

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

_____ КОМПОНЕНТНА БАЗА СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЖИВЛЕННЯ BMS _____
(тема)

Виконав:
студент 4 курсу, групи МНТМН-21-1
Болотов О.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна те-
хніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Мікро- та наноелектроніка
(повна назва освітньої програми)

Керівник Карнаушенко В.П.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І. М.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
 Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
 Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
 Спеціальність _____ 153 Мікро- та наносистемна техніка _____
 (код і повна назва)
 Тип програми _____ освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ «Мікро- та наноелектроніка» _____
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
 (підпис)
 « _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Болотову Олександрю Олександровичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Компонентна база систем контролю живлення BMS» _____
 затверджена наказом університету від 26 05 2025 р. № 414Ст _____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 5 06 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення - 5 В, робоча частота – 100 МГц, контроль вологості, контроль струму 0...5А, контроль напруги 0...15 В.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
 - 1) Аналітичний огляд
 - 2) Розробка мікро приводу із застосуванням САПР
 - 3) Конструкторська частина
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____
Схема електрична принципова, схема монтажна, друкована плата
Слайди

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по ба- тькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	20.04.2024	
2	Огляд інформаційних джерел	1.05-10.05	
3	Створення проекту за допомогою САПР	10.05-15.05	
4	Розробка конструкції пристрою	15.05-25.05	
5	Пояснювальна записка	25.05-30.05	
6	Підготовка презентації	1.06-2.06	
7	Рецензування, нормконтроль	2.06-5.06	
8	Здача роботи на кафедрі	8.06.2024	

Дата видачі завдання 20 квітня 2025р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Карнаушенко В.П.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи складає: 41 сторінок, 16 рисунків, 8 джерел, 6 додатків.

МОНІТОРИНГ СТАНУ АКУМУЛЯТОРА, BMS, КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ

Об'єкт дослідження – системи моніторингу стану акумуляторів

Метод дослідження – аналітичний.

Мета роботи – метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження концепцій систем моніторингу акумуляторів електромобілів з використанням сучасних передових технологій.

Актуальність теми: контроль стану акумуляторів за допомогою мікроелектронних систем забезпечує оптимальну, довгострокову і безпечну експлуатацію електромобілів.

ABSTRACT

The explanatory note to the qualification paper consists of: 41 pages, 16 figure, 8 sources, 6 appendices.

BATTERY CONDITION MONITORING, BMS, PARAMETER CONTROL

Object of research – battery condition monitoring systems

Research method – analytical.

Purpose of work – the purpose of this qualification work is to study the concepts of electric vehicle battery monitoring systems using modern advanced technologies.

Relevance of the topic: battery condition monitoring using micro-electronic systems ensures optimal, long-term and safe operation of electric vehicles.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Структура сучасного автомобільного акумулятора	12
1.2 Система моніторингу стану акумулятора	15
2 СТРУКТУРА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ	22
2.1 Компоненти систем моніторингу	28
3 РОЗРОБКА ФРАГМЕНТУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	32
4 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ І КОНСТРУКЦІЇ БЛОКУ	38
ВИСНОВКИ	40
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	41
ДОДАТКИ	42

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

IOT – інтернет речі;

AI – штучний інтелект;

CMOS – КМОП

HVAC – опалення, вентиляції та кондиціонування повітря;

ECS – системи контролю навколишнього середовища;

VJB – блок комутації;

BMS – система моніторингу;

CAN, LIN – мережі;

CMB – cell monitoring & balancing;

CSU – cell supervisor unit.

I²C, SPI, UART – інтерфейси зв'язку.

ML – машинне навчання;

OBC – бортова зарядка;

SOA – система контролю стану;

SOC – система контролю заряду;

SOH – система контролю;

ВСТУП

Швидке зростання електромобілів стимулює інновації в багатьох ключових частинах системи доставки електроенергії, включаючи бортовий зарядний пристрій (ОВС), зовнішній зарядний пристрій для зарядки акумулятора, інвертори, що використовуються для приводу електродвигуна, технологію побудови акумулятора та системи керування акумулятором (BMS). BMS утворює важливий модуль, який забезпечує оптимальну та безпечну роботу акумулятора.

Незважаючи на те, що електромобілі становлять значну частину продажів нових автомобілів, вони все ще складають невелику частину загального світового автомобільного ринку. Підвищення довіри користувачів до переходу з існуючих бензинових транспортних засобів на електромобілі потребує вирішення багатьох проблем, зокрема:

- підвищення запасу ходу є багатогранною проблемою, яка включає підвищення ефективності та потужності в системах перетворення та керування енергією, вдосконалену технологію акумуляторів великої ємності та моніторинг їх стану;
- швидке заряджання при вищій напрузі може скоротити час заряджання до стандартного часу заправки бензином, тоді як покращені топології ОВС, батареї та функції зарядки/моніторингу батареї можуть зіграти важливу роль;
- скорочення вартості в результаті масового виробництва широко зонних напівпровідників, більш дешевших акумуляторів, які можна переробити, і створення пристроїв і топологій, які можна гнучко масштабувати;
- також, зменшення розміру, ваги та об'єму системних компонентів і проводки може зіграти важливу роль у підвищенні ефективності системи і, таким чином, у зниженні вартості;
- підвищена надійність, моніторинг температури та електрична безпека;

– тягові інвертори повинні добре працювати протягом очікуваного терміну служби $>1e^{11}$ циклів перемикання для EV.

Технологія літійових акумуляторів потребує систем керування живленням з постійним тепловим і електричним моніторингом і технологією відключення, яка може швидко реагувати у разі несправності. Існуючі стандарти автомобільної безпеки рівня D (ASIL-D) у рамках ISO 26262 повинні забезпечувати найвищий рівень функціональної безпеки та є обов'язковими для багатьох автомобільних систем і компонентів.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Технологія електромобілів підтримується значною кількістю силових електронних підсистем, включаючи:

- системи керування акумуляторами, що виконують перетворення змінного струму в постійний, необхідне для заряджання акумуляторної батареї;
- системи стабілізації навантаження, що виконують перетворення струму, що необхідно для перетворення напруги, що забезпечується акумуляторами (400 В / 800 В), на нижчу напругу, необхідну для живлення навантажень, підключених до шини 12 В або 48 В;
- системи силової передачі, включаючи так званий головний або тяговий інвертор, які виконують перетворення постійного струму в змінний, необхідне для руху електродвигуна, який у більшості випадків є трифазним асинхронним двигуном змінного струму.

Однією з ключових підсистем силової електроніки, що відповідає за керування зарядом акумулятора, є бортовий зарядний пристрій (ОВС), який зазвичай складається з каскаду коректора коефіцієнта потужності (ККП), за яким слідує перетворювач постійного струму (ППС) (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Класична структура вбудованого зарядного пристрою

Удосконалення в системі акумуляторів, технології напівпровідників та підвищені вимоги до необхідної потужності, ефективності та щільності потужності сприяють розвитку технології ОВС.

Важливу роль у цьому відіграють системи накопичення енергії, такі як акумулятори, ультраконденсатори, паливні елементи та гібридні системи накопичення енергії. Сьогодні дослідження зосереджені на вдосконаленні цих компонентів, щоб забезпечити більше енергії за меншу вартість, об'єм та вагу. Акумулятори є важливими компонентами в споживчих товарах, таких як телефони та ноутбуки, у важливих медичних та промислових застосуваннях, що потребують мобільних та резервних джерел живлення, в електромобілях, та у системах зберігання відновлюваної енергії.

Покращена щільність енергії, стійкість до розряду, термін служби, час перезарядження – це деякі з ключових переваг, які роблять літій-іонні акумулятори популярними для використання в електромобілях. На рисунку 1.2 показано порівняння об'ємної та питомої щільності енергії літій-іонних акумуляторів у порівнянні з деякими іншими акумуляторними батареями. Переваги за обома цими показниками дозволяють використовувати менші та легші акумуляторні блоки, а отже, збільшують запас ходу.

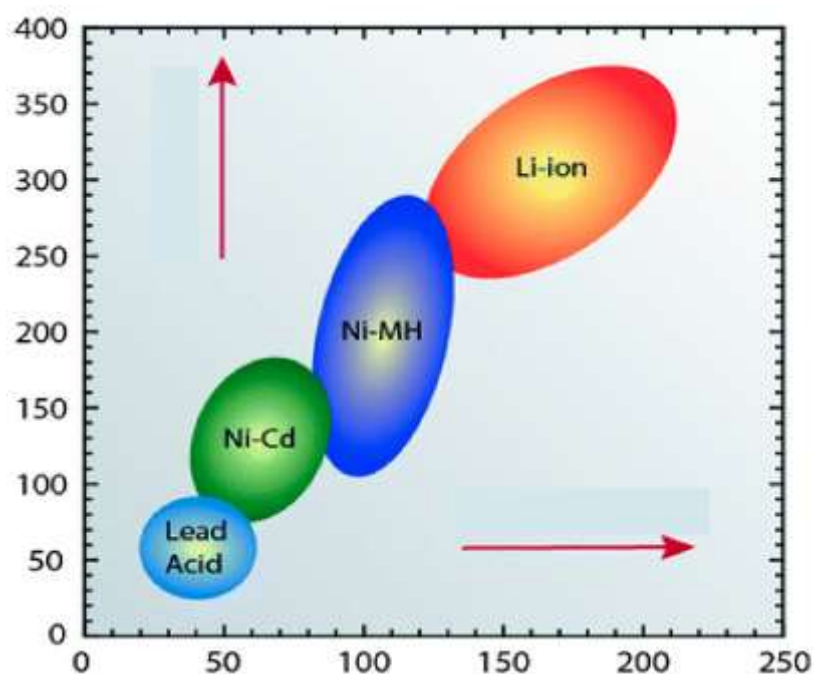


Рисунок 1.2 – Порівнянні об'ємної та питомої щільності енергії деяких типів акумуляторів

Протягом останніх 15 років щільність енергії літій-іонних акумуляторів виросла майже в десять разів.

За джерелами Grand View Research, що проводили огляд ринку літій-іонних акумуляторів, індустрія показує невинне зростання автомобільних та сонячних акумуляторів, що складають половину від загального обсягу продукції.

Зростання попиту привабило більше виробників, що призвело до значного збільшення виробничих потужностей і викликало різке зниження ціни на ці акумулятори майже в сто разів за десять років.

Але не тільки масове виробництво сприяє розповсюдженню літієвих акумуляторів. Розробники і дослідники постійно працюють над удосконаленням матеріалів і технологій виробництва.

1.1 Структура сучасного автомобільного акумулятора

Акумуляторний блок, що використовується в електромобілях, складається з кількох компонентів, як показано на рисунку 1.2.

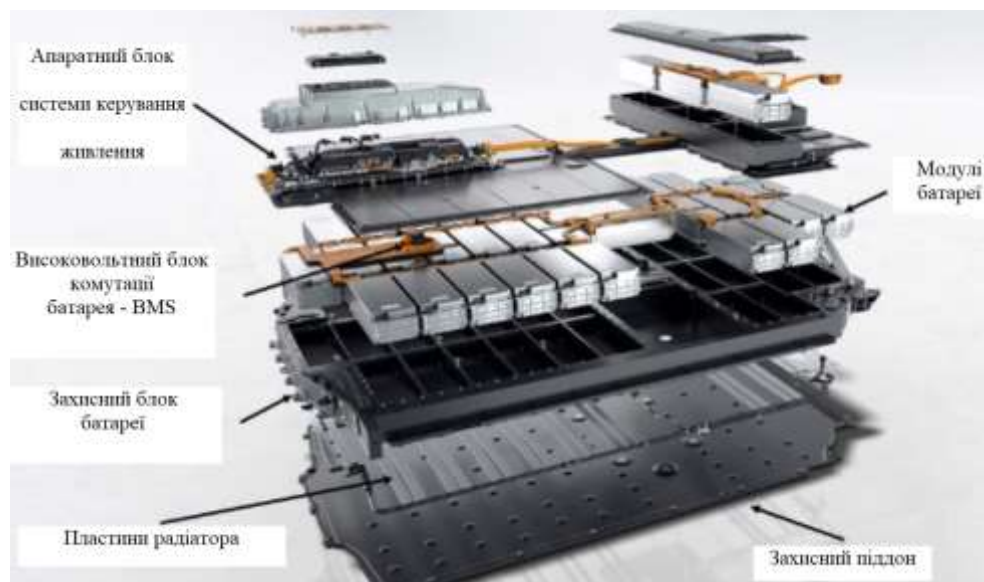


Рисунок 1.2 – Структура акумуляторного блоку автомобіля (Motoiq.com)

Елементи батареї, як правило, послідовно з'єднані в модулі. Потім модулі можуть підключатися паралельно для генерування необхідної напруги та струму. Кожна комірка в модулі повинна контролюватися за її ключовими параметрами, такими як напруга та струм, за допомогою блоку контролю комірок (CSU). Розподільна коробка акумулятора (BJB) забезпечує важливу функцію розподілу електроенергії та функції безпеки, а також деякі вимірювання верхнього рівня. CSU і BJB підключені до мікроконтролера через комунікаційні мости, і вони разом утворюють блок керування батареєю (BMU).

Кожен окремий елемент виробляє електричну енергію за допомогою процесу хімічного електролізу. Зазвичай використовується рідкий електроліт, наприклад, на основі LiPF_6 . Класифікація акумуляторів зазвичай базується на хімічному складі катода. Деякі з найпоширеніших типів катодів, що використовуються в сучасних літій-іонних акумуляторах:

LCO – оксид літію кобальту;

NCM – оксид літію нікелю кобальту марганцю;

NCA – оксид літію нікелю кобальту алюмінію;

LFP – фосфат літію заліза.

Найпоширенішим хімічним складом є NCM. Типовим було співвідношення 1:1:1, хоча зараз спостерігається тенденція до збільшення вмісту Ni та зменшення вмісту кобальту, наприклад, до співвідношення 8:1:1, що може збільшити ємність елементів, але за рахунок скорочення терміну служби. Зменшення вмісту кобальту має переваги у зниженні вартості та меншій залежності від елементу, який наразі видобувається в регіонах з вищими геополітичними ризиками. NCA використовується деякими виробниками, такими як Tesla, і може мати подібні властивості до елементів NCM з вищим вмістом нікелю. Елементи LFP на основі заліза набагато дешевші у виробництві та також набагато безпечніші у використанні, але недоліком є нижча щільність енергії порівняно з елементами NCM та NCA. Анод зазвичай графітовий, проте сьогоднішня тенденція полягає в тому, щоб включити в нього більше наночастинок кремнію,

що може покращити ємність елемента, але за рахунок скорочення терміну служби.

Твердотільні літій-іонні елементи мають до 50% вище щільність енергії, водночас вони набагато безпечніші, ніж системи на основі рідкого електроліту. Розробники працюють над тим, щоб вивести ці більш досконалі елементи на серійне виробництво. Наприклад є розробки без анодного елемента у промисловому варіанті, в якому літій-металевий анод створюється під час звичайного заряджання елемента та має твердий керамічний сепаратор. Цей елемент має кілька переваг, таких як покращена щільність енергії, а також швидша зарядка, збільшений термін служби та підвищена безпека.

Сучасний підхід до упаковки цих елементів для генерації необхідної напруги для електромобілів (типово 400 В, з тенденцією до 800 В для швидкої зарядки в майбутньому) полягає у складанні окремих елементів у модуль. Елементи з'єднуються послідовно та паралельно для генерації цільової напруги та струму всередині модуля. Модуль розміщується в окремому корпусі. Потім модулі об'єднуються в акумуляторному блоці, який має власний корпус. Новіші підходи включають тенденцію «від елемента до пакета» (C2P), де модуль відсутній і, отже, потрібен лише один корпус, та «від елемента до шасі» (C2C), де елементи монтуються безпосередньо на шасі автомобіля без спеціального корпусу. Ці останні підходи можуть бути більш ефективними з точки зору раціонального використання простору.

Форма корпусу елемента може варіюватися, і найчастіше використовуються циліндричні, пакетні або призматичні. Циліндричні елементи мають малі розміри порівняно з іншими форм-факторами (габаритами) та зазвичай виготовляються з нікельованої сталі, а негативний електрод з'єднаний з корпусом. Тенденція полягає в тому, щоб зробити їх більшими, як-от елемент 4680, який має діаметр 46 мм і довжину 80 мм, щоб збільшити енергетичну ємність на елемент. Більші елементи знижують вартість, але, нажаль, пов'язані з підвищеним ризиком для безпеки. Пакетні елементи, які використовуються деякими корейськи-

ми виробниками автомобілів, та призматичні елементи, якім віддають перевагу деякі європейські виробники автомобілів, зазвичай можуть бути більшими за циліндричні аналоги, що потребує оптимізації за габаритами для забезпечення більшої індивідуальної ефективності упаковки.

1.2 Система моніторингу стану акумулятора

Систему управління акумулятором можна вважати мозком системи акумуляторних батарей, вона відповідає за кілька ключових операційних та безпечових функцій. Зазвичай вона розроблена за архітектурою "ведучий-підлеглий", де загальна функція керування лежить на процесорному ядрі, яке виконує всі необхідні дії на основі даних, отриманих від підлеглих модулів моніторингу даних нижнього рівня. На рисунку 1.3 наведено загальну структуру вдосконаленої системи моніторингу.

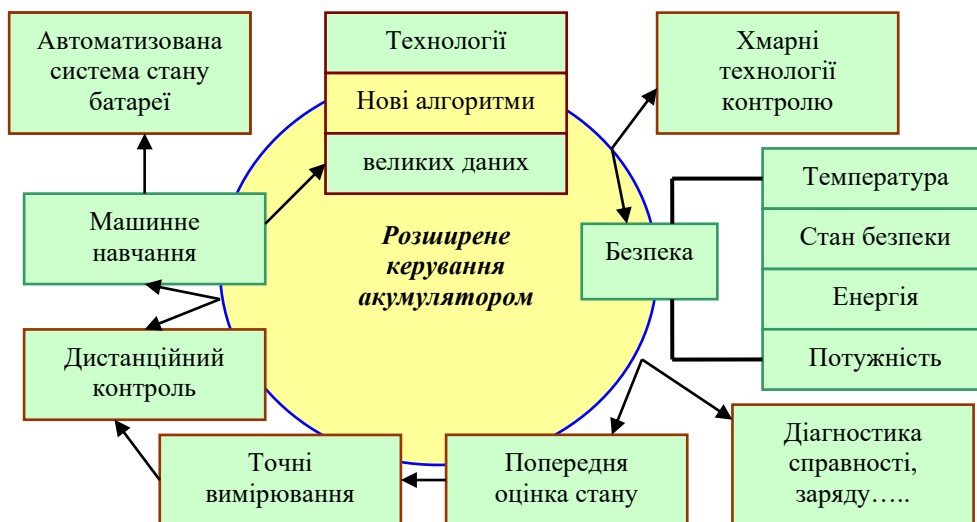


Рисунок 1.3 – Структура вдосконаленої BMS високого рівня

Основні функції, які має виконувати система, пов'язані із забезпеченням максимального захисту користувачам транспортних засобів і навколишнього

середовища. Це пов'язано з проблемами, що пов'язані з експлуатацією та утилізацією акумуляторів, особливо літійєвих. Будь яке механічне пошкодження, або порушення вимог щодо експлуатації, температурних режимів, або параметрів робочого циклу може призвести до вкрай негативних наслідків. В деяких країнах задля зменшення наслідків від надзвичайних ситуацій з електромобілями існують спеціальні пожежні екіпажі із відповідним обладнанням для усунення наслідків небезпеки.

Система управління контролює стан та керує системами акумулятора, щоб запобігти перевантаженню по струму та напрузі. Необхідно забезпечувати постійний контроль температури, оскільки перегрів, або дефекти можуть призвести до вибухонебезпечного теплового режиму, що може мати катастрофічні наслідки. Моніторинг гарантує, що елементи працюють у межах безпечної робочої зони (SOA, state of area). Також необхідно контролювати електричну ізоляцію між акумулятором та шасі.

Важливий показник – стан заряду (SOC, state of charge) відноситься до доступної ємності у відсотках від номінальної ємності, тоді як стан справності (SOH, state of health) – це відношення фактичної номінальної ємності до номінальної ємності у визначений момент часу. Старіння літій-іонних елементів може впливати як на їх динамічні характеристики, так і на характеристики зберігання. Оцінка SOC, SOH та залишкового терміну служби (RUL, remaining useful life) передбачає складні розрахунки на основі даних та використання алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (ML) у передових системах BMS. Ці дані можуть бути передані користувачеві для визначення запасу ходу автомобіля та загального стану акумулятора.

Балансування елементів та оптимізація акумулятора, його окремих елементів, або модулів потрібно для забезпечення вирівнювання циклів заряду і розряду. Вирівнювання заряду може бути пасивним, коли всі елементи розряджаються до відомого рівня під час розряду. Цей процес пов'язаний з виділенням тепла та є неефективним. Активне балансування передбачає використання

двонаправлених перетворювачів постійного струму та мікро контролера для перерозподілу заряду на зовнішні пристрої зберігання, а потім рівномірного розподілу його по елементах (рис. 1.4). Цей та інші параметри, такі як температура, можна корегувати для оптимізації продуктивності та терміну служби акумулятора.

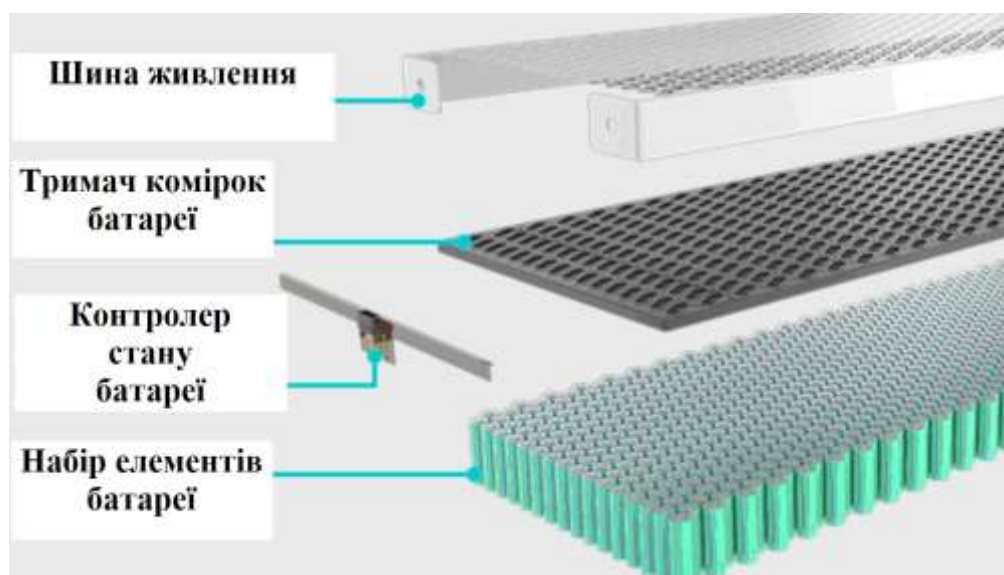


Рисунок 1.4 – Система з'єднань електромобілів, яка містить усі окремі елементи акумулятора та BMS (Interplex)

Всі параметри, що контролює система передаються в головний електронний блок керування електромобілем для реєстрації параметрів акумулятора.

Система BMS контролює і підтримує температуру елементів в оптимальному діапазоні від 15 до 40°C за допомогою системи охолодження. Вона може бути повітряною, як у Nissan Leaf, або рідинною, прикладом якої є Tesla 3. Рідинне охолодження має більшу гнучкість і отримує все більше поширення.

Оскільки в упаковці потенційно можуть знаходитися тисячі комірок, їх електричне з'єднання є доволі складним. Деякі з використовуваних підходів включають ультразвукове зварювання, контактне зварювання та лазерне зварювання. Використаний метод залежить від формату комірок, причому менші ци-

ліндричні комірки є найбільш гнучкими, тоді як більші циліндричні, а також пакетовані та призматичні комірки більше підходять для лазерного зварювання. Тому лазерне зварювання стає все ширшим.

Елементи з'єднання потрібні не тільки для забезпечення контактів між окремими елементами і модулями, вони включають таку важливу функцію, як показники напруги, струму та температури. Надійні з'єднання забезпечують точний і своєчасний потік даних, необхідний для прийняття обґрунтованих рішень BMS. З'єднання можуть включати вбудовані датчики або з'єднання із зовнішніми датчиками, які відстежують напругу та температуру елементів і модулів. Ці датчики забезпечують систему керування даними в реальному часі, дозволяючи BMS ефективно керувати процесами заряджання та розряджання.

З'єднання також забезпечують шляхи для балансування струмів в елементах. BMS використовує ці шляхи для вирівнювання заряду між елементами, запобігаючи перезарядженню або глибокому розряду окремих елементів. Ефективне балансування подовжує загальний термін служби батареї та покращує продуктивність. Деякі з'єднання призначені для роботи в якості радіаторів або теплопровідних шляхів, які допомагають керувати температурою. Допмагаючи розсіювати тепло, вони запобігають появі гарячих точок і гарантують, що BMS може підтримувати оптимальний температурний діапазон для акумуляторної батареї.

Механічні аспекти конструкції акумуляторних блоків важливі для безпеки електромобіля. З'єднання допомагають пом'якшити механічну нестабільність, що пов'язана з динамічним навантаженням і випадковими вібраціями, ударними навантаженнями. Механічна складова показників конструкції елементів з'єднання відіграє особливу роль в тонких призматичних або м'яких полімерних елементах із помітними змінами розмірів елементів батареї під час заряджання та розряджання.

Міжз'єднання, такі як шини та джгути проводів, мають бути розроблені для рівномірного розподілу механічних навантажень по всій поверхні акумуля-

торній батареї. Це допомагає запобігти концентрації стресових навантажень на окремих ділянках, зменшуючи ризик пошкодження та забезпечуючи довговічність. З'єднувальні елементи можуть підсилити загальну жорсткість акумуляторної батареї, діючи як структурний елемент.

Таким чином, можна зробити висновок, що з'єднання відіграють значну роль у функціонуванні електромобілів, забезпечуючи передачу електроенергії та даних між основними компонентами транспортного засобу. З огляду на те, що майбутнє покоління моделей електромобілів працює на вищих рівнях напруги, понад поточні 400 В, міжз'єднання повинні підтримувати підвищені рівні напруги для підвищення ефективності та мінімізації втрат потужності.

Однією з функцій системи контролю є вимірювання струму в робочому циклі. Для цього завдання використовують різні засоби: резистивні (струмові) шунти, датчики Холла, трансформатори струму, а також нові технології, такі як магнітоопір та алмазні квантові сенсори.

Стандартний шунт – це найпростіше рішення для вимірювання струму. Це високоточний, низькоомний, потужний резистор. Струм, що проходить через шунт, призводить до падіння напруги, пропорційного струму (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Резистивний шунт

Однак, падіння напруги на шунті потрібно посилити, ізолювати та виміряти, щоб визначити рівень струму. Оскільки шунт з'єднаний послідовно з на-

вантаженням, падіння напруги призводить до втрати потужності, тому використовуються резистори дедалі меншого номіналу. Це означає, що для підсилення падіння напруги потрібен прецизійний підсилювач з високим коефіцієнтом підсилення.

На відміну від шунтів, датчики Холла ізолювані від навантаження і вимірюють величину магнітного поля навколо провідника зі струмом (рис.1.6).

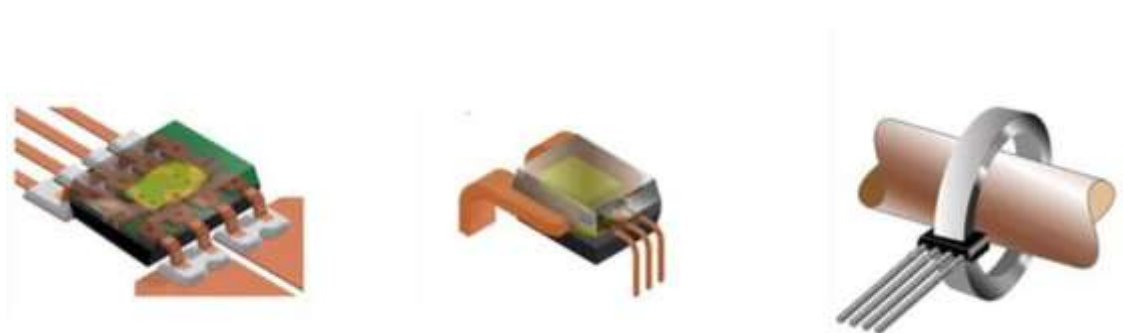


Рисунок 1.6 – Датчики Холла можуть вимірювати постійний та змінний струми без втрат потужності

Вимірювання диференціального датчика струму з використанням двох елементів Холла забезпечують високу точність навіть у шумному середовищі, де можуть виникати перехресні перешкоди від сусідніх ліній струму або магнітних полів розсіювання.

Датчики на основі трансформаторів струму також мають хорошу ізоляцію і широко використовуються в якості безконтактних сенсорів для вимірювання величини струму.

Електричний опір магніто резистивного датчика змінюється під впливом зовнішнього магнітного поля. Найновіша технологія магнітних датчиків, тунельний магніто резистивний сенсор має переваги для застосування в датчиках струму електромобілів, включаючи меншу чутливість до змін температури, надзвичайно високу магнітну чутливість та високе співвідношення сигнал/шум.

Алмазні квантові датчики все ще перебувають у режимі досліджень та розробок, вони мають широкий динамічний діапазон та високу чутливість для

вимірювання струму акумулятора. У дослідній конструкції використовується диференціальне детектування двох датчиків для усунення синфазного шуму навколишнього середовища в автомобілі. У прототипі монітора акумулятора алмазний квантовий датчик вимірював струм акумулятора до 130 А, випробування підтвердили робочий діапазон температур від -40° до $+85^{\circ}$.

Отже, деякі тенденції, які спостерігаються в різних системах моніторингу і управління станом акумуляторів:

- покращена точність моніторингу елементів живлення, щоб забезпечити широке застосування більш економічно ефективної хімії літій-залізо-фосфатної батареї;

- інтелектуальна архітектура ВІВ, яка підтримує локальні вимірювання та моніторинг кількох пакетів, що робить зв'язок із системою моніторингу більш ефективним або навіть бездротовим;

- опції перемикання для підтримки широкого діапазону варіантів напруги, наприклад 400 В і 800 В, і, потенційно, 1500 В для систем зберігання енергії, таких як сонячні інвертори.

2 СТРУКТУРА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

Сучасна тенденція в побудові систем моніторингу стану акумуляторів полягає в розробці спеціалізованих приладів, що складають загальну структуру пристрою.

В структурі систем моніторингу важливу роль відіграють супервізори – пристрої контролю живлення. Наприклад для контролю живлення сучасних засобів зв'язку застосовують спеціалізовані інтегральні схеми, які призначені для контролю напруги, струму і температури під час роботи пристрою.

Наприклад, DS2438 – монітор параметрів акумуляторів, використовуваних в портативному обладнанні. Інтегральна схема має інтерфейс 1-Wire. Вимірювання струму батареї здійснюється за допомогою 10 розрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що має два окремих диференціальних виводи, що підключені до зовнішнього резистивного кола (похибка перетворення не більше 2%, час перетворення ~ 1 с).

Вимірювання напруги проводиться через одно провідний вхід окремого вбудованого 10-розрядного АЦП (похибка перетворення не більше 0,5%, час перетворення ~ 2 мс). Діапазон контрольованих електричних величин при цьому не залежить від рівня живлення приладу, який в свою чергу також може контролюватися, завдяки можливості підключення виводів живлення на вхід АЦП.

Для вимірювання температури застосовується вбудована схема перетворювача з 13-бітовою роздільною здатністю, при цьому, похибка перетворення в діапазоні від 0°C до $+70^{\circ}\text{C}$ становить $\sim 1^{\circ}\text{C}$).

Також DS2438 містить програмований таймер з вбудованим опорним генератором, який може виконувати функції годинника/календаря реального часу на основі 32-ррядного «довічного» лічильника ємністю до 136 років). До складу компоненту входить енергонезалежна пам'ять об'ємом 40 байт, яка служить

для зберігання інформації, що стосується батареї (дата, тип і виробник, характеристики, а також аварійні ситуації).

Монітор має унікальний 64-розрядний ідентифікаційний номер, який може бути прив'язаний до місця розташування конкретного елемента живлення. Живлення DS2438 відбувається безпосередньо від контрольованої батареї напругою від 2,4 В до 10 В. Структурна схема монітору живлення наведена на рисунку 2.1

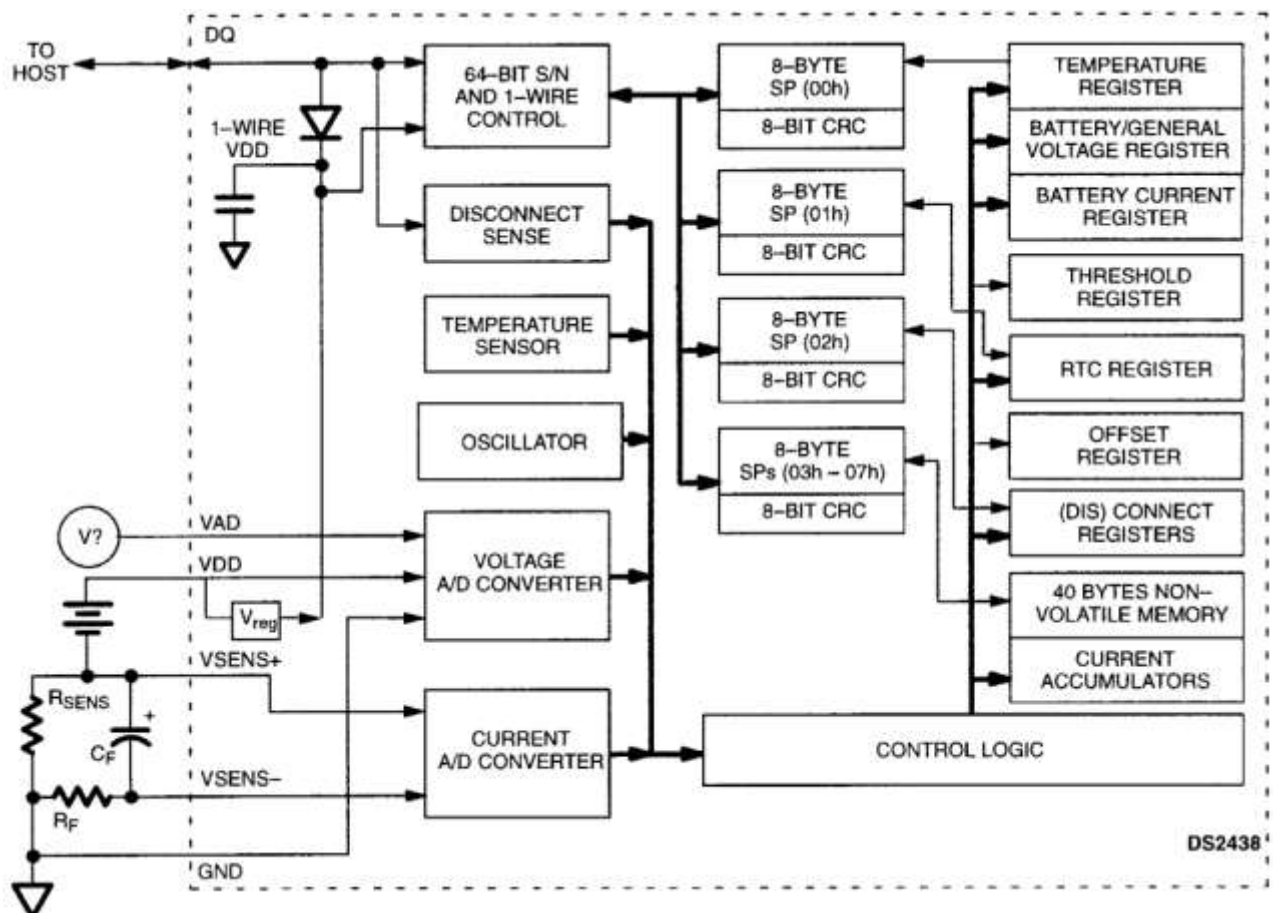


Рисунок 2.1 – Структурна схема монітора живлення акумулятора (DS)

Системи керування акумуляторами для літій-іонних елементів вимагають моніторингу напруги, струму та температури для визначення стану заряду та справності. Точне вимірювання напруги елементів забезпечує безпечну роботу та дотримання вимог функціональної безпеки, що є критично важливим для та-

ких функцій, як балансування елементів. Спеціалізовані мікросхеми керування акумуляторами забезпечують комплексне рішення для моніторингу та балансування комірок акумулятора.

Системи керування акумуляторами застосовуються для моніторингу та керування акумуляторами, що використовуються в багатьох сферах діяльності. ІС балансування акумуляторів, також відомі як схеми керування акумуляторами або BMS, є важливим засобом забезпечення безпеки та функціональності, де б вони не використовуються. Автомобільні системи керування акумуляторами використовуються в електромобілях, включаючи електромобілі, вантажівки та поза шляхові транспортні засоби, такі як гольф-кари, а також транспортні засоби, що працюють в складських і виробничих приміщеннях. В мережевій та промисловій енергетичній інфраструктурі акумулятори використовуються як резервне джерело живлення, включаючи вежі стільникового зв'язку, підстанції змінного струму, військову сферу, Інтернет інфраструктуру, системи підтримки авіації, вежі радіозв'язку, сфера охорони здоров'я та метеостанції. Крім того, все більша кількість споживчих товарів, таких як електричні велосипеди та інші транспортні засоби для відпочинку, потребує живлення від акумулятора та покладається на системи керування для ефективного та безпечного використання.

Пристрій моніторингу та балансування елементів вимірює напругу, струм та температуру елементів для визначення стану заряду (SOC), що забезпечує безпечну роботу в робочій зоні (SOA). Він виконує діагностику та технічне обслуговування при низькому енергоспоживанні та зв'язується з головним контролером для балансування елементів та управління температурою акумуляторів, запускаючи відключення та сповіщення за потреби.

Акумуляторні блоки складаються з великої кількості численних окремих елементів, що неминуче призводить до виробничих відхилень, наприклад, відхилення внутрішнього опору, ємності, або неоднорідного теплового розподілу в блоку та інших характеристик елементів.

З часом невеликі відмінності між окремими акумуляторами в багатоелементних батарейних блоках збільшуються під час кожного циклу заряджання та розряджання. Слабші елементи з меншою ємністю досягають максимальної напруги швидше за інші і змушують процес заряджання всього блоку зупинитися. У цьому випадку повна ємність батареї акумулятора не може бути використана.

Як наслідок, використання пристрою моніторингу та балансування автомобільних елементів акумулятора (СМВ, cell monitoring & balancing) для компенсації слабших елементів шляхом вирівнювання заряду по всьому блоку є важливим для збільшення запасу ходу та терміну служби електромобіля.

Крім того, для виконання спеціалізованих функцій обслуговування з надзвичайно низьким енергоспоживанням, таких як періодичні заплановані вимірювання комірок та аналіз стану, необхідні для функціональної безпеки, СМВ може працювати незалежно від головного контролера BMS. Функції безпеки, такі як сигналізація про перевищення або зниження напруги, теплове навантаження та аварійні сигнали, спрацьовують автономно.

Також важливим елементом системи моніторингу є канали передачі даних між окремими структурними блоками BMS. Найбільш поширеним варіантом є дротова система комунікації. Така архітектура між з'єднань виглядає більш привабливою з точки зору вартості окремих компонентів і матеріалів. Сучасний рівень технологій дозволяє отримати будь яку конфігурацію шин зв'язку із застосуванням гнучких і високо надійних шлейфів на основі полімерів. Однак є і деякі вади такого підходу, що пов'язані з ізоляцією, електромагнітними завадами і великою кількістю провідників.

У дротовій топології BMS розповсюджені рішення на основі ізольованих UART-приймачів з високою стійкістю до завад, що суттєво поліпшує ситуацію з електромагнітною сумісністю. Ізольований UART (Iso-UART) надає надійний високошвидкісний зв'язок між кількома електрично з'єднаними блоками моніторингу та полегшує зв'язок в умовах складної топології комірок акумулятора. Для додаткової стійкості такий варіант з'єднання реалізує резервне кільце, яке

підтримує зв'язок між усіма підключеними ІС у разі розриву з'єднання. стійкість зв'язку забезпечується алгоритмом обчислення контрольної суми для перевірки цілісності даних. Цей метод використовується для виявлення помилок, які могли з'явитися під час передачі або зберігання даних.

Іншим методом підвищення електромагнітної стійкості і електричної ізоляції окремих елементів моніторингу і балансування (СМВ) є забезпечення ізоляції акумуляторного блоку з використанням бездротових приймачів-передавачів. Перевагою бездротової топології є те, що повністю гарантована електрична ізоляція і підвищена завадостійкість. Для бездротових технологій застосовують Bluetooth-системи автомобільного класу з підтримкою підключеної BLE, що забезпечує низьке енергоспоживання.

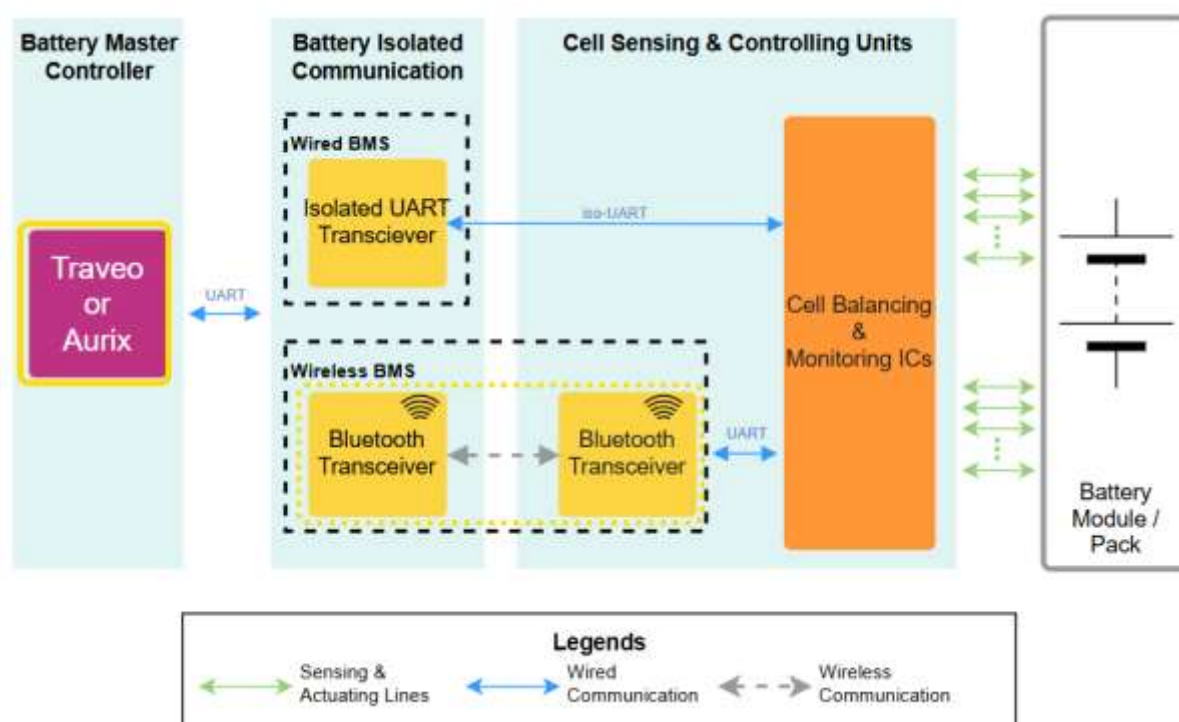


Рисунок 2.2 – Структурна схема BMS з використанням дротового, або бездротового зв'язку

На структурній схемі представлені основні блоки системи моніторингу:

- головний блок керування на базі мікро контролера;

- шлюз комунікації між блоком керування і блоком контролю і балансування;
- і, безпосередньо, блок елементів акумулятора.

Потрібно зауважити, що функції BMS не обмежуються якимось одним режимом роботи. Система моніторингу працює як в період заряджання акумулятора так і в робочому режимі, коли акумулятор працює в якості джерела енергії для силового, тобто тягового інвертора (рис.2.3).

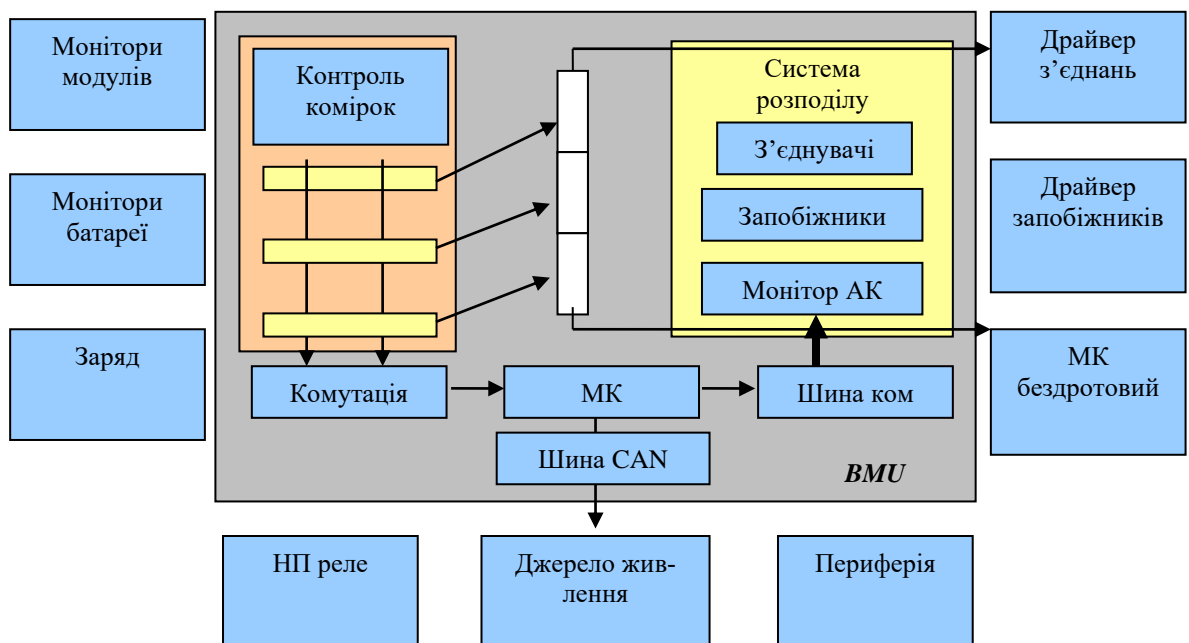


Рисунок 2.3 – Узагальнена структурна схема системи моніторингу

Схема включає як сам акумулятор, так функціональні блоки, що входять до складу системи. Це і система розподілу, що включає з'єднувачі, запобіжники, блок контролю, комутаційні пристрої, обчислювальне ядро, напівпровідникові реле, засоби зв'язку (дротові, або бездротові), вторинні джерела живлення, генератори опорної напруги і струму, різноманітні драйвери виконуючих пристроїв, периферійні блоки зв'язку, інтерфейси програмування, енергонезалежну пам'ять і таке інше.

2.1 Компоненти систем моніторингу

В розглянутій структурі (рис. 2.3) складно виділити окремо один, або групу головних компонентів, тому черговість огляду буде довільною.

Контактори в блоці комутації забезпечують основну функцію підключення живлення батареї або до інверторів, що керують електродвигуном під час роботи, або до бортової системи під час заряджання. Структурна схема блоку включає драйвер соленоїда DRV3946-Q1 (рис. 2.4). Цей пристрій може керувати двома соленоїдами від каскаду живлення з налагоджуваним піковим струмом і струмом утримання за допомогою інтерфейсу SPI. Здатність знизити струм під час утримання дозволяє підвищити енергетичну ефективність блоку. Інтегрована схема швидкого розряду запобігає контактному зварюванню. Вбудована самоперевірка включає діагностику увімкненого та вимкненого станів, що підвищує надійність системи.

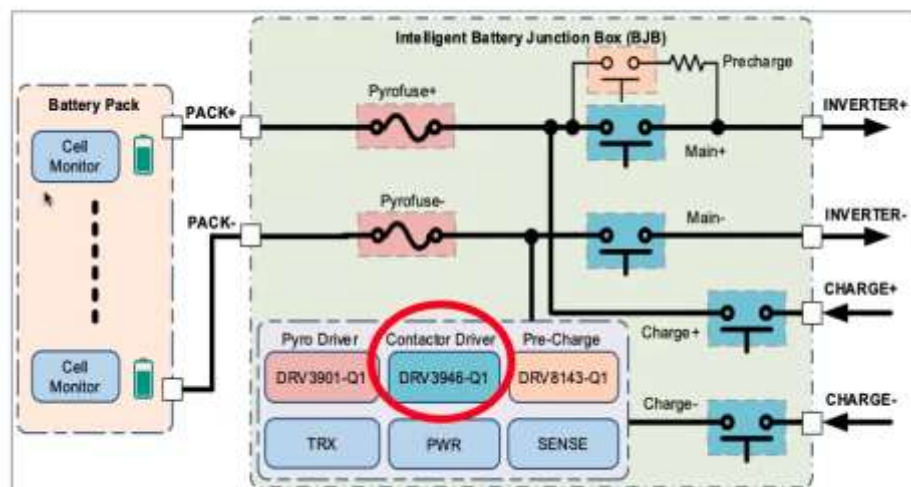


Рисунок 2.4 – Структурна схема блоку комутації (TI)

Драйвер VQB79718 -Q1 – це пристрій, що відповідає стандартам функціональної безпеки та має апаратні можливості що відповідають найвищому рів-

ню цілісності автомобільної безпеки, тобто системі класифікації ризиків, визначеній стандартом ISO 26262.

Деякі з ключових функцій драйверу соленоїдів включають:

- спеціалізовані сучасні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) для кожної з 18 комірок;
- висока точність вимірювання АЦП ± 1 мВ;
- вимірювання напруги окремого елемента та струму акумуляторної з періодом 64 мкс;
- резервний АЦП для екстремальних умов з точністю 10 мВ

Точність вимірювань елемента безпосередньо впливає на показники діапазон руху електромобіля, наприклад для блоку LFP, який має більш плаский профіль розряду напруги, різниця між точністю 10 мВ і 1 мВ може призвести до збільшення діапазону пробігу за рахунок більш якісного розподілення енергії в елементах акумулятору на 100 км для 450-кілометрової батареї.

Надмірність у вимірюваннях параметрів комірок забезпечує більшу гарантію точності, оскільки запобігає похибок у визначенні стану батареї. Синхронізація вимірювань напруги та струму також призводить до меншої похибки у визначенні стану працездатності акумуляторної батареї.

Відключення батареї в умовах несправності є важливою функцією безпеки в електромобілі, за це відповідає драйвер пірозапобіжника DRV3901-Q1. Два поширені підходи полягають у використанні плавкого запобіжника, який спрацьовує на основі теплових умов надструму, або пірозапобіжника, який приводиться в дію електронним драйвером. Пірозапобіжники забезпечують більш високу надійність і швидше спрацьовування та широко використовуються, наприклад, в системах піропатронів подушок безпеки. Привід для них часто може мати дискретні рішення. Високо інтегрований драйвер пірозапобіжника DRV3901-Q1 забезпечує швидкий час відгуку завдяки використанню прямого двоконтактного апаратного інтерфейсу, який можна безпосередньо сполучати із

зовнішнім датчиком UIR (напруга, струм, опір), таким чином обходячи інтерфейс SPI та усунення необхідності втручання мікро контролера (рис. 2.5).

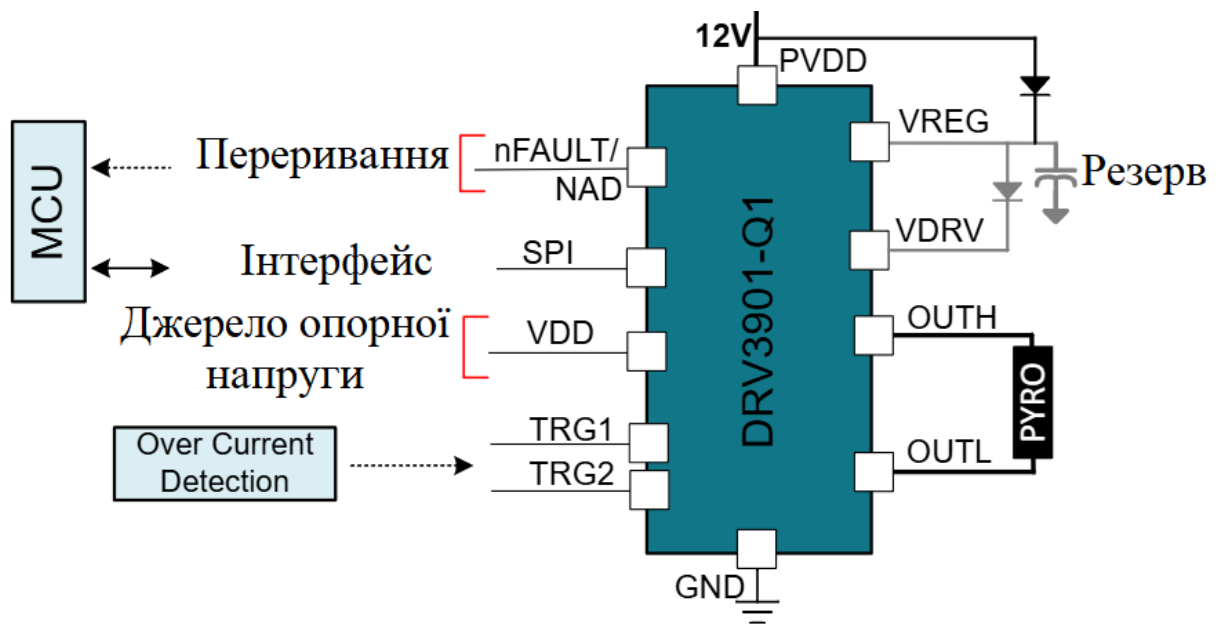


Рисунок 2.5 – Схема підключення драйвера пірозапобіжника DRV3901-Q1 (TI)

Послідовність спрацьовування може бути налаштована через інтерфейс SPI, щоб відповідати профілям різних запобіжників. Вбудований зарядний насос забезпечує мінімальне падіння вихідної напруги. Резервне живлення може забезпечуватися зовнішнім резервним конденсатором в умовах, коли основне живлення від батареї недоступне. DRV3901-Q1 контролює розрядний струм конденсатора для забезпечення нормальної роботи. Запобігання пропуску аварійної ситуації забезпечується циклічними перевірками резервування на інтерфейсі SPI, резервними контактами для прямого апаратного спрацьовування та окремими захищеними драйверами високого та низького рівня.

Завдання системи керування акумулятором полягає в постійному контролі стану заряду та справності акумулятора. Жоден з цих показників не можна виміряти безпосередньо, обидва мають бути розраховані або виведені з інших вимірювань. Визначення стану заряду (який визначає дальність руху) вимагає

вимірювання напруги, струму, імпедансу, температури, ємності та співставлення з нещодавнім профілем заряджання/розряджання акумулятора. Стан справності аналогічно визначається на основі врахування історії більшості вищезазначених факторів, а також кількості минулих циклів заряджання та розряджання (рис.2.6).

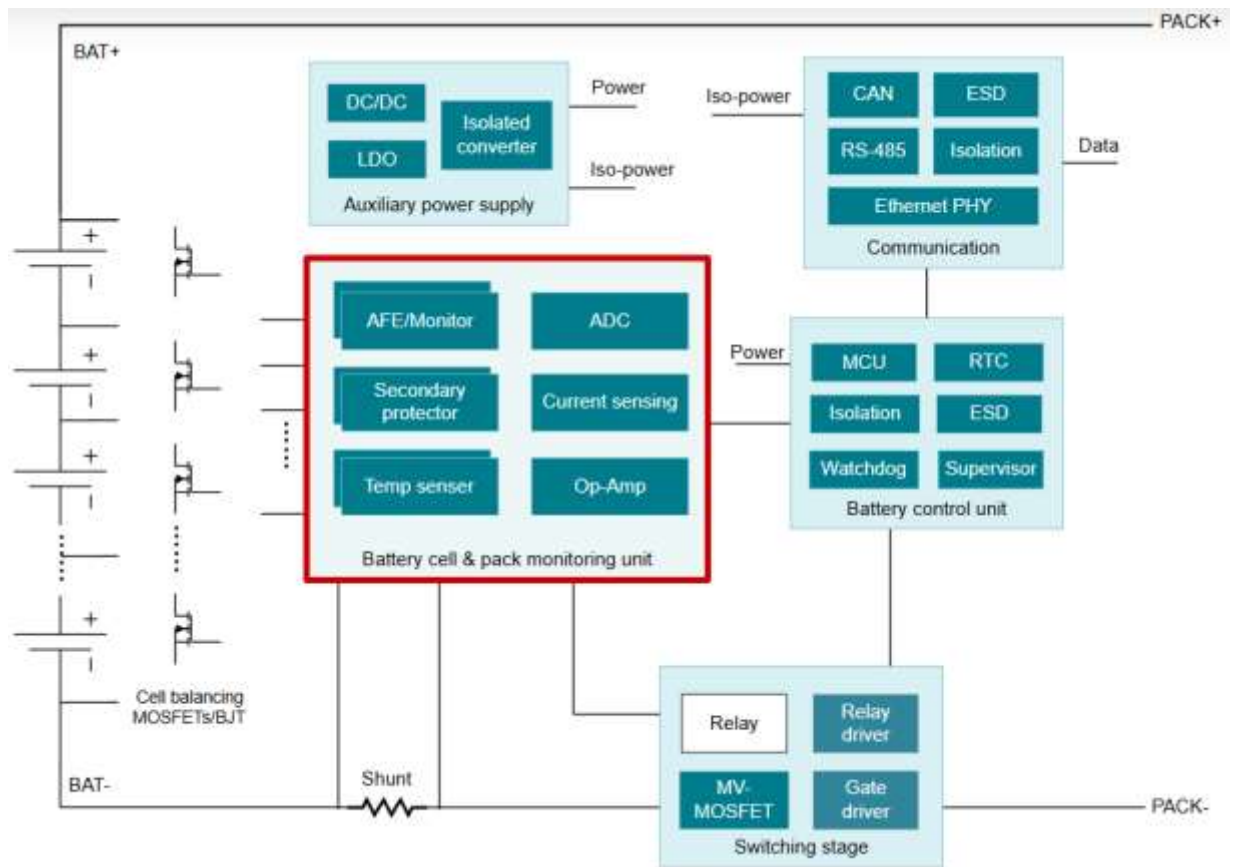


Рисунок 2.6 – Структура контролера системи моніторингу стану акумулятора електромобіля

3 РОЗРОБКА ФРАГМЕНТУ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

Розробка будь якого електронного пристрою починається з ескізу структурної схеми. В якості аналога для проєкту обрана структура пристрою моніторингу акумулятора, яку пропонує ТІ (рис.3.1).

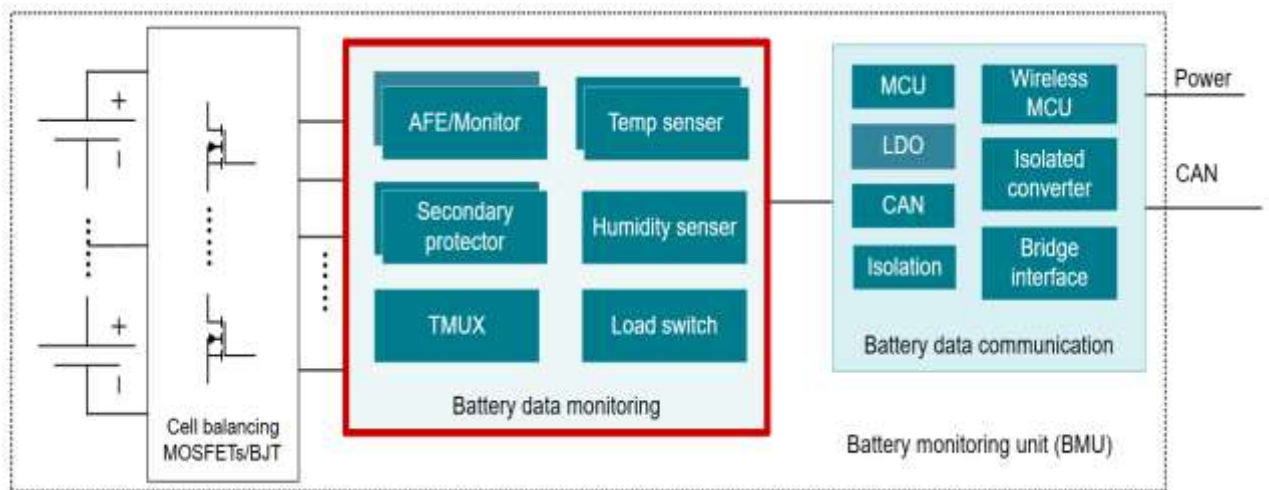


Рисунок 3.1– Узагальнена структура пристрою моніторингу стану акумулятора

Пристрій містить монітор аналогових сигналів (AFE monitor), тобто блок вимірювання струму і напруги, мультиплексори, сенсори температури, вологості і тиску, блок комутації, мікро контролер, внутрішні шини даних, провідний і без провідний інтерфейси, блоки захисту, джерела опорного напруги, блоки гальванічної розв'язки і напівпровідникові ключі системи балансування комірок акумулятора.

В роботі розроблено фрагмент системи моніторингу, що призначений для контролю напруги і струму, а також блок вимірювання вологості. Структура розроблювальної системи приведена на рисунку 3.2.

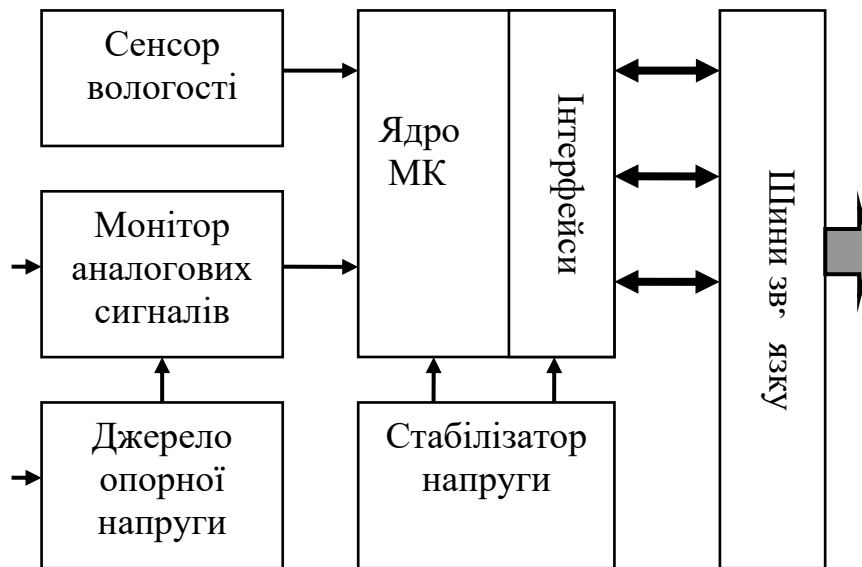


Рисунок 3.2 – Структура розроблювальної системи моніторингу

В якості ядра системи обрано 16/32 розрядний мікро контролер транспортного рівня виконання TMS570LS1224 з RISC архітектурою на базі ядра Cortex R4F. Архітектура безпеки включає два процесори з синхронізованою пам'яттю, логіку для процесора та пам'яті, корекцію помилок як для флеш-пам'яті, так і для SRAM даних, контроль парності периферійної пам'яті та можливість зворотного зв'язку на периферійних входах/виходах.

TMS570LS1224 інтегрує процесор з плаваючою комою ARM Cortex-R4F, який має конфігурації, які можуть працювати до 180 МГц, забезпечуючи до 298 DMIPS.

TMS570LS1224 має 1,25 МБ вбудованої флеш-пам'яті та 192 КБ оперативної пам'яті даних з корекцією однобітових помилок та виявленням двобітових помилок. Флеш-пам'ять цього пристрою є енергонезалежною програмованою пам'яттю, реалізованою з 64-бітним інтерфейсом шини даних. Флеш-пам'ять працює від живлення 3,3 В (той самий рівень, що й живлення вводу/виводу) для всіх операцій читання, програмування та стирання (рис. 3.3).

У конвеєрному режимі флеш-пам'ять працює з частотою системного тактового сигналу до 180 МГц. SRAM підтримує одно цикловий доступ до читання та запису в режимах байта, півслова, слова та подвійного слова в усьому підтримуваному діапазоні частот.

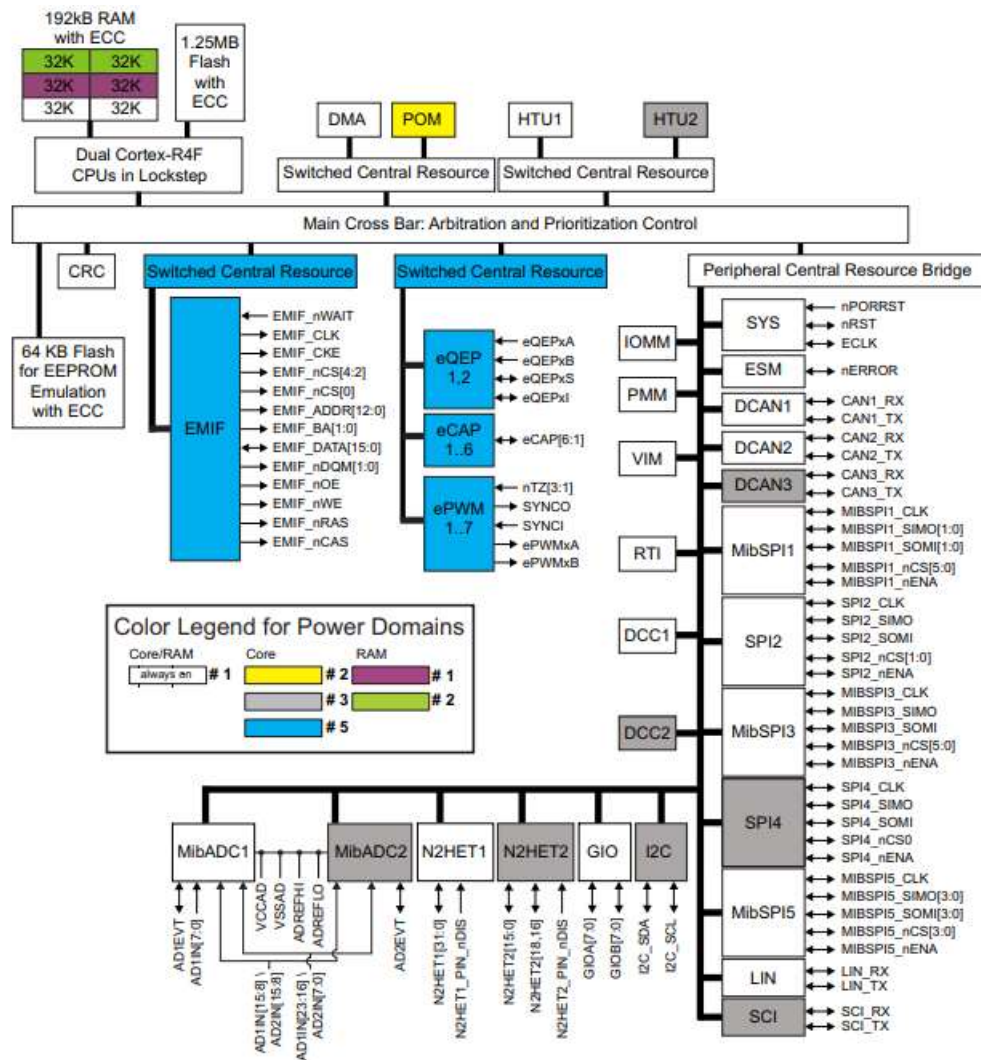


Рисунок 3.3 – Функціональна схема мікро контролеру TMS570LS1224

TMS570LS1224 оснащений периферійними пристроями для програм керування в реальному часі, включаючи два синхронізуючі співпроцесори високого класу Next Generation High-End Timer (N2HET) з кількістю входів до 44, сім модулів покращеного широтно-імпульсного модулятора (ePWM) з кількіс-

тю виходів до 14 та два 12-бітні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що підтримують до 24 входів.

В якості ІС моніторингу аналогових сигналів обрано TLE9012DQU (Infineon). Інтегральна схема моніторингу та балансування літій-іонних акумуляторів TLE9012DQU – це багатоканальна мікросхема для моніторингу та балансування акумуляторів, розроблена для літій-іонних акумуляторних блоків, що використовуються в багатьох сферах застосування в автомобільному світі (електромобілі будь-якого типу: MHEV, HEV, PHEV та BEV тощо), промислового (системи накопичення енергії) та споживчому секторі (наприклад, системи управління будинком, для електричних велосипедів, домашні накопичувачі енергії тощо) (рис. 3.4).

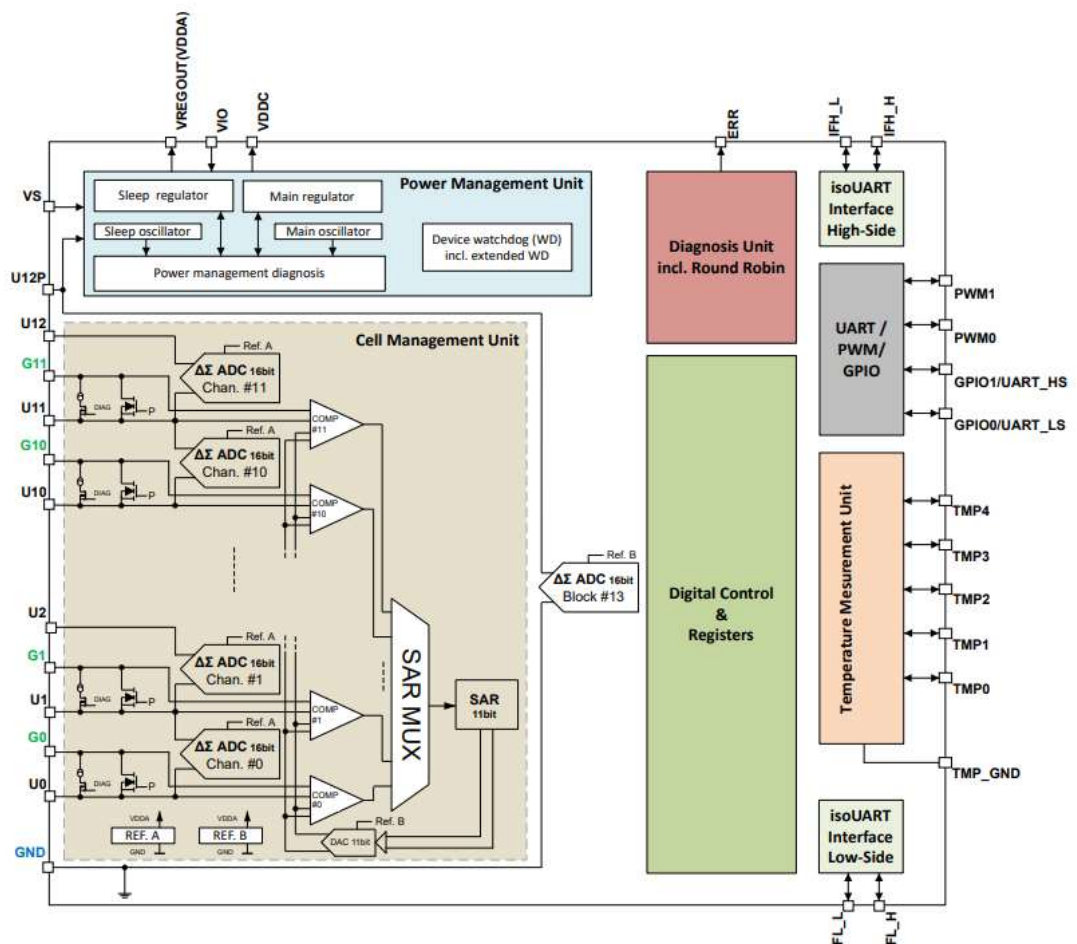


Рисунок 3.4 – Функціональна схема моніторингу аналогових сигналів

TLE9012DQU виконує чотири основні функції: вимірювання напруги на елементах, вимірювання температури, балансування елементів та ізольований зв'язок з головним контролером акумулятора. Крім того, TLE9012DQU надає необхідні діагностичні інструменти для забезпечення належного функціонування, гарантуючи безпеку осіб поблизу контрольованого акумулятора.

Основні функції ІС моніторингу аналогових сигналів

- контроль напруги до 12 послідовно з'єднаних елементів акумулятора;
- підтримка гарячого підключення;
- 16-бітний дельта-сигма АЦП для кожної комірки з можливістю вибору режиму вимірювання;
 - високоточне вимірювання для розрахунку SoC та SoH;
 - вбудований датчик напруги живлення з алгоритмом цифрової компенсації та вимірюваннями з температурною компенсацією;
 - додатковий АЦП з тими ж характеристиками фільтра усереднення, що й удосконалений механізм безпеки "End to End";
 - п'ять каналів вимірювання температури для зовнішніх термісторів NTC;
 - внутрішні датчики температури;
 - вбудований балансувальний перемикач, що забезпечує балансувальний струм до 200 мА;
 - диференційний послідовний комунікаційний інтерфейс 2 Мбіт/с;
 - додаткові чотири виводи GPIO, наприклад, для підключення зовнішньої EEPROM;
 - внутрішня циклічна процедура скидання запускає більшість механізмів діагностики.

В якості сенсора вологості обрано інтегрований датчик НІН-3602-А.

Датчик має тришарову ємнісну конструкцію, платинові електроди та терморезистивний полімер і вбудовану систему обробки сигналу. Під час роботи водяна пара в діелектричному шарі активного конденсатора врівноважується з

навколишнім простіром. Пористий платиновий шар захищає діелектричну реакцію від зовнішніх впливів, а захисний полімерний шар зверху забезпечує механічний захист платинового шару від забруднень, таких як пил та мастила.

Оскільки вихідні дані всіх абсорбційних датчиків вологості залежать від температури, в структурі передбачена температурна компенсація. НІН-3602-А містить на підкладці платиновий термометр опору з номіналом 1000 Ом, який включено до схеми термокомпенсації.

4 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ І КОНСТРУКЦІЇ БЛОКУ

Спираючись на розроблену структурну схему і обрані компоненти було розроблено схему електричну принципову (рис. 4.1).

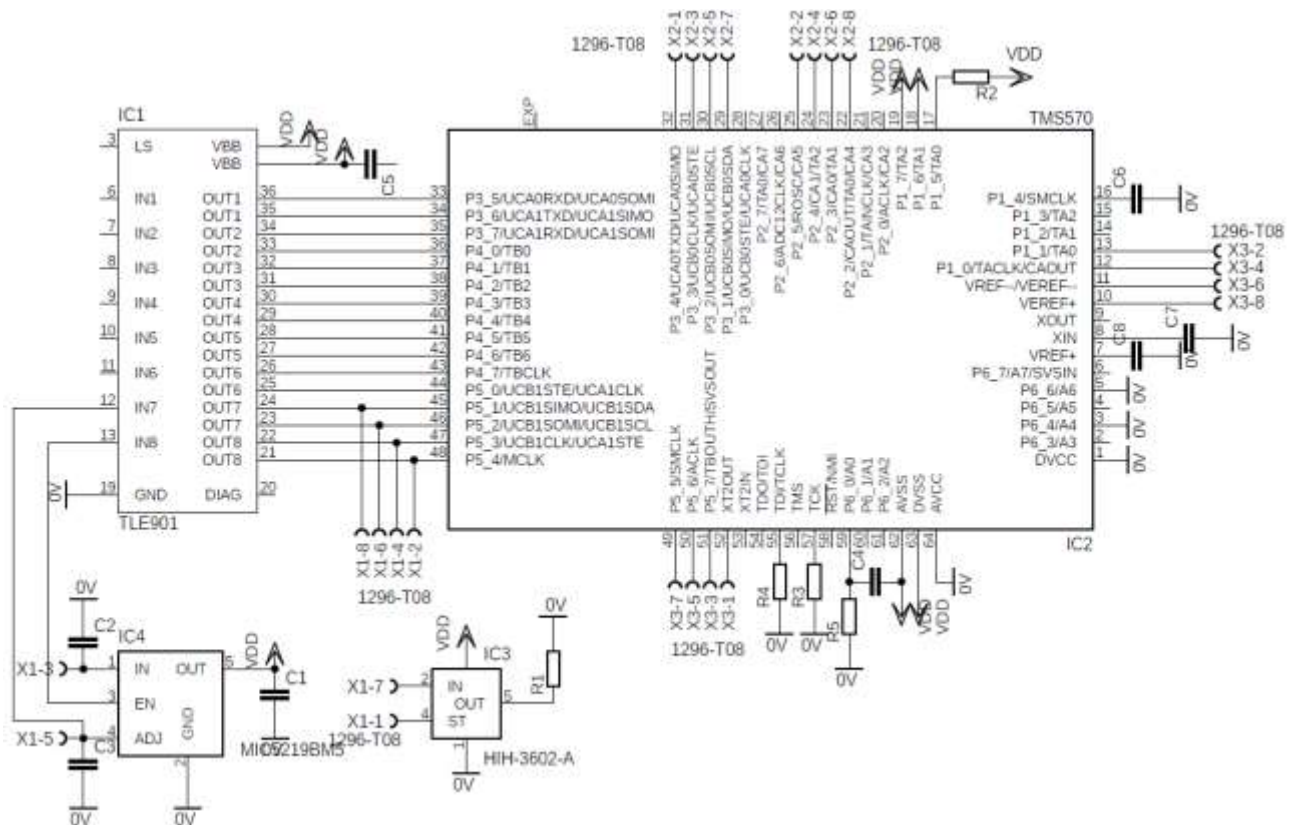


Рисунок 4.1 – Схема електрична принципова

На основі електричної схеми була побудовано конструкцію друкованої плати пристрою (рис. 4.2).

На рисунку відображено вид конструкції друкованої плати, що містить зображення компонентів схеми, їх контури і заборонену зону для трасування і монтажу, а також трасування між'єднань, виконаних в двох шарах металізації.

Розмір друкованої плати 47x34 мм.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розглянуто методи і засоби контролю параметрів акумуляторів.

На основі аналізу були прийняті рішення щодо шляхів вирішення поставленої задачі, методів та засобів її реалізації.

Розроблені структурні схеми фрагменту системи контролю параметрів акумуляторів і конструкція пристрою.

Також із застосуванням системи автоматизованого проектування розроблена конструкція блоку системи контролю і технологічні файли для виробництва.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. «Мікропроцесорні системи контролю та керування»: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
- 2 <http://www.ti.com>
- 3 Hardware for Providing Smart Farming Technologies. / Volodimir Karnaushenko, Liudmyla Sviderska. DOI: 10.35598/mcfpga.2023.003
- 4 Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 241с.
- 5 Інформаційні технології в транспортних додатках. Горбенко Є.О., Васильєв Ю.С., Карнаушенко В.П., Пятайкина М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178 с.
- 6 «Прилади та пристрої інтегральної електроніки» Карнаушенко В.П. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Васильєв Ю.С. Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
- 7 Field Programmable Counter Arrays Integration with Field Programmable Gates Arrays, p.p.14-16. I Міжнародна науково-практична конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розробки пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС» MC&FPGA-2019.
- 8 Головні тенденції у виробництві електроніки. Васильєв Ю.С., Горбенко Є.О., Карнаушенко В.П., Пятайкина М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178.