

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «Система автоматизованого керування зарядом і захистом
акумуляторних батарей»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-21

Шикера Богдан Іванович _____

Керівник:

асистент, д.ф.,

Повшенко Олександр Анатолійович _____

Рецензент:

ст. викл., к.т.н., кафедри ІВТ

Морозова Марія Миколаївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПК-21.13.1760.01.000 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПК-21.13.1760.01.001 ПЗ	Пояснювальна записка	79	
3	A1	ДП ПК-21.13.1760.01.002 СхС	Схема структурна	1	
4	A1	ДП ПК-21.13.1760.01.003 СхС	Схема структурна автоматизації	1	
5	A1	ДП ПК-21.13.1760.01.004 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
6	A4	ДП ПК-21.13.1760.01.005 ПЕЗ	Перелік елементів	2	
7	A1	ДП ПК-21.13.1760.01.006 СК	Складальний кресленик друкованих плат	1	
8	A1	ДП ПК-21.13.1760.01.007 СК	Складальник кресленик пристрою	1	
9	A1	ДП ПК-21.13.1760.01.008 СхА	Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення	1	

				ДП ПК-21.13.1760.01.001 ПЗ		
	ПІБ	Підпис	Дата			
Розроб.	Шикера Б.І.			Відомість дипломного проєкту	Аркуш	Аркушів
Керівн.	Повшенко О.А.				1	79
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК	
Н/Контр.						
Зав. каф.	Киричук Ю.В.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система автоматизованого керування зарядом і
захистом акумуляторних батарей»**

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

_____ Шикера Богдан Іванович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту «Система автоматизованого керування зарядом і захистом акумуляторних батарей», керівник проєкту Повшенко Олександр Анатолійович, доктор філософії, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту _____ « 24 » травня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту : Система призначена для керування зарядом і захисту акумуляторних батарей; діапазон вхідної напруги [7.5В; 20 В]; максимальний постійний струм не більше 40 А; кількість акумуляторів у збірці – 4 шт.; передбачити захист заряду акумуляторі з використанням мікроконтролера.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ; 1. Аналітичний огляд раніше виконаних робіт та постановка завдання; 2. Розробка структури системи та підбір елементної бази; 3. Проєктування апаратної та програмної частин системи; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt)

6. Дата видачі завдання « 20 » квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання на дипломне проєктування	20.04.2026	
2	Огляд та аналіз літературних джерел за тематикою дипломного проєкту	25.04.2026	
3	Аналіз існуючих рішень за тематикою дипломного проєкту	02.05.2026	
4	Розробка структурної схеми системи та вибір елементної бази для її реалізації	07.05.2026	
5	Розробка електричної принципової схеми	14.05.2026	
6	Проектування прототипу системи	18.05.2026	
7	Розробка алгоритму роботи програмного забезпечення	21.05.2026	
8	Оформлення текстової та графічної частини дипломного проєкту	24.05.2026	

Студент

(підпис)

Богдан ШИКЕРА

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ПОВШЕНКО

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Метою дипломної роботи є розробка «Системи автоматизованого керування зарядом і захистом акумуляторних батарей» на основі мікроконтролера з активним балансуванням елементів та передачею даних користувачу. У будові використано окремі мікросхеми, що відповідають за вимірювання напруги на елементах та струму на виході.

У ході літературного огляду сучасного стану систем заряду акумуляторів було проаналізовано сучасні аналоги та сформовано конкретні вимоги, що встановлюються до подібних пристроїв, відповідно до сфери застосування. У роботі аргументовано актуальність та проведено порівняння технологічних рішень щодо різних складових системи. Створено структурну схему, схему електричну принципову, розроблено програмний алгоритм роботи.

Розроблена система має практичне застосування для забезпечення живлення портативних або автономних пристроїв, що потребують моніторингу даних про енергоспоживання та прогнозування залишкового заряду. Основна сфера використання: робототехніка, IoT, системи розумного будинку.

У результаті роботи створено функціональний прототип системи автоматизованого керування зарядом і захистом акумуляторних батарей.

Ключові слова: система керування батареєю, вбудовані системи, літій-іонний акумулятор, мікроконтролер, активне балансування елементів.

ANNOTATION

The purpose of the thesis is to develop a "System for automated control of charging and protection of rechargeable batteries" based on a microcontroller with active balancing of elements and data transmission to the user. The structure uses stand-alone integrated circuits responsible for measuring the voltage on the elements and the current at the output.

During the study, modern analogues were analyzed and specific requirements set for similar devices were formed, according to the scope of application. The work argues the relevance and compares technological solutions for various components of the system. A structural diagram, a schematic electrical diagram, and a software algorithm for operation were developed.

The developed system has practical application for providing power to portable or autonomous devices that require monitoring of energy consumption data and state of charge estimation. The main scope of use: robotics, IoT, smart home systems.

As a result of the work, a functional prototype of a system for automated control of charging and protection of rechargeable batteries was created.

Keywords: battery management system, embedded systems, lithium-ion battery, microcontroller, active cell balancing.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП.....	8
1. Аналітичний огляд раніше виконаних робіт та Постановка завдання	10
1.1 Сучасний стан і проблематика систем захисту та заряду	10
1.2 Принцип роботи літєвих акумуляторів.....	18
1.2.2 Загальна структура	20
1.2.3 Блок силових ключів.....	23
1.2.1 Блок вимірювання напруги	23
1.2.1 Блок вимірювання струму	24
1.2.2 Вимірювання рівня заряду	24
1.2.3 Вимірювання температури	24
1.2.4 Інші блоки	25
1.3 Аналітичний огляд автоматизованих систем керування зарядом.....	25
1.3.1 Проєкт СКБ на основі BQ77915	25
1.3.2 Проєкт модульної СКБ на основі ATTINY1624 та ESP32.....	27
1.3.3 Проєкт СКБ на основі MAX14921.....	29
1.4 Постановка завдання розробки систем захисту та заряду	31
Висновки до розділу 1.....	32
2. Розробка структури системи та підбір елементної бази	33
2.1 Структурна схема автоматизованої системи	33
2.2 Об'єкт керування.....	34
2.3 Контроль напруги елементів	35
2.3.1 Із застосуванням подільника напруги	35
2.3.2 З використанням диференційного підсилювача	36
2.3.3 З використанням мультиплексора	37
2.3.4 З використанням плаваючих конденсаторів.....	38
2.3.5 З використанням спеціалізованих мікросхем.....	39
2.4 Вимірювання струму	40
2.4.1 З використанням шунта	40
2.4.2 З використанням датчика ефекту Холла.....	41
2.5 Балансування елементів.....	41

2.5.1 Пасивне балансування	42
2.5.2 Активне балансування з використанням конденсаторів	42
2.5.3 Активне балансування з використанням індукторів	43
2.5.4 Активне балансування з використанням трансформаторів	44
2.5.5 Активне балансування з використанням DC-DC перетворювачів	45
2.6 Вибір компонентів	45
2.6.1 Вибір мікроконтролера	45
2.6.2 Вибір DC-DC перетворювача	46
2.6.3 Вибір модуля вимірювання струму	47
2.6.4 Вибір модуля вимірювання напруги елементів	49
2.6.5 Вибір драйвера для балансування	50
2.6.6 Вибір драйвера для керування ключами	51
2.6.7 Вибір силових ключів	52
2.6.8 Вибір транзисторів для балансування	52
Висновки до розділу 2	53
3. Проектування апаратної та програмної частин системи	55
3.1 Розробка електричної принципової схеми системи	55
3.1.1 Електрична схема підключення мікроконтролера	55
3.1.2 Електрична схема DC-DC перетворювача	56
3.1.3 Електрична схема датчика вимірювання напруги	58
3.1.4 Розрахунок параметрів шунта	59
3.1.5 Силові ключі та їхній драйвер	60
3.1.6 Блок балансування	62
3.2 Проектування та виготовлення прототипу системи	65
3.2.1 Розробка першого прототипу на основі STM32C011F6P6	65
3.2.1 Розробка актуальної версії	69
3.3 Розробка алгоритму роботи системи	70
Висновки до розділу 3	72
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75
ДОДАТКИ	Ошибка! Закладка не определена.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АКБ	акумуляторна батарея
АЦП	аналого-цифровий перетворювач
ККД	коефіцієнт корисної дії
СКБ	система керування батареєю (Battery Management System)
EV	електротранспорт (Electric vehicles)
IoT	Інтернету речей (Internet of Things)
SoC	відсоток заряду (State of Charge)
SoH	відсоток залишкової ємності (State of Health)

ВСТУП

Сучасні технології докорінно змінюють повсякденні потреби людини, упроваджуючи все нові пристрої, без яких складно уявити теперішній спосіб життя. Потреба в системах накопичення енергії виникла разом з появою сучасного виробництва. Більшість сфер потребує джерел живлення. Без літєвих акумуляторів десятиліття розвитку мобільних пристроїв були б неможливими. Індустрія відновлюваної енергетики не мала б практичного застосування, а високотехнологічне виробництво втрачало мільярди доларів під час перебоїв живлення, через аварійні ситуації в електричній мережі.

Сучасний етап розвитку електронної техніки та інформаційних технологій характеризується стрімким поширенням портативних пристроїв, автономних електронних систем і транспортних засобів з електричним приводом. Функціонування таких систем залежить від ефективності джерел живлення. Літій-іонні акумулятори, завдяки високій енергетичній густині, низькому рівню саморозряду та тривалому терміну роботи, стали основою сучасних систем накопичення енергії.

Паралельно зі збільшенням сфер застосування акумуляторних батарей зростають вимоги до забезпечення їхньої безпечної, надійної та ефективної експлуатації. Одним з основних недоліків літій-іонних акумуляторів є займисті речовини, що містяться в їхньому складі. Така будова робить батареї вразливими до низки ризиків. Неправильні умови експлуатації можуть призвести до виникнення небезпечних ситуацій, що створюють загрозу не тільки для акумуляторної збірки, але й для пристрою в цілому та навіть користувача. Для забезпечення нормальних умов роботи готові батареї обладнуються системами захисту, які виконують функції контролю напруги, струму, температури. Вони запобігають виникненню аварійних ситуацій та мають додаткові функції, наприклад, для балансування елементів.

Протягом останніх десятиліть літій-іонні акумулятори суттєво вдосконалилися: збільшилася їхня енергетична густина, зменшилася вартість виробництва та розширилися сфери практичного застосування. За прогнозами аналітичних

досліджень, попит на літій-іонні системи накопичення енергії продовжить стабільно зростати, завдяки розвитку електротранспорту, відновлюваної енергетики та автономних електронних пристроїв. У зв'язку з цим розроблення ефективних систем керування батареями є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, безпеки та довговічності сучасних акумуляторних систем.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РАНІШЕ ВИКОНАНИХ РОБІТ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

У цьому розділі розглянуто актуальність систем захисту та заряду в сучасних технологічних рішеннях. Проаналізовано проблеми, які постають у процесі експлуатації у теперішніх умовах та шляхи їхнього вирішення.

Розглядається загальна структура та принципи роботи окремих складових систем керування акумуляторами (СКБ). Порівнюються різні варіанти конфігурації та будови основних вузлів для визначення оптимального компонування для конкретних завдань.

1.1 Сучасний стан і проблематика систем захисту та заряду

Протягом останнього десятиліття електрифікація транспорту знову набула масового характеру, адже в короткий проміжок на початку 20 століття електромобілі вже домінували в сегменті транспорту [1]. Застосування електричного струму як рушія для багатьох систем не тільки є перспективою майбутнього, але й вигідною інвестицією, що значно збільшує термін служби та зменшує вартість обслуговування; тому низка сфер використовували електричні приводи задовго до масового впровадження літієвих акумуляторів [2].

У 1970-х роках відбувся різкий сплеск інтересу до розробки акумуляторних батарей. У 1967 році компанія «Ford» виявила матеріал, що поклав основу сучасним нікелевим та літієвим акумуляторам. Паралельно з цим успішна розробка натрієво-сірчаного акумулятора зайняла близько 40 років перед тим, як увійти в масове виробництво. На початку 1970-х було досліджено, що явище інтеркаляції є найбільш перспективним для майбутніх накопичувачів енергії. 10 років досліджень у цій сфері поклали основу для розробки сучасних літієвих акумуляторів. З моменту першої масової появи на ринку в 1991 році цей тип батарей здобув статус найпопулярніших у світі [1].

За 3 десятиліття існування літієві акумулятори втричі збільшили об'ємну енергетичну густину та стали утридцятьох дешевшим [3]. Літієві акумулятори

сприяли розвитку мобільних пристроїв зв'язку, ноутбуків. Такі батареї набули нечуваного розповсюдження в усіх сферах: від портативних інструментів до кількасоткіловатних сонячних електростанцій. Прогнозується, що попит на літєві акумулятори щорічно зростатиме на 27% відсотків до 2030 року [4].

Глобальний ринок СКБ оцінювався у 13,64 мільярда доларів США у 2025 році й, за прогнозами, становитиме 16,30 мільярда доларів США у 2026 році, а до 2034 року досягне 51,78 мільярда доларів США, демонструючи середньорічний темп зростання на рівні 15,55% протягом прогнозованого періоду. Азійсько-Тихоокеанський регіон домінував на ринку систем керування акумуляторами з часткою ринку 71,40% у 2025 році.

Texas Instruments є одним із головних гравців на ринку. Компанія відома своїм широким портфоліо рішень для СКБ, зокрема для електромобілів та систем накопичення енергії.

Система керування акумулятором є одним із найважливіших компонентів, що використовуються в акумуляторних системах, передусім в електротранспорті (EV, Electric vehicles), накопичувачах відновлюваної енергії та різних портативних електронних пристроях. Вона складається з апаратних та програмних компонентів, які відстежують, контролюють та керують продуктивністю, безпекою та тривалістю служби акумуляторів.

СКБ має високий попит завдяки зростанню впровадження електромобілів, розширенню систем накопичення відновлюваної енергії та збільшенню потреби в ефективних рішеннях для управління енергією в різних сферах застосування.

У всьому світі уряди зосереджують увагу на зменшенні впливу на навколишнє середовище, що стимулює популярність електротранспорту. За даними Міжнародного енергетичного агентства, станом на 2023 рік світові продажі електромобілів досягли майже 14 мільйонів одиниць, що свідчить про подальше стрімке зростання ринку. Ця тенденція вказує на потужний зсув у бік електричної мобільності, зумовлений збільшенням споживчого попиту, державними стимулами та вдосконаленням технологій електромобілів.

Основна роль СКБ в електромобілях полягає у відстеженні та керуванні ефективністю акумулятора, що є критично важливим для максимізації терміну служби та ефективності акумуляторного блока. Оскільки виробники прагнуть збільшити запас ходу, швидкість заряджання та загальну ефективність, передові технології СКБ стають необхідними. Ці системи надають дані в режимі реального часу про стан акумулятора, включно з рівнем заряду (SoC, State of Charge) та станом «здоров'я» (SoH, State of Health), що дозволяє ефективно контролювати його параметри. Оптимізуючи цикли заряджання та запобігаючи таким проблемам, як перезарядження або перегрів, СКБ відіграє вирішальну роль у підтримці цілісності акумулятора, що і є рушійною силою зростання світового ринку систем керування акумуляторами.

Крім того, провідні автовиробники беруть на себе зобов'язання щодо електрифікації. Наприклад, компанія Ford пообіцяла інвестувати 50 мільярдів доларів США в розробку електромобілів до 2026 року, підкреслюючи потребу в ефективних рішеннях для керування акумуляторами для підтримки своїх парків електромобілів, що розширюються.

Розширення систем накопичення відновлюваної енергії є вагомим рушієм для індустрії систем керування акумуляторами, зокрема через те, що країни дедалі більше переходять на чистіші джерела енергії, такі як сонячна та вітрова. Ці відновлювані технології генерують енергію лише за сприятливих умов, наприклад, у сонячні години або вітряні періоди, що зумовлює потребу в ефективних рішеннях для накопичення енергії з метою перерозподілу її надлишків. Ця накопичена енергія вивільняється в періоди високого попиту або за несприятливих кліматичних умов. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики, очікується, що до 2026 року світовий ринок накопичувачів енергії перевищить 1,1 трильйона доларів США завдяки збільшенню кількості установок відновлюваної енергії та потребі в ефективних рішеннях для управління енергією.

Уряди по всьому світу інвестують значні кошти в проєкти відновлюваної енергетики. Наприклад, Закон США про зниження інфляції від серпня 2022 року виділив приблизно 369 мільярдів доларів США на ініціативи щодо чистої енергії

протягом наступного десятиліття. Це фінансування включає податкові пільги для установок відновлюваної енергії та конкретні стимули для рішень із накопичення енергії, визнаючи важливу роль накопичувачів у керуванні змінною потужністю від сонячних і вітрових джерел. Такі ініціативи підкреслюють необхідність в ефективних рішеннях СКБ, здатних керувати складними процесами у великомасштабних акумуляторних системах, що робить їх важливими для успішної інтеграції відновлюваної енергії в наявні енергетичні інфраструктури.

Розробка, впровадження та обслуговування передових рішень вимагають значних фінансових інвестицій, що створює бар'єр для багатьох компаній, особливо стартапів та дрібних фірм. Наприклад, ціна літій-іонних акумуляторів, які зазвичай використовуються в електромобілях та системах накопичення відновлюваної енергії, може коливатися від 200 до 600 доларів США за кіловат-годину. Ця істотна вартість додатково посилюється потребою в передових СКБ, які можуть включати такі функції, як моніторинг у режимі реального часу, управління безпекою та прогнозна аналітика. Інтеграція високоякісної СКБ може додати приблизно від 15% до 30% до загальної вартості акумуляторної системи, що робить її значною статтею витрат для виробників і кінцевих користувачів.

Фінансовий бар'єр обмежує впровадження передових технологій виробництва акумуляторів у різних секторах, особливо на ринках, що розвиваються, де бюджети на проєкти відновлюваної енергетики та електромобілі є обмеженими. Ця ситуація ще більше ускладнюється потребою в безперервних інвестиціях у дослідження та розробки, щоб іти в ногу з технологічним прогресом, що може виснажувати фінансові ресурси.

Інтеграція систем керування акумуляторами з технологіями розумних мереж відкриває значні можливості для ринку, оскільки ці системи є критично важливими для підвищення ефективності та надійності розподілу електроенергії. Розумні мережі використовують цифрові комунікації, автоматизацію та аналіз даних для оптимізації управління енергією, а також для балансування попиту та пропозиції. У міру розвитку глобальних енергетичних систем синергія між СКБ та розумними мережами дедалі більше визнається життєво важливою для створення більш адаптивної та гнучкої

енергетичної інфраструктури. За даними Міжнародного енергетичного агентства, очікується, що інвестиції у технології розумних мереж перевищуватимуть 100 мільярдів доларів США щорічно до 2025 року, що підкреслює зростання уваги до модернізації енергетичних систем.

Крім того, глобальні інвестиції у проекти розумних мереж стимулюють розробку рішень СКБ, адаптованих для систем накопичення енергії. Такі компанії, як Siemens та Schneider Electric, активно розробляють рішення, що інтегрують функціонал із можливостями смартмереж. Наприклад, платформа EcoStruxure від Schneider Electric забезпечує моніторинг та аналітику в режимі реального часу для управління енергією, оптимізуючи використання акумуляторів відповідно до потреб мережі. Оскільки все більше комунальних підприємств та постачальників енергії впроваджують технології розумних мереж, попит на сумісні та передові СКБ зростатиме, створюючи вигідні можливості для виробників щодо інновацій та розширення своєї продукції на цьому ринку, який стрімко розвивається.

Стрімкі темпи технологічного прогресу в галузі акумуляторних технологій та рішень для накопичення енергії створюють серйозні виклики для зростання ринку. Оскільки постійно з'являються нові хімічні склади акумуляторів, як-от твердотільні та літій-сірчані батареї, наявні рішення СКБ можуть швидко застаріти або стати менш конкурентоспроможними. Це зумовлює потребу в інноваціях та адаптації з боку виробників, щоб іти в ногу з мінливим ринковим ландшафтом.

Наприклад, твердотільні акумулятори, які забезпечують вищу щільність енергії, довший термін служби та підвищену безпеку порівняно з традиційними літій-іонними батареями, стають дедалі популярнішими. Такі компанії, як Toyota та QuantumScape, інвестують значні кошти в твердотільні технології, причому Toyota прагнула продемонструвати прототип такого автомобіля до 2025 року. Впровадження цих передових акумуляторів вимагає розробки нових рішень СКБ, здатних ефективно керувати їхніми унікальними характеристиками, такими як температурні профілі та профілі заряджання, які можуть бути несумісними з наявними системами.

Оскільки глобальна обізнаність про зміну клімату та деградацію довкілля зростає, виробники надають пріоритет розробці акумуляторних систем, які

мінімізують вплив на навколишнє середовище протягом усього свого життєвого циклу – від виробництва до утилізації. Технології СКБ розробляються для підвищення ефективності та подовження терміну служби цих акумуляторів, що забезпечує кращу продуктивність і водночас зменшує потребу в частій заміні. Такий фокус на довговічності є критично важливим, оскільки він безпосередньо впливає на загальну екологічну стійкість акумуляторних систем, зменшуючи кількість відходів та знижуючи попит на сировину. Наприклад, у 2022 році BMW уклала партнерство з Northvolt для створення екологічно стійких акумуляторних елементів. Ця співпраця мала на меті створити підприємство з виробництва акумуляторів, яке пріоритетно орієнтується на сталий розвиток завдяки використанню відновлюваних джерел енергії та вторинної сировини. Система СКБ, інтегрована в ці акумулятори, буде спроектована так, щоб максимально збільшити їхню ефективність і термін служби, сприяючи екологізації автомобільного сектору. Крім того, у 2023 році компанія Tesla оголосила про свою ініціативу щодо екологічно стійких акумуляторів для розробки повністю екологічного процесу виробництва батарей. Це включає використання перероблених матеріалів для компонентів акумуляторів та впровадження системи переробки замкнутого циклу. Поточні зусилля компанії щодо збільшення довговічності акумуляторів за допомогою передових технологій СКБ узгоджуються з її метою зменшення впливу на навколишнє середовище.

Залежно від типу ринок поділяється на стаціонарні та мобільні акумулятори. Мобільні системи керування акумуляторами зараз лідирують переважно завдяки стрімкому зростанню в секторі електротранспорту та збільшенню попиту на портативні електронні пристрої. Компанії інвестують у цей сектор, щоб задовольнити попит на електромобілі по всьому світу. Наприклад, у 2022 році компанія General Motors оголосила про значні досягнення у своїй технології акумуляторів Ultium, яка включає ультрасучасну систему керування акумулятором. Ця платформа розроблена для підтримки різних електромобілів, забезпечуючи масштабованість та гнучкість характеристик. GM прагне випускати лінійку електромобілів із використанням цієї технології, що відображає її прагнення до електрифікації. Очікується, що у 2026 році мобільний сегмент займе переважну частку ринку — 51,36%.

Стаціонарні СКБ є не менш важливими для керування великомасштабними акумуляторними системами, які накопичують надлишок енергії, що генерується в періоди пікового виробництва, для використання під час стрибків попиту. Оскільки енергетичні мережі стають більш децентралізованими, зростає увага до підвищення стабільності та стійкості мережі. Стаціонарні СКБ дозволяють комунальним підприємствам ефективно керувати великими акумуляторними установками, що забезпечують резервне живлення та регулювання частоти. Прогнозується, що цей сегмент демонструватиме середньорічний темп зростання на рівні 18,28% протягом прогнозованого періоду.

За системною інтеграцією ринок поділяється на централізовані, розподілені та модульні системи. Централізовані системи керування акумуляторами займають більшу частину ринку завдяки їхньому широкому використанню у великомасштабних сферах застосування, як-от електромобілях та стаціонарних системах накопичення енергії. У таких системах одна СКБ може ефективно керувати кількома акумуляторними елементами або модулями. Централізовані системи зазвичай є простішими у впровадженні та економічно вигідними для виробників, оскільки вони спрощують процеси моніторингу й контролю. Очікується, що в 2026 році централізований сегмент утримуватиме переважну частку ринку на рівні 58,67%.

Розподілені системи керування акумуляторами набирають обертів і дедалі більше завойовують ринок, особливо в тих сферах застосування, де потрібні гнучкість, масштабованість та резервування. Цей тип СКБ розподіляє функції керування між кількома вузлами, що підвищує ефективність роботи в різних сценаріях. Прогнозується, що цей сегмент демонструватиме середньорічний темп зростання на рівні 16,74% протягом прогнозованого періоду.

За типом акумуляторів ринок поділяється на літій-іонні, свинцево-кислотні, нікель-кадмієві, твердотільні та інші. Літій-іонні акумулятори лідирують на ринку систем керування акумуляторами завдяки своїй високій щільності енергії, що робить їх ідеальними для електромобілів та портативної електроніки. Станом на 2022 рік на них припадало приблизно 90% світового ринку акумуляторів для електромобілів, що зумовлено стрімким зростанням цього сектору. Нещодавні досягнення, як-от анонс

компанією Tesla нових акумуляторних технологій, спрямованих на підвищення продуктивності та безпеки, ще більше підкреслюють домінування літій-іонних батарей у сфері СКБ. Очікується, що в 2026 році цей сегмент утримуватиме частку ринку на рівні 61,53%.

Свинцево-кислотні акумулятори є другим за значущістю типом на ринку, особливо в таких сферах застосування, як автомобільна промисловість та накопичувачі відновлюваної енергії. Вони широко використовуються завдяки своїй низькій вартості та перевіреним технологіям. Попри те, що вони важчі та менш ефективні порівняно з літій-іонними акумуляторами, свинцево-кислотні батареї все одно займають значну частину ринку, особливо в системах запуску, освітлення та запалювання. Прогнозується, що цей сегмент демонструватиме середньорічний темп зростання на рівні 13,42% протягом прогнозованого періоду.

Нікель-кадмієві (NiCd) акумулятори використовуються переважно в промислових сферах, портативних електроінструментах та системах аварійного резервного живлення. Хоча вони забезпечують надійну роботу, зокрема в екстремальних умовах, їхня частка ринку знижується через екологічні занепокоєння та конкуренцію з боку новіших технологій.

За сферами застосування ринок поділяється на електромобілі, системи накопичення енергії, побутову електроніку, промисловий сектор та інші (рис. 1.1).

Сегмент EV є найбільшим і зростає найшвидше на ринку. У 2026 році на цей сегмент припадатиме 57,67% частки ринку. Світовий зсув у бік екологічно чистого транспорту забезпечив продажі електромобілів на рівні понад 10 мільйонів одиниць у 2022 році, де літій-іонні акумулятори стали основним вибором. Такі компанії, як Tesla та GM, постійно вдосконалюють свої СКБ для підвищення продуктивності, безпеки та запасу ходу, що додатково стимулює зростання цього сегмента.

Сегмент систем накопичення енергії набирає значних обертів через зростання попиту на інтеграцію відновлюваної енергії та стабільність енергомереж. Станом на 2023 рік прогнозується, що світова потужність накопичувачів енергії перевищить 400 ГВт·год, при цьому стаціонарні акумуляторні системи стають базовими для управління коливаннями попиту та пропозиції в енергетиці [5].

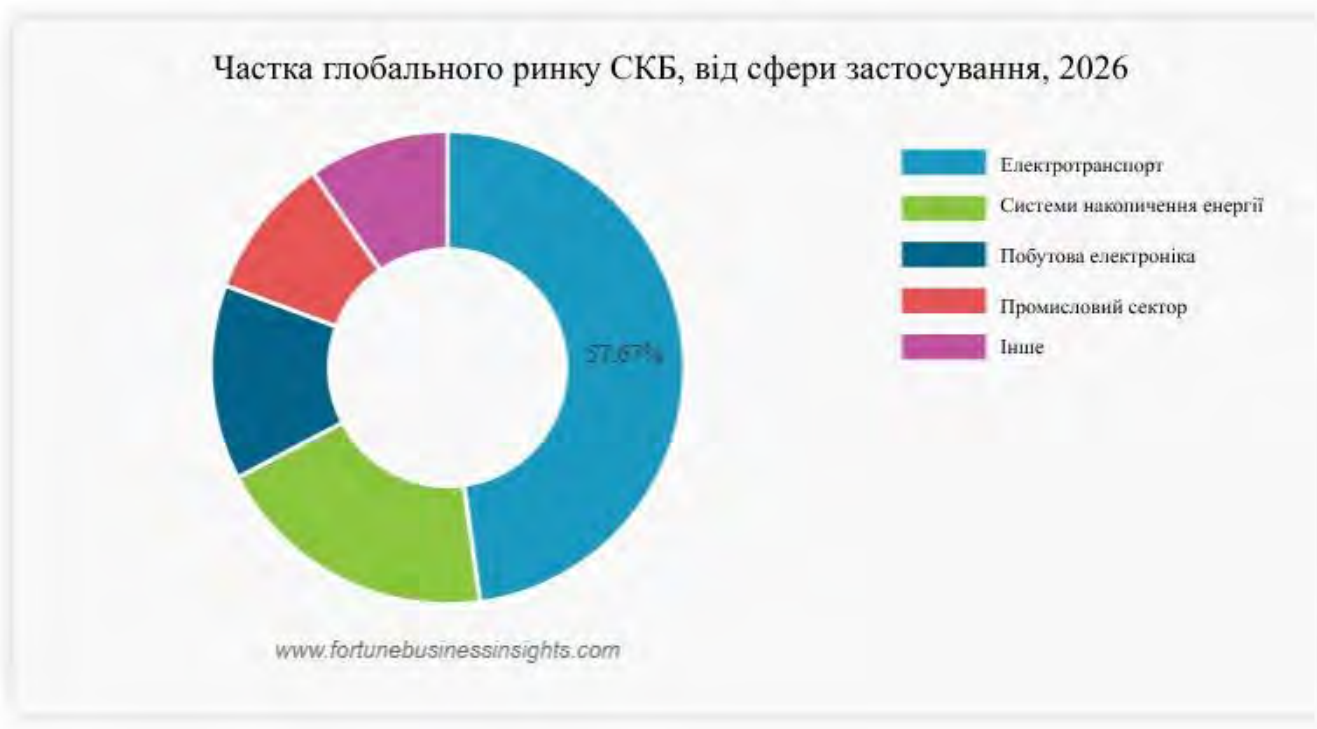


Рисунок 1.1 – Частка глобального ринку СКБ, від сфери застосування, 2026

1.2 Принцип роботи літєвих акумуляторів

Принцип роботи акумулятора є відносно простим у своїй базовій конфігурації (рис. 1.2). Елемент складається з двох електродів, кожен з яких підключений до електричного кола. Вони розділені електролітом, який може проводити заряджені частинки. Зазвичай електроди фізично розділені бар'єрним матеріалом, який запобігає їхньому фізичному контакту одне з одним, що може призвести до короткого замикання. У режимі розряду, коли акумулятор служить для генерації електричного струму, на негативному електроді (аноді) відбувається процес окислення, у результаті чого електрони рухаються від електрода по колу. На позитивному електроді (катоді) відбувається комплементарний процес відновлення, що поповнює його електронами. Для акумуляторних батарей процес може бути зворотним: зовнішня електроенергія буде використана для протилежної окисно-відновної реакції, що повертає систему в початковий стан.

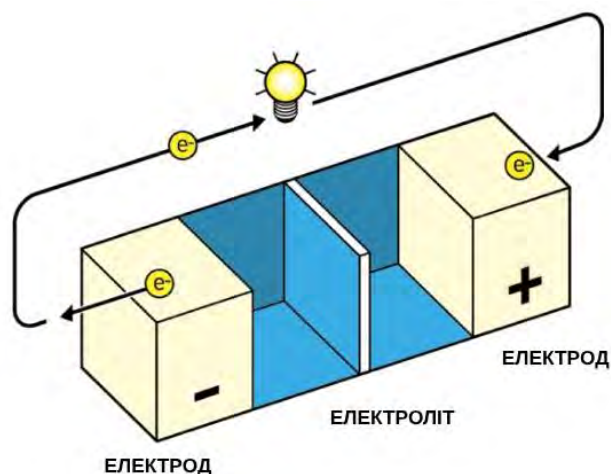


Рисунок 1.2 – Принцип роботи гальванічного елемента в режимі розряду

До середини 20-го століття обмежена щільність енергії та ємність розроблених батарей поклали початок пошуку інших конфігурацій – і літій став основним напрямком досліджень. Цей метал мав низку перспективних властивостей, що потенційно могли покращити характеристики носіїв енергії. Однак високореактивний літій не міг бути застосований у чистому вигляді. Після повторюваних циклів заряду-розряду ріст літієвих дендритів був достатньо значним, щоб досягти протилежного електрода що призвело б до короткого замикання та потенційного ризику виникнення пожежі (рис. 1.3).

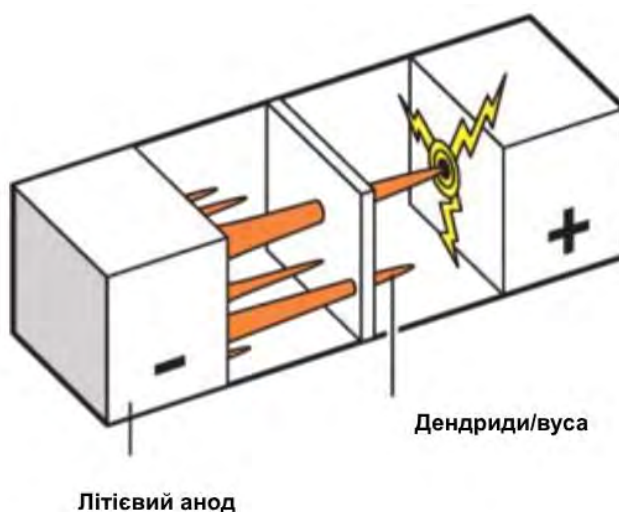


Рисунок 1.3 – Утворення літієвих дендритів/ вусів, що призводять до короткого замикання

Саме через це сучасні літій-іонні акумулятори працюють за принципом комірки з перенесенням іонів, яку називають «коміркою-гойдалкою». У цьому типі елементів

немає літію у формі металу, а обидва електроди виготовлені з інтеркаляційних матеріалів, здатних вміщувати йони. Ключовим фізико-хімічним процесом є інтеркаляція, тобто здатність іонів літію входити у внутрішню структуру електродів і залишати її без руйнування самої решітки. Матеріали катоду зазвичай мають виражену шарувату структуру, де йони літію можуть надійно зв'язуватися в проміжках між шарами оксидів металів, не створюючи при цьому серйозного розширення кристалічної решітки [6].

Ці відкриття та розробки зрештою призвели до комерційного випуску літієвих акумуляторних батарей, що могли безпечно експлуатуватися. Однак основна небезпека: утворення дендритів, що можуть пробити сепаратор та спричинити коротке замикання, зберіглась. При неправильних режимах роботи, а саме: при надмірному заряді, перевищенні потужності, нагріванні акумулятора станеться самозаймання, спричинене порушенням ізоляційного шару. Саме тому використання систем захисту є необхідністю для безпечної роботи літієвих джерел живлення [7].

1.2.2 Загальна структура

Головною перевагою використання акумуляторів як накопичувача енергії є можливість змінювати конфігурацію такого джерела живлення для конкретних вимог експлуатації. Масштабування відбувається шляхом об'єднання потрібної кількості елементів паралельно або послідовно. Це дозволяє досягти бажаної напруги, ємності та потужності.

Проте сформована акумуляторна збірка потребує контролю кожного елемента та захисту батареї у цілому – виникає потреба в модулях, що виконують ці функції. Система керування батареєю відповідає за захист від розряджання та короткого замикання, контролює процес заряду [8]. Функціонал таких модулів гарантує, що акумулятор працюватиме лише у визначеному діапазоні напруги, струму та температури.

Зараз майже кожна батарея обладнується СКБ. Усі промислові та побутові накопичувачі енергії зобов'язані бути захищеними такими системами, відповідно до стандартів. Статистика свідчить, що переважна частина інцидентів, що пов'язані з загорянням літієвих акумуляторів, є наслідком відсутності або некоректної роботи

модулів захисту, тому наявність СКБ належної якості є пріоритетом виробників електроніки та електротранспорту [9].

СКБ можна поділити на окремі функціональні блоки, кожен з яких виконує відповідне завдання. Призначення та конкретні вимоги визначають конфігурацію модулів, що використовуються в будові. Широка сфера застосування СКБ потребує багатьох спеціалізованих варіантів, тому загальна структура може значно відрізнятися залежно від виконуваних задач. Проте більшість функціональних блоків залишаються незмінними [10]. Типова будова СКБ зображена на рисунку 1.4.

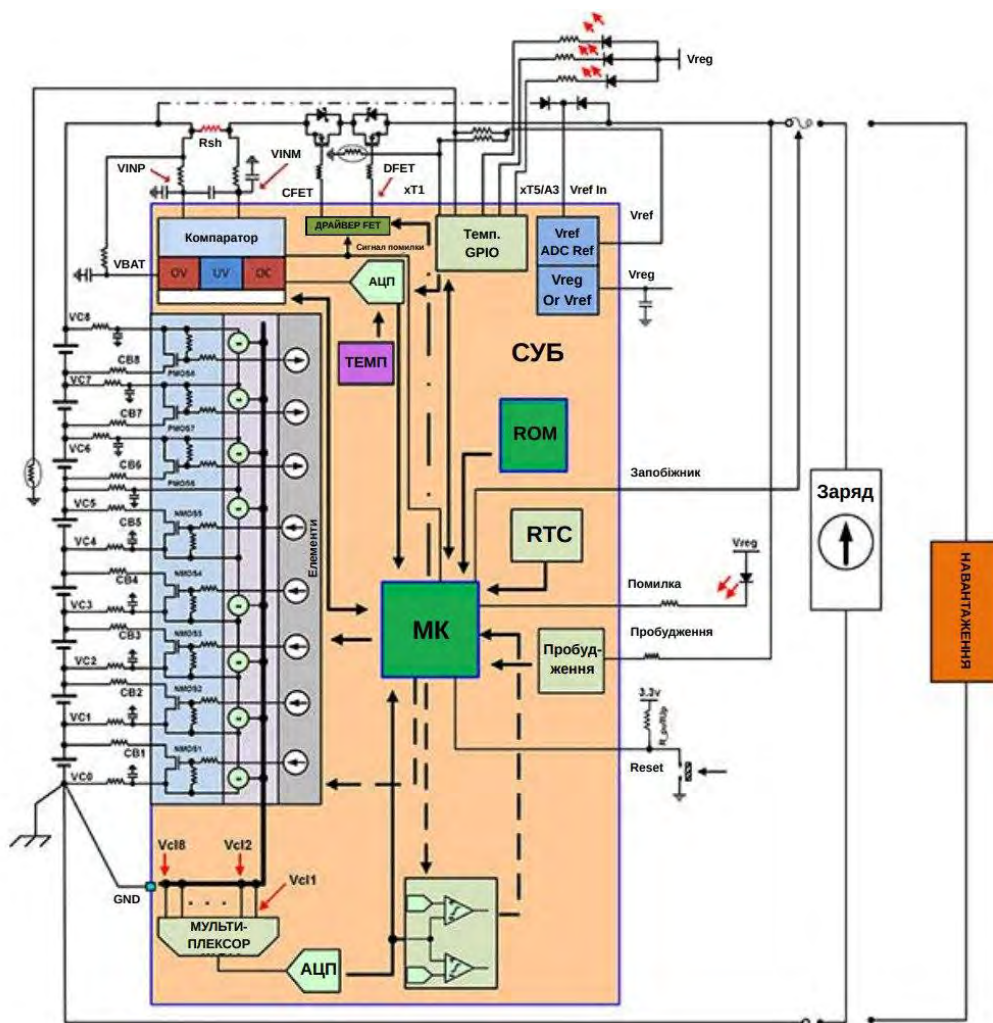


Рисунок 1.4 – Загальна структура СКБ

Для функціонування СКБ необхідно вимірювати три основні параметри: напругу на елементах, струм у збірці та температуру. Діапазони цих показників вказуються виробником і варіюються залежно від типу акумуляторної батареї (АКБ). Контроль напруги є ключовим способом визначення стану повного розряду або

повного заряду. Використання АКБ за цими межами може пошкодити елементи або призвести до стрімкого виділення тепла, що спричинить займання чи вибух.

Вимірювання струму дозволяє визначити наявність короткого замикання на виході АКБ або перевищення максимального рекомендованого навантаження збірки. Це спричинить неконтрольований нагрів та може також призвести до займання. Контроль температури запобігає використанню АКБ поза рекомендованими виробником межами. Висока температура є ключовим показником виникнення надзвичайних ситуацій. Датчики цих трьох параметрів формують основу для безпечної роботи АКБ.

Отже, основні функції СКБ включають:

- Моніторинг параметрів акумуляторних елементів – СКБ постійно відстежує напруги, струму та температури.
- Захист акумуляторних комірок – СКБ повинна забезпечувати захист від загроз для акумуляторної системи (контроль заряджання та розряджання; захист від перезаряду/перевантаження).
- Балансування елементів – СКБ використовує пасивний або активний метод перерозподілу заряду, мінімізуючи неоднорідність (неоднаковість параметрів) елементів.
- Оцінка стану SoC, SoH та діагностика несправностей – СКБ оцінює та прогнозує залишок заряду і стан «здоров'я» АКБ; також відповідає за виявлення несправностей, як-от пошкодження з'єднань елементів, а також за запобігання наслідків.
- Керування заряджанням та розряджанням – для забезпечення тривалого терміну служби АКБ СКБ повинна підтримувати відповідний SoC і забезпечувати оптимальні умови для процедур заряджання та розряджання.
- Зв'язок та реєстрація даних (логування) – СКБ повинна керувати даними акумуляторного блока та фільтрувати їх, а також накопичувати важливу інформацію [11].

1.2.3 Блок силових ключів

Цей функціональний блок відіграє роль комутаційного вузла, що відповідає за розмикання та замикання електричного кола, а саме: підключення навантаження або зарядного пристрою до АКБ. Силовий ключ може бути реалізовано на базі потужних польових транзисторів або електромеханічного реле (контактора). Отже, завдяки цьому блоку здійснюється керування виходом АКБ. Режим роботи визначається залежно від напруги та струму АКБ, а також інших параметрів, вимірювання яких безперервно здійснюється під час роботи. На рисунку 1.5 зображено дві конфігурації з'єднання між навантаженням, зарядним пристроєм і АКБ. Варіант «а» потребує найменшої кількості комутацій за допомогою силових транзисторів та обмежує режими роботи акумуляторної батареї до заряджання або розрядження. Поточний напрямок струму та показники інших параметрів визначають логіку комутації. Схема підключення «б», на відміну від розглянутого варіанту, дозволяє жити під'єднане навантаження під час заряду.

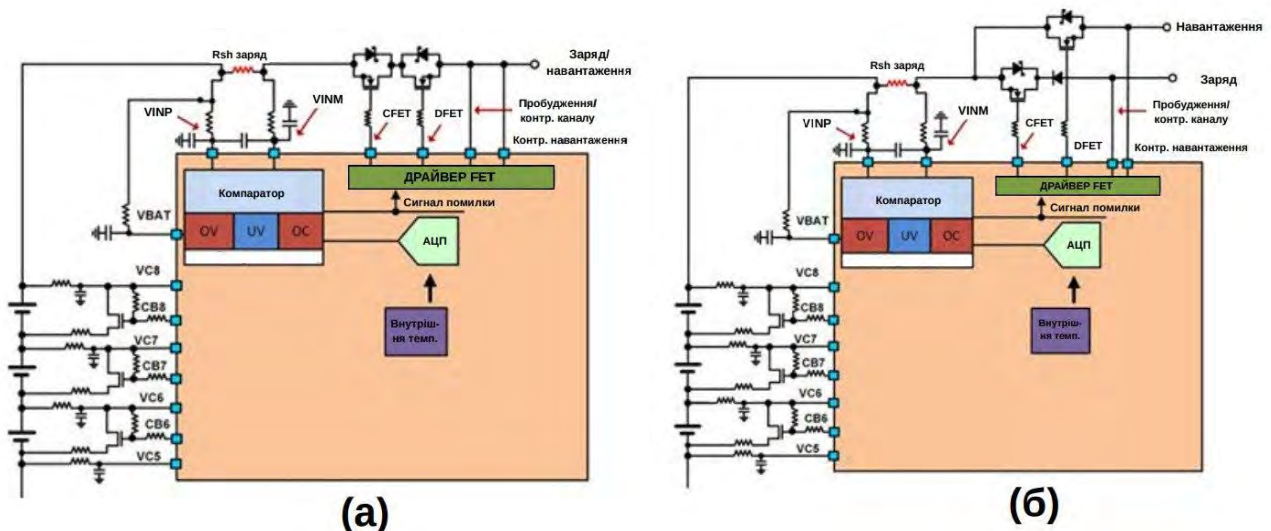


Рисунок 1.5 – Типи підключення акумулятора, зарядного пристрою та навантаження: а) спільний вихід, б) окремі виходи

1.2.1 Блок вимірювання напруги

Для забезпечення безпечної та ефективної роботи АКБ необхідно контролювати напругу кожного елемента в АКБ. Виміряні дані є необхідними для більшості алгоритмів захисту та діагностики.

1.2.1 Блок вимірювання струму

Вимірювання струму є необхідним для оцінки терміну служби АКБ, а також для забезпечення захисту від перевантажень. Моніторинг значення струму в режимі реального часу дозволяє визначити обсяг накопиченої енергії для подальшої оцінки SoC. Дані від датчиків струму дають змогу дізнатися про спожиту АКБ енергію, допомагаючи визначити залишковий корисний термін служби. Крім того, виміряні в режимі реального часу значення струму можуть використовуватися системами безпеки для сповіщення про виникнення несправності в системі

1.2.2 Вимірювання рівня заряду

Функціональний блок оцінки рівня заряду – це індикатор залишкової ємності. Він відстежує кількість електричної енергії, яку приймає або віддає АКБ. Ємність – це інтеграл струму за часом. Для прогнозування залишку спочатку необхідні дані про початковий заряд АКБ. Потім для розрахунку витраченої під час розряду енергії потрібно вимірювати струм, що протікає крізь акумулятор. Такий спосіб є набагато точнішим, ніж просте вимірювання напруги, оскільки останній метод сильно залежить від потужності навантаження та типу АКБ (наприклад, літій-залізо-фосфатні акумулятори мають майже незмінну напругу протягом більшої частини циклу заряду-розряду), що робить оцінку залишку ємності лише приблизною. Найбільш простим та економним рішенням є використання послідовно підключеного до батареї резистора малого опору. За допомогою АЦП вимірюється падіння напруги на ньому. Для розрахунку використовується значення опору цього резистора та проміжок часу між вимірюваннями.

1.2.3 Вимірювання температури

Сучасні акумулятори здатні віддавати величезний струм протягом довгого часу. Це може призвести до перегріву батареї та потенційного загоряння: хімічні речовини, які використовуються для виготовлення батарей, є дуже займистими. Щоб цього уникнути, СКБ обладнані датчиком температури. Також такі сенсори можуть визначати, чи оптимальна температура для заряду або розряду.

1.2.4 Інші блоки

Інші функціональні блоки СКБ можуть включати автентифікацію АКБ, годинник реального часу, постійну пам'ять. Їх застосовуються для «чорної скриньки»: зберігання інформації з позначенням часу. Це дозволяє користувачеві контролювати поточний стан батареї. Блок автентифікації запобігає підключенню електроніки СКБ до акумуляторів стороннього виробника. Опорна напруга або регулятор використовуються для живлення периферійних схем СКБ.

1.3 Аналітичний огляд автоматизованих систем керування зарядом

Найбільш детальна інформація про будову та алгоритми роботи СКБ міститься в проєктах з відкритою документацією. Такі роботи відображають основні напрямки сучасних рішень, що застосовуються і в комерційних продуктах. Завдяки відкритій документації, з'являється можливість проаналізувати апаратну частину СКБ та взяти окремі рішення за основу подальшої розробки.

1.3.1 Проєкт СКБ на основі BQ77915

У цьому проєкті використовується мікросхема BQ77915 від Texas Instruments. Це малопотужний контролер захисту акумуляторних батарей, який забезпечує повний комплекс захисту за напругою, струмом і температурою, а також реалізує алгоритм розумного балансування елементів живлення без необхідності керування з боку мікроконтролера. Нижче наведено ключові характеристики [12].

Енергоспоживання та масштабованість:

- Ультранизький струм споживання: 8 мкА в робочому режимі;
- Енергозбереження: зниження споживання до 2 мкА;
- Глибокий сон: максимальний струм становить усього 0,5 мкА;
- Масштабованість за кількістю елементів: підтримка конфігурацій від 3 до 20 і більше елементів.

Захист за напругою (Похибка: заряд ± 10 мВ, розряд ± 18 мВ):

- Захист від перевищення верхнього ліміту напруги: поріг від 3 В до 4.575 В;
- Захист від перевищення нижнього ліміту напруги: поріг від 1.2 В до 3 В;
- Виявлення обриву лінії: перевірка пошкодження елемента або з'єднання.

Захист за струмом під час розрядження:

- Перевищення струму при розряджанні: поріг від -10 мВ до -85 мВ;
- Перевищення струму при розряджанні: поріг від -20 мВ до -170 мВ;
- Коротке замикання: поріг від -40 мВ до -340 мВ.
- Гнучке налаштування: час затримки захисту регулюється зовнішнім резистором.

Захист за температурою:

- Перегрів під час заряджання: поріг 45°C або 50°C ;
- Перегрів під час розряджання: поріг 65°C або 70°C .

Інші особливості:

- Розумне пасивне балансування: автономний алгоритм усунення дисбалансу між елементами;
- Вбудовані ключі балансування: інтегровані польові транзистори підтримують струм до 50 мА.
- Зовнішнє балансування: можливість підключення зовнішніх польових транзисторів для вищого струму;
- Керування ключами: роздільні драйвери для зовнішніх транзисторів;
- Висока надійність: гранична абсолютна напруга на кожному вході становить 36 В;
- Функціональна безпека: сертифікація для високонадійних систем.

У будові використовуються стандартний перелік компонентів рекомендованих виробником. В якості ключів застосовуються IQDH35N03LM5 з низьким опором стоку-витоку в $0,35$ мОм (рис. 1.6). Автор наголошує на надійності застосування спеціалізованих мікросхем як основи для розробки СКБ [13]. Серед перспектив покращення він виділяє: розробку модуля активного балансування, впровадження індикатора ємності та використання нітрид-галієвих польових транзисторів, завдяки їхній питомій потужності та стійкості до стрибків напруги [14].

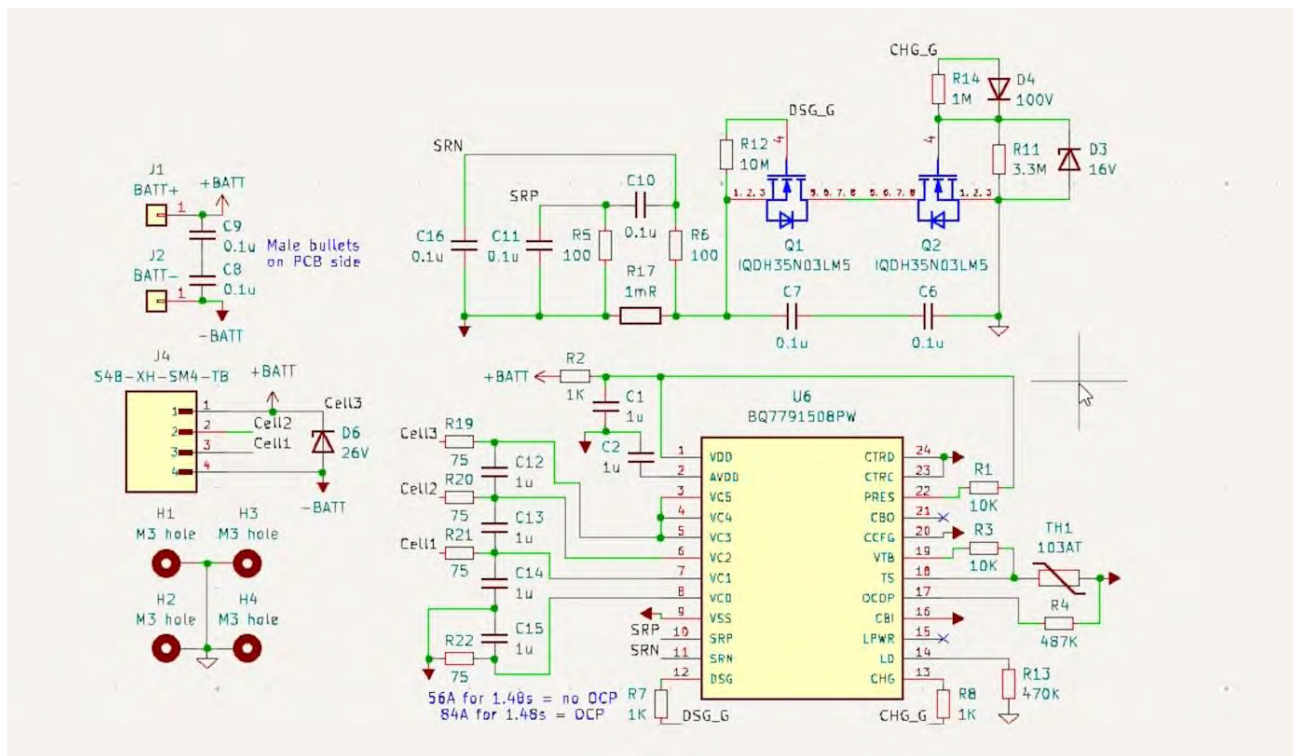


Рисунок 1.6 – Електрична принципова схема СКБ
на основі BQ77915

1.3.2 Проєкт модульної СКБ на основі ATTINY1624 та ESP32

Цей проєкт орієнтований на застосування в накопичувачах енергії для побутових сонячних електростанцій та систем резервного живлення. Завдяки окремим модулям для контролю кожного елемента, систему можна легко масштабувати та конфігурувати. Дані з них обробляє мікроконтролер на основі плати ESP32-DEVKITC-32D. Обмін здійснюється за протоколом UART. Також головний модуль підтримує: WI-FI, CANBUS та RS485.

Контроль струму здійснюється за допомогою вбудованого АЦП ATTINY1624. Це сучасний 8-бітний високопродуктивний мікроконтролер із низьким енергоспоживанням сімейства tinyAVR 2 від компанії Microchip. Він випускається у компактному 14-піновому корпусі (SOIC або TSSOP).

Основні характеристики:

- Ядро: AVR із двотактовим апаратним помножувачем, що працює на частоті до 20 МГц;
- Пам'ять: 16 КБ Flash-пам'яті, 2 КБ SRAM та 256 байт EEPROM;

- Периферія: Система подій для незалежної роботи периферії без участі процесора, конфігурована логіка, таймери та інтерфейси зв'язку (2x USART, SPI, I2C/TWI);
- Живлення: Робота в діапазоні напруги від 1.8 В до 5.5 В.

Характеристики вбудованого АЦП

Модель ATtiny1624 оснащена передовим аналоговим модулем з високою точністю.

Ключові параметри АЦП:

- Розрядність: 12-бітний диференціальний АЦП;
- Швидкість роботи: До 375 тисяч вибірок на секунду;
- Канали: Доступно 9 зовнішніх входних каналів;
- Підсилювач: Вбудований підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення;
- Опорна напруга: Кілька внутрішніх джерел опорної напруги на вибір: 1.024 В, 2.048 В, 2.500 В, 4.096 В, а також рівень живлення [15].

Балансування відбувається пасивним методом. Для цього на друкованій платі модуля елемента розташовані резистори для розсіювання тепла, керується ATTINY1624 та одним польовим транзистором. Для вимірювання струму застосовується мікросхема INA229 та зовнішній шунт, номінал якого обирається користувачем на базі АКБ [16]. Це високоточний цифровий монітор потужності та накопиченого заряду з 20-бітним дельта-сигма АЦП та інтерфейсом SPI.

Мікросхема розроблена спеціально для точного вимірювання струму за допомогою зовнішнього шунта. Завдяки низькому зміщенню та мінімальному дрейфу параметрів, пристрій забезпечує високу динамічну точність без калібрування за різних температур. Вбудований обчислювальний блок самостійно виконує математичні розрахунки струму, потужності та енергії у фоновому режимі.

Ключові характеристики:

- Розрядність АЦП: 20 біт;
- Робоча напруга шини: від 0 В до 85 В;
- Синфазна напруга: від -0.3 В до $+85$ В;

- Діапазон диференціальної напруги шунта: ± 163.84 мВ або ± 40.96 мВ;
- Точність вимірювання струму: зміщення макс. ± 1 мкВ, дрейф зміщення макс. ± 0.01 мкВ/°C;
- Похибка вимірювань: потужність — до 0.5%, заряд — до 1.0%;
- Вбудований термодатчик: точність $\pm 1^\circ\text{C}$ (при 25°C), діапазон від -40°C до $+125^\circ\text{C}$;
- Компенсація дрейфу шунта: автоматичне коригування значень залежно від температури;
- Інтерфейс зв'язку: 4-провідний SPI з частотою до 10 МГц;
- Живлення: від 2.7 В до 5.5 В;
- Струм споживання: 640 мкА (типовий робочий), 5 мкА (максимальний у режимі сну);
- Швидкість відгуку тривоги: 75 мкс;
- Час перетворення АЦП: налаштовується від 50 мкс до 4.12 мс із накопиченням вибірок від 1х до 1024х [17].

1.3.3 Проєкт СКБ на основі MAX14921

Це покращена версія проєкту від автора попередньої роботи [16]. Тут концепція модульної будови була замінена одною мікросхемою, що розрахована на велику кількість елементів. Для контролю напруги та обробку інших даних відповідає мікросхема MAX14921. Це аналоговий інтерфейс для вимірювання параметрів акумуляторів. MAX14921 забезпечує точне вибіркове вимірювання напруги елементів живлення та зсув рівнів для АКБ з кількістю елементів до 16 / +65 В (макс.). Пристрій одночасно вимірює напругу всіх елементів, що дозволяє точно визначати рівень заряду та внутрішній опір джерела. Напруги всіх елементів зсуваються за рівнем відносно землі з одиничним коефіцієнтом підсилення, що спрощує перетворення даних зовнішнім АЦП. Пристрій має малошумний підсилювач із низьким зміщенням, який обробляє диференційні напруги до +5 В, дозволяючи контролювати всі поширені технології літій-іонних елементів. Похибка напруги елемента, що виникає у результаті, становить $\pm 0,5$ мВ. Висока точність пристрою робить його ідеальним для моніторингу хімічних джерел струму з дуже плоскою

кривою розряду, таких як літій-метал-фосфатні акумулятори. Пасивне балансування елементів підтримується зовнішніми драйверами польових транзисторів. Вбудована діагностика дозволяє виявляти обрив з'єднань та сигналізувати про знижену/підвищену напругу. Управління здійснюється через інтерфейс SPI з можливістю послідовного підключення. MAX14921 випускається у 80-контактному корпусі TQFP (12 мм x 12 мм). Пристрій розрахований на роботу в розширеному температурному діапазоні від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ [18].

Для обробки сигналів використовується зовнішній АЦП MCP33151. Це високоточний малопотужний АЦП послідовного наближення від компанії Microchip, призначений для роботи в системах з високою швидкістю збору даних. Пристрій працює із зовнішньою опорною напругою в діапазоні від аналогової напруги живлення до 5,1 В, що забезпечує широкий повний діапазон вхідної напруги від 0 В до опорної напруги. Налаштування опорної напруги не залежить від аналогової напруги живлення. Результат перетворення доступний через простий у використанні 3-провідний інтерфейс, сумісний з SPI.

Основні характеристики

- Розрядність: 14 біт;
- Швидкість вибірки: 1 мільйон вибірок за секунду;
- Тип входу: Однополярний;
- Інтерфейс: SPI (сумісний з Microwire та DSP);
- Робоча напруга: від 1.7 В до 5.5 В (цифрова частина) та 1.8V (аналогова частина);
- Споживання енергії: наднизьке (менше 1.5 мкА в режимі очікування);
- Сфери застосування: медичні прилади, системи автоматизації, автомобільна електроніка та вимірювальне обладнання [19].

Керування здійснюється мікроконтролером STM32F030. Обмін даними між мікросхемами здійснюється за протоколом SPI. Для комутації, як і в минулому варіанті використовується зовнішній контактор.

1.4 Постановка завдання розробки систем захисту та заряду

Підставою для розробки є завдання на виконання дипломного проєкту. Прилад призначений для контролю заряду літієвих акумуляторів. Також реалізовано функції захисту від розряджання та короткого замикання. Для визначення рівня заряду використовується вимірювання ємності. За допомогою контролю цих даних забезпечуються оптимальні умови для функціонування АКБ.

1.5 Завдання

Потрібно розробити структурну схему системи та вибрати елементну базу. Створити електричну принципову схему системи автоматизованого керування зарядом і захистом акумуляторних батарей. Розробити програмно-алгоритмічне забезпечення.

1.6 Технічні вимоги

Розроблений прилад повинен відповідати таким основним характеристикам:

- Активне балансування елементів;
- Протокол передачі даних користувачу UART;
- Захист за напругою залежно від типу АКБ;
- Захист за струмом залежно від потужності АКБ;
- Можливість налаштування параметрів захисту;

1.7 Умови роботи

- Температура зовнішнього середовища від 0 до +45 °C;
- Відносна вологість не більше 80%;
- Атмосферний тиск 600-800 мм. рт. ст.;
- Хімічно активних речовин немає;
- Характер роботи неперервний;
- Клас IP22;

1.8 Загальні вимоги

- Точність вимірювання напруги елементів 0,5%;
- Точність вимірювання струму 1%;
- Постійний струм розряду АКБ 40 А;

- Кількість елементів збірки 4;
- Напруга АКБ 7,5-20 В;

Висновки до розділу 1

У цьому розділі було проаналізовано основні статистичні дані про використання літій-іонних акумуляторів. Розглянуто прогнози щодо перспектив розвитку ринку. Було проаналізовано принцип роботи акумуляторів та основні види небезпеки, що вони можуть становити. Обґрунтовано актуальність впровадження СКБ в умовах стрімкого розвитку електротранспорту, систем накопичення відновлюваної енергії та інших галузей. Описано основні тенденції та перспективи використання таких систем у майбутньому. Було проаналізовано будову та функції, що застосовуються для моніторингу та контролю. Як основа для проектування були розглянуті проекти з відкритою документацією. Основною тенденцією таких рішень є використання спеціалізованих мікросхем, що відповідають за вимірювання та в деяких випадках логіку керування. Завдяки такому підходу, значно спрощується загальна структура та зменшується кількість елементів схеми. Для мікросхем, що повністю відповідають за роботу СКБ, суттєвим недоліком є відсутність можливості налаштовувати ліміти параметрів напруги та струму. Використання спеціалізованих аналогових інтерфейсів для контролю елементів дозволяє уникнути проблеми різного рівня потенціалів та значно спрощує вимірювання. Також за логіку роботи в такому випадку відповідає мікроконтролер, що залишає можливість самостійно встановлювати ліміти для більшої гнучкості СКБ. Проте такі мікросхеми зазвичай розраховані на велику кількість елементів та мають відносно високу вартість. Ще один варіант з модульною будовою має багато можливостей для нестандартних конфігурацій, але є занадто громіздким для портативних застосувань невеликої ємності.

2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТА ПІДБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

У цьому розділі розглядається структура СКБ. Проводиться огляд апаратних рішень різних способів впровадження основних функцій СКБ. Обирається компонентна база для розробки прототипу системи.

2.1 Структурна схема автоматизованої системи

На основі описаної структури СКБ було визначено відповідні складові частини (рис. 2.1). Система захисту складається з мікроконтролера, DC-DC перетворювача, силових транзисторів, датчика напруги та струму, блоку балансування, інтерфейсу UART. Система живиться від DC-DC перетворювача. Значення з датчика для кожного елемента передаються до мікроконтролера, що керує блоком силових ключів та балансування. Оброблені дані передаються через інтерфейс UART до користувача.

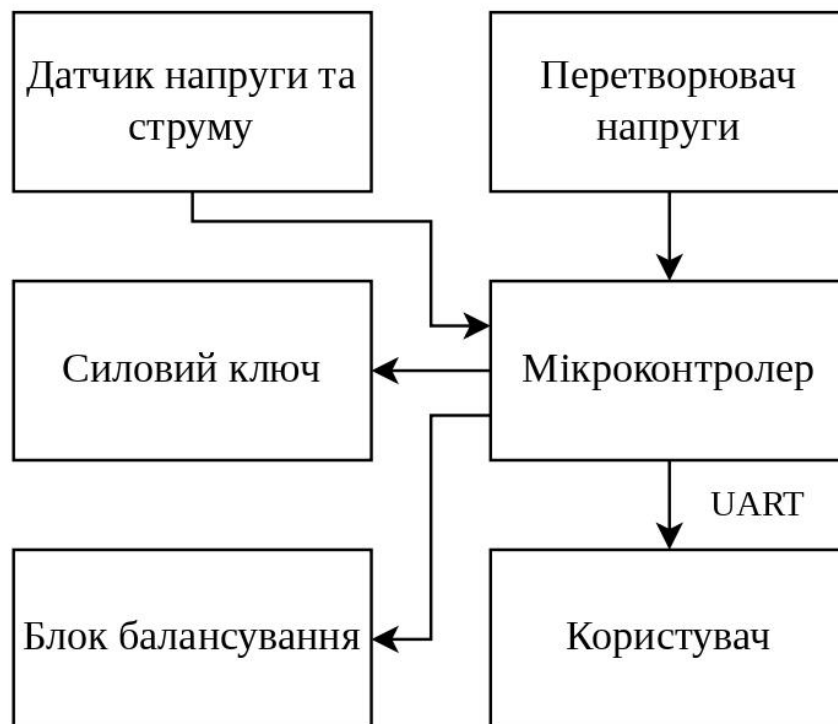


Рисунок 2.1 – Загальна структурна схема СКБ

2.2 Об'єкт керування

СКБ складається з об'єкту керування (збірки літєвих акумуляторів), системи керування, що включає блок транзисторів і блок балансування, та зворотного зв'язку (рис. 2.2).

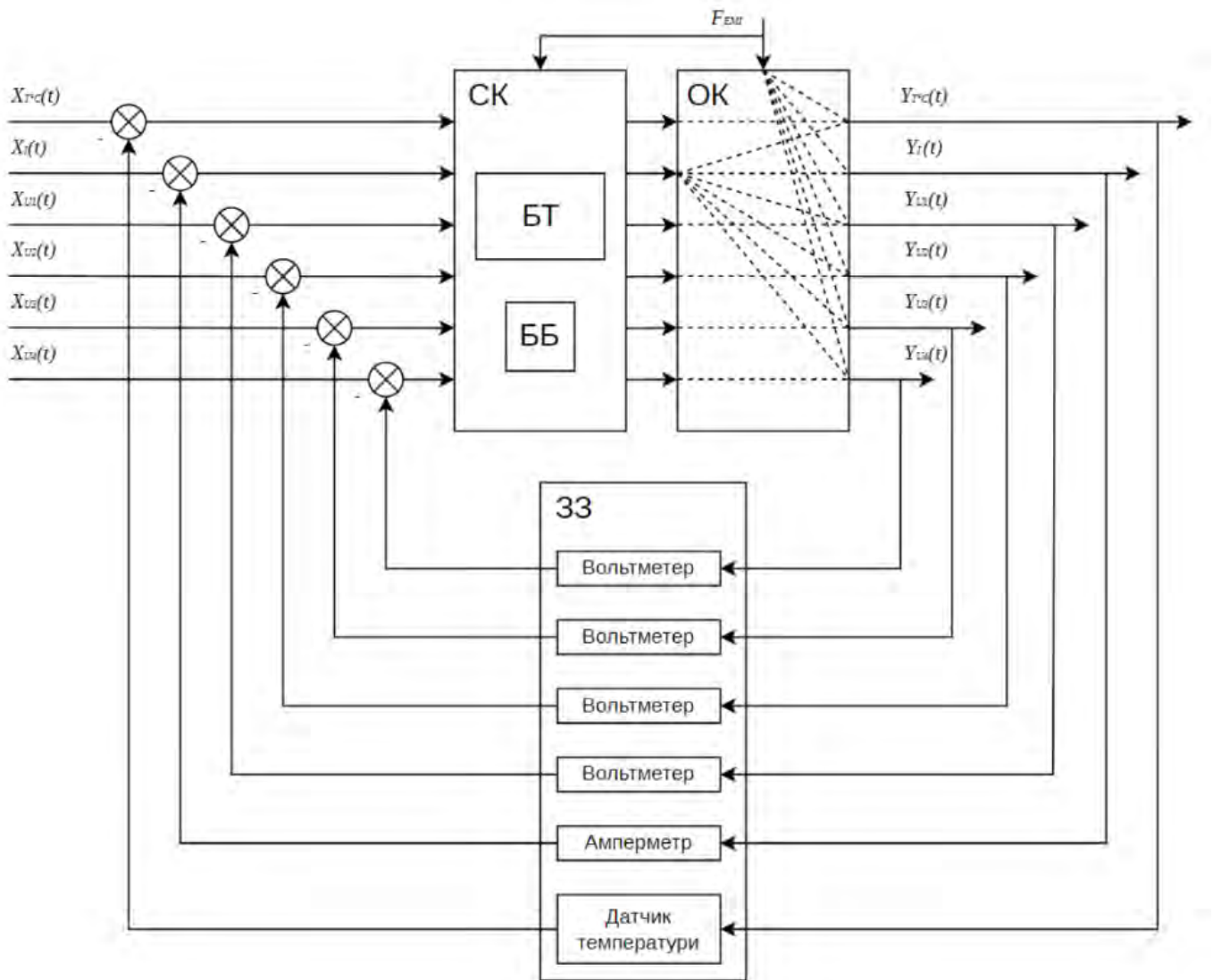


Рисунок 2.2 – Загальна структурна схема СКБ

Напруга на кожному елементі $X_{U_1} \dots X_{U_4}$, що вимірюється у вольтах, та струм X_I , що вимірюється в амперах, змінюються в часі t . Збуреннями F_{EMI} – це електромагнітне випромінювання та електричні завади, що можуть спричинити неточності при вимірюванні параметрів.

2.3 Контроль напруги елементів

Моніторинг напруги кожного елемента обов'язковий для нормальної роботи АКБ. Усі літєві акумулятори мають регламентований діапазон, де має відбуватися цикл заряду-розряду для безпечної експлуатації та забезпечення максимального ресурсу [20]. Існує декілька підвидів, залежно від їхнього хімічного складу встановлюється верхня та нижня межа, що представляють стан повного заряду та повного розряду відповідно. Якщо використовується літій-іона батарея, робоча напруга зазвичай становить від 3 до 4.2 В. Експлуатація за цими межами може призвести до незворотних процесів, що пошкодять внутрішню структуру елемента.

Для досягнення необхідних показників окремі елементи з'єднують послідовно та паралельно, щоб сформувати збірку. Паралельне з'єднання збільшує ємність та максимальний струм, який батарея може віддавати, тоді як послідовне з'єднання збільшує загальну напругу. Для забезпечення безпеки СКБ здійснює моніторинг кожного елемента в збірці, щоб не допустити надмірний заряд або розряд у тому випадку, якщо в процесі експлуатації відбувся дисбаланс. Також завдяки вимірюванню напруги з'являється можливість приблизно оцінювати залишкову ємність АКБ. Це один із найпростіших способів контролювати ступінь заряду.

Хоча напруга на одному елементі не перевищує 5 В, при послідовному з'єднанні потенціал кожного наступного елемента пропорційно зростає відносно загального нуля. Зі збільшенням напруги постає проблема її моніторингу, оскільки динамічний діапазон АЦП повинен бути достатнім, якщо вимірювання здійснюється відносно одного спільного рівня. Також для великої кількості елементів у збірці виникає необхідність гальванічної розв'язки для безпечної експлуатації. Існує декілька варіантів вирішення такої задачі.

2.3.1 Із застосуванням подільника напруги

Для невеликих збірок АКБ можливо застосувати окремі подільники напруги для кожного елемента, щоб звести всі рівні до діапазону вимірювання, що має АЦП (рис. 2.3). Такий спосіб є найпростішим у реалізації. Він дозволяє використовувати вбудовані АЦП мікроконтролерів, тому не потребує окремих мікросхем. Основним

недоліком такого методу є невелика точність та висока чутливість до завад. Нерівномірність, пов'язана з різними коефіцієнтами дільників, призводить до різної роздільної здатності при вимірюванні. На кожному наступному елементі також змінюється підключений до нього опір, що в подальшому призведе до різного розряду та створення дисбалансу. Ще одним недоліком є те, що вимірюється тільки загальна напруга, замість диференціальної. Цей метод може бути корисним лише для відносного визначення напруги, через невисоку точність, тому в традиційних СКБ не використовується.

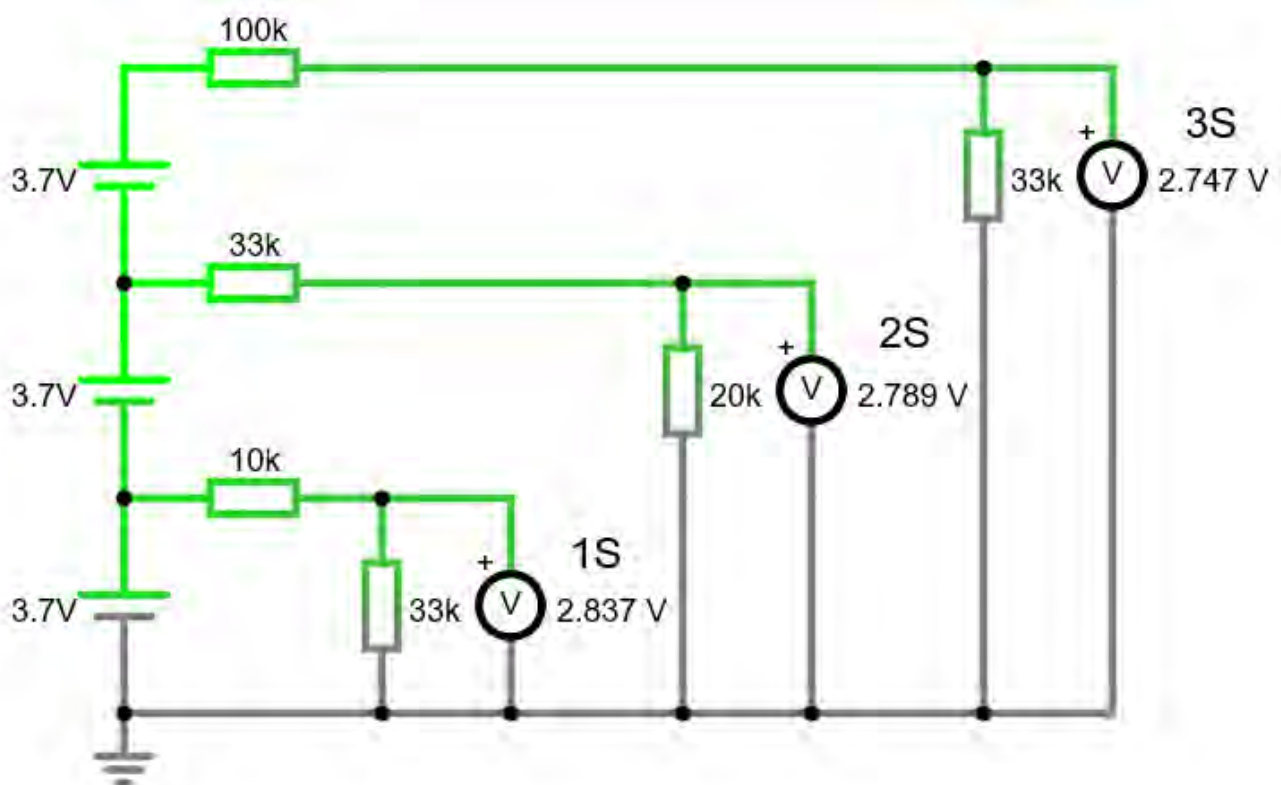


Рисунок 2.3 – Вимірювання за допомогою дільника напруги для трьох елементів

2.3.2 З використанням диференційного підсилювача

Використання індивідуальних диференціальних підсилювачів (рис. 2.4) для всіх елементів дозволяє звести рівні напруги до дійсного діапазону кожного з них, що значно полегшує подальшу обробку. Такий підхід використовує повну роздільну здатність АЦП, що залишається однаковою для всіх вимірювань. Недоліком цього методу є збільшення кількості компонентів ще до етапу обробки сигналу АЦП. Для

великої кількості елементів це може суттєво вплинути на кінцеву вартість. Використання індивідуальних диференційних підсилювачів як одного з методів моніторингу може бути аргументована лише необхідністю синхронно вимірювати напругу на кожному елементі, що не є критично важливою умовою для переважної більшості застосувань у СКБ, тому таке рішення залишається не поширеним.

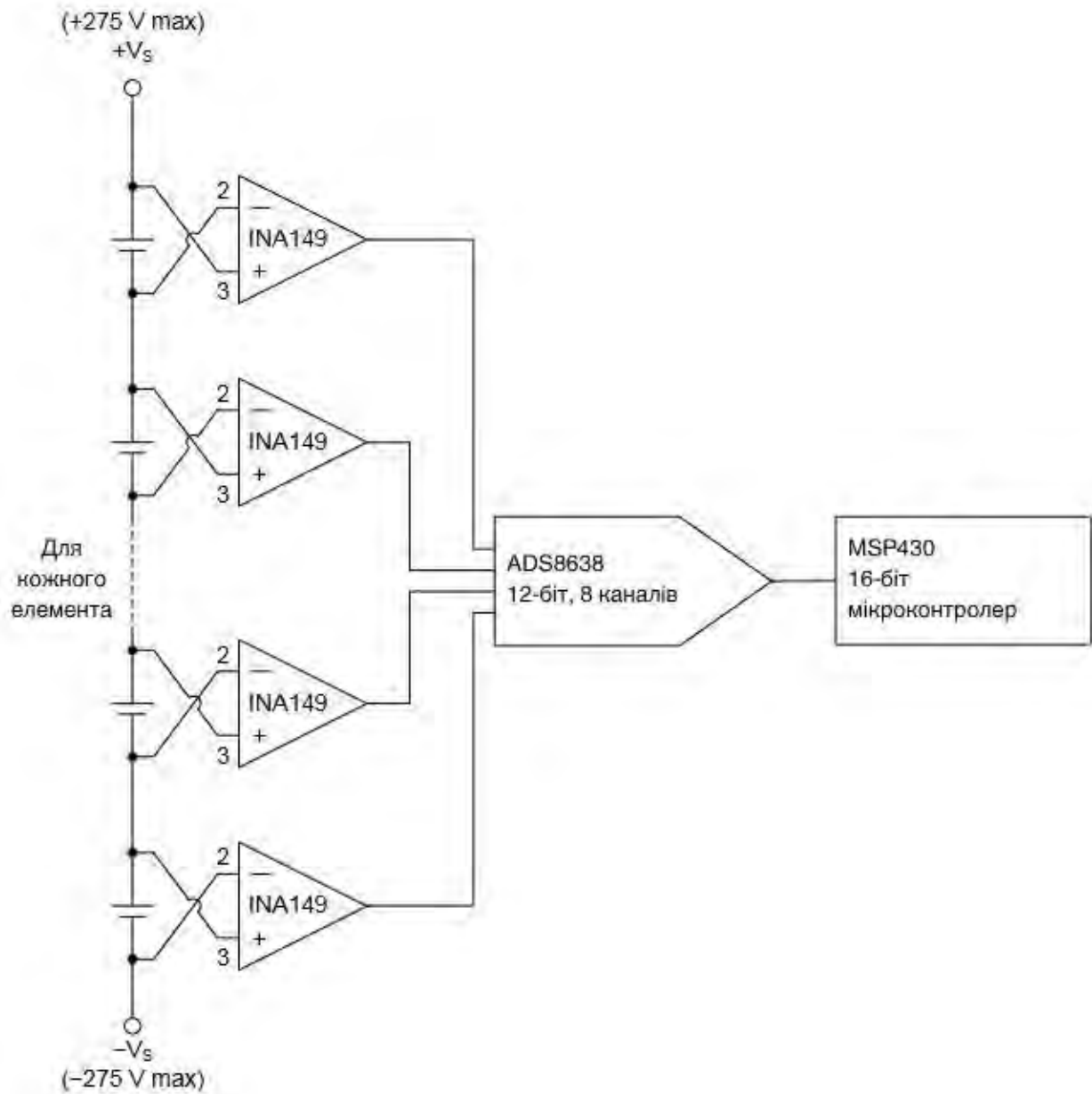


Рисунок 2.4 – Вимірювання за допомогою диференційних підсилювачів на прикладі мікросхеми INA149

2.3.3 З використанням мультиплексора

Цей спосіб дозволяє вимірювати рівень напруги кожного елементу шляхом перемикавання мультиплексора (рис. 2.5), але потребує АЦП, діапазон вимірювання

якого є достатньо великим для збірки АКБ. Використання окремих мікросхем, що поєднують ці компоненти значно спрощує загальну схему та з використанням протоколів передачі даних дозволяє легко реалізувати комунікацію з мікроконтролером. Недоліком є обмежена максимальна кількість елементів у збірці, через невеликий динамічний діапазон роботи АЦП. Ще одним мінусом є вимірювання загальної напруги а не диференційної. Як наслідок, точність при моніторингу верхніх елементів каскаду менша, ніж нижніх.

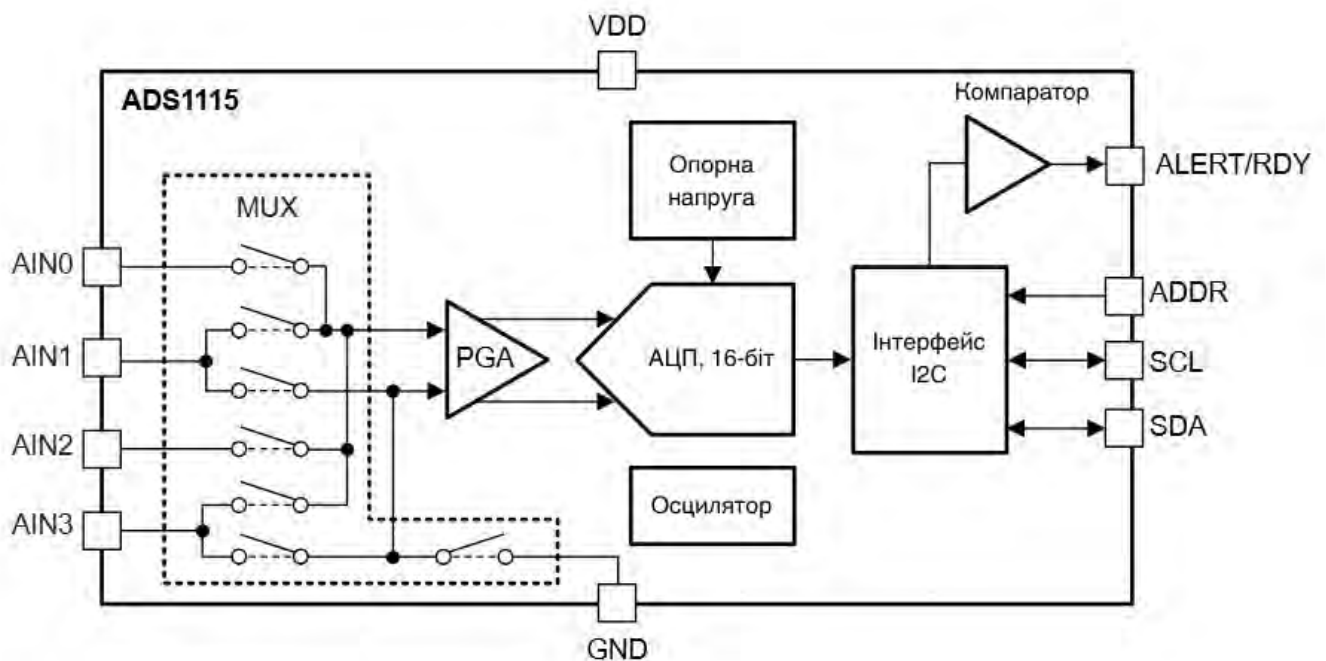


Рисунок 2.5 – Вимірювання за допомогою мультиплексора
на прикладі мікросхеми ADS1115

2.3.4 З використанням плаваючих конденсаторів

У цьому методі використовуються конденсатори, щоб тимчасово зберігати заряд з кожного елемента (рис. 2.6). Для цього за допомогою транзисторів відбувається комутація. На першому етапі конденсатори паралельно підключаються до кожного з елементів. На другому етапі цей ланцюг розривається, а натомість відбувається підключення до загального нуля. Наступним етапом є обробка сигналу з кожного елемента за допомогою АЦП. Цей спосіб контролю є доволі поширеним серед виробників мікросхем, бо вирішує одразу низку проблем при вимірюванні напруги. Недоліком є відносна складність такого рішення та необхідність

використання якісних компонентів, що можуть витримати постійне навантаження від перемикачів з високою частотою.

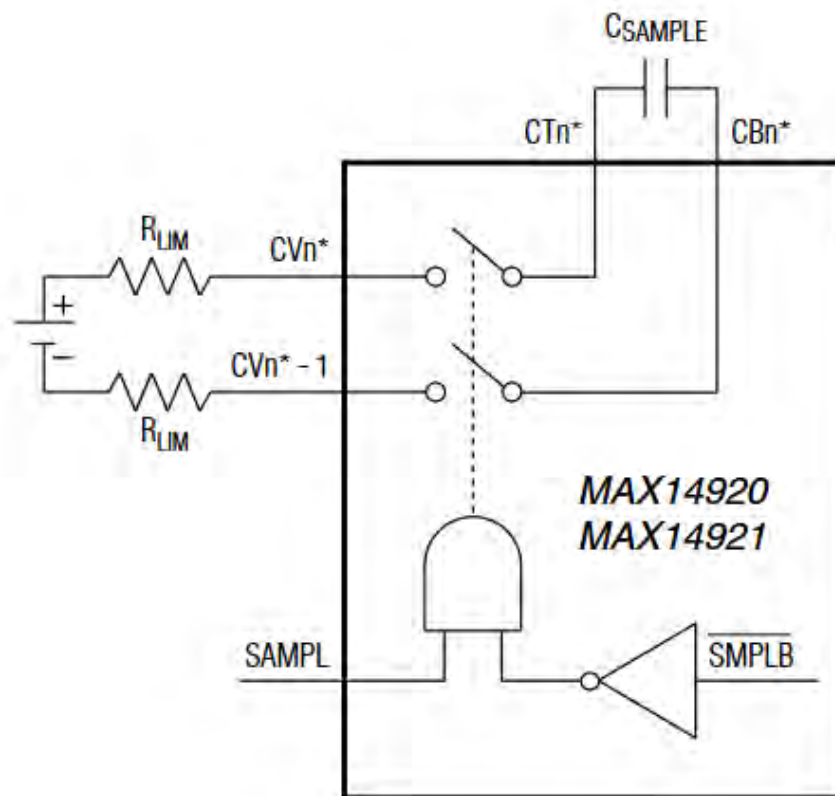


Рисунок 2.6 – Вимірювання за допомогою плаваючих конденсаторів
на прикладі мікросхеми MAX14920/14921

2.3.5 З використанням спеціалізованих мікросхем

Сучасні СКБ використовують мікросхеми, що поєднують багатоканальні мультиплексери, джерела опорної напруги, АЦП та інші вузли в одному корпусі. Такі рішення можуть додатково включати інтерфейси зв'язку з мікроконтролером та периферійними компонентами, а також інші функції, як-от балансування та керування силовими ключами. Перевагою є легка інтеграція СКБ в наявні системи з мінімальною кількістю додаткових компонентів. Цей метод зазвичай застосовується для великої кількості елементів або для систем з високим струмом, оскільки вартість впровадження модулів з багатьма додатковими функціями доволі висока порівняно з простішими рішеннями [21]. Основним недоліком є відсутність можливості змінювати параметри та загальну логіку роботи. Більшість виробників вирішують цю

проблему, створюючи декілька варіантів мікросхеми для різних діапазонів напруги, щоб задовольнити всі типи АКБ [12, 22].

2.4 Вимірювання струму

Контроль струму потрібен для роботи захисту АКБ від короткого замикання та від надмірного навантаження. У поєднанні з годинником реального часу в мікроконтролері цей вимір дозволяє точно розраховувати залишкову ємність на основі даних про заряд. Можливість вимірювати отриману кількість енергії під час кожного циклу заряду також дає змогу встановлювати рівень деградації АКБ в процесі експлуатації.

2.4.1 З використанням шунта

Застосування резистора з низьким значенням опору послідовно з АКБ є найпростішим способом (рис. 2.7). Вимірюючи напругу на шунті та враховуючи його номінал, мікроконтролер може обчислити значення сили струму. Хоча висока точність виміру потребує прецензійних резисторів та високої роздільної здатності АЦП, цей метод не піддається сильному впливу зовнішніх завад. Простий принцип роботи дозволяє регулювати точність та діапазон вимірювання, просто змінюючи номінал шунта. Недоліком такого методу є втрата частини потужності, яка виділяється в тепло на самому резисторі. Також для високої напруги необхідно додатково ізолювати контур, що її вимірює, від низьковольтної частини схеми [23].

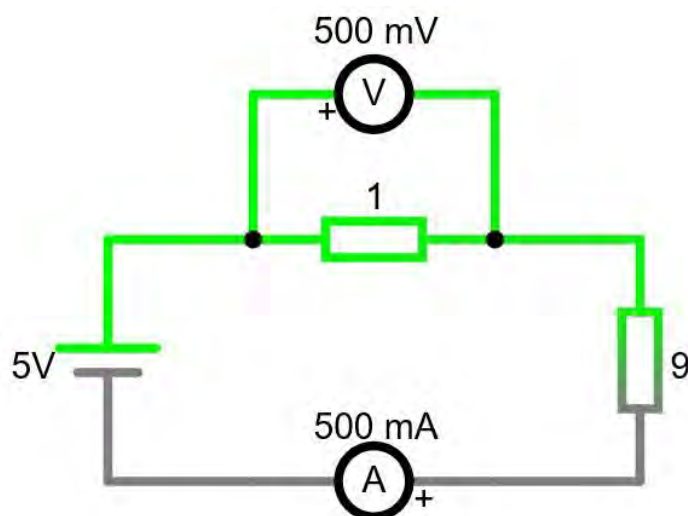


Рисунок 2.7 – Вимірювання за допомогою шунта

2.4.2 З використанням датчика ефекту Холла

Цей метод заснований на ефекті Холла. Вихідна напруга прямо пропорційна напруженості магнітного поля, що створюється струмом. Зазвичай використовуються спеціалізовані мікросхеми, що здійснюють необхідні обчислення та передають уже готові дані мікроконтролеру (рис. 2.8). Основною особливістю датчика ефекту Холла є те, що вимірювання здійснюється безконтактно. Для конфігурацій АКБ з високою напругою це дозволяє не використовувати гальванічну розв'язку. Головним недоліком є чутливість до електромагнітного випромінювання. За невеликих значень струму завади можуть сильно впливати на результати виміру [24].

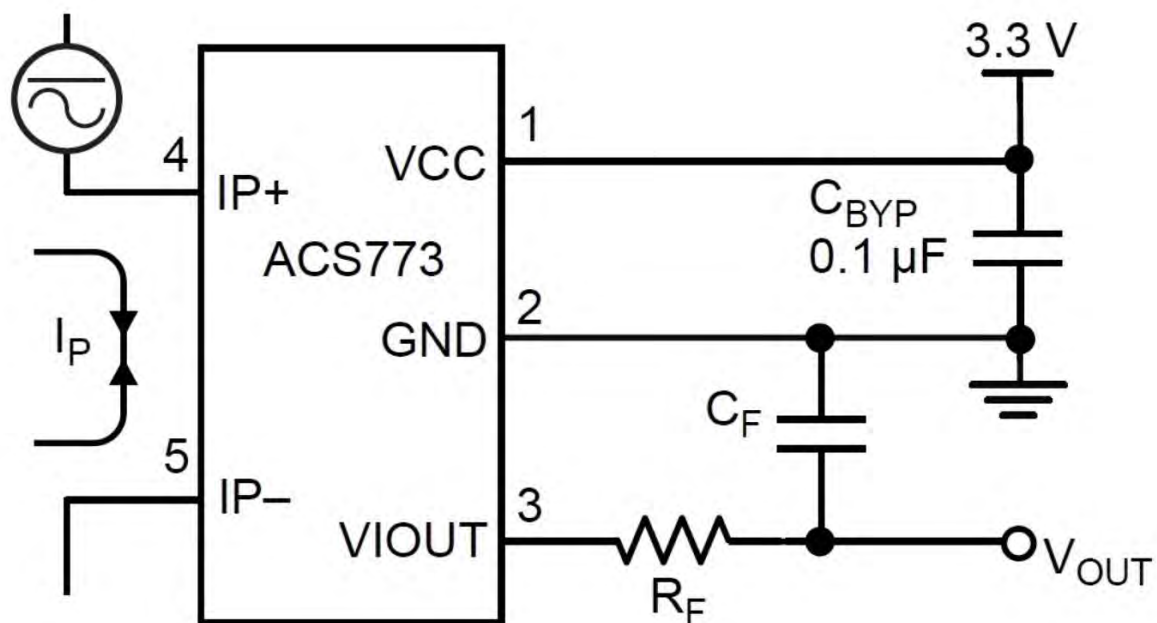


Рисунок 2.8 – Вимірювання струму за допомогою датчика Холла
на прикладі мікросхеми ACS773

2.5 Балансування елементів

На початку роботи акумуляторної збірки напруга на всіх елементах зазвичай однакова. Проте з часом різниця внутрішнього опору та інших чинників може призвести до розбалансування. Такий стан виникає, коли напруга на одному чи кількох елементах відрізняється від середньої. Ця ситуація призводить до того, що загальна ємність батареї обмежується елементом, який першим досягає кінця заряду або розряду.

2.5.1 Пасивне балансування

Цей метод є найпростішим способом позбутися дисбалансу в збірці, тому широко поширений серед виробників. Процес роботи полягає у підключенні невеликого навантаження, яким можна керувати, до окремих елементів, що дає змогу вибірково розряджати певні з них. Процес зазвичай відбувається в кінці заряду, де дисбаланс напруги найбільше виражений. На апаратному рівні такий метод реалізується за допомогою резистора малого опору та польового транзистора для керування (рис. 2.9 (а)). Основним недоліком цього способу балансування є малий струм, тому при значній розбіжності напруги процес триватиме довго. Ще однією особливістю, що ускладнює розробку такої системи без використання спеціалізованих мікросхем є формування напруги для керування транзисторами на різних рівнях каскаду.

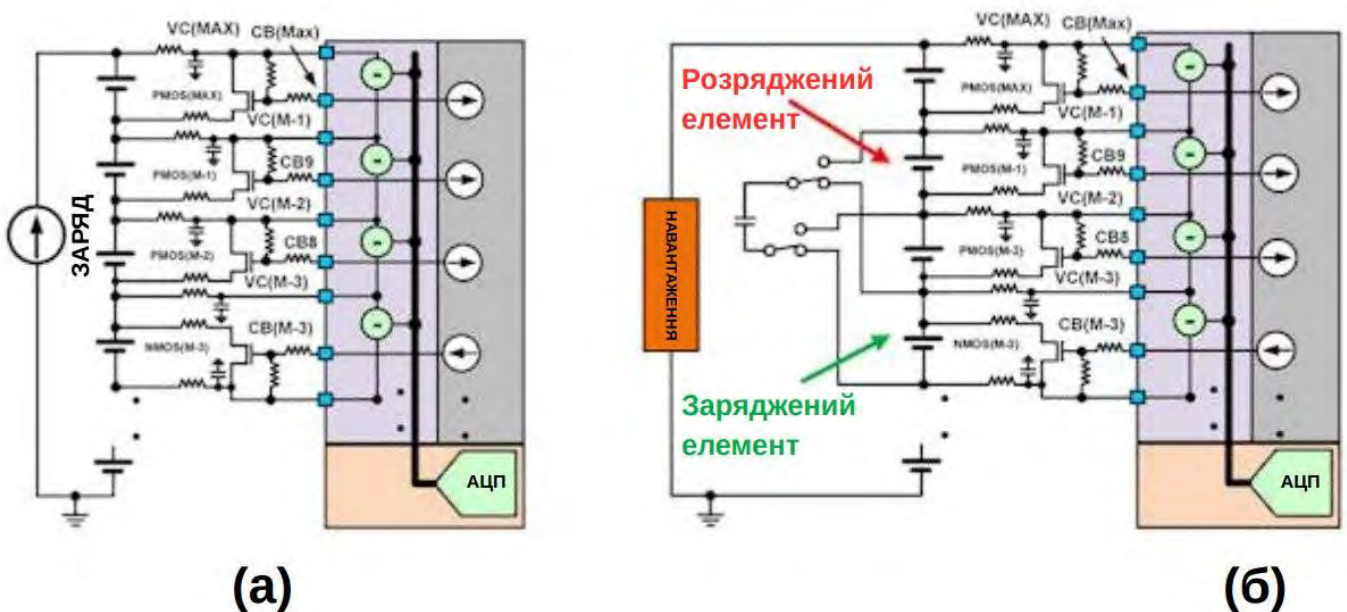


Рисунок 2.9 – Методи балансування елементів: а) схема з використанням резистора, б) схема з використанням конденсатора

2.5.2 Активне балансування з використанням конденсаторів

Цей метод дає змогу перерозподілити заряд між елементами, тобто енергія, на відміну від попереднього способу, не втрачається повністю. Принцип роботи заснований на використанні конденсаторів (рис. 2.9 (б)). На першому етапі їх заряджають елементи з вищим потенціалом. На другому – конденсатори

підключається до інших рівнів каскаду. Комутація здійснюється за допомогою польових транзисторів за схожим принципом до розглянутого раніше методу виміру напруги. Існують кілька конфігурацій підключення плаваючих конденсаторів, але базовий функціонал залишається однаковим. Основною перевагою є те, що балансування здійснюється за рахунок різниці потенціалів, тобто система не потребує зворотного зв'язку у вигляді постійного моніторингу напруги кожного з елементів. Головний недолік – це різний струм балансування при різних умовах. Якщо різниця потенціалів доволі низька, процес балансування проходитиме повільно. Також складність таких систем може негативно вплинути на надійність СКБ, через постійні перемикання з високою частотою [25].

2.5.3 Активне балансування з використанням індукторів

У цьому методі застосовується схожий принцип перерозподілу енергії. Проте заряд зберігається у вигляді магнітного поля, створеного індуктором (рис. 2.10). Завдяки цьому струм балансування високий навіть при невеликій різниці напруги.

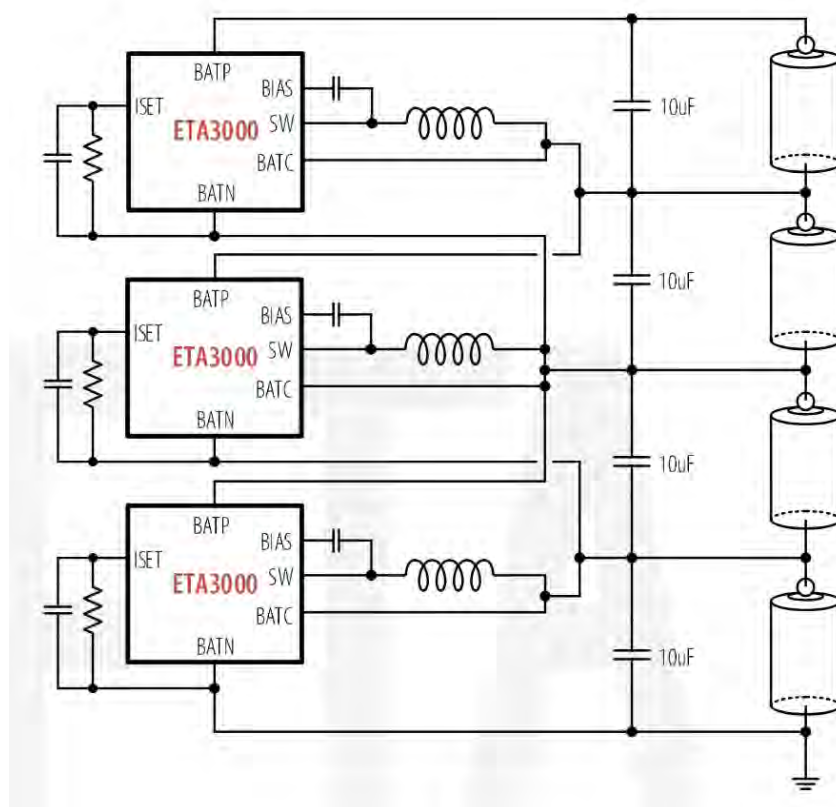


Рисунок 2.10 – Балансування за допомогою індукторів
на прикладі мікросхеми ETA3000

Комутація також здійснюється за допомогою польових транзисторів, що працюють з вищою частотою, ніж у способі з використанням конденсаторів. Перевагою цього методу є швидкість балансування, що пояснюється значно меншим часом, що потрібен на заряд індуктора. Недоліком є вищі вимоги до апаратної частини та складність реалізації інших конфігурацій топології, що з'єднують елементи різних рівнів, а не тільки сусідніх. Також варто зазначити, що більш доступні готові рішення не можуть здійснювати балансування до таких показників, як конденсаторні аналоги [26].

2.5.4 Активне балансування з використанням трансформаторів

Використовує трансформатори для перерозподілу енергії. Такий підхід дозволяє здійснювати різні варіанти комутацій між елементами або між групами та використовувати зовнішнє джерело живлення в процесі балансування (рис. 2.11). Завдяки цьому, можна досягти більшої гнучкості. Проте недоліком є великі габарити та складність такої системи, що значно обмежує потенційні сфери застосування цього способу балансування елементів.

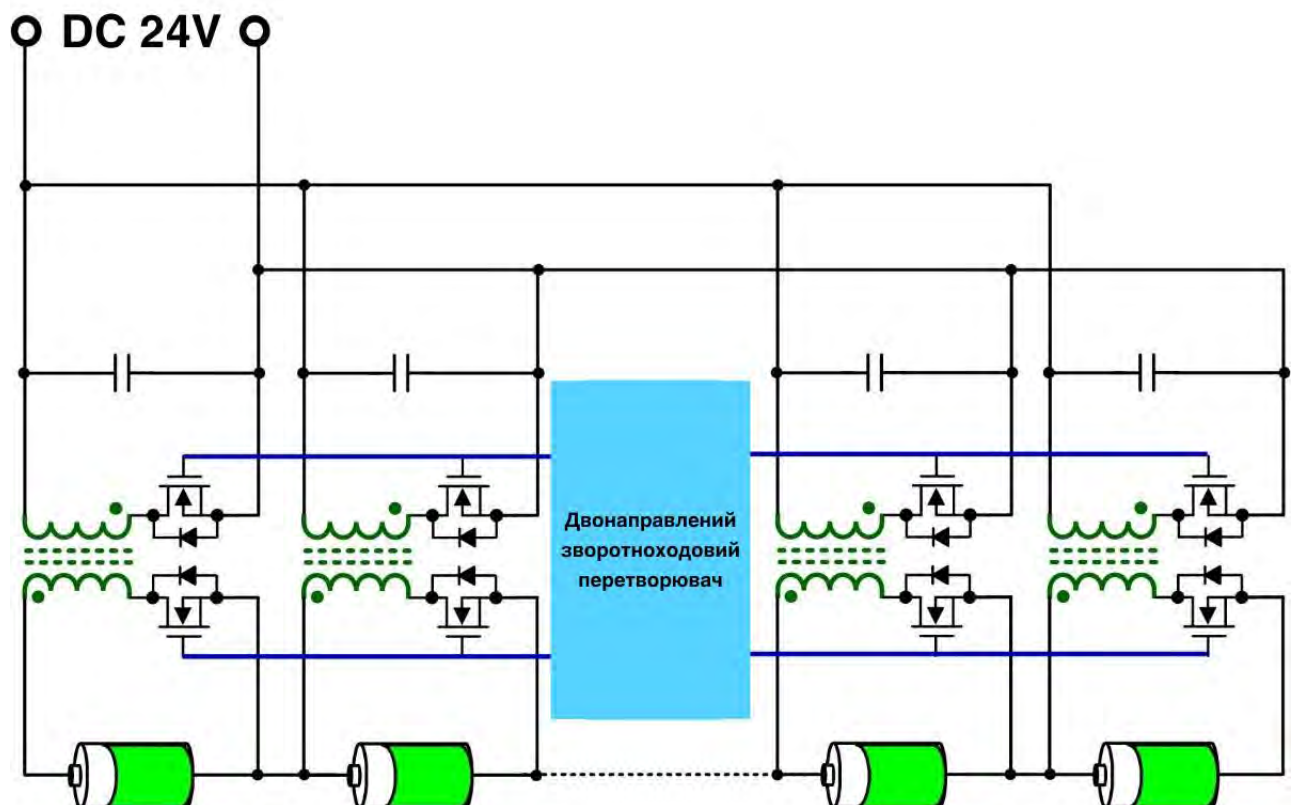


Рисунок 2.11 – Балансування за допомогою трансформатора

2.5.5 Активне балансування з використанням DC-DC перетворювачів

На відміну від інших методів, балансування елементів за допомогою імпульсних перетворювачів може перерозподіляти заряд у будь-який спосіб та в будь-якому напрямку. Це дозволяє забезпечити найбільшу гнучкість при переносі енергії [11]. Перевагами є великий струм, незалежність від різниці потенціалів та контроль над усіма параметрами балансування. Недоліком є складність реалізації таких рішень, що є найвищою серед розглянутих методів.

2.6 Вибір компонентів

На основі розглянутих методів було обрано компоненти, потрібні для розробки СКБ та впровадження всіх необхідних функцій. Основна увага приділяється доступності та низькому енергоспоживанню, оскільки система живиться від АКБ. Ключовим критерієм також є актуальність: у будові використовуються сучасні мікросхеми, що масово випускаються. Ще одним аспектом є підтримка інтерфейсів для комунікації. Це значно спрощує з'єднання компонентів. Також завдяки впровадженню таких інтерфейсів з'являється можливість легко змінювати та масштабувати систему шляхом додавання нових датчиків та модулів. Ще одним критерієм підбору елементів є тип корпусу. Завдяки невеликому формфактору мікросхем та інших компонентів можна значно зменшити загальний розмір системи. Також важливим аспектом є діапазон напруги живлення та роботи, щоб не використовувати додаткові перетворювачі.

2.6.1 Вибір мікроконтролера

Обраний мікроконтролер повинен підтримувати інтерфейси I2C та UART для здійснення комунікації між датчиками та передачі даних користувачу. Мати достатню кількість виходів та входів, невисокий рівень енергоспоживання в режимі роботи, а також сну. Форм фактор та швидкодія теж відіграють значну роль. Середовище розробки, наявність бібліотек та детальна документація є важливими для процесу написання програмного коду та налагодження. STM32G031 – це представник лінійки STM32.

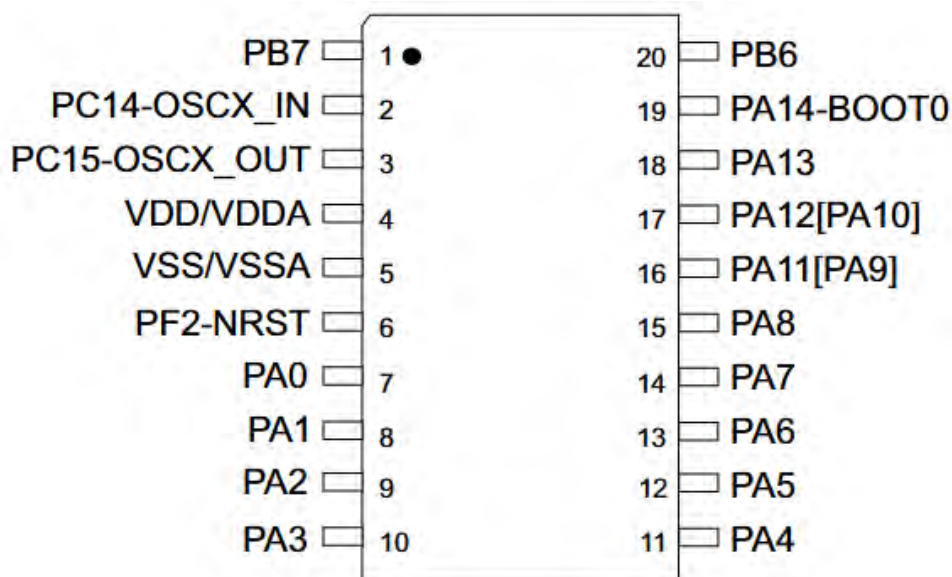


Рисунок 2.12 – STM32G031 у корпусі TSSOP20

Базується на високопродуктивному 32-бітному RISC-ядрі Cortex-M0+, що працює на частоті до 64 МГц. Завдяки високому рівню інтеграції підходить для широкого спектра застосувань у сферах споживчої електроніки, промисловості, побутової техніки, а також для використання в рішеннях IoT. Пристрої містять модуль захисту пам'яті, високошвидкісну вбудовану пам'ять (8 Кбайт SRAM та до 64 Кбайт флеш-пам'яті програм із захистом від зчитування, захистом від запису, захистом власного коду та зоною безпеки), контролер прямого доступу до пам'яті, широкий спектр системних функцій, покращені порти введення-виведення та периферії. Пропонуються стандартні комунікаційні інтерфейси (два I2C, два SPI / один I2S та два USART), один 12-бітний АЦП (2.5 мільйона вибірок на секунду) з підтримкою до 19 каналів, вбудований буфер опорної напруги, енергоефективний годинник реального часу, таймер розширеного керування ШІМ, що працює на частоті до подвійної частоти процесора, чотири 16-бітні таймери загального призначення, один 32-бітний таймер загального призначення, два низькоспоживаючі 16-бітні таймери, два сторожові таймери та системний таймер [27].

2.6.2 Вибір DC-DC перетворювача

Для забезпечення живлення використовується стабілізатор напруги. Оскільки модуль розрахований на 4 елементи, з'єднані послідовно, вхідна напруга становитиме

від 10 до 16.8 В. Висока ефективність та малий струм власного споживання є критичними, тому було обрано синхронний понижувальний перетворювач JW5017S (рис. 2.13). Він має високий коефіцієнт корисної дії (ККД) при малих навантаженнях, високу частоту роботи та вбудований плавний пуск [28].

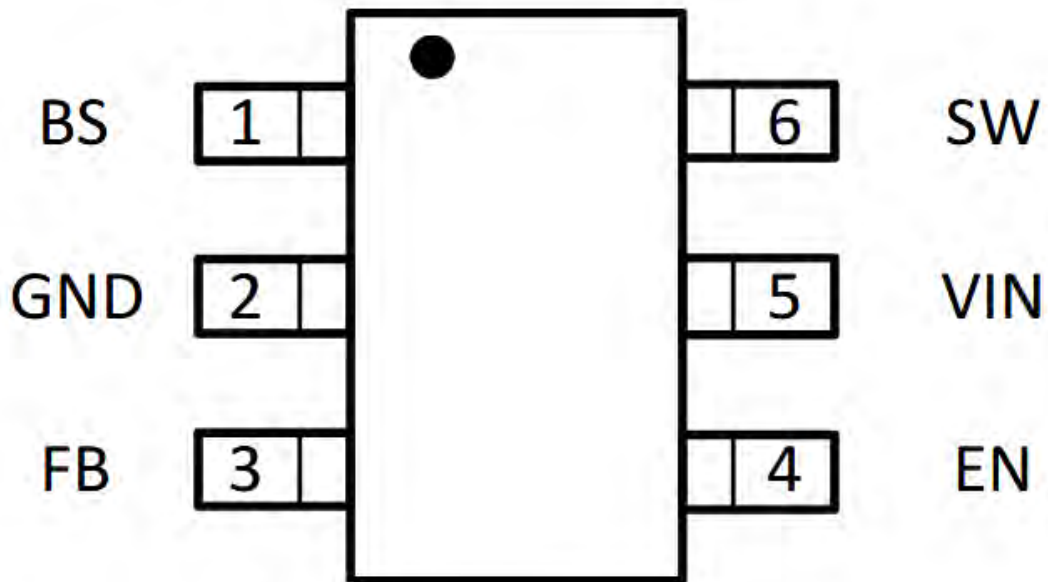


Рисунок 2.13 – JW5017S у корпусі SOT23-6

2.6.3 Вибір модуля вимірювання струму

Для розрахунку ємності та захисту від короткого замикання потрібно вимірювати струм, що проходить через АКБ. Падіння напруги на шунті складає усього кілька десятків мілівольт, тому використовується АЦП з високою роздільною. INA226 – це спеціалізована мікросхема монітору струму на шунті та потужності з I2C- або SMBUS-сумісним інтерфейсом (рис. 2.14). Пристрій контролює як падіння напруги на шунті, так і напругу шини живлення. Програмоване калібрувальне значення, час перетворення та усереднення в поєднанні з внутрішнім помножувачем дозволяють безпосередньо зчитувати значення струму в амперах та потужності в ватах.

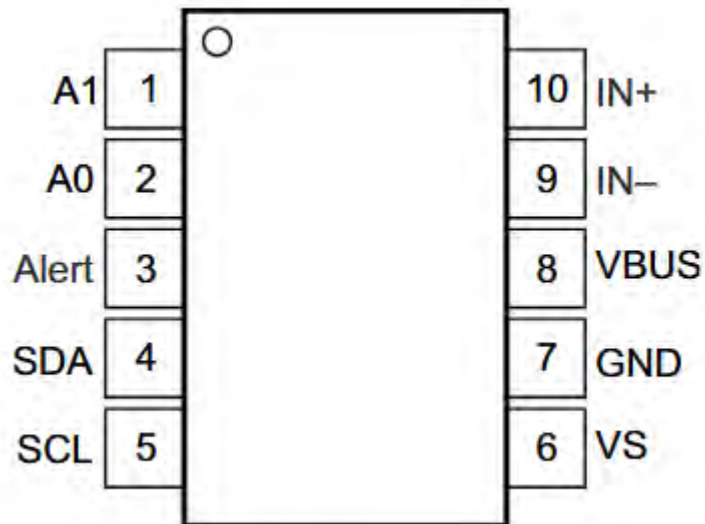


Рисунок 2.14 – INA226 у корпусі 10-Pin VSSOP

Характеристики:

- Роздільна здатність: Вбудований 16-бітний АЦП для максимальної точності вимірювань;
- Вимірювана входна напруга (шини): Від 0 В до +36 В (вимірювання незалежне від напруги живлення самого чипа);
- Власна напруга живлення: Від 2.7 В до 5.5 В;
- Точність вимірювань:
 - o Максимальна похибка підсилення: $\pm 0.1\%$;
 - o Максимальна напруга зміщення: 10 мкВ (це дозволяє використовувати дрібні та точні шунти з мінімальними втратами потужності).
- Крок вимірювання (роздільна здатність напруги):
 - o Напруга шини: 1.25 мВ на молодший розряд;
 - o Падіння напруги на шунті: 2.5 мкВ на розряд (при діапазоні шкали ± 81.92 мВ).
- Напрямок струму: Підтримка двонаправленого вимірювання струму (заряд/розряд);
- Струм споживання: Усього 330 мкА в робочому режимі;
- Додатково: Має окремий програмований вивід для миттєвого сповіщення мікроконтролера про перевищення струму чи напруги [29].

Обрана мікросхема задовольняє вимогу про точність вимірювання струму в 1%.

2.6.4 Вибір модуля вимірювання наруги елементів

Для вимірювання наруги використовується триканальний INA3221 (рис. 2.15). Мікросхема контролює три нижні елементи каскаду. Функціонал вимірювання струму не використовується, оскільки за це відповідає INA226 з вищою роздільною здатністю.

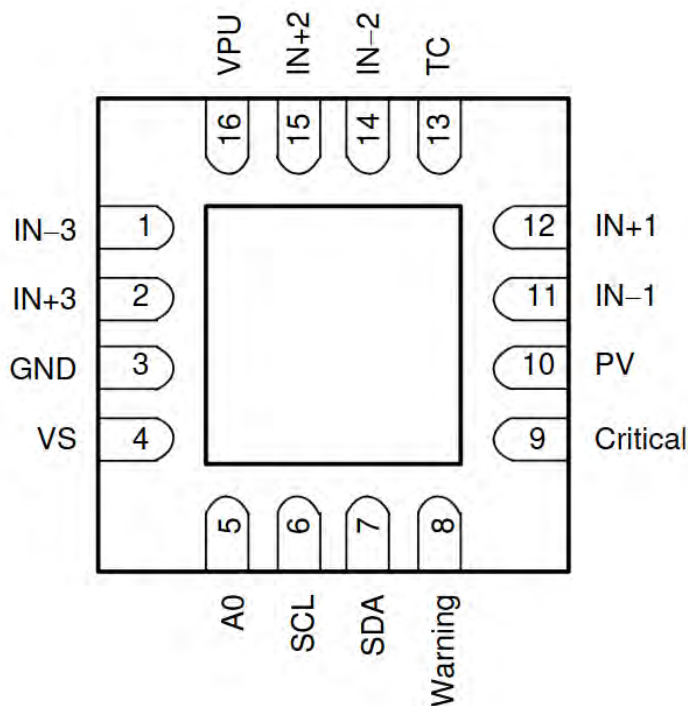


Рисунок 2.15 – INA3221 у корпусі 16-Pin VQFN

Основні характеристики:

- Роздільна здатність: Вбудований 13-бітний АЦП;
- Вимірювана вхідна наруга (шини): Від 0 В до +26 В;
- Наруга живлення: Від 2.7 В до 5.5 В;
- Точність вимірювань:
 - o Максимальна похибка підсилення: $\pm 0.25\%$;
 - o Максимальна наруга зміщення: ± 80 мкВ.
- Крок вимірювання (роздільна здатність наруги):
 - o Наруга шини: 8 мВ на молодший розряд;
 - o Падіння наруги на шунті: 40 мкВ на розряд (при повному діапазоні шкали ± 163.84 мВ).

- Напрямок струму: Підтримка двонаправленого вимірювання струму (заряд/розряд);
- Інтерфейс: I2C / SMBus із підтримкою до 4 різних адрес на одній шині (налаштовується виводом A0).

Додатково: Має кілька програмованих виводів сповіщення для моніторингу виходу параметрів за критичні межі по кожному з трьох каналів. [30]. Характеристики обраної мікросхеми задовольняють поставлену умову для точності вимірювання напруги елементів у 0,5%.

2.6.5 Вибір драйвера для балансування

Для активного балансування використовується конденсатори, що по чергово підключаються до елементів різного рівня. Для реалізації цієї комутації застосовується мікросхема EG2131, що відповідає за керування польовими транзисторами. Драйвер формує сигнали керування для напівмостової топології, на якій засноване балансування (рис. 2.16).

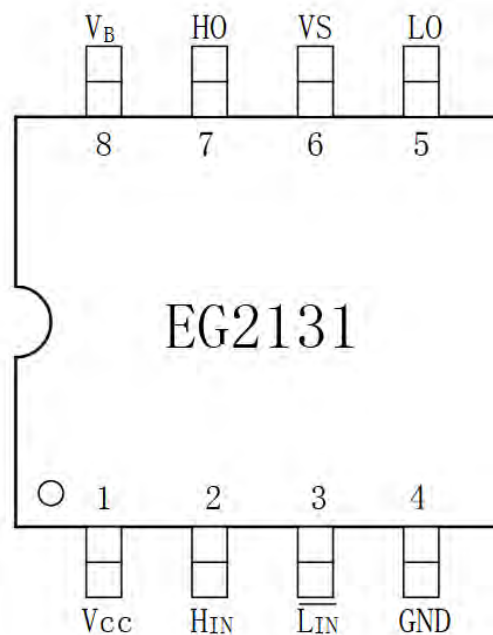


Рисунок 2.16 – EG2131 у корпусі SOIC-8

Основні параметри:

- Тип драйвера: Драйвер верхнього та нижнього плеча (напівміст);
- Тип навантаження: N-канальні польові транзистори;
- Максимальна робоча напруга: До 300 В (для верхнього плеча);

- Напруга живлення логіки: Від 11 В до 20 В;
- Вихідний струм керування: +1.0 А (джерело) / -1.5 А (споживач);
- Струм споживання: Менше 100 мкА (типово 5 мкА в режимі сну);
- Робоча температура: Від -45 °С до +125 °С;
- Тип корпусу: SOP-8 (SOIC-8) [31].

2.6.6 Вибір драйвера для керування ключами

Для керування польовими транзисторами за допомогою мікроконтролера використовується мікросхема, що формує достатню напругу на затворі та керується логічним сигналом. Драйвер польових транзисторів MAX1614 реалізує цю задачу (рис. 2.17).

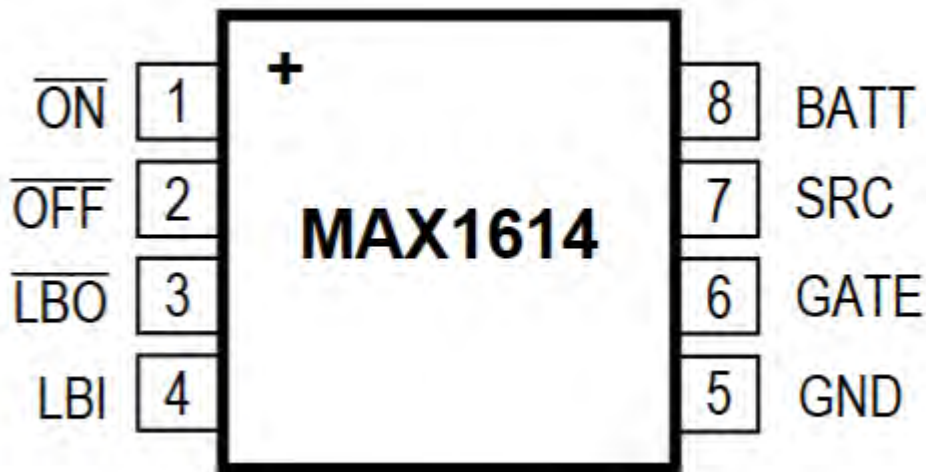


Рисунок 2.17 – MAX1614 у корпусі μMAX

Характеристики:

- Не потребує зовнішніх компонентів;
- Вбудована тригер увімкнення/вимкнення спрощує керування за допомогою кнопки;
- Детектор низького заряду батареї з точністю 1.5% захищає акумулятор та дані, збережені в пам'яті;
- Контрольоване увімкнення для забезпечення низького пускового струму
- Низьке енергоспоживання подовжує термін служби батареї;
- Максимальний струм споживання – 25 мкА;

- Максимальний струм у режимі сну – 6 мкА;
- Корпус μ MAX на 60% менший за стандартне 8-контактне рішення SO (SOIC);
- Підтримка типових вимог для портативних пристроїв із батарейним живленням;
- Діапазон входної напруги від 5 В до 26 В;
- Керування поодинокими або зустрічно-послідовними польовими транзисторами [32].

2.6.7 Вибір силових ключів

Для керування навантаженням та зарядом застосовуються польові транзистори. Вони повинні мати низький опір у відкритому стані для якомога менших втрат при високому струмі. Для більшої універсальності використовується корпус TO252. Застосовуються N-канальні транзистори AOD2144.

Основні характеристики:

- Напруга стік-витік: 40 В;
- Струм стоку при $V_{gs}=10V$: 120 А;
- Опір у відкритому стані при $V_{gs}=10V$: < 2.3 мОм (типово 1.85 мОм);
- Опір у відкритому стані при $V_{gs}=4.5V$: < 4.0 мОм (типово 2.45 мОм);
- Тип корпусу: TO-252 (DPAK) [33].

2.6.8 Вибір транзисторів для балансування

Для комутації елементів та конденсаторів, що відповідають за балансування, використовуються N-канальні польові транзистори AO3400.

Характеристики:

- Тип транзистора: N-канальний польовий транзистор;
- Тип корпусу: SOT-23;
- Максимальна напруга стік-витік: 30 В;
- Максимальна напруга затвор-витік: ± 12 В;
- Максимальний постійний струм стоку: 5.8 А (при 25°C);
- Максимальний імпульсний струм стоку: 30 А;
- Максимальна розсіювана потужність: 1.4 Вт (при 25°C);

- Порогова напруга затвору: 0.65 ... 1.45 В (типова 1.05 В);
- Опір у відкритому стані при $V_{gs}=10V$: < 28 мОм (типовий 18 мОм);
- Опір у відкритому стані при $V_{gs}=4.5V$: < 33 мОм (типовий 19 мОм);
- Опір у відкритому стані при $V_{gs}=2.5V$: < 52 мОм (типовий 24 мОм);
- Повний заряд затвору (Q_g) при $V_{gs}=4.5V$: 7 нКл;
- Робоча температура (T_j): від -55 до +150 °C.

Висновки до розділу 2

У розділі було розглянуто методи реалізації основних функцій СКБ. На прикладі спеціалізованих мікросхем, що застосовуються в комерційних рішеннях, були проілюстровані принципи роботи. Проаналізовано плюси та мінуси різних методів реалізації базових функцій СКБ. Більшість розглянутих рішень використовується в різних конфігураціях для вирішення конкретних задач. У розділі було визначено основні функціональні частини виробу та обрано відповідні електронні елементи для їхньої реалізації. Основними критеріями вибору під час розробки були максимальна гнучкість для налаштування та доступність. Ще одним фактором є використання інтерфейсів для комунікації з мікросхемами. Завдяки цьому вдалося зменшити кількість задіяних виходів мікроконтролера та спростити подальше трасування плати. Оскільки кількість елементів, на які розрахована СКБ, складає 4, використання спеціалізованих аналогових інтерфейсів, що розраховані на 12 або більше, є недоцільним. Натомість застосовується мікросхема, що має АЦП з достатнім динамічним діапазоном для вимірювання напруги на трьох перших елементах збірки. Для вимірювання струму потрібно використовувати окремий підсилювач або зовнішній АЦП, тому використовується ще один модуль. Також ця мікросхема вимірює напругу на четвертому елементі. Такий набір датчиків дозволяє контролювати необхідні показники без використання АЦП мікроконтролера та значно спрощує комунікацію, завдяки використанню інтерфейсу I2C. Недоліком такої конфігурації є вимірювання загальної напруги, замість диференціальної. Проте висока точність АЦП і невелика кількість елементів у збірці дозволяють значно зменшити вплив на кінцеві результати. Для керування ключами використовується

драйвер, що створює напругу для подачі на затвори польових транзисторів. Мікроконтролер напряду керує цією мікросхемою без використання додаткових перетворень логічного сигналу. Використання окремої мікросхеми значно спрощує загальну структуру та дозволяє керувати транзисторами в зустрічно-послідовній конфігурації. Для реалізації активного балансування використовується напівмостовий драйвер, що відповідає за здійснення комутації між конденсаторами та елементами збірки. Саме ця мікросхема відповідає за почергове ввімкнення польових транзисторів верхнього та нижнього плеча, а також запобігає моменту, коли транзистори обох рівнів були б відкриті одночасно. Драйвер керується сигналом з мікроконтролера. За результатами було створену структурну схему та обрано компоненти для подальших етапів розробки.

3. ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИН СИСТЕМИ

У третьому розділі розглянуто практичну реалізацію системи автоматизованого керування зарядом і захистом акумуляторних батарей. Наведено розробку електричної принципової схеми, описано процес проєктування прототипу системи та розробку алгоритму роботи програмного забезпечення.

3.1 Розробка електричної принципової схеми системи

3.1.1 Електрична схема підключення мікроконтролера

Для стабільної роботи мікроконтролер потребує фільтрації живлення. Для цього використовуються два конденсатори з номіналами 4,7 мкФ та 100 нФ, згідно з документацією виробника (рис. 3.1). Для забезпечення постійної тактової частоти роботи процесора застосовується зовнішній кварцовий кристал з частотою 8 МГц.

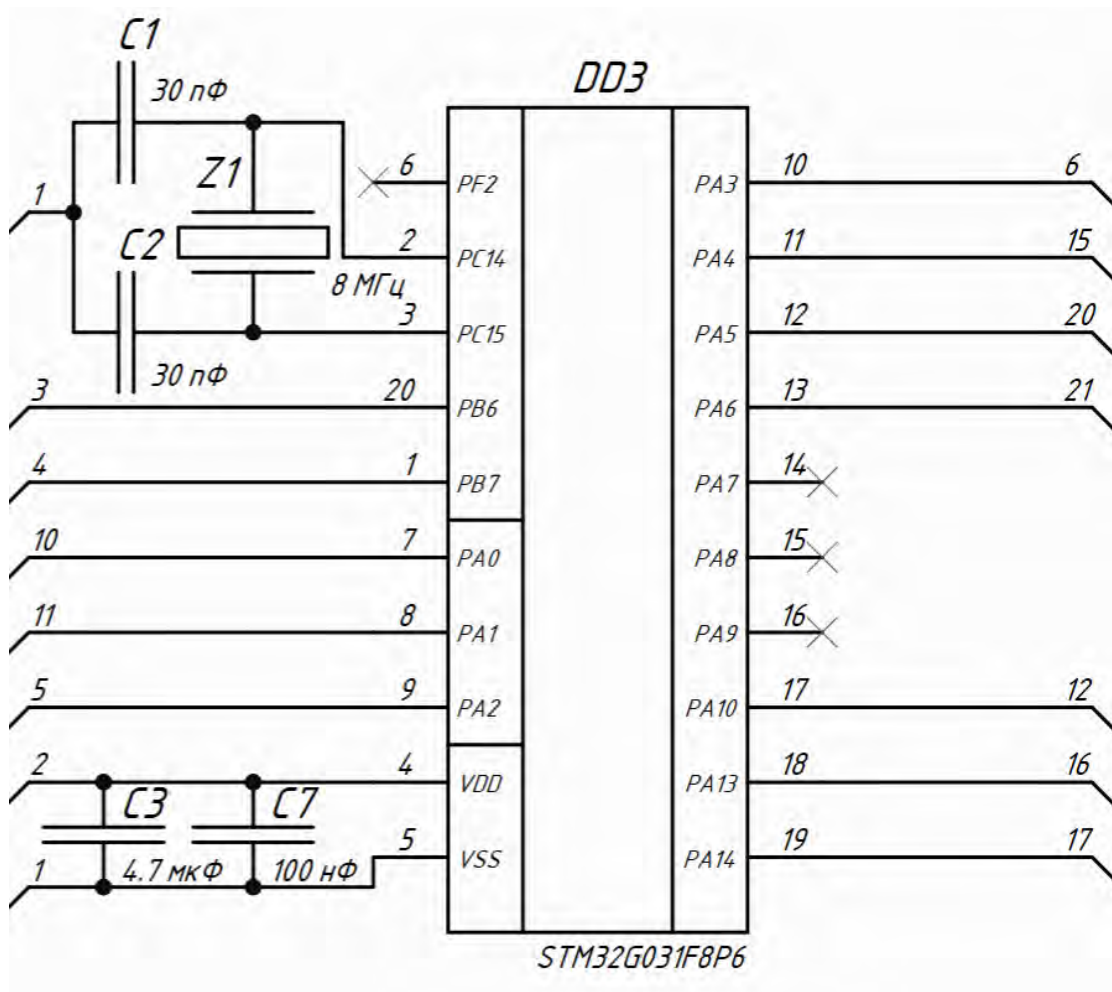


Рисунок 3.1 – Електрична принципова схема підключення мікроконтролера

Розрахунок номіналів конденсаторів для навантаження кристала. Для цього від ємності, вказаної у специфікації, віднімаємо ємність доріжок, яка зазвичай складає 2-5 пФ та множимо на 2 за формулою (3.1).

$$CL = 2 \cdot (C_{load} - C_{stray}) = 2 \cdot (20 - 5) = 30 \text{ пФ} \quad (3.1)$$

Для індикації поточного стану передбачено два світлодіоди, підключені до виходів мікроконтролера (рис. 3.2).

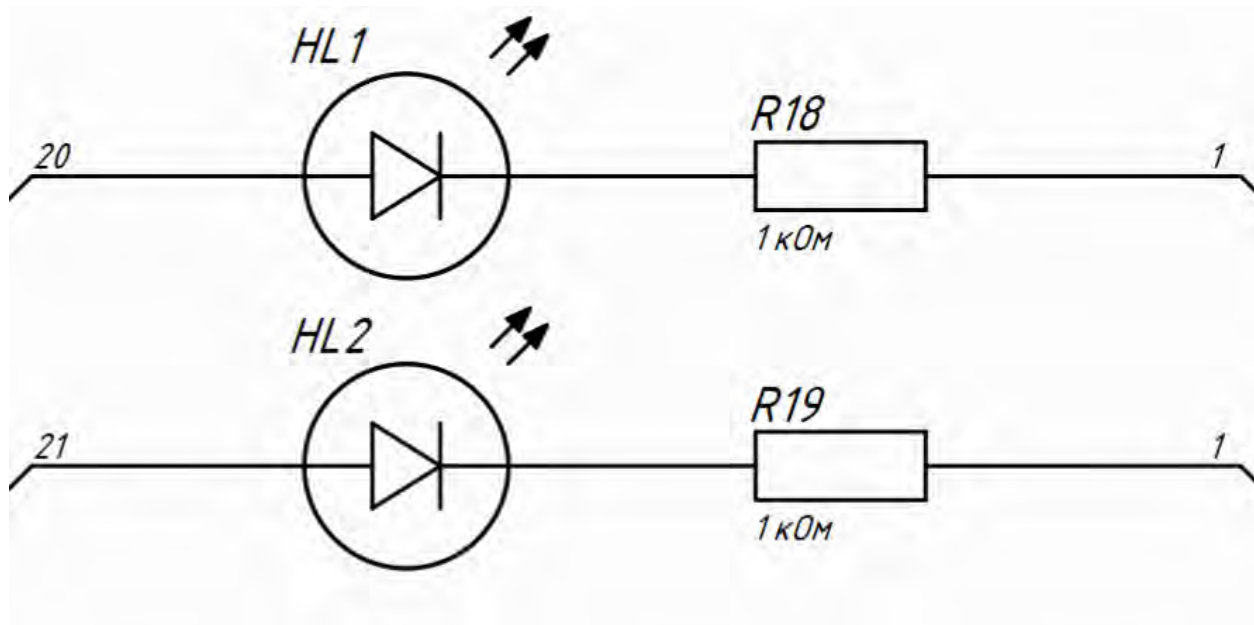


Рисунок 3.2 – Підключення світлодіодів

Для обмеження потужності світлодіодів послідовно підключені резистори. Опір величиною 1 кОм при напрузі в 3,3 В установить струм у колі, що розраховується за формулою (3.2).

$$I = \frac{3.3}{1000} = 3.3 \text{ мА} \quad (3.2)$$

3.1.2 Електрична схема DC-DC перетворювача

Діапазон напруги АКБ становить приблизно 10 – 16.8 В. Для забезпечення живлення компонентів створено лінію 3.3 В. Для цього використовується синхронний стабілізатор напруги JW5017S. Номінали додаткових компонентів для реалізації взято, згідно з прикладом застосування в технічній документації. Електричну принципову схему зображено на рисунку 3.3.

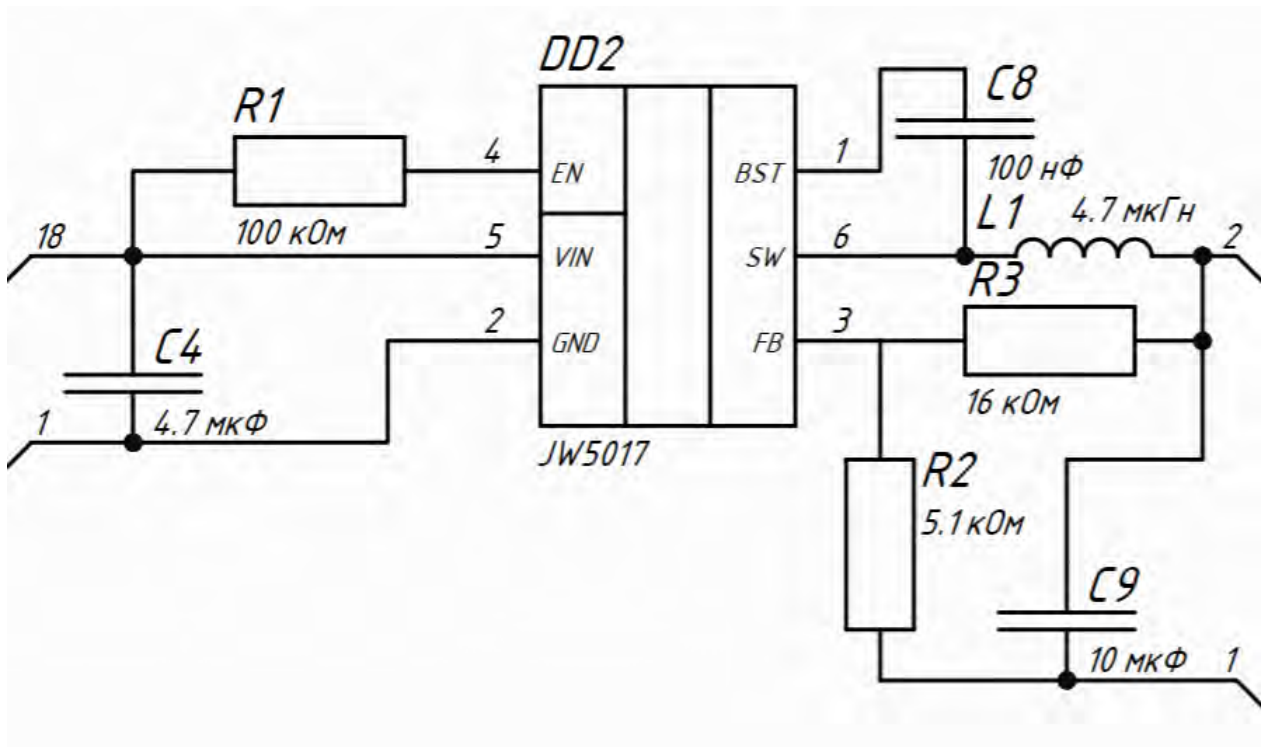


Рисунок 3.3 – Електрична принципова схема підключення мікроконтролера

Розрахунок подільника напруги для зворотного зв'язку. Вихідна напруга задається резистором. Розраховується за формулою (3.3).

$$V_{FB} = V_{OUT} \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) \quad (3.3)$$

Опір резистора $R_{\text{верх}}$, згідно з рекомендаціями виробника, потрібен бути близько 10 кОм. Для розрахунку за формулою (3.4) взято значення 16 кОм.

$$R_3 = R_2 \cdot \left(\frac{V_{OUT}}{0.8} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Виражаємо R_2 за формулою (3.5). Напруга зворотного зв'язку $V_{FB} = 0,8$ В.

$$R_2 = \frac{R_3}{\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1} = \frac{16000}{\frac{3,3}{0,8} - 1} = 5,12 \text{ кОм} \quad (3.5)$$

Найближче стандартне значення 5,1 кОм.

Розмах пульсацій струму дроселя, згідно з документацією, слід розрахувати на рівні 30% від максимального вихідного струму за формулою (3.6).

$$\Delta I_L = 1,2 \cdot 0,3 = 0,36 \text{ А} \quad (3.6)$$

Частота роботи становить 1,2 МГц, вхідну напругу можна прийняти, як номінальну для АКБ з 4 елементами 14.8 В, тоді індуктивність розраховується за формулою (3.7).

$$L = \frac{V_{OUT}}{f_s \cdot \Delta I_L} \cdot \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) = \frac{3,3}{1,2 \cdot 10^6 \cdot 0,36} \cdot \left(1 - \frac{3,3}{14,8}\right) = 5,9 \text{ мкГн} \quad (3.7)$$

Стандартне значення індуктивності, відповідно до рекомендацій виробника, слід округлити до 4,7 мкГн.

Ємність вхідного та вихідного конденсатора взято з документації виробника. На вході використано керамічний конденсатор номіналом 4.7 мкФ для зменшення пульсацій, на виході – 10 мкФ.

3.1.3 Електрична схема датчика вимірювання напруги

Для моніторингу напруги елементів застосовується INA3221. Функціонал вимірювання напруги на шунтах не використовується, тому елементи підключені до обох входів мікросхеми на кожному з трьох каналів (рис. 3.4).

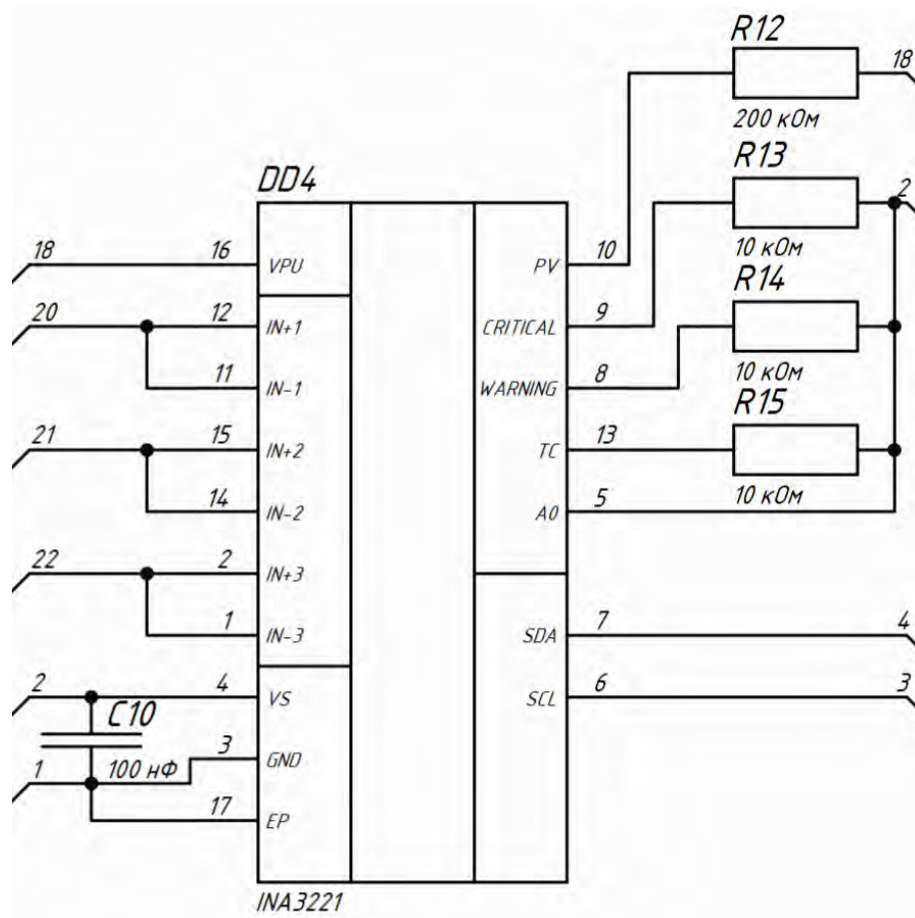


Рисунок 3.4 – Електрична принципова схема підключення INA3221

3.1.4 Розрахунок параметрів шунта

The schematic diagram illustrates the internal circuitry of the INA226 module. The central component is the INA226 chip, which has several pins connected to external components and module pins. The connections are as follows:

- Pin 10 (Vin+):** Connected to a series of five 5 MΩ resistors (R4, R5, R6, R7, R8) connected to pin 25.
- Pin 9 (Vin-):** Connected to pin 18.
- Pin 8 (VBUS):** Connected to pin 2.
- Pin 6 (VS):** Connected to pin 1.
- Pin 7 (GND):** Connected to pin 1.
- Pin 1 (A1):** Connected to pin 12.
- Pin 2 (A0):** Connected to pin 2.
- Pin 3 (Alert):** Connected to pin 4.
- Pin 4 (SDA):** Connected to pin 3.
- Pin 5 (SCL):** Connected to pin 2.

Additional components include a 100 nF capacitor (C11) connected between pins 6 and 7, and four 10 kΩ resistors (R9, R10, R11) connected between pins 12 and 2, 4 and 3, and 2 and 3 respectively.

Рисунок 3.5 – Електрична принципова схема датчика струму

Використовується 5 резисторів номіналом 5 мОм та потужністю 2 Вт, що з'єднані паралельно. Опір розраховується за формулою (3.8).

$$R_{\text{шунт}} = \frac{0,005}{5} = 0,001 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

Максимальний струм, який може виміряти мікросхема розраховується за формулою (3.9):

$$I_{\text{MAX}} = \frac{0,08192}{R_{\text{шунт}}} = \frac{0,08192}{0,001} = 81,92 \text{ А} \quad (3.9)$$

Максимальний струм, який можна виміряти, складатиме ± 81.9 А. При 40 А на шунті виділяється потужність, що розраховується за формулою (3.10).

$$P_{\text{шунт}} = I^2 \cdot R_{\text{шунт}} = 40^2 \cdot 0.001 = 1.6 \text{ Вт} \quad (3.10)$$

При номінальному навантаженні в 40 А обрані резистори зможуть розсіювати тепло, що виділяється. У конфігурації з таким шунтом роздільну здатність вимірювання струму можна розрахувати за формулою (3.11).

$$LSB_I = \frac{I_{\text{MAX}}}{2^{15}} = \frac{81.92}{32768} = 2,5 \text{ мА} \quad (3.11)$$

Додатково на схемі показані резистори для підтягування напруги для функціонування шини I2C та виходу тривоги.

3.1.5 Силові ключі та їхній драйвер

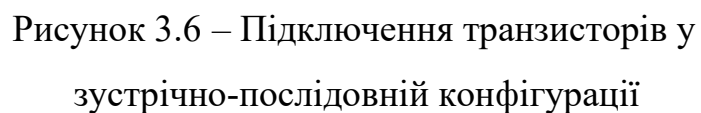
Для повного блокування протікання струму в обох напрямках польові транзистори встановлені в зустрічно-послідовній конфігурації [34]. Вбудований діод може пропускати струм, навіть якщо ключ повністю закритий, тому, щоб уникнути небезпеки перевищення струму під час заряду або розряду, використовується така топологія. Опір транзистора AOD2144 у відкритому стані $R_{DS(ON)} = 2,3$ мОм. У контурі послідовно об'єднано дві ланки. Кожна складається з 5 паралельно з'єднаних ключів. Опір контуру обчислюється за формулою (3.12).

$$R_{\text{тр}} = \frac{R_{DS(ON)}}{5} + \frac{R_{DS(ON)}}{5} = \frac{2 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3}}{5} = 0.92 \text{ мОм} \quad (3.12)$$

Потужність, що втрачається при 40 А, розраховується за формулою (3.13).

$$P_{\text{тр}} = I^2 \cdot R_{\text{тр}} = 40^2 \cdot 0.92 \cdot 10^{-3} = 1.47 \text{ Вт} \quad (3.13)$$

Загальний вигляд контуру зображено на рисунку 3.6.



Для керування напруга на затворі транзистора повинна бути вища, ніж на стоці. За це відповідає драйвер MAX1614 (рис. 3.7). Він живиться від вхідної напруги АКБ та створює на виході $V_{gs}=8$ В. Завдяки цьому транзисторами можна керувати за допомогою сигналу з мікроконтролера.

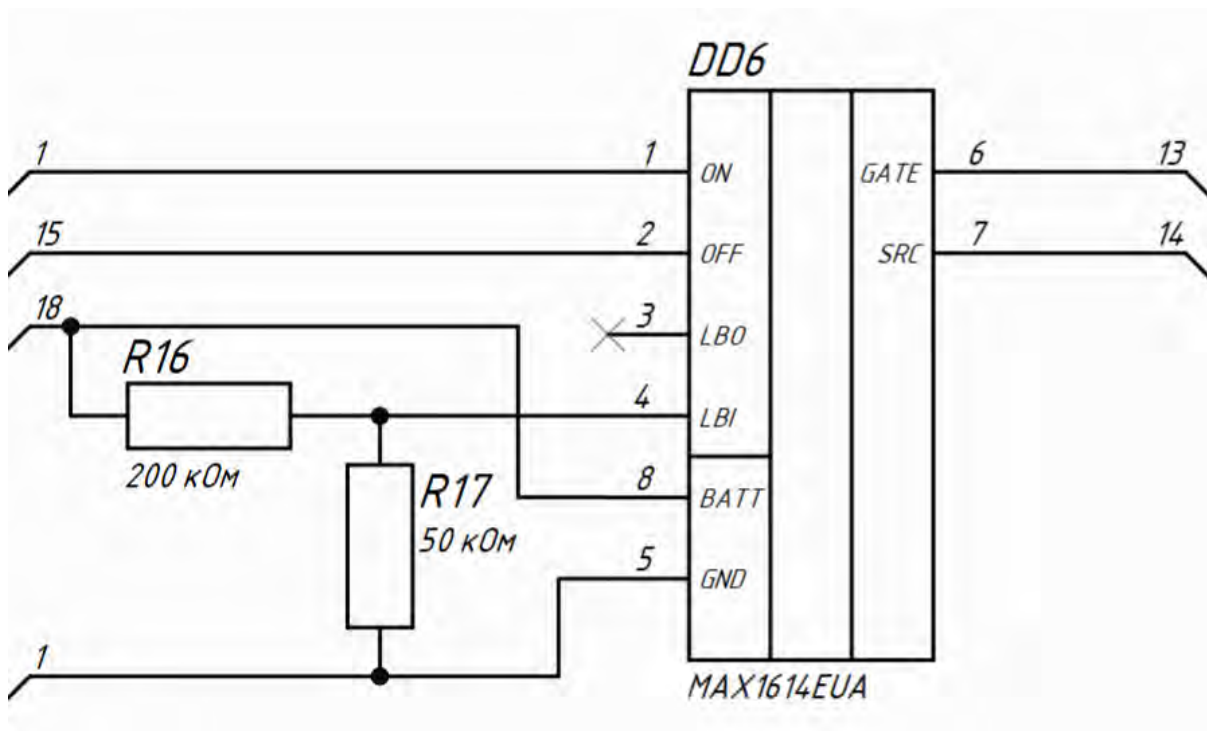


Рисунок 3.7 – Підключення транзисторів у зустрічно-послідовній конфігурації

3.1.6 Блок балансування

Активне балансування реалізовано на основі драйвера EG2131 (рис. 3.8).

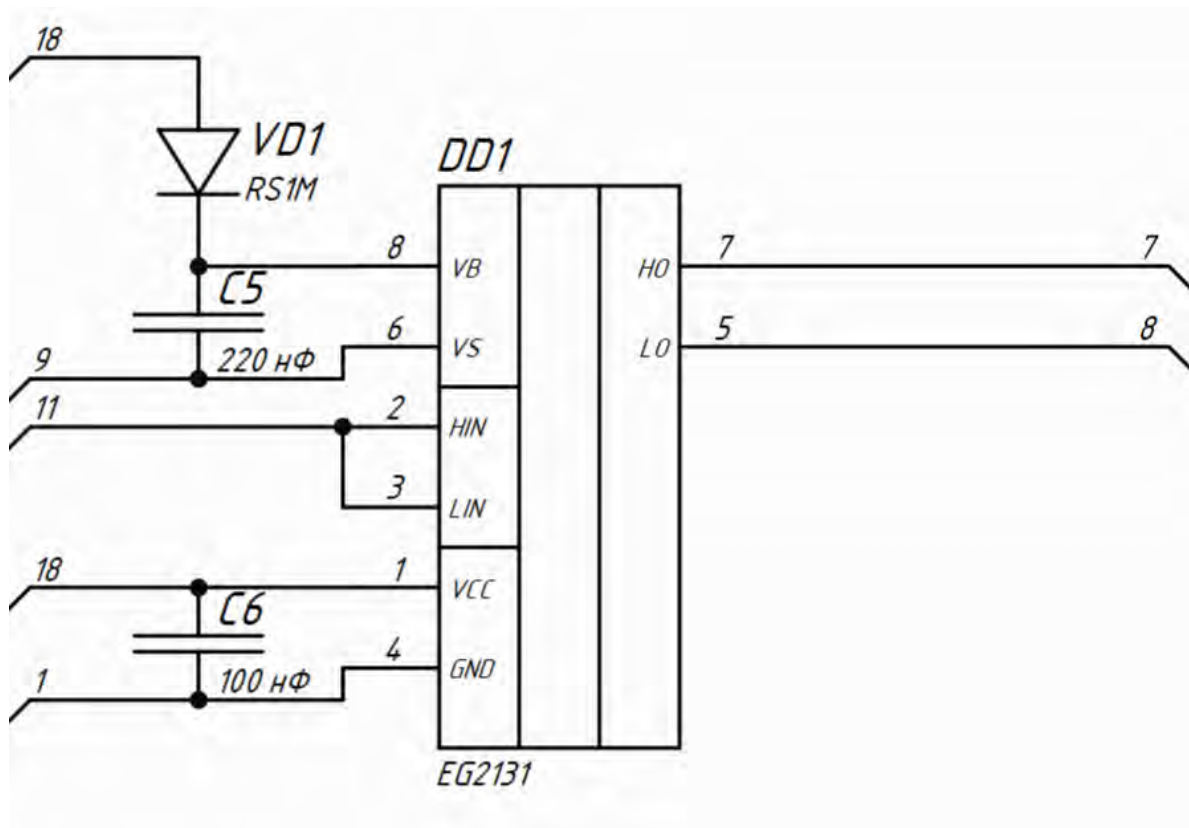


Рисунок 3.8 – Підключення драйвера EG2131

Заряд тимчасово зберігається в танталових конденсаторах, після здійснення комутації перерозподіляється між елементами (рис. 3.9).

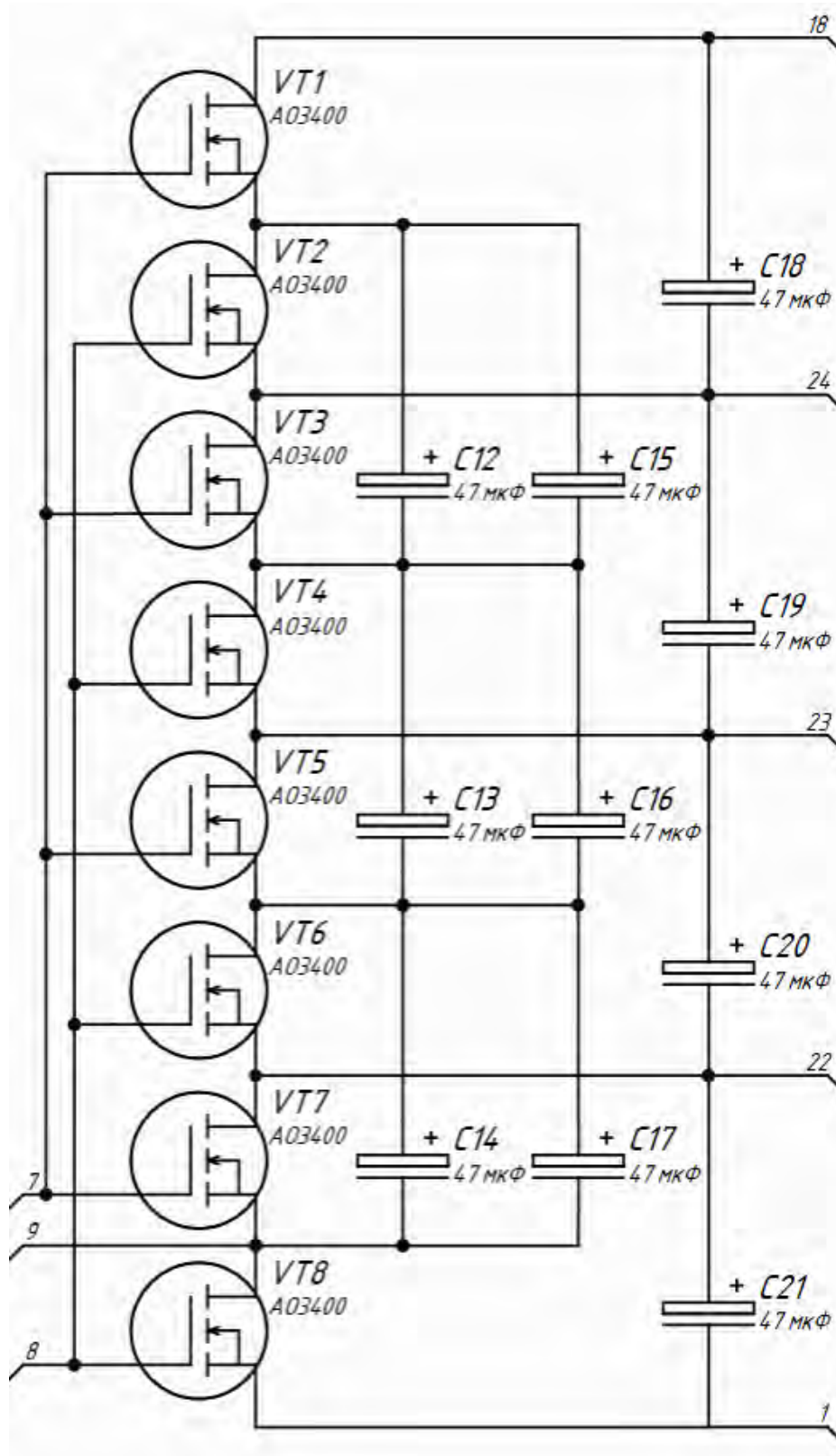


Рисунок 3.9 – Електрична принципова схема
блока активного балансування

Транзистори АО3400 здійснюють комутацію, по чергово підключаючи конденсатори до елементів різних рівнів каскаду. Додатково для роботи мікросхеми використовується підтягувальна ланка. Під час роботи нижнього плеча схеми конденсатор $C5$ заряджається. Коли на наступному етапі вмикається верхнє плече, напруга з конденсатора подається на затвори транзисторів відносно середньої точки (їхнього стоку).

Для оптимального балансування конденсатори повинні повністю заряджатися між циклами переключення верхнього та нижнього плеча. Період заряду – це час, необхідний для накопичення електричної енергії на пластинах. Для його розрахунку потрібно обчислити опір ланцюга. Еквівалентний послідовний опір обраних конденсаторів $ESR = 0,4$ Ом. У схемі використовується два паралельно з'єднанні конденсатори в кожному ланцюгу балансування. Спільний опір обчислюється за формулою (3.14).

$$R_{\text{конд}} = \frac{ESR}{2} = \frac{0,4}{2} = 0,2 \text{ Ом} \quad (3.14)$$

Опір транзистора АО3400 у відкритому стані складає $R_{DS(ON)} = 0,028$ Ом. Загальний опір розраховується за формулою (3.15).

$$R_{\text{ланц}} = R_{\text{конд}} + R_{DS(ON)} = 0,2 + 0,028 = 0,228 \text{ Ом} \quad (3.15)$$

Ємність конденсатора становить $C_{\text{конд}} = 47$ мкФ. Загальна ємність двох паралельно з'єднаних обчислюється за формулою (3.16).

$$C_{\text{ланц}} = 47 \cdot 10^{-6} + 47 \cdot 10^{-6} = 94 \text{ мкФ} \quad (3.16)$$

Період заряду контуру розраховується за формулою (3.17).

$$\tau = R_{\text{ланц}} \cdot C_{\text{ланц}} = 0,228 \cdot 94 \cdot 10^{-6} = 2,14 \cdot 10^{-5} \text{ с} \quad (3.17)$$

Для повного заряду контуру необхідно 5τ , тоді загальний час заряду обчислюється за формулою (3.18).

$$t_{\text{заряду}} = 5\tau = 5 \cdot 2,14 \cdot 10^{-5} = 1,07 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (3.18)$$

Частота роботи драйвера для здійснення балансування розраховується за формулою (3.19).

$$f = \frac{1}{t_{\text{заряду}}} = \frac{1}{1,07 \cdot 10^{-4}} = 9345 \text{ Гц} \quad (3.19)$$

Інші додаткові пасивні компоненти було обрано згідно з рекомендаціями, наведеними в технічній документації виробника.

3.2 Проєктування та виготовлення прототипу системи

3.2.1 Розробка першого прототипу на основі STM32C011F6P6

Перший прототип СКБ був заснований на мікроконтролері STM32C011F6P6 (рис. 3.10). Додатково були підключені зовнішній кварцовий резонатор для стабільної тактової частоти процесора та конденсатори для фільтрації живлення. Цей мікроконтролер має корпус та розташування виводів, що збігається з тим, який застосований в актуальній версії. Проте перший прототип мав недостатній обсяг пам'яті для реалізації усіх функцій. Завдяки зміні мікроконтролера, вдалося розширити можливості для програмування та легко інтегрувати його у вже створену електричну принципову схему.

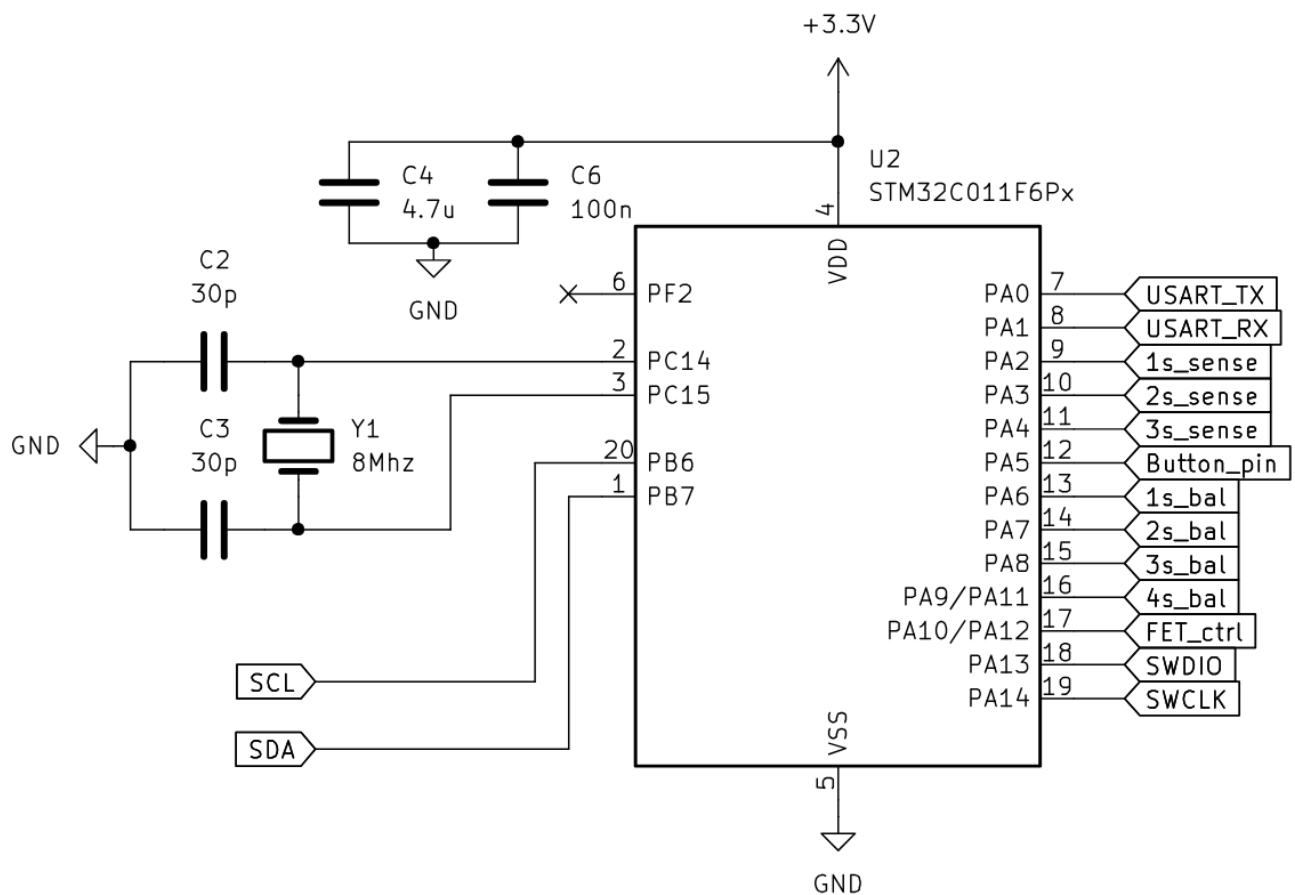


Рисунок 3.10 – Електрична принципова схема підключення STM32C011F6P6

Вимірювання напруги на перших трьох елементах збірки здійснювалося на основі вбудованого АЦП та простих подільників напруги (рис. 3.11). Коефіцієнти пропорційно збільшуються для вищих рівнів каскаду, тому похибка при вимірюванні третього елементу стає доволі суттєвою. Це впливає і на інші вузли. При вимірюванні загальної напруги мікросхемою INA226 точність розрахунку диференціальної напруги на четвертому елементі значно зменшується. Через це точний контроль заряду та балансування стає неможливим.

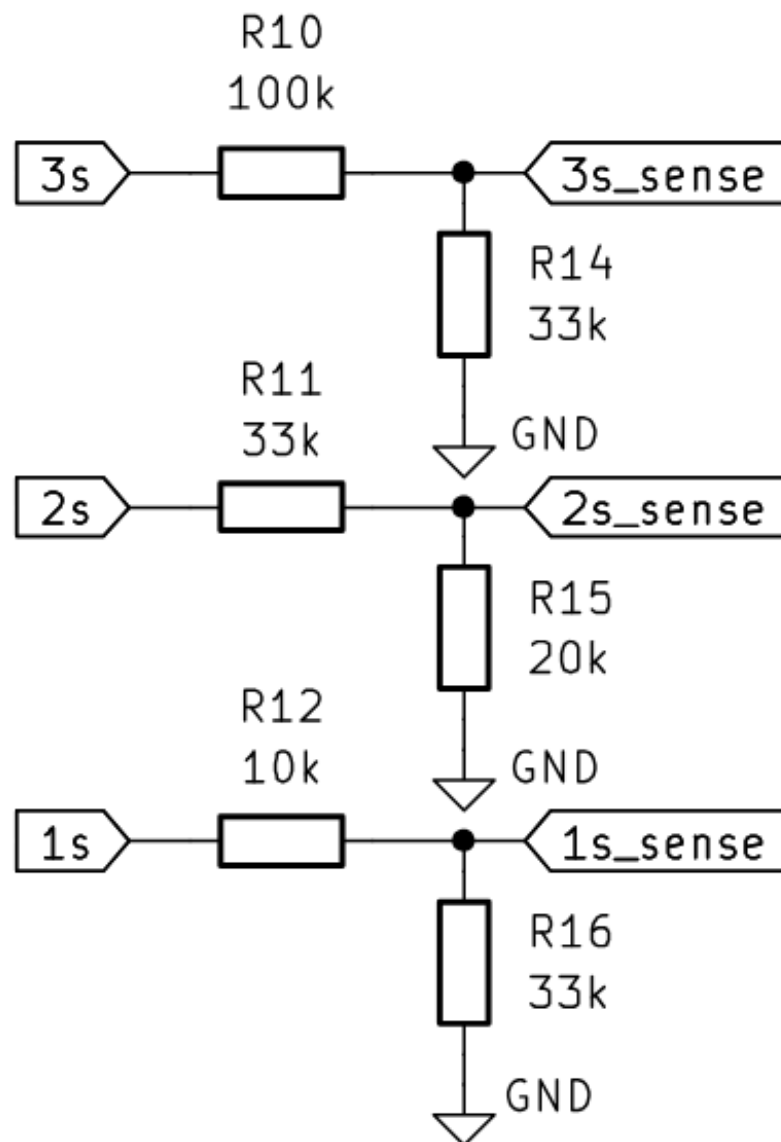


Рисунок 3.11 – Подільники напруги для контролю елементів

Для вимірювання струму використовувалася мікросхема INA226. Також вона відповідала за контроль напруги четвертого елемента. Параметри шунта та додаткові

елементи збігаються з актуальною версією, але в першому прототипі резистори були розташовані на мінусовому виводі (рис. 3.12).

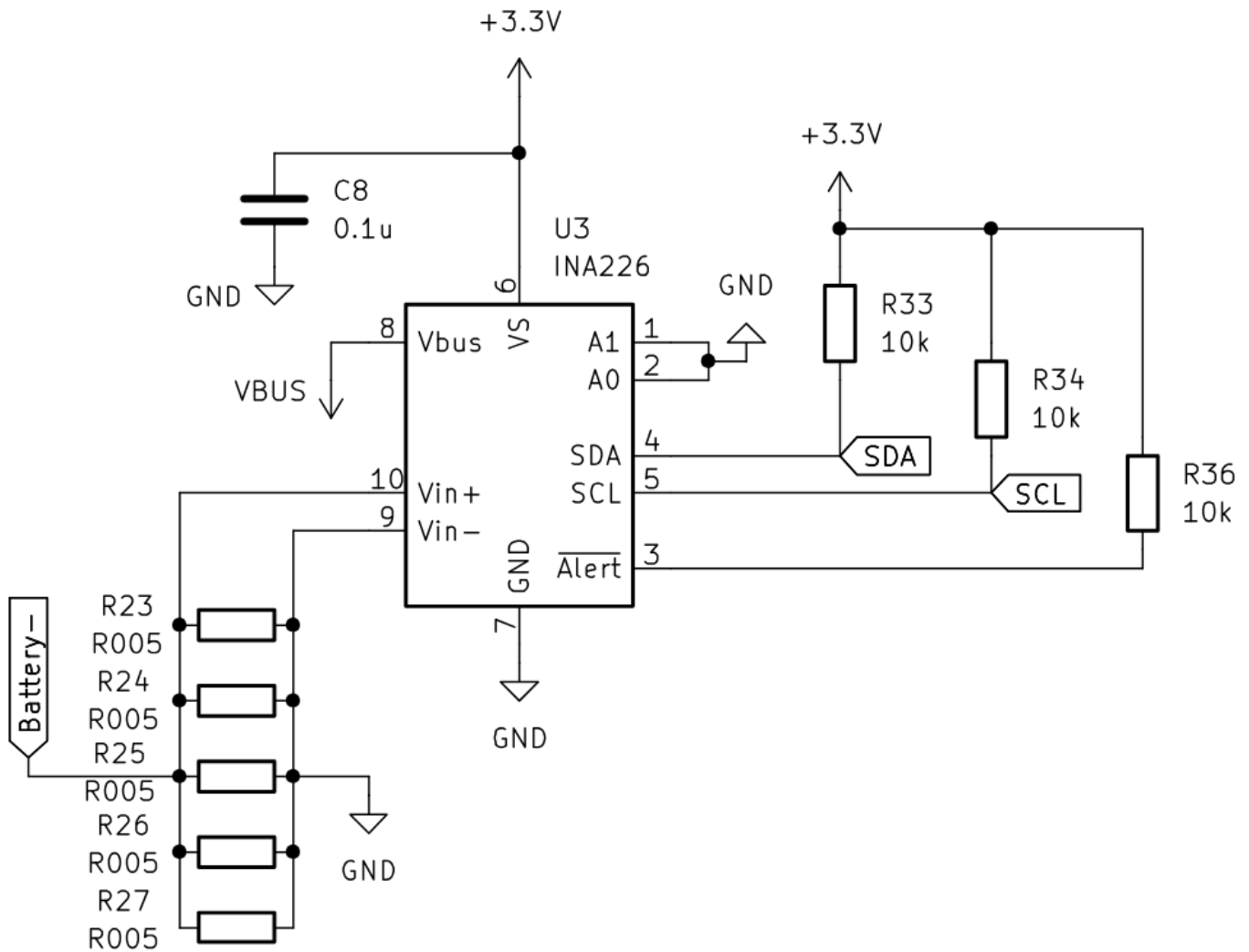


Рисунок 3.12 – Електрична принципова схема датчику напруги та струму

Конфігурація DC-DC перетворювача залишилася ідентичною у фінальній розробці. Балансування здійснювалося за допомогою пасивного методу розсіювання надлишкового заряду в тепло (рис. 3.13). Розряд відбувався через резистори номіналом 47 Ом, що підключалися польовими транзисторами до кожного елемента. Основним недоліком цього методу є втрата загальної ефективності АКБ, через те що частина енергії під час заряду витрачалася. Також такий спосіб балансування базується на точності вимірювання напруги на елементах, тому може бути менш точним, ніж інші конфігурації, при сильному відхиленні від реальних показників.

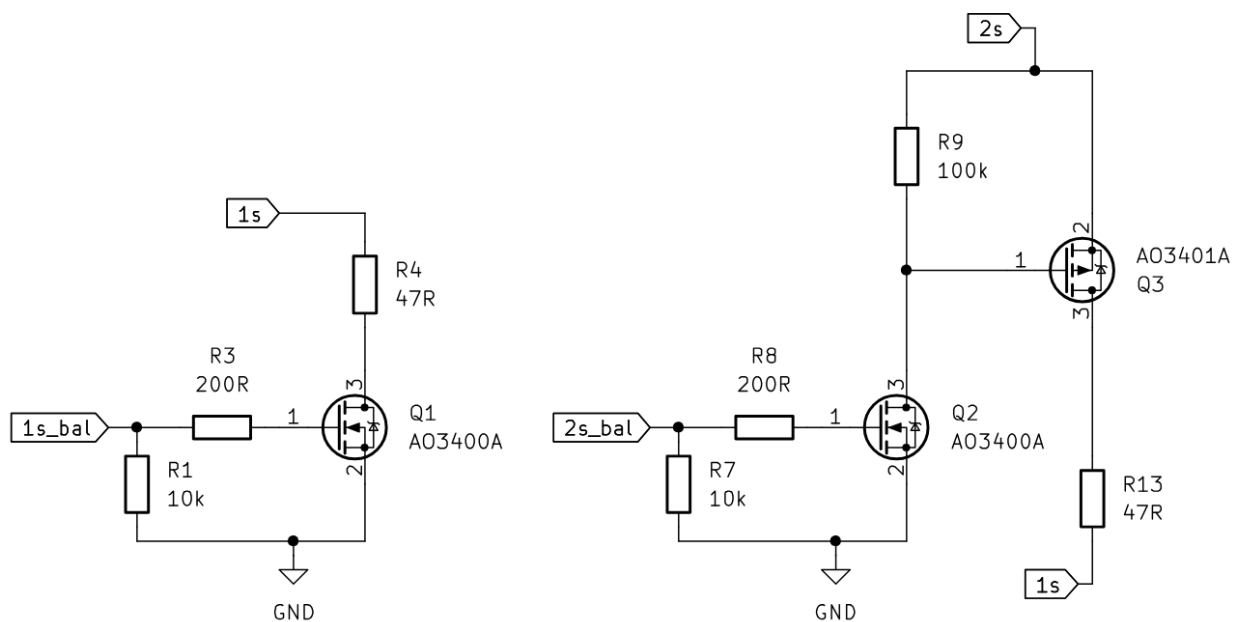


Рисунок 3.13 – Електрична принципова схема
блоку балансування

У результаті було розроблено друковану плату для збірки та тестування прототипу (рис. 3.14).

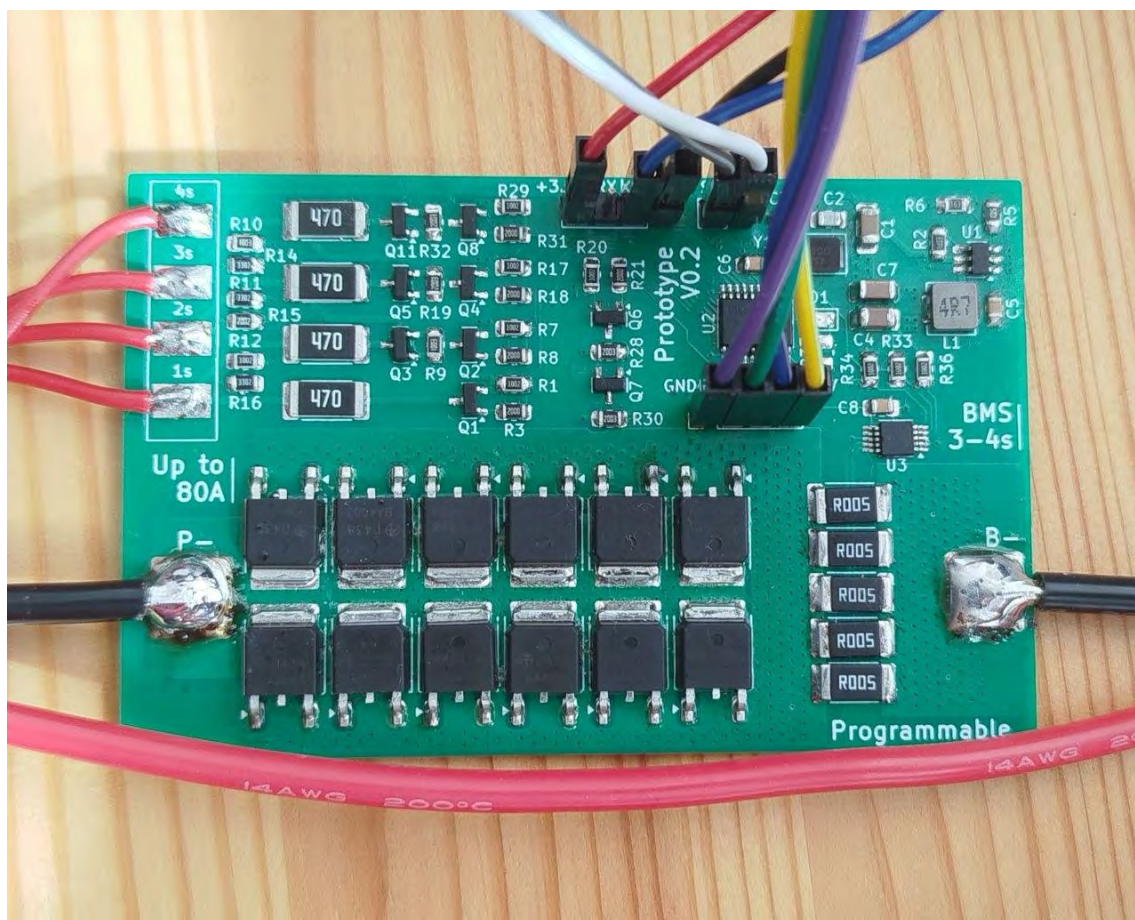


Рисунок 3.14 – Друкована плата першого прототипу

Це двошарова плата зі стандартною товщиною шару в 35 мкм. При трасуванні приділялася увага максимальному збільшенню площі полігонів міді, через які протікає струм АКБ. Для цього в нижній частині, де розташовані силові ключі та шунт, з'єднання реалізовані на обох сторонах плати.

Основною проблемою першого прототипу були низька точність вимірювання напруги перших трьох елементів каскаду. Через це прилад не міг забезпечити умови для коректної роботи захисту. У той же час показники загальної напруги на верхньому елементі каскаду та обчислений струм АКБ, за вимірювання яких відповідала INA226, показали достатню точність для реалізації потрібних функцій. DC-DC перетворювач також продемонстрував стабільну роботи та низький рівень електроспоживання. У фінальній версії СКБ ці два модулі залишилися незмінними.

3.2.1 Розробка актуальної версії

За результатами електричної принципової схеми розроблено друковану плату (рис. 3.15). Рішення інтегрує всі розглянуті компоненти в компактному формфакторі для використання з акумуляторними збірками.

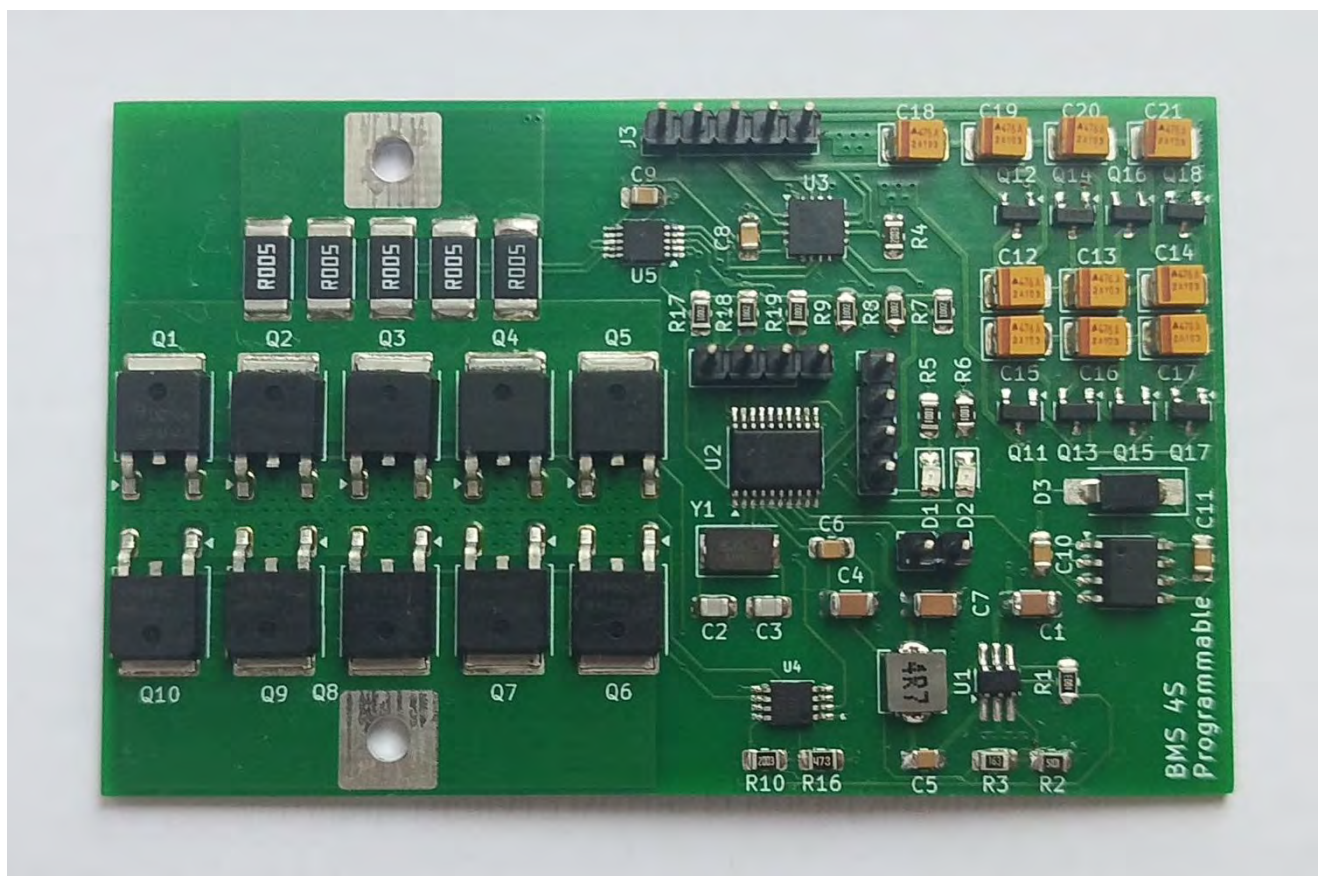


Рисунок 3.15 – Друкована плата актуального прототипу

Основною відмінністю в трасуванні стала поява контуру для активного балансування. Він розташований біля входу елементів для зменшення довжини доріжок, що з'єднують балансувальні контури. Силова частина розміщена ліворуч. Зустрічно-послідовна конфігурація польових транзисторів дозволила значно спростити трасування, оскільки виходи шунта, ключів та АКБ розташовані поруч одне з одним. Це значно зменшило площу полігонів для з'єднань на платі. Датчики для вимірювання напруги та струму розташовані одразу біля входу АКБ для мінімізації шуму від інших компонентів. Мікроконтролер розміщений посередині для простого підключення до інших мікросхем, з якими відбувається зв'язок. DC-DC перетворювач розташований якнайдалі від вимірювального контуру. Завдяки оптимальному розміщенню компонентів, вдалося реалізувати трасування на двошаровій платі.

3.3 Розробка алгоритму роботи системи

СКБ приймає рішення на базі контролю ключових показників акумулятора: напруги та струму. Розроблена програма (рис. 3.16) постійно опитує АЦП датчиків INA226 та INA3221 для формування моментальних значень. Ці дані порівнюються зі встановленими користувачем лімітами для моніторингу поточного стану. Якщо виміряні значення перевищують граничні, СКБ розриває комутацію за допомогою силового ключа та запобігає пошкодженню батареї. Додатковою функцією є розрахунок ємності. Вона обчислюється як добуток моментального значення струму на час та зберігається в пам'яті.

Зовнішня кнопка призначена для увімкнення або вимкнення виходу АКБ. Її стан та поточна комутація ключів зчитуються та використовуються для визначення бажаної дії користувача (увімкнення або вимкнення). Під час заряджання дані з датчиків використовуються для встановлення рівнів напруги на окремих елементах. Якщо їхня різниця перевищує установлену, починається процес балансування.

Після обробки значення напруги, струму та ємності передаються користувачеві за допомогою інтерфейсу UART для моніторингу показників та визначення поточного стану батареї.

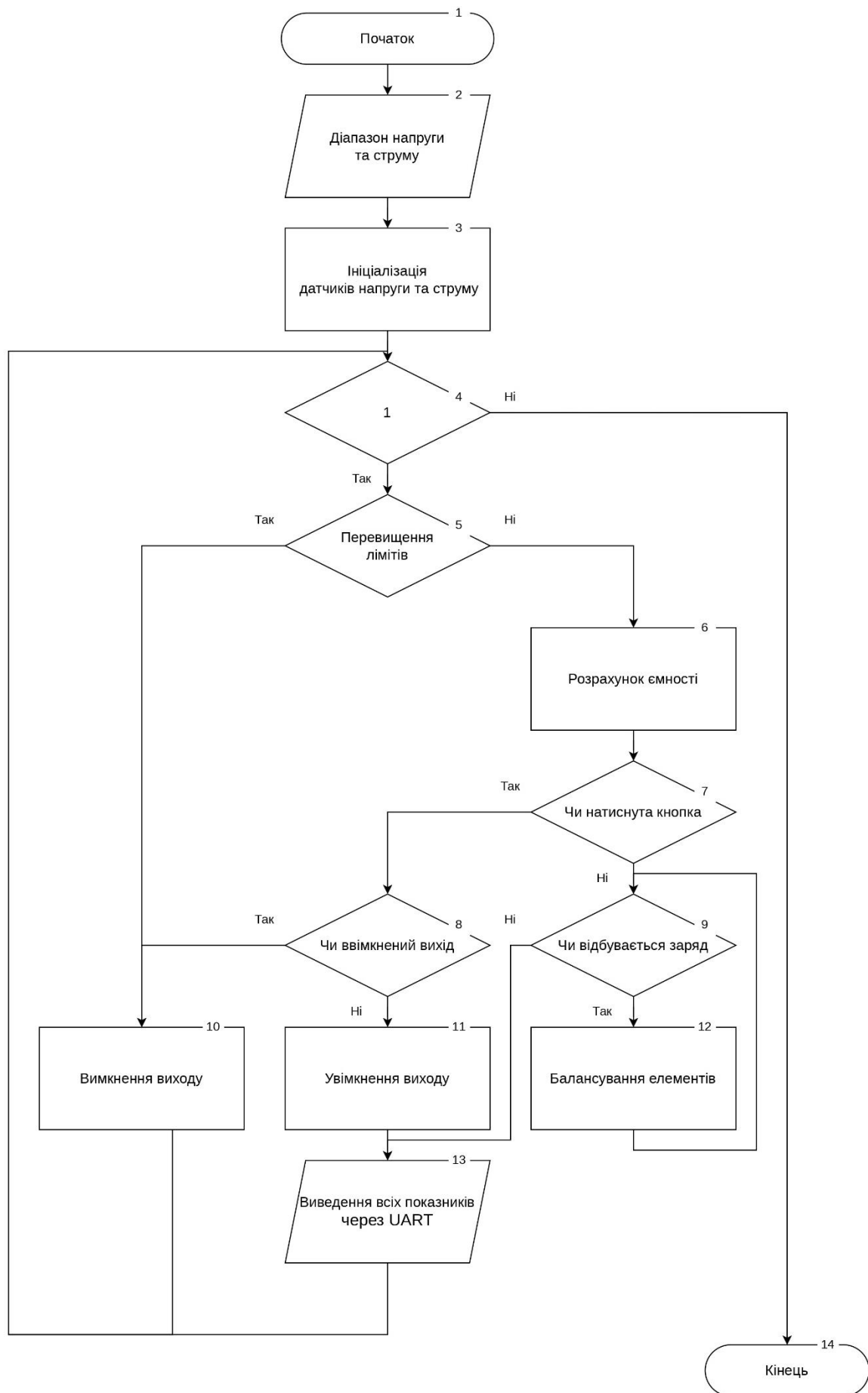


Рисунок 3.16 – Блок-схема алгоритму роботи СКБ

Висновки до розділу 3

У розділі були обрані додаткові компоненти. Описано призначення та основні технічні критерії вибору пасивних та активних елементів: резисторів, конденсаторів, діодів та транзисторів. Загалом розрахунок проводився за рекомендаціями в технічній документації виробника. Враховувалися такі параметри, як: точність, формфактор, та доступність для вибору компонентів. Проведений розрахунок подільника напруги для зворотного зв'язку DC-DC перетворювача, а також номіналу для його індуктора. Обчислено теплові параметри при протіканні номінального струму через силовий контур. Для цього були враховані показники опору, а також тип корпусу для розсіювання тепла, що на ньому виділяється. Ще одним аспектом був розрахунок частоти роботи драйвера для активного балансування. На основі характеристик конденсаторів було обрано оптимальний час тривалості комутації для повного заряду. Перед розробкою актуального прототипу описані апаратні рішення, що були застосовані в першій версії макета СКБ. Детально описані недоліки, що мала система. Це стало основою для нового варіанту, що значно покращив роботу цих аспектів. У результаті створено електричну принципову схему. У кінці процесу розробки апаратної частини було спроектовано та виготовлено друковану плату. Описано ключові особливості трасування та розташування компонентів. Наступним етапом стала розробка алгоритму роботи. Описано основні функції та логіку роботи для реалізації всіх аспектів СКБ. Для візуалізації створено блок схему, яка демонструє розгалуження, цикли та умови переходу системи з одного стану в інший.

ВИСНОВКИ

У рамках виконаної роботи було спроектовано систему автоматизованого керування зарядом і захистом акумуляторних батарей із функцією активного балансування елементів, призначену для забезпечення безпечної, тривалої та ефективної експлуатації літій-іонних АКБ. Було проведено повний цикл розробки. Створено структурну схему, електричну принципову схему, розроблено друковану плату та зібрано прототип.

Завдяки впровадженню інтерфейсу зв'язку (UART) стала можливою інтеграція з іншими системами керування (контролером верхнього рівня або хмарними додатками). Це надає можливості для віддаленої діагностики, збору інформації про деградацію елементів та адаптивної зміни параметрів роботи під конкретні умови та навантаження.

На відміну від традиційних пасивних систем, які розсіюють надлишкову енергію у вигляді тепла на резисторах, розроблена СКБ з методом активного балансування забезпечує перерозподіл енергії від більш заряджених елементів до менш заряджених. Це дозволило мінімізувати теплові втрати та підвищити загальний ККД процесу заряду.

Розроблена топологія та програмні алгоритми можуть стати основою для серійних СКБ в індустрії робототехніки та IoT. Основна перевага створеного рішення полягає у доступності та гнучкості. Комерційні СКБ, що мають схожий функціонал та рівень можливостей налаштування, зазвичай розраховані на більші акумуляторні збірки та мають відносно високу вартість. Часто в таких системах програмне забезпечення є спеціалізованим, тому зміна алгоритму роботи або деяких параметрів для конкретного застосування обмежується функціоналом програми.

Модулі СКБ, що розраховані на невелику кількість елементів зазвичай не мають додаткових функцій, які могли б значно розширити можливості застосування. Змога інтеграції з мікроконтролерами, програмованими логічними контролерами є основною перевагою розробленої системи. Завдяки цьому можливе здійснення

віддаленого моніторингу за станом АКБ та корегування роботи системи, яку він живить, для максимальної ефективності експлуатації.

Проект може послужити основою для розробки СКБ, розрахованих на більшу кількість елементів. Застосування мікроконтролера, на якому ґрунтується керування периферійними системами дозволяє досягти максимальної гнучкості для контролю за всіма параметрами, зберігання і обробки інформації. Поява більш доступних аналогових інтерфейсів, призначених для спрощення вимірювання напруги елементів, може сприяти розвитку таких рішень. Використання мікросхем, що здійснюють вимірювання диференційної напруги елементів та комунікацію з мікроконтролером та АЦП значно спрощує розробку систем СКБ різних конфігурацій. Також однією з перспектив розвитку є створення модульної системи, що дозволить легко масштабувати конфігурацію АКБ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] M. S. Whittingham, «History, Evolution, and Future Status of Energy Storage,» *Proceedings of the IEEE*, т. 100, pp. 1518-1534, 2012.
- [2] Б. І. Шикера та О. А. Повшенко, «Розробка приладу для заряду літійових акумуляторів з інтелектуальним керуванням,» в *Тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси»*, Київ, 2025.
- [3] L. G. Chagas, S. Jeong, I. Hasa та S. Passerini, «Ionic Liquid-Based Electrolytes for Sodium-Ion Batteries: Tuning Properties To Enhance the Electrochemical Performance of Manganese-Based Layered Oxide Cathode,» *ACS Applied Materials & Interfaces*, т. 11, № 25, p. 22278–22289, 2019.
- [4] J. Fleischmann, «Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular,» McKinsey & Company, 16 Січень 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>. [Дата звернення: 24 Травень 2026].
- [5] «Battery Management System [BMS] Market Size, Share, 2034,» Fortune Business Insights, 4 Травень 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/battery-management-system-market-101311>. [Дата звернення: 24 Травень 2026].
- [6] The Royal Swedish Academy of Sciences, «Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2019: Lithium-Ion Batteries,» 9 Жовтня 2019. [Онлайновий]. Available: <https://www.nobelprize.org/uploads/2019/10/advanced-chemistryprize2019.pdf>. [Дата звернення: 24 Травень 2026].
- [7] B. Xu, J. Lee, D. Kwon, L. Kong та M. Pecht, «Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, т. 150, № 111437, 2021.
- [8] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti та M.-Y. Chow, «Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles,» *IEEE Industrial Electronics Magazine*, т. 7, № 2, pp. 4-16, 2013.
- [9] M. Kaliaperumal, M. Dharanendrakumar, S. Prasanna, K. Abhishek, R. Chidambaram, S. Adams, K. Zaghib та M. Reddy, «Cause and Mitigation of Lithium-Ion Battery Failure-A Review,» *Materials (Basel)*, pp. 14-19, 2021.
- [10] «Battery Management System Tutorial,» 2018. [Онлайновий]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/document/whp/battery-management-system-tutorial?language=en&r=481266>. [Дата звернення: 24 Травень 2026].

- [11] A. Kurkin, A. Chivenkov, A. Aleshin, I. Trofimov, A. Shalukho та D. Vilkov, «Battery Management System for Electric Vehicles: Comprehensive Review of Circuitry Configuration and Algorithms,» *World Electric Vehicle Journal*, т. 16, № 8, p. 451, 2025.
- [12] «BQ77915 3-Series to 5-Series Stackable Ultra-Low Power Primary Protector with Autonomous Cell Balancing and HIBERNATE Mode,» Texas Instruments, Dallas, 2018.
- [13] «Most BMSs (Battery Management Systems) don't cut it... I Built a BETTER One,» Haase Industries, 5 Вересень 2025. [Онлайновий]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=UUr-CJudg38>. [Дата звернення: 15 Травень 2026].
- [14] «Battery systems,» Haase Industries, 8 Травень 2026. [Онлайновий]. Available: <https://haaseindustries.com/Projects/Battery-systems>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [15] «ATtiny1624/1626/1627 Data Sheet: tinyAVR® 2 Family,» Microchip Technology Inc., 2021.
- [16] S. Pittaway, «diyBMSv4,» GitHub repository, 2026. [Онлайновий]. Available: <https://github.com/stuartpittaway/diyBMSv4>. [Дата звернення: 24 Травень 2026].
- [17] «INA229 85-V, 20-Bit, Ultra-Precise Power/Energy/Charge Monitor With SPI Interface,» Texas Instruments, Dallas, 2020.
- [18] «MAX14920/MAX14921 High-Accuracy 12-/16-Cell Measurement AFEs,» Analog Devices, 2014.
- [19] «MCP33151/41-XX 1 Msps/500 ksps, 14/12-Bit Single-Ended Input SAR ADC,» Microchip Technology Inc., Chandler, 2023.
- [20] «BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries,» Battery University, 11 Жовтень 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [21] «HY2110 Datasheet: 1-Cell Lithium-ion/Lithium Polymer Battery Packs Protection ICs,» HYCON Technology Corp., 2017.
- [22] «BM3451 Datasheet: 3/4/5 Cell Battery Protectors,» AllDatasheet, [Онлайновий]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1253599/ETC1/BM3451.html>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [23] «Hall Effect Current Sensor vs Shunt Resistor: Key Differences, Advantages & Applications,» ELEHUB, 26 Березень 2026. [Онлайновий]. Available: <https://elehub.com/hall-effect-current-sensor-vs-shunt-resistor>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].

- [24] W. Reusen, «A view to a battery: Current sensor – shunt or Hall,» Melexis Tech Talks, 12 Січень 2021. [Онлайновий]. Available: <https://www.melexis.com/en/news/tech-talks/a-view-to-a-battery-current-sensor-shunt-or-hall>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [25] «Switched Capacitor Based Active Balancing,» XBattery, 6 Липень 2025. [Онлайновий]. Available: <https://xbattery.energy/blog/switched-capacitor-based-active-balancing>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [26] «ETA3000 Inductive cell balancer IC with balancing current up to 2A,» ETA Solutions.
- [27] «STM32G031x4/x6/x8 Arm® Cortex®-M0+ 32-bit MCU, up to 64 KB Flash, 8 KB RAM, 2x USART, timers, ADC, comm. I/Fs, 1.7-3.6 V Datasheet - production data,» STMicroelectronics, Geneva, 2025.
- [28] «JW5017S: 26V Synchronous Step-Down Converter,» JoulWatt Technology, 2016.
- [29] «INA226 36V, 16-Bit, Ultra-Precise I2C Output Current, Voltage, and Power Monitor With Alert,» Texas Instruments, Dallas, 2011.
- [30] «INA3221 26V, Triple Channel, 13-Bit, I2C Output Current and Voltage Monitor With Alerts,» Texas Instruments, Dallas, 2012.
- [31] «EG2131 High-Side and Low-Side Gate Driver Datasheet,» EG Micro, 2017.
- [32] «MAX1614: High-Side, n-Channel MOSFET Switch Driver,» Analog Devices, Wilmington, 2001.
- [33] «AOD2144: 40V N-channel MOSFET datasheet,» Alpha & Omega Semiconductor, 2026.
- [34] R. Panguloori, «Achieve Bidirectional Control and Protection Through Back-to-Back Connected eFuse Devices,» Texas Instruments, Грудень 2017. [Онлайновий]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/slva948/slva948.pdf>. [Дата звернення: 10 Травень 2025].
- [35] B. Devi та V. S. Kumar, «Lithium-ion battery management system: a review,» в *International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems*, Chennai, 2022.
- [36] H. Peng, H. Yi та J. Liu, «A brief review of battery management technology for smart battery,» в *16th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Beijing, 2024.
- [37] J. Zhu та W. Tai, «Discrete Active Cell Balancing(ACB) Design,» Жовтень 2025. [Онлайновий]. Available: <https://www.ti.com/lit/an/sdaa096/sdaa096.pdf>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].

- [38] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua та M. Ouyang, «A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,» *Journal of Power Sources*, т. 223, pp. 272-288, 2013.
- [39] «ACS773 Datasheet: High Accuracy, Hall-Effect-Based, 200 kHz Bandwidth, Galvanically Isolated Current Sensor IC with 100 $\mu\Omega$ Current Conductor,» Allegro MicroSystems, 2025.
- [40] «INA149 high common-mode voltage difference amplifier,» Texas Instruments, Dallas, 2011.
- [41] «ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator, ADS1113, ADS1114, ADS1115,» Texas Instruments, Dallas, 2024.
- [42] F. Zhang, «Simplicity Wins—Part 1: A Deeper Look into Active Balancing Solutions for BMS Design,» *Analog Dialogue*, 1 Січень 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/simplicity-wins-part-1.html>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [43] R. Venkatasatish та C. Dhanamjayulu, «Design and implementation of an inductor based cell balancing circuit with reduced switches for Lithium-ion batteries,» *Scientific Reports*, т. 14, № 1, Листопад 2024.
- [44] D. Marcin, M. Lacko, D. Bodnár та L. Pancurák, «Capacitor-Based Active Cell Balancing for Electric Vehicle Battery Systems: Insights from Simulations,» *Power Electronics and Drives*, т. 9, № 44, p. 317–330, 2024.
- [45] P. Patel, «The Age of Silicon Is Here...for Batteries,» *IEEE Spectrum*, 4 травень 2023. [Онлайновий]. Available: <https://spectrum.ieee.org/silicon-anode-battery>. [Дата звернення: 10 травень 2026].
- [46] «A Look Inside Battery-Management Systems,» *Electronic Design*, 26 березень 2015. [Онлайновий]. Available: <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/article/21800666/a-look-inside-battery-management-systems>. [Дата звернення: 10 травень 2026].
- [47] «What is a Battery Management System?,» Synopsys, 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [48] «The complete Guide to using 3S 40A Lithium BMS Battery Charger,» WattHour, 15 Січень 2021. [Онлайновий]. Available:

<https://www.youtube.com/watch?v=QNENyu97w2A>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].

- [49] M. Kesic, C. Chen та A. C. Knoll, «Battery-Management-Systems,» VDE Verband der Elektrotechnik, Вересень 2021. [Онлайновий]. Available: <https://www.vde.com/resource/blob/2105544/731ed20695f9fbf2f66423407554d1c5/fact-sheet-battery-management-system-pdf-file-data.pdf>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [50] «Active Balancing: How It Works and Its Advantages,» Monolithic Power Systems, 11 Липень 2024. [Онлайновий]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/active-balancing-how-it-works-and-its-advantages>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [51] STMicroelectronics, «STM32C011J6,» STMicroelectronics, [Онлайновий]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32c011j6.html>. [Дата звернення: 10 Травень 2026].
- [52] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.
- [53] Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
- [54] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
- [55] Комп'ютерне проєктування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.

- [56] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [57] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.