. 2019, doi: 10.3390/su11205784.
- [67] Andrew Garberson, “EV driving range study by state finds an overlooked stat.” Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.recurrentauto.com/research/ev-range-by-state>
- [68] Новицький О., “На який реальний пробіг варто розраховувати, купуючи вживане авто.,” На який реальний пробіг варто розраховувати, купуючи вживане авто.

- [69] G. Saldana, J. I. S. Martin, I. Zamora, F. J. Asensio, O. Onederra, and M. Gonzalez, “Empirical Electrical and Degradation Model for Electric Vehicle Batteries,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 155576–155589, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019477.
- [70] Charlotte Argue, “EV Battery Health Insights: Data From 10,000 Cars | Geotab.” Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>
- [71] A. Millner, “Modeling lithium ion battery degradation in electric vehicles,” *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply, CITRES 2010*, no. October 2010, pp. 349–356, 2010, doi: 10.1109/CITRES.2010.5619782.
- [72] X. Han *et al.*, “A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle,” *eTransportation*, vol. 1, p. 100005, 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
- [73] P. Keil and A. Jossen, “Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Impact of Regenerative Braking,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 41–51, Mar. 2015, doi: 10.3390/wevj7010041.
- [74] B. Xu, A. Oudalov, A. Ulbig, G. Andersson, and D. S. Kirschen, “Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1131–1140, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2578950.
- [75] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanés-Montero, and M. A. Guerrero-Martinez, “Battery Equalization Control Based on the Shunt Transistor Method,” *Electrical, Control and Communication Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 20–27, Dec. 2014, doi: 10.1515/ecce-2014-0019.
- [76] H. Liu, H. Li, X. Yang, and J. Qian, “A multi-objective parallel layered equalizer for large-scale lithium ion battery system,” *IET Electr Power Appl*, vol. 16, no. 12, pp. 1542–1558, Dec. 2022, doi: 10.1049/elp2.12239.
- [77] W. Kurpiel *et al.*, “Performance of passive and active balancing systems of lithium batteries in onerous mine environment,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14227624.

- [78] S. Alatai *et al.*, “A review on state-of-the-art power converters: Bidirectional, resonant, multilevel converters and their derivatives,” Nov. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/app112110172.
- [79] F. Zhang, M. M. U. Rehman, R. Zane, and D. Maksimovic, “Hybrid balancing in a modular battery management system for electric-drive vehicles,” in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, Oct. 2017, pp. 578–583. doi: 10.1109/ECCE.2017.8095835.
- [80] Jim Castelaz, Jessica Riley, Vishal Parikh, Steven Diamond, and Samuel Chang, “System and Method for Balancing Charge Within a Battery Pack,” Pat. USA, no. 20100237830A1, 2010
- [81] A. Ziegler, D. Oeser, T. Hein, and A. Ackva, “Development and application of an active balancing system for lithium-ion cells,” in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [82] Quentin Wayne Kramer, Andrew S. Hintz, and Robert L. Galyen, “Cell management system,” Pat. USA, no. 20100244781A1, 2010
- [83] C.-H. Kim, Y.-D. Kim, G.-W. Moon, and H. Park, “Individual cell voltage equalizer using selective two current paths for series connected li-ion battery strings,” in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, 2009, pp. 1812–1817.
- [84] S. W. Lee, K. M. Lee, Y. G. Choi, and B. Kang, “Modularized design of active charge equalizer for li-ion battery pack,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 11, pp. 8697–8706, Nov. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2813997.
- [85] Tae-Jin Kim, “Cell balancing circuit and cell balancing method using the same,” US9318910B2, 2013
- [86] Junichi Miyamoto, Shingo Takahashi, Yuan Luo, and Nobuhide Noshida, “Charge and discharge device, charge and discharge control method, and program,” Pat. USA, no. 20160043578A1, 2014

- [87] Payam Naghshtabrizi and Siamak Hashemi, “Active Battery Cell Balancing Methods with Variable Duration Discharge,” Pat. USA, no. 20120293129A1, 2012
- [88] Dayang ZHENG, Lei Wang, Wentao Wang, Juncheng Zhan, and Bogao XU, “Method and system for balancing a battery assembly,” Pat. USA, no. 20210006078A1, 2021
- [89] Ben Ou and Bing Xiao, “Battery management system with parallel equalization function and equalization method,” Pat. China, no. 107359662B, 2017
- [90] D. G. ELVIRA, H. V. BLAVÍ, J. M. B. MONCUSÍ, À. C. I. D. PASTOR, J. A. G. CASTILLO, and L. M. SALAMERO, “Active battery balancing via a switched dc/dc converter: Description and performance analysis,” in *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [91] V.-L. Pham, V.-T. Duong, and W. Choi, “High-efficiency active cell-to-cell balancing circuit for Lithium-Ion battery modules using LLC resonant converter,” *Journal of Power Electronics*, vol. 20, pp. 1037–1046, 2020.
- [92] S. Musumeci, F. Stella, M. Panizza, and F. Perraud, “Monolithic Bidirectional Switch Based on GaN Gate Injection Transistors,” 2020.
- [93] “Solid state relay.” Accessed: Mar. 31, 2025. [Online]. Available: <https://analogcircuitdesign.com/solid-state-relay/>
- [94] P. R. R. Somarowthu, S. K. Saxena, and D. B. Mahajan, “Isolated SEPIC Converter with a novel Voltage Clamp Circuit,” in *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, IEEE, Dec. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/PEDES.2018.8707789.
- [95] M. V. Mosconi Ewerling, T. Brunelli Lazzarin, and C. H. Illa Font, “Proposal of an Isolated Two-Switch DC-DC SEPIC Converter,” in *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, IEEE, Dec. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065718.

- [96] N. Mohammad, M. Quamruzzaman, M. R. T. Hossain, and M. R. Alam, "Parasitic Effects on the Performance of DC-DC SEPIC in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Applications," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 04, no. 01, pp. 113–121, 2013, doi: 10.4236/sgre.2013.41014.
- [97] J. Ahmad, C. H. Lin, M. S. Khan, H. D. Liu, and M. Fahad, "Modified Isolated SEPIC Converter for EV Charging and High Voltage Applications," in *2023 International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control, PIECON 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/PIECON56912.2023.10085847.
- [98] M. Azizi, O. Husev, D. Vinnikov, and O. Veligorskyi, "Comparative Evaluation of Isolated dc-dc Converters for Low Power Applications," in *2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, IEEE, Sep. 2022, pp. 7–12. doi: 10.1109/PEMC51159.2022.9962944.
- [99] S. Musumeci and S. Di Mauro, "Low voltage single fuel cell interface by Push-Pull converter: A case of study," in *2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, IEEE, Jun. 2017, pp. 541–548. doi: 10.1109/ICCEP.2017.8004741.
- [100] R. Zgheib, I. Kamwa, and K. Al-Haddad, "Comparison between isolated and non-isolated DC/DC converters for bidirectional EV chargers," in *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, Mar. 2017, pp. 515–520. doi: 10.1109/ICIT.2017.7913285.
- [101] K. Bathala, D. Kishan, and N. Harischandrappa, "Soft Switched Current Fed Dual Active Bridge Isolated Bidirectional Series Resonant DC-DC Converter for Energy Storage Applications," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16010258.
- [102] N. Hou and Y. W. Li, "Overview and Comparison of Modulation and Control Strategies for a Nonresonant Single-Phase Dual-Active-Bridge DC-DC Converter," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 3, pp. 3148–3172, Mar. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2927930.

- [103] H. Zhang and T. Isobe, “A Verification of Applying Superjunction MOSFETs in Dual-Active-Bridge Converters Operated with Minimal RMS Current,” *IEEJ Journal of Industry Applications*, p. 24004235, 2024, doi: 10.1541/ieejia.24004235.
- [104] F. Feng, J. Fang, U. Manandhar, H. B. Gooi, and P. Xie, “Impedance-Based Stability Analysis of DAB Converters With Single-, Double-, or Cooperative Triple-Phase-Shift Modulations and Input LC Filter,” *Front Energy Res*, vol. 10, Apr. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.874477.
- [105] B. Zhao, Q. Song, W. Liu, and Y. Sun, “Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 29, no. 8, pp. 4091–4106, 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2289913.
- [106] J. Zhu, M. M. Koch, J. Lian, W. Li, and T. Wierzbicki, “Mechanical Deformation of Lithium-Ion Pouch Cells under In-Plane Loads—Part I: Experimental Investigation,” *J Electrochem Soc*, vol. 167, no. 9, p. 090533, 2020, doi: 10.1149/1945-7111/ab8e83.

**ДОДАТОК А ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

[1] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Використання часткового зарядно-розрядного циклу акумуляторної батареї для збільшення її ресурсу. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2023, № 3 – 4, с. 9 – 15, DOI: 10.15222/ТКЕА2023.3-4.09. (Фахове видання категорії «Б») (Особистий внесок автора – проведено дослідження впливу часткового циклу на ресурс АБ).

[2] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Модифікований активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. Технологія та конструювання в електронній апаратурі, 2024, № 1–2, с. 11 –23, DOI:10.15222/ТКЕА2024.1-2.11. (Фахове видання категорії «Б») (Особистий внесок автора – створення удосконаленої топології активного балансира для застосування в модульних АБ).

[3] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Розробка DC-DC перетворювача для використання в системах активного балансування акумуляторних батарей в межах студентських змагань. Мікросистеми, електроніка та акустика, 2024, том 30, № 3, С. 1-8, DOI: 10.20535/2523-4455.me.316127. (Фахове видання категорії «Б») (Особистий внесок автора – дослідження практичної реалізація DC-DC перетворювача для застосування в модульному активному балансірі).

[4] D. Lipko and O. Bondarenko, "Modified Active Balancer for Multi-Module Battery Pack," 2024 19th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC), Tallinn, Estonia, 2024, pp. 1-5, DOI: 10.1109/BEC61458.2024.10737985. (Закордонне періодичне видання, що індексується в Scopus) (Особистий внесок автора – моделювання часу балансування модульного активного балансира з покращеною топологією в різних режимах роботи).

[5] D. Lipko, I. Yamnenko, A. Manzhelii and O. Bondarenko, "Possibilities and Challenges of Partially Using a Charge-Discharge Cycle of Battery to Increase Its Resource," 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv,

Ukraine, 2023, pp. 1-5, DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312983. (Особистий внесок автора – проведено дослідження впливу часткового циклу на ресурс АБ).

[6] Anton Manzhelii, Dmytro Lipko, and Oleksandr Bondarenko, "Comparative Analysis of DC-DC Converters for Micro-Mobility Vehicles," 2024 IEEE 7th International Conference on Smart Technologies in Power Engineering and Electronics (STEE), Kyiv, Ukraine, 2024, pp. 1-5. DOI:10.1109/STEE63556.2024.10748120 (Scopus). (Особистий внесок автора – проведено – аналітичний огляд науково-технічної літератури та наукових праць, за тематикою дослідження перетворювачів для мікромобільного транспорту)

[7] Ліпко Д.О., Бондаренко О.Ф. Вдосконалений пристрій для діагностування стану акумуляторних батарей. Сучасні інформаційні та електронні технології (СІЕТ-2022): праці XXIII міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 23-27 травня 2022 р. Одеса, 2022. С. 32–33. (Особистий внесок автора – запропоновано вдосконалення для пристрою діагностування стану АБ електромобілів)

[8] Ліпко Д. О., Бондаренко О. Ф. Збільшення ресурсу акумуляторної батареї при частковому використанні зарядно-розрядного циклу. Сучасні інформаційні та електронні технології (СІЕТ-2023): праці XXIV міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 29-31 травня 2023 р. Одеса, 2023. С. 46–47. (Особистий внесок автора – аналітичний огляд науково-технічної літератури та наукових праць)

[9] Ліпко Д.О., Бондаренко О.Ф. Активний балансир для застосування в багатомодульних акумуляторних батареях. Сучасні інформаційні та електронні технології (СІЕТ-2024): праці XXV міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 27-29 травня 2024 р. Одеса, 2024. С. 51–52. (Особистий внесок автора – проведення моделювання часу балансування модульного активного балансира з покращеною топологією в різних режимах роботи, побудова графіків)

ДОДАТОК Б. ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ СЕРІЙНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Електромобіль	Ємність акумулятора	Конфігурація батареї	Кількість модулів (конфігурація модуля)	Щільність комірок Wh/kg	Форм фактор	Тип хімії	Виробник
Nissan Leaf	24	96s2p	48 (2s2p)	110	Пакет	NMC	Envision AESC
Nissan Leaf	40	96s2p	24 (4s2p)	130	Пакет	NMC	Envision AESC
Nissan Leaf	62	96s3p	24 (4s2p)	150	Пакет	NMC	Envision AESC
Renault Zoe	40	96s2p	12 (8s2p)	145	Пакет	NMC	LG Chem
Renault Zoe	52	96s2p	12 (8s2p)	168	Пакет	NMC	LG Chem
Tesla Model S	100	96s86p	16 (6s86p)	162	Циліндричний	NCA	Panasonic
Tesla Model 3	75	96s46p	2 (25s46p) та 2 (23s46p)	168	Циліндричний	NCA	Panasonic
Tesla Model X	100	96s86p	16 (6s86p)	162	Циліндричний	NCA	Panasonic
BMW i3	33	96s1p	8(12s1p)	132	Призматичний	NMC	Samsung SDI
BMW i3	42	96s1p	8(12s1p)	152	Призматичний	NMC	Samsung SDI
VW e-Golf	36	88s3p	16(4s3p) та 11(2s3p)	103	Пакет	NMC	Samsung SDI
Hyundai Kona Electric	64	98s3p	8(10s3p) та 2(9s3p)	149	Пакет	NMC	LG Chem

Hyundai IONIQ Electric	28	96s2p	6(10s2p) та 6(6s2p)	112	Пакет	NMC	LG Chem
Peugeot e-208	50	108s2p	18(6s2p)	140	Призматичний	NMC	CATL
Jaguar I-PACE	90	108s4p	36(3s4p)	149	Пакет	NMC	LG Chem
Mercedes-Benz EQC	85	96s4p	4 (36s2p) та 2 (24s2p)	130	Пакет	NMC	LG Chem або SK Innovation
Audi e-tron 55	95	108s4p	36(3s4p)	136	Пакет	NMC	LG Chem
Porsche Taycan Turbo S	93	198s2p	33(6s2p)	148	Пакет	NMC	LG Chem

ДОДАТОК В. ПОРІВНЯННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РІЗНИХ ТИПІВ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

	Li-Po	Li-S	Твердотільні	LFP	LCO	LMO	NMC	NCA	LTO
Щільність енергії	Дуже висока (до 250 Вт·год/кг)	Дуже висока (до 500 Вт·год/кг)	Висока (250-750 Вт·год/кг)	Середня (90-160 Вт·год/кг)	Висока (140-200 Вт·год/кг)	Середня (100-150 Вт·год/кг)	Висока (150-220 Вт·год/кг)	Висока (200-260 Вт·год/кг)	Низька (60-85 Вт·год/кг)
Потужність	Висока	Висока	Висока	Середня	Висока	Середня	Висока	Висока	Висока
Напруга, В	3.0 - 4.2	1.9 – 2.6	2.2 – 4.3	2.8 – 3.6	3.0 – 4.2	3.0 – 4.2	2.5 – 4.2	2.5 – 4.2	1.8 – 2.85
Термін служби	Середній (300-500 циклів)	Середній (500-1000 циклів)	Дуже довгий (1000+ циклів)	Дуже довгий (2000+ циклів)	Низька (500-800 циклів)	Середня (1000-1500 циклів)	Середня (1000-2000 циклів)	Низька (500-1000 циклів)	Висока (3000-7000 циклів)
Безпека	Низька	Низька	Висока	Висока	Низька	Середня	Середня	Низька	Висока
Вартість	Висока	Висока	Дуже висока	Низька	Висока	Середня	Середня	Висока	Висока
Вага	Дуже легка	Дуже легка	Легка	Важка	Легка	Середня	Легка	Легка	Важка
Форма	Гнучка	Різно-манітні	Різно-манітні	Різноманітні (циліндричні, призматичні)	Циліндричні, призматичні	Циліндричні, призматичні	Циліндричні, призматичні	Циліндричні, призматичні	Циліндричні, призматичні
Застосування	Смарт-фони, планшети, дрони	Електро-мобілі, авіація	Електро-мобілі, портативна електроніка	Електроінструменти, сонячні батареї, електро-мобілі	Ноутбуки, смартфони	Електроінструменти, гібридні автомобілі	Електро-мобілі, електроінструменти	Електро-мобілі високої потужності	Гібридні автомобілі, електробуси

Переваги	Дуже висока щільність енергії, легка вага, гнучка форма	Дуже висока щільність енергії, легка вага	Безпека, довгий термін служби, висока щільність енергії	Довгий термін служби, безпека, низька вартість	Висока щільність енергії, висока потужність	Добра безпека, низька вартість	Висока щільність енергії, висока потужність, добра безпека	Висока щільність енергії, висока потужність	Висока безпека, довгий термін служби, висока потужність
Недоліки	Менш безпечні, ніж Li-ion, обмежена кількість циклів	Потенційно небезпечні, обмежена кількість циклів	Висока вартість, технологія ще в розробці	Нижча щільність енергії, важка вага	Низька безпека, висока вартість, низький термін служби	Середня щільність енергії, обмежений термін служби	Висока вартість, деградація при високих температурах	Низька безпека, висока вартість, низький термін служби	Низька щільність енергії, висока вартість

ДОДАТОК Г. ПРОГРАМНИЙ КОД МІКРОКОНТРОЛЕРА ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЧАСТИН СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

```

#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>

// PCF8575 I2C Address
#define PCF8575_ADDRESS 0x20

#define SCREEN_WIDTH 128 // Ширина OLED дисплея
#define SCREEN_HEIGHT 64 // Висота OLED дисплея

// I2C адреса OLED
#define OLED_RESET 4
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

unsigned long previousMillis = 0;
const long interval = 2000; // Інтервал перемикання (2 секунди)

// Масив комірок (дві лінії на одну комірку)
const uint8_t cellPairs[][2] = {
    {12, 13}, // cell 7
    {0, 1}, // cell 6
    {2, 3}, // cell 5
    {4, 5}, // cell 4
    {6, 7}, // cell 3
    {8, 9}, // cell 2
    {10, 11} // cell 1
};

const uint8_t numCells = sizeof(cellPairs) / sizeof(cellPairs[0]);
uint8_t currentCell = 0; // Індекс активної комірки

// Функція запису в PCF8575
void PCF8575_Write(uint16_t data) {
    Wire.beginTransmission(PCF8575_ADDRESS);
    Wire.write(lowByte(data));
    Wire.write(highByte(data));
    Wire.endTransmission();
}

```

```

// Функція зчитування стану портів PCF8575
uint16_t PCF8575_Read() {
    uint16_t data = 0;
    Wire.requestFrom(PCF8575_ADDRESS, 2);
    if (Wire.available() == 2) {
        data = Wire.read();
        data |= (Wire.read() << 8);
    }
    return data;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    Wire.begin(); // Ініціалізація I2C

    // Ініціалізація OLED дисплея
    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
        for (;;)
    }
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);
    display.setCursor(0, 0);
    display.print("PCF8575 Cell Control");
    display.display();

    // Вимикаємо всі виходи (встановлюємо HIGH)
    PCF8575_Write(0xFFFF);
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
        previousMillis = currentMillis;

        // Вимикаємо всі виходи
        uint16_t portState = 0xFFFF;

        // Включаємо лише поточну комірку (2 виходи)
        portState &= ~(1 << cellPairs[currentCell][0]);
        portState &= ~(1 << cellPairs[currentCell][1]);
    }
}

```

```

// Записуємо стан у PCF8575
PCF8575_Write(portState);

// Читаємо стан портів для перевірки
uint16_t read_state = PCF8575_Read();

// Виводимо стан на дисплей
display.clearDisplay();
display.setCursor(0, 0);
display.print("Active Cell: ");
display.print(7 - currentCell); // Нумерація від 7 до 1
display.setCursor(0, 10);
display.print("Ports: P");
display.print(cellPairs[currentCell][0]);
display.print(" & P");
display.print(cellPairs[currentCell][1]);

display.display();

// Перемикаємося на наступну комірку
currentCell = (currentCell + 1) % numCells;
}
}

```

**ДОДАТОК Д. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ПРОМАВТОМАТИКА ТРЕЙД»**

вул. Бакинська, 1, прим. 264, с. Крюківщина, Бучанський р-н, Київська обл., 08119
тел. +380 93 4752186 e-mail: 0934752186@ukr.net ЄДРПОУ 45563672

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ТОВ «Промавтоматика трейд»

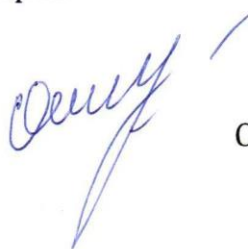
Юрій ПОТУПЧИК
«19» 02 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Ліпка Дмитра Олеговича
«Системи керування акумуляторними батареями з функцією збільшення
їх експлуатаційного ресурсу» в розробки ТОВ «Промавтоматика трейд»

Даним актом підтверджується, що система керування акумуляторними батареями для електротранспорту та стаціонарних накопичувачів енергії, яку розроблено аспірантом кафедри електронних пристроїв та систем КПП ім. Ігоря Сікорського Ліпком Дмитром Олеговичем в рамках виконання ним дисертаційного дослідження, випробувана в складі стаціонарного накопичувача енергії ємністю 75 кВт·год. Запропоновані ним технічні рішення й отримані результати дозволили побудувати прототип акумуляторної батареї з модульною структурою та системою активного балансування комірок акумуляторної батареї. Аналіз показав, що в результаті було збільшено доступну ємність акумуляторних батарей на 15%, а також збільшено швидкість балансування у середньому на 30%. Очікуваний приріст ресурсу акумуляторних батарей складає близько 12%. Схожий ефект можна очікувати й при застосуванні запропонованих рішень в електротранспорті.

Завідувач лабораторії вимірювань



Олександр ЧЕРНІЙ



ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректорка з навчальної роботи
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Тетяна ЖЕЛЯСКОВА

Вихідний № _____

від «03» 04 2025 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
аспіранта кафедри електронних пристроїв та систем Дмитра ЛІПКА
у навчальному процесі Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ми, що нижче підписалися, декан факультету електроніки, д-р техн. наук, проф. Найда С.А., зав. каф. електронних пристроїв та систем, д-р техн. наук, проф. Вербицький Є.В., канд. техн. наук, доц. Сафронов П.С., склали цей Акт про те, що результати дисертаційної роботи Ліпка Д.О. «Системи керування акумуляторними батареями з функцією збільшення їх експлуатаційного ресурсу» впроваджені у навчальний процес кафедри електронних пристроїв та систем, а саме:

1) у дисципліні «Пристрої перетворювальної техніки – ч.1» в темі 3.2 «Імпульсні перетворювачі постійної напруги (струму)» в 2024/2025 навчальному році додано питання про особливості використання напівпровідникових перетворювачів в активних системах керування акумуляторними батареями;

2) у дисципліні «Силові електронні системи» в темі 4.5 «Системи живлення космічних апаратів» в 2024/2025 навчальному році додано питання побудови активних систем керування акумуляторними батареями з функцією збільшення їх експлуатаційного ресурсу;

3) при розробці конкурсного завдання для всеукраїнського хакатону «Hackathon Melexis Future Innovators» (Додаток 1 до Наказу «Про проведення всеукраїнського хакатону «Hackathon Melexis Future Innovators»» № НОД/194/25 від 10.03.2025 р.).

Декан факультету електроніки,
д-р техн. наук, проф.

 Сергій НАЙДА

Зав. каф. електронних пристроїв та систем,
д-р техн. наук, проф.

 Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

Доц. каф. електронних пристроїв та систем,
канд. техн. наук, доц.

 Павло САФРОНОВ



**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Тел./факс (044) 236-96-76



ДОВІДКА

про практичне впровадження результатів дисертаційної роботи
Дмитра ЛПКА «Системи керування акумуляторними батареями з функцією
збільшення їх експлуатаційного ресурсу» на здобуття
наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 Електроніка
в науково-дослідні розробки НДІ ЕМСТ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Довідка надана в підтвердження використання результатів досліджень за темою дисертаційної роботи Дмитра ЛПКА в науково-дослідних розробках НДІ ЕМСТ КПІ ім. Ігоря Сікорського за темами ДБ № 01200101285 «Енергоефективні системи швидкого заряду комбінованих ємнісних накопичувачів енергії типу суперконденсатор-акумуляторна батарея», ДБ № 0124U001411 «Модульні перетворювачі для систем накопичення енергії автономних мікро- та наномереж постійного струму» та ДБ № 0122U001522 «Наукові засади створення портативних електронних приладів контактного зварювання біологічних тканин з автономним живленням». В зазначених НДР використано наступні результати досліджень: опис області на зарядно-розрядних характеристиках акумуляторних батарей при роботі в якій забезпечується приріст загального ресурсу на 114% та рекомендації щодо вибору ділянки на якій реалізується частковий цикл; топологія активного балансира з покращеними властивостями, а саме з дубльованою системою комутаторів та можливістю підключення додаткового джерела живлення, що забезпечило проведення активного балансування на всіх ієрархічних рівнях багатомодульних акумуляторних батарей; умови забезпечення відмовостійкості запропонованої топології балансира; рекомендації щодо модернізації внутрішньої системи електротранспорту, що дозволяє тримати акумуляторну батарею максимальний проміжок часу в зарядно-розрядній області, в якій забезпечується приріст загального ресурсу; схема покращеного активного балансира для використання у наявних акумуляторних батареях електротранспорту, шляхом заміни пасивної системи балансування, яка використовується зараз, без внесення змін в конструкцію цих акумуляторних батарей; схема покращеного активного балансира для систем з підвищеною надійністю.

Старший науковий співробітник, Ph.D.

Юлія КОЖУШКО

**ДОДАТОК Е. СЕРТИФІКАТИ ПРО УЧАСТЬ
У МІЖНАРОДНИХ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ**

XXIII Міжнародна науково-практична конференція
«Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2022),
м. Одеса, 23-27 травня 2022 р.



XXIII Міжнародна науково-практична конференція
«Сучасні інформаційні та електронні технології»
«Modern Information and Electronic Technologies»
XXIII International Scientific and Practical Conference

СЕРТИФІКАТ

засвідчує представлення на конференції "CIET-2022" доповіді
*"Вдосконалений пристрій для діагностування
стану акумуляторних батарей"*
(авт. Д. О. Ліпко, О. Ф. Бондаренко)

Україна, Одеса
23—27 травня 2022 р.



Відповідальний секретар
Оргкомітету конференції
О. А. Тихонова



XXIV Міжнародна науково-практична конференція
«Сучасні інформаційні та електронні технології» (СІЕТ-2023),
м. Одеса, 29-31 травня 2023 р.



XXV Міжнародна науково-практична конференція
«Сучасні інформаційні та електронні технології» (СІЕТ-2024),
м. Одеса, 27-29 травня 2024 р.

