

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного
менеджменту

Розвадовський Назарій Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.518+621.311.243

(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану
акумуляторних батарей (BMS) у системах накопичення енергії для сонячних
електростанцій

(назва роботи)

Інженерія відновлюваної енергетики

(назва освітньої програми)

152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело**

Здобувач освітнього ступеню Н.М. Розвадовський

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Миндюк Валентин Дмитрович, доцент, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент

В.С. Цих

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національно технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту

Освітній рівень Бакалавр

Спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри
інформаційно-вимірювальних
технологій та енергетичного
менеджменту

В.С. Цих

“ ” 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Розвадовському Назарію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану акумуляторних батарей (BMS) у системах накопичення енергії для сонячних електростанцій

керівник роботи Миндюк Валентин Дмитрович, доцент, к. т. н.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “5” травня 2026 року №204/7

2. Строк подання студентом роботи 15 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз сучасних методів та засобів моніторингу акумуляторних батарей

Проектування архітектури інформаційного-вимірювальної системи.

Алгоритмічне та програмне забезпечення обробки результатів вимірювань.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтролер</i>	<i>доцент Яворський А.В.</i>		
<i>Перевірка на плагіат</i>	<i>доцент Миндюк В.Д.</i>		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдань бакалаврської роботи.	10.05.2026	
2	Складання плану.	15.05.2026	
3	Підбір джерел, оброблення зібраних матеріалів.	25.05.2026-30.05.2026	
4	Написання вступу та Роздіру 1.<<Аналіз сучасних методів та засобів моніторингу акумуляторних батарей>>	02.06.2026-03.06.2026	
5	Написання Розділу 2 <<Проектування архітектури інформаційного-вимірювальної системи>>	05.06.2026-06.06.2026	
6	Написання Розділу 3 <<Алгоритмічне та програмне забезпечення обробки результатів вимірювань>>	07.06.2026-08.06.2026	
7	Оформлення роботи.	09.06.2026-12.06.2026	

Студентка

(підпис)

Розвадовський Н.М

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Миндюк В.Д.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Розвадовського Н.М. «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану акумуляторних батарей (BMS) у системах накопичення енергії для сонячних електростанцій». Дипломна робота освітнього рівня – бакалавр, на правах рукопису. Спеціальність -152 «Метрологія та інформаційно вимірювальна техніка». – Івано-Франківськ, 2026.

Бакалаврська робота містить: 63 сторінок, 7 рисунків, 1 додаток.

Присвячена розробленню прецизійної інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану акумуляторних батарей (BMS) для високовольтних багатоелементних систем накопичення енергії сонячних електростанцій (на базі літій-іонних комірок хімії NMC у конфігурації 88S).

Мета роботи: підвищення точності збору даних та забезпечення достовірного оцінювання експлуатаційних параметрів акумуляторних батарей для запобігання аварійним ситуаціям та подовження їх життєвого циклу під час роботи з гібридним інвертором потужністю 30 кВт.

Основні результати дослідження та практичне значення: Спроектовано розподілену ієрархічну апаратну архітектуру IBC (Master-Slave) із застосуванням прецизійних вимірювальних перетворювачів (марганіновий шунт 100 мкОм, 16-бітні сигма-дельта АЦП, ізольована шина зв'язку), що гарантує високу завадостійкість і безпеку від високих потенціалів. Розроблено та програмно реалізовано комбінований алгоритм розрахунку ступеня заряду (SoC), що поєднує метод динамічного підрахунку кулонів та корекцію за напругою розімкненого кола (OCV) у стані спокою. Це дозволило ефективно нівелювати кумулятивну інструментальну похибку та зменшити загальну похибку вимірювань до $\pm 1-2\%$. Запропоновано математичну модель динамічного оцінювання стану здоров'я (SoH) комірок на основі вимірювання внутрішнього еквівалентного опору під час різких стрибків струмового навантаження. Реалізовано протокол безперервної інформаційної взаємодії з гібридним інвертором Deue по шині CAN 2.0B для забезпечення багаторівневого апаратного захисту та предиктивного обмеження струмів (Derating).

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні повністю робочого, масштабованого комплексу BMS, який мінімізує вплив апаратних похибок, перетворює акумуляторну збірку на інтелектуальний вузол розумної мережі та гарантує абсолютну безпеку експлуатації потужних систем накопичення енергії.

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, СИСТЕМА
УПРАВЛІННЯМИ БАТАРЕЙ, BMS, СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ,
ЛІТІЙ-ІОНІЙ АКАМУЛЯТОР, СТУПЕНЬ ЗАРЯДУ, СТАН ЗДОРОВ'Я,
ГІБРИДНИЙ ІНВЕРТОР, МІКРОКОНТРОЛЕР.

ABSTRACT

N.M. Rozvadovsky. "Development of an Information-Measurement System for Monitoring the State of Batteries (BMS) in Energy Storage Systems for Solar Power Plants". Bachelor's degree thesis, as a manuscript. Specialty 152 "Metrology and Information Measurement Technology". – Ivano-Frankivsk, 2026.

The bachelor's thesis contains: 63 pages, 7 figures, 1 appendix.

Thesis is devoted to the development of a precision information-measuring system for monitoring the state of batteries (BMS) for high-voltage multi-cell energy storage systems of solar power plants (based on Li-ion NMC cells in an 88S configuration).

The purpose of the work: to improve the accuracy of data collection and ensure reliable estimation of battery operational parameters to prevent emergency situations and extend their life cycle when operating with a 30 kW hybrid inverter.

Main research results and practical significance: A distributed hierarchical hardware architecture of the IMS (Master-Slave) was designed using precision measuring transducers (100 μOhm manganin shunt, 16-bit sigma-delta ADCs, isolated communication bus), which guarantees high noise immunity and safety from high potentials. A combined algorithm for calculating the state of charge (SoC) was developed and implemented in software, combining the dynamic Coulomb counting method and open-circuit voltage (OCV) correction in the resting state. This effectively leveled the cumulative instrumental error and reduced the overall measurement error to $\pm 1\text{-}2\%$. A mathematical model for dynamic estimation of the state of health (SoH) of cells based on measuring the internal equivalent resistance during sharp current load spikes is proposed. A protocol for continuous information interaction with the Deye hybrid inverter via the CAN 2.0B bus was implemented to ensure multi-level hardware protection and predictive current limitation (Derating).

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a fully functional, scalable BMS complex that minimizes the impact of hardware errors, transforms the battery assembly into an intelligent smart grid node, and guarantees the absolute operational safety of powerful energy storage systems.

Keywords: information-measuring system, battery management system, BMS, energy storage system, lithium-ion battery, state of charge, state of health, hybrid inverter, microcontroller, metrological analysis.

INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM, BATTERY MANAGEMENT SYSTEM, BMS, ENERGY STORAGE SYSTEM, LITHIUM-ION BATTERY, STATE OF CHARGE, STATE OF HEALTH, HYBRID INVERTER, MICROCONTROLLER.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ.....	15
1.1.Класифікація систем накопичення енергії та вимоги до їх безпеки.....	15
1.2. Функціональна структура BMS: контроль напруги, струму, температури та балансування.....	17
1.3. Огляд існуючих технічних рішень на базі інтегральних схем	20
Висновки до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНОГО-ВІМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	24
2.1. Вибір та обґрунтування вимірювальних перетворювачів	24
2.1.2. Прецизійні подільники напруги.....	26
2.2 Апаратна реалізація збору та обробки даних	29
2.2.1. Сенсорний рівень (Первинне перетворення)	30
2.2.2. Рівень первинного збору даних (вимірювальні модулі).....	33
2.2.3. Рівень головного контролера та інтерфейсів обміну	35
2.3. Вибір мікроконтролера та параметрів АЦП для забезпечення заданої точності.....	38
2.3.1 Вибір мікроконтролера	38
2.3.2 Вибір розрядності АЦП	40
2.3.2 Вибір частоти дискретизації.....	41
Висновки до розділу 2.....	42
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНЕ РЕАЛІЗУВАННЯ	44

3.1. Розрахунку ступеня заряду (SoC): порівняння методу підрахунку кулонів (Coulomb Counting) та вимірювання напруги розімкненого кола (OCV)	44
3.1.2. Математична модель оцінювання стану здоров'я (SoH) на основі внутрішнього опору	47
3.1.3. Практична реалізація розрахунку SoH	49
3.2. Багаторівневого захисту інформаційно-вимірювальної системи	51
3.2.1. Захист акумуляторних комірок	51
3.2.2. Струмівий захист	52
3.2.3. Тепловий захист	52
3.3. Інформаційної взаємодії системи управління батареями (BMS) з гібридним інвертором Deue	54
3.3.1. Статуси та результати вимірювань	55
3.3.2. Динамічні експлуатаційні ліміти	55
3.3.3. Завчасне обмеження струмів	56
Висновки до розділу 3	57
ВИСНОВОК	59
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ СИМВОЛІВ

АСНЕ- Акумуляторні системи накопичення енергії (BESS- Battery Energy Storage Systems)

СЕС- Сонячна електрична станція

ВРЗ- Визначення рівня заряд (SoC- State of Charge)

ЗБР - Зона безпечної роботи (SOA- Safe Operating Area)

СУБ - Система управління батареєю (BMS-Battery Management System)

АІ - Аналоговий інтерфейс (AFE-Analog Front End)

ІВС - Інформаційно-вимірювальної системи

ОРК - Обчислення із рухомою комою(FPU - Floating-Point Unit)

ВСТУП

Актуальність теми

В умовах глобального переходу до відновлюваних джерел енергії та необхідності забезпечення енергетичної незалежності України, сонячні електростанції стають невід'ємною частиною енергосистеми. Проте нестабільність генерації, залежна від погодних умов та часу доби, вимагає обов'язкового використання систем накопичення енергії BESS для балансування мереж та забезпечення безперебійного живлення об'єктів. Особливої актуальності це набуває при інтеграції потужного перетворювального обладнання, такого як трифазні гібридні інвертори потужністю 30 кВт, які вимагають використання високовольтних акумуляторних збірок для мінімізації струмових втрат.

На сьогодні найефективнішим рішенням для таких систем є використання літій-залізо-фосфатні LiFePO_4 акумулятори. Вони витримують до 6000+ циклів заряду-розряду, мають глибокий розряд до 90 % і слугують понад 10–15 років які демонструють високу питому ємність [1]. Однак експлуатація таких багатоелементних збірок супроводжується значними технологічними викликами. Літієві комірки мають вузьку зону безпечної експлуатації, і вихід параметрів струму, напруги чи температури за допустимі межі ініціює незворотну деградацію або аварійні ситуації.

Вирішенням цієї проблеми є застосування систем управління батареями (BMS). Проте більшість комерційних рішень фокусується виключно на захисних функціях, нехтуючи метрологічними аспектами. В умовах реальної експлуатації виникають суттєві похибки вимірювань через температурний дрейф датчиків, завади від силової електроніки та обмежену роздільну здатність АЦП. Це призводить до викривлення розрахунків критично важливих параметрів - ступеня заряду (SoC) та стану здоров'я (SoH) акумулятора. Помилкова оцінка ємності унеможливорює ефективне управління енергетичними потоками. Саме

тому розроблення прецизійної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) моніторингу BMS, яка забезпечить точний безперервний збір даних, алгоритмічну компенсацію похибок та надійну комунікацію з інверторним обладнанням, є надзвичайно актуальним науково-практичним завданням.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у розробленні інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану акумуляторних батарей (BMS) у системах накопичення енергії для СЕС, що забезпечує підвищену точність збору даних та достовірне оцінювання їхніх експлуатаційних параметрів.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- Аналіз сучасних методів, алгоритмів та апаратних засобів моніторингу параметрів акумуляторних батарей у високовольтних системах накопичення енергії;
- Розроблення структурної та функціональної архітектури ІВС моніторингу BMS для конфігурації багатoeлементної збірки з обґрунтуванням вибору засобів вимірювальної техніки;
- Розроблення алгоритмічного забезпечення для розрахунку ступеня заряду (SoC) акумуляторів із застосуванням методів цифрової компенсації похибок;
- Проведення метрологічного аналізу ІВС: оцінка джерел похибок вимірювальних каналів та розрахунок сумарної невизначеності вимірювань за допомогою табличних процесорів;
- Розроблення методичних рекомендацій щодо калібрування вимірювальних каналів та забезпечення безпечної інформаційної взаємодії BMS із силовим інверторним обладнанням.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процеси вимірювання, збору та контролю параметрів високовольтних літій-іонних акумуляторних батарей під час їх експлуатації у системах накопичення енергії.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є методи, алгоритми та апаратно-програмні засоби інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану акумуляторних батарей, а також умови забезпечення їхньої метрологічної точності.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувались такі методи дослідження:

- Теоретичний аналіз літературних джерел та функціоналу існуючих систем управління батареями;
- Методи системного аналізу та структурно-функціонального моделювання (для проектування архітектури IBC за принципом Master-Slave);
- Теорія електричних кіл (для обґрунтування схемотехнічних рішень вимірювальних каналів);
- Метрологічний та математичний аналіз (для оцінювання інструментальних похибок та розрахунку параметрів за допомогою засобів обчислювальної техніки);
- Метод наукового узагальнення та систематизації.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у технічній реалізації інформаційно-вимірювальної системи BMS для багатоелементної високовольтної збірки літій-іонних акумуляторів, адаптованої для роботи з гібридним сонячним інвертором потужністю 30 кВт і більше. Впровадження розробленої системи дозволяє мінімізувати вплив інструментальних похибок на результати вимірювання струму, напруги та температури, що гарантує високу точність визначення доступного енергозапасу (SoC). Це, у свою чергу, запобігає аварійним ситуаціям, пов'язаним з перезарядом чи глибоким розрядом комірок, суттєво збільшує експлуатаційний ресурс батарейного блоку та забезпечує загальну стабільність і енергоефективність роботи промислових і приватних сонячних електростанцій.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

1.1.Класифікація систем накопичення енергії та вимоги до їх безпеки

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячних електростанцій (СЕС), у сучасні енергосистеми вимагає ефективних механізмів балансування генерації та споживання. Оскільки сонячна енергія є стохастичною за своєю природою і залежить від часу доби, сезону та мінливих метеорологічних умов, виникає гостра потреба у буферизації виробленої електроенергії. Цю функцію виконують системи накопичення енергії (СНЕ), які дозволяють акумулювати надлишки згенерованої потужності в періоди пікової інсоляції та віддавати їх у мережу під час максимального навантаження. Залежно від фізичних принципів, що лежать в основі процесів перетворення та зберігання енергії, СНЕ класифікують на кілька основних категорій: механічні (гідроакумулюючі електростанції, маховики, пневматичні акумулятори), теплові (накопичувачі на розплавлених солях), електричні (суперконденсатори, надпровідні магнітні накопичувачі) та електрохімічні.

З огляду на техніко-економічні показники, високу модульність, швидкість реакції на зміну навантаження та можливість масштабування від приватних домогосподарств до промислових об'єктів, саме електрохімічні системи - акумуляторні батареї (BESS) - стали безальтернативним стандартом для оснащення сучасних СЕС [1]. Особливої актуальності використання електрохімічних накопичувачів набуває при проектуванні високопотужних вузлів на базі трифазних гібридних інверторів (наприклад, потужністю 30 кВт), які потребують високовольтних акумуляторних збірок для стабільної роботи та мінімізації струмових втрат у силових магістралях.

У класі електрохімічних систем накопичення енергії існує власна внутрішня класифікація, яка базується на хімічному складі комірок. Традиційні свинцево-кислотні (Lead-Acid) акумулятори, незважаючи на низьку початкову

вартість, стрімко втрачають свої позиції через низьку питому енергоємність, малу кількість робочих циклів та деградацію при глибоких розрядах. На зміну їм прийшли літій-іонні технології, які сьогодні абсолютно домінують на ринку. Серед розмаїття літій-іонних технологій для побудови високоємних багатoeлементних збірок (високовольтні послідовні збірочні конфігурації) оптимальними є елементи з хімією NMC (літій-нікель-марганець-кобальт-оксид) та LiFePO_4 (літій-залізо-фосфат). Зокрема, акумулятори типу NMC відзначаються надзвичайно високою щільністю енергії та стабільною кривою розряду, що дозволяє створювати компактні стійкові рішення з великим енергозапасом.

Проте використання високоенергетичних літій-іонних батарей у складі систем накопичення енергії супроводжується значними експлуатаційними викликами, головним з яких є забезпечення їхньої безпеки. Літійові комірки мають вузьку зону безпечної експлуатації (SOA), межі якої суворо регламентуються граничними значеннями напруги, струму та температури. Вихід за ці межі ініціює руйнівні хімічні реакції всередині акумулятора. Наприклад, перевищення максимально допустимої напруги заряду (понад 4,2 В для хімії NMC) призводить до виділення металевого літію на аноді та розкладання електроліту з інтенсивним виділенням газів. З іншого боку, глибокий розряд спричиняє розчинення мідного струмознімача [5], що при подальшому заряді призводить до внутрішнього короткого замикання.

Найбільш критичним сценарієм аварійної ситуації є тепловий розгін-лавиноподібний процес неконтрольованого зростання температури комірки, що супроводжується виділенням токсичних та горючих газів, розривом корпусу і, зрештою, займанням або вибухом. Зважаючи на те, що високовольтні батарейні блоки СЕС складаються із десятків послідовно з'єднаних комірок, тепловий розгін навіть одного елемента може спровокувати ланцюгову реакцію і призвести до знищення всієї системи накопичення.

З огляду на ці загрози, міжнародні стандарти (зокрема ІЕС 62619 для промислових літій-іонних систем) висувають жорсткі вимоги до безпеки

експлуатації BESS [6]. Базова вимога полягає у необхідності безперервного та багаторівневого контролю фізичних параметрів кожної окремої комірки в режимі реального часу. Система повинна мати апаратні та програмні механізми захисту від перенапруги, глибокого розряду, перевищення струмів заряду та розряду, а також перегріву. Крім того, через природний розкид внутрішнього опору та ємності комірок, виникає імперативна вимога щодо їх обов'язкового балансування, аби не допустити ситуації, коли дисбаланс напруг призведе до деградації найслабших ланок ланцюга.

Функцію забезпечення цих жорстких вимог безпеки виконує спеціалізована система управління акумуляторними батареями (BMS). Проте ефективність та надійність будь-яких захисних алгоритмів фундаментально залежать від метрологічної якості первинних даних. Таким чином, безпека сучасних систем накопичення енергії нерозривно пов'язана з точністю інформаційно-вимірювальних каналів, що робить розробку та дослідження метрологічних характеристик BMS критично важливим етапом проектування.

1.2. Функціональна структура BMS: контроль напруги, струму, температури та балансування

Система управління акумуляторними батареями (BMS) за своєю суттю є центральним програмно-апаратним ядром інформаційно-вимірювального комплексу сучасних систем накопичення енергії (BESS). Вона виконує функцію інтелектуального координатора, який забезпечує живучість, ефективність та безпеку всього масиву накопичувальних елементів. Функціональна структура BMS розробляється як багаторівнева ієрархічна архітектура, де кожен елемент підпорядкований єдиній меті - утриманню кожної окремої комірки в межах її зони безпечної експлуатації (SOA). Це завдання стає особливо складним та критично важливим у високовольтних послідовних збірочних конфігураціях (зокрема, типу 88S), що працюють під значними потужнісними навантаженнями у зв'язці з промисловими чи великими приватними гібридними інверторами.

Базова функціональна структура такої системи охоплює чотири взаємопов'язані вимірювально-керуючі канали: прецизійний контроль напруги, моніторинг струмових потоків, тепловий аудит та підсистему балансування комірок.

Першим та найбільш відповідальним вузлом у структурі є канал вимірювання та контролю напруги. На відміну від класичних низьковольтних систем, де допускається груповий моніторинг, високовольтний послідовний ланцюг літій-залізо-фосфатні акумуляторів вимагає суворого індивідуального контролю кожного окремої комірки. Оскільки літєві елементи мають чітко обмежені пороги (максимальний робочий потенціал 4,2 В та мінімальний робочий потенціал 3,0 В), вимірювальні тракти BMS повинні працювати з малими вольтами. Інформаційно-вимірювальна підсистема реалізує циклічне високошвидкісне сканування диференційних напруг для миттєвої фіксації станів перенапруги (Overvoltage) або глибокого розряду (Undervoltage). Крім безпосередньої функції аварійного захисту, динамічні показники напруги під навантаженням та в стані спокою є фундаментальним базисом для математичних алгоритмів розрахунку ступеня заряду (SoC). Відповідно, будь-яка інструментальна похибка АЦП або температурний дрейф у цьому каналі автоматично деформують усю аналітичну модель системи управління.

Контроль струму в архітектурі BMS відповідає за моніторинг та інтегрування енергетичних потоків у загальній силовій шині «заряд-розряд». Фізична реалізація цього каналу зазвичай базується на прецизійних вимірювальних шунтах або безконтактних датчиках, заснованих на ефекті Холла, що встановлюються у розрив силового кола. Для систем, інтегрованих із гібридними інверторами потужністю до 30 кВт, струмові навантаження під час пікової сонячної генерації або максимального енергорозряду можуть досягати значних величин. Функціональне призначення каналу струму є подвійним: забезпечення миттєвого апаратного та програмного захисту від надструмів (Overcurrent) та коротких замикань, а також накопичення первинних даних для кулонівського інтегрування (Coulomb Counting). Метрологічна складність тут полягає в тому, що похибка вимірювання струму (наприклад, зміщення нуля або

шум квантування) має властивість інтегруватися і накопичуватися з часом, викликаючи хронічний дрейф обчисленого значення SoC, що вимагає впровадження методів цифрової фільтрації та алгоритмів періодичної корекції за напругою розімкненого кола [13].

Температурний моніторинг (тепловий аудит) складає третій обов'язковий рівень функціональної структури. Літій-іонні акумуляторні комірки надзвичайно чутливі до температурного градієнта всередині накопичувальної шафи чи стійки. Нерівномірне нагрівання елементів призводить до різної швидкості їх внутрішньої деградації, що швидко руйнує однорідність послідовного ланцюга. Підсистема термомоніторингу використовує мережу аналогових NTC-термісторів, розподілених по фізичних модулях збірки (наприклад, закріплених безпосередньо на поверхні блоків по 10 та 8 комірок). Логіка BMS аналізує як абсолютні значення температур для запобігання тепловому розгону (Thermal Runaway), так і швидкість зміни локального нагріву. Отримані дані використовуються для динамічного обмеження максимальних струмів заряду чи розряду через інформаційні команди до інвертора, а також для керування системами активної вентиляції та кліматизації.

Завершальним і найбільш технологічно складним елементом структури є підсистема балансування комірок. Через неминучий виробничий розкид параметрів ємності та внутрішнього опору, комірки в послідовному ланцюзі під час циклічної експлуатації неминуче розбалансовуються. Функціональний блок балансування покликаний нівелювати цей ефект шляхом вирівнювання потенціалів усіх елементів. У системах великої потужності найчастіше застосовується пасивне балансування за допомогою резистивних матриць і комутаційних ключів. Алгоритм балансування повністю спирається на інформаційні дані каналу вимірювання напруги: як тільки система фіксує, що певна комірка випереджає інші за напругою під час заряду від сонячної станції, BMS замикає відповідний транзисторний ключ, пускаючи надлишковий струм в обхід елемента на баластний резистор. Це дозволяє безпечно дозарядити решту 88-елементного ланцюга до 100% ємності, максимізуючи загальний енергозапас

системи та запобігаючи локальному перезаряду окремих компонентів збірки. Таким чином, усі чотири базові функції об'єднуються в замкнуту інформаційно-вимірювальну архітектуру, що забезпечує стабільну і безпечну життєдіяльність високовольтного накопичувача.

1.3. Огляд існуючих технічних рішень на базі інтегральних схем

Сучасний етап розвитку систем (BMS) характеризується повним переходом від дискретних схемотехнічних рішень до використання високоефективних спеціалізованих інтегральних мікросхем, що класифікуються як аналогові інтерфейси збору даних.

Такий технологічний перехід зумовлений жорсткими вимогами до вимірювань показників, надійності та, радикального підвищення точності та синхронності вимірювань. У високовольтних системах накопичення енергії, які працюють у зв'язці з потужними гібридними інверторами (наприклад, потужністю від 30 до 100 кВт), вимірювальні чипи повинні забезпечувати безперервний моніторинг десятків послідовно з'єднаних комірок в умовах високого рівня електромагнітних завад. Провідні світові виробники напівпровідникових компонентів, такі як Texas Instruments та Analog Devices, пропонують готові інтегральні рішення, які об'єднують на одному кристалі прецизійні аналого-цифрові перетворювачі, комутатори для балансування, блоки апаратного захисту та ізольовані інтерфейси зв'язку.

Компанія Texas Instruments (TI) посідає провідні позиції на ринку завдяки спеціалізованій лінійці мікросхем серії bq769x, розробленій для промислових та автомобільних систем накопичення. Флагманським рішенням цієї серії є мікросхема bq76952, яка дозволяє здійснювати одночасний моніторинг від 3 до 16 послідовно з'єднаних комірок [9]. Апаратна архітектура цього чипа містить швидкісний 16-бітний сигма-дельта АЦП, який використовується для циклічного вимірювання напруги на кожному елементі, а також окремий виділений АЦП для вимірювання струму на шунті. Метрологічні характеристики

bq76952 забезпечують типову похибку вимірювання напруги на рівні ± 5 мВ у всьому робочому діапазоні температур. Особливістю рішень від TI є глибока інтеграція підсистем автономного апаратного захисту: чип здатний самостійно, без участі зовнішнього мікроконтролера, фіксувати критичні стани перенапруги, глибокого розряду та надструмів, керуючи зовнішніми силовими транзисторами через вбудовані драйвери високого рівня. Також мікросхема підтримує пряме підключення до 9 датчиків температури (NTC-термісторів), що дозволяє реалізувати щільний тепловий аудит акумуляторного масиву.

Іншим технологічним еталоном у галузі прецизійного моніторингу акумуляторів є рішення від компанії Analog Devices (ADI, що містить розробки колишньої Linear Technology). Серія інтегральних схем LTC68xx (зокрема LTC6811 на 12 каналів та LTC6813 на 18 каналів) орієнтована на застосування у високовольтних системах [10], з послідовною топологією (таких як збірки типу 88S). Ключовою перевагою чипів ADI є безпрецедентна метрологічна точність: сумарна похибка вимірювання напруги комірки не перевищує ± 1.2 мВ, а довгострокова стабільність показників забезпечується вбудованим прецизійним джерелом опорної напруги (ЗЕНЕР-діод підповерхневого типу). Архітектура АЦП у мікросхемах LTC68xx використовує спеціалізовані цифрові фільтри третього та четвертого порядків, які ефективно пригнічують високочастотні шуми та пульсації, що генеруються силовими ключами гібридних інверторів під час перетворення енергії сонячної станції. Для побудови високовольтних стеків мікросхеми ADI використовують фірмовий ізольований інтерфейс isoSPI, що дозволяє з'єднувати десятки чіпів послідовно («daisy chain») за допомогою однієї витієї пари, забезпечуючи гальванічну ізоляцію до 4 кВ між Master-контролером та Slave-модулями високої напруги.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасних методів та апаратних засобів моніторингу акумуляторних батарей у системах накопичення енергії, за результатами якого сформульовано такі висновки.

Встановлено, що для забезпечення балансування потужних сонячних електростанцій (зокрема, із застосуванням гібридних інверторів потужністю 30 кВт) оптимальним рішенням є використання високовольтних багатоеlementних літій-іонних збірок (наприклад, конфігурації 88S з електрохімічною системою NMC). Проте їх експлуатація супроводжується високими ризиками теплового розгону та деградації комірок, що вимагає жорсткого утримання кожного елемента в межах вузької зони безпечної експлуатації.

Визначено, що центральним елементом гарантування безпеки є система управління акумуляторними батареями (BMS). Для високовольтних конфігурацій її функціональна архітектура повинна забезпечувати прецизійний багаторівневий контроль диференційної напруги кожної комірки, вимірювання загальних струмових потоків, багато точковий температурний аудит та обов'язкове балансування для усунення технологічного дисбалансу елементів.

Аналіз сучасної елементної бази (на прикладі рішень від Texas Instruments та Analog Devices) довів, що побудова надійних вимірювальних каналів BMS вимагає відмови від дискретних компонентів на користь спеціалізованих інтегральних аналого-цифрових інтерфейсів (AFE). Використання таких мікросхем дозволяє досягти мілівольтової точності вимірювань, забезпечити гальванічну ізоляцію високовольтних магістралей та реалізувати ефективну цифрову фільтрацію високочастотних завад від інверторного обладнання.

Обґрунтовано, що ключова метрологічна проблема систем накопичення енергії полягає у неможливості прямого вимірювання критичних параметрів ступеня заряду (SoC) та стану здоров'я (SoH) акумулятора. Достовірність їх оцінювання (наприклад, методом кулонівського інтегрування) цілком залежить від мінімізації інструментальних похибок первинних вимірювальних каналів.

Хронічне накопичення похибок квантування, зміщення нуля або температурного дрейфу призводить до критичних помилок в оцінці доступного енергозапасу.

Для надійної роботи високовольтної системи накопичення енергії СЕС необхідно розробити спеціалізовану інформаційно-вимірювальну систему моніторингу, здатну мінімізувати вплив апаратних похибок та гарантувати високу точність збору даних. Вирішення цієї задачі вимагає детального проєктування структурної схеми ІВС, обґрунтованого вибору прецизійних вимірювальних перетворювачів та розробки адаптивних алгоритмів обробки сигналів, що буде реалізовано в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНОГО- ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Вибір та обґрунтування вимірювальних перетворювачів

При розробленні (IBC) для (BMS) одним із першочергових завдань став обґрунтований вибір первинних вимірювальних перетворювачів. Оскільки високовольтна акумуляторна збірка конфігурації 88S працює у зв'язці з потужним трифазним гібридним інвертором, вимірювальні канали повинні забезпечувати високу точність, швидкодію та стійкість до значних струмових і температурних навантажень. Для побудови надійного контуру моніторингу та захисту мною було проведено детальний аналіз та вибір сенсорів для трьох ключових каналів: струму, напруги та температури.

2.1.1. Датчики струму: порівняльний аналіз вимірювальних шунтів та датчиків на ефекті Холла

Для проектування каналу вимірювання струму загальної силової шини СНЕ перш за все необхідно визначити максимальні робочі значення. Виходячи з типових параметрів промислових гібридних інверторів (наприклад, потужністю 30 кВт) та мінімально допустимої напруги високовольтного стеку, струм у системі під час пікового розряду розраховується за формулою (2.1) [2]:

$$I_{\max} = \frac{P_{\text{нор}}}{U_{\min}} \quad (2.1)$$

Враховуючи необхідний метрологічний запас для вимірювання короткочасних перевантажень, вимірювальний канал проектується на номінальні струми понад 50-75 А. Для реалізації цього каналу було розглянуто два типи первинних перетворювачів

Вимірювальний шунт є пасивним резистивним перетворювачем. Його головними перевагами, які були враховані при аналізі, є надзвичайно висока точність (клас точності до 0,1 або 0,2), відсутність власного зміщення нуля (пасивний елемент) та лінійність характеристики у всьому діапазоні вимірювань. Це критично важливо для інтегрального методу підрахунку кулонів, оскільки будь-яке зміщення нуля призводить до хронічного накопичення похибки та дрейфу показника SoC.

Проте використання шунта на струмах близько 50–75 А супроводжується значним виділенням тепла $P = I_2 \times R$ та вимагає розриву силового ланцюга. Що ще важливіше для високовольтної системи на 75 В - шунт не забезпечує гальванічної ізоляції, тому для підключення його аналогового виходу до мікроконтролера Master-блоку потрібно було б проектувати складні схеми з ізольованими підсилювачами або оптичними розв'язками.

Датчики струму на ефекті Холла (зокрема, замкненого типу - Closed Loop) забезпечують природну гальванічну ізоляцію вимірювального ланцюга від високовольтної силової шини, оскільки встановлюються безпосередньо на кабель без розриву мідного провідника. Вони мають нульові втрати потужності на нагрівання і високу стійкість до тривалих струмових перевантажень.

Основними технічними недоліками датчиків Холла є наявність магнітного гістерезису, чутливість до зовнішніх магнітних полів (що створюються трансформаторами інвертора на великій потужності) та помітний температурний дрейф нульової точки. Похибка зміщення нуля в таких датчиках може досягати 10–50 мА, що при щоденній циклічній експлуатації СЕС викликає суттєву похибку розрахунку ємності батареї.

Обґрунтування вибору: Для забезпечення максимальної метрологічної точності системи та безпомилкового підрахунку кулонів в алгоритмі визначення SoC, і прецизійний вимірювальний шунт опором 100 мкОм із низьким температурним коефіцієнтом опору. Для вирішення проблеми безпеки та високої синфазної напруги, аналоговий вихід шунта інтегровано зі спеціалізованим (AFE) чіпом головного модуля Master BMS, який має вбудовану систему

цифрової гальванічної ізоляції та прецизійний 16-бітний сигма-дельта. Таке рішення дозволило поєднати еталонну точність резистивного методу вимірювання із повною електричною безпекою керуючої низьковольтної частини ІВС.

2.1.2. Прецизійні подільники напруги

Контроль напруги в розробленій системі накопичення енергії реалізовано на двох рівнях: поосередковий моніторинг (для кожної комірки) та контроль загальної напруги всього високовольтного стеку. Вимірювання напруги кожної окремої комірки виконується локальними Slave-модулями збору даних, які підключаються через багатоканальні комутаційні матриці АЦП. Однак, для дублювання каналів безпеки, виникає необхідність прямого вимірювання загальної високої напруги батарейного стеку (яка в таких системах сягає кількох сотень вольт) на вході Master-модуля. Для безпечного введення такого сигналу в аналоговий тракт.

Вимірювання напруги кожної окремої комірки виконується безпосередньо Slave-модулями збору даних. Оскільки фізична топологія розділена на 9 блоків (8 блоків містять по 10 комірок, а 1 блок - 8 комірок), шлейфи балансування та моніторингу підключаються до вбудованих у Slave-плати багатоканальних комутаційних матриць АЦП. Ці спеціалізовані мікросхеми здійснюють диференційне вимірювання напруги на внутрішніх резистивних перетворювачах, легко витримуючи статичний зсув потенціалу.

Однак, для дублювання каналів безпеки та забезпечення правильної інформаційної взаємодії з гібридним інвертором, виникла необхідність прямого вимірювання загальної високої напруги батарейного стеку $U_{\text{ном}} \approx 325,6\text{В}$, $U_{\text{max}} \approx 370\text{В}$ на вході Master-модуля. Для безпечного введення такого сигналу в аналоговий тракт мікроконтролера, який оперує опорною напругою 2,5 В або 3,3 В, було спроектовано прецизійний резистивний подільник напруги.

При розрахунку подільника керувався правилом забезпечення мінімального струму витoku через вимірювальний ланцюг (для запобігання саморозряду батареї під час простою) та мінімізації інструментальних похибок. Схема подільника складається з високосного верхнього плеча $R_1=4\text{МОм}$ та низьковольтного нижнього плеча $R_2=36\text{кОм}$. Розрахунок номіналів опорів базується на законах Ома за формолою (2.2) і зображення в (рис 2.1) [3]:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{ВХ}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 370\text{В} \times \frac{36\text{кОм}}{4000\text{кОм} + 36\text{кОм}} = 370 \times \frac{36}{4036} = 3,3\text{В} \quad (2.2)$$

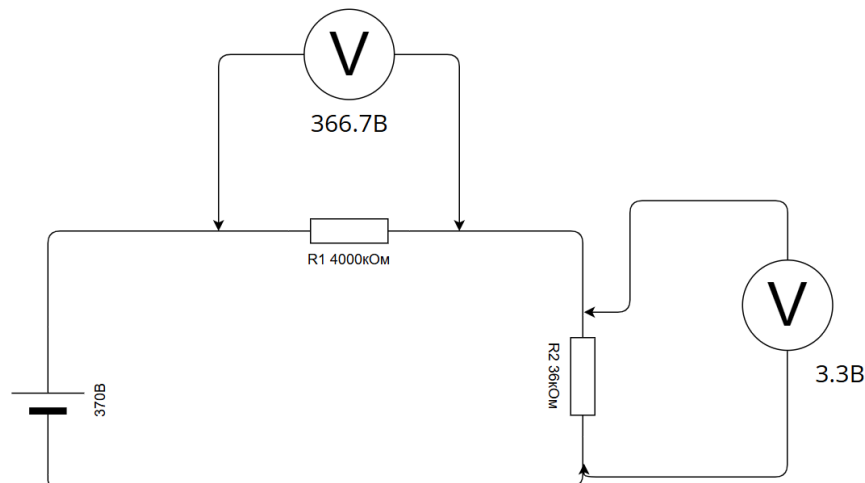


Рисунок 2.1.- Схема подільника напруги

Для забезпечення високої точності вимірювань у всьому експлуатаційному діапазоні СЕС, для побудови подільника було відкинuto стандартні вуглецеві резистори загального призначення через їх високу похибку (5%) та значний температурний коефіцієнт (до 500 ppm/°C). Вхідний вимірювальний канал на базі прецизійних металоплівкових резисторів із допуском відхилення номіналу $\pm 0,1\%$ та температурним дрейфом не більше 15 ppm/°C. Верхнє плече було реалізовано у вигляді послідовного ланцюжка з декількох резисторів для рівномірного розподілу високої напруги та запобігання електричному пробою елементів.

2.1.3. Обґрунтування вибору та розміщення температурних сенсорів

Тепловий моніторинг є критично важливою функцією вимірювального комплексу BMS (рик 2.2.), оскільки літій-залізо-фосфатні комірки дуже чутливі до перегріву. Для забезпечення багатоточкового контролю температурного градієнта в межах усієї серверної стійки напівпровідникові терморезистори з негативним температурним коефіцієнтом (NTC-термістори) номіналом 10 кОм при температурі 25 °С.

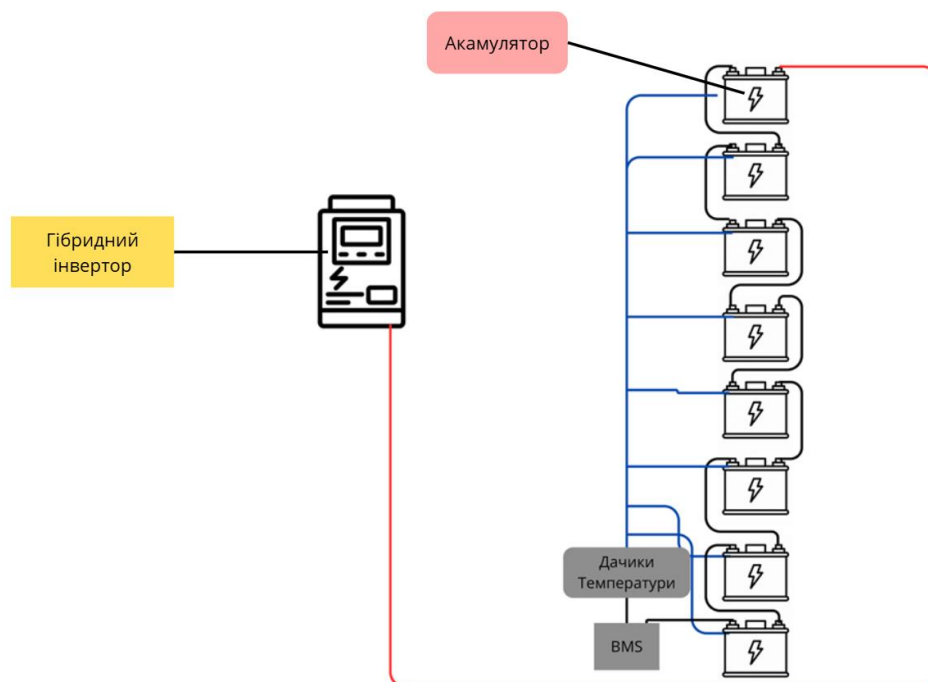


Рисунок 2.2.— Схема вимірювання температури в збірці акумуляторів

Вибір NTC-термісторів обґрунтований їхніми метрологічними перевагами у цільовому робочому діапазоні температур акумуляторів (від -10 °С до +55 °С):

- Висока чутливість (крутизна характеристики): зміна температури на 1 °С викликає зміну опору на 4–5%, що дозволяє легко фіксувати навіть незначні теплові аномалії за допомогою простих аналогових вимірювальних кіл.

- Малі габаритні розміри, що дозволяє монтувати їх безпосередньо в технологічні проміжки між комірками.

- Висока стабільність та довговічність характеристик при постійній експлуатації.

Аналоговий сигнал з кожного термістора зчитується Slave-модулями через схему вимірювального моста або подільника напруги із фіксованим прецизійним резистором. Отримане значення напруги оцифровується АЦП, а мікроконтролер Slave-плати за допомогою програмного розрахунку рівняння Стейнхарта-Харта здійснює високоточну конвертацію опору в абсолютну температуру в градусах Цельсія.

Особливу увагу топології розміщення сенсорів усередині стійки. Оскільки акумуляторна збірка складається з декількох елементів, фізичні умови теплообміну на різних «поверхах» стійки є неоднаковими (верхні блоки через природну конвекцію повітря зазвичай нагріваються сильніше). Було встановлено 8 температурних сенсорів, рівномірно розподілених по всьому об'єму системи:

- Сенсори закріплювалися безпосередньо на алюмінієвих міжкоміркових з'єднувальних шинах та поверхнях корпусів модулів за допомогою спеціального теплопровідного клею та фіксувалися термостійким каптоновим скотчем.

- Точки монтажу вибиралися в зонах потенційно найбільшого тепловиділення - у геометричному центрі кожного модуля та поблизу силових вивідних клем.

Завдяки такій схемі теплового аудиту головний контролер Master BMS отримує повну картину температурного градієнта. Це дозволяє системі не лише вчасно виявляти локальні точки перегріву окремих осередків, але й передавати інформаційні команди на інвертор для предиктивного обмеження струму заряду СЕС у спекотні періоди або автоматично вмикати активну примусову вентиляцію серверної стійки.

2.2 Апаратна реалізація збору та обробки даних

Перехід від етапу обґрунтування первинних перетворювачів до практичної апаратної реалізації інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) вимагає вирішення комплексу складних схемотехнічних завдань. Головна проблема проектування апаратної частини для акумуляторної збірки конфігурації 88S полягає у необхідності одночасної та високошвидкісної обробки великого

масиву аналогових сигналів (88 каналів напруги та 8 каналів температури) в умовах впливу високої синфазної напруги, яка на верхніх комірках стеку сягає 370 В. Крім того, робота вимірювальних кіл у безпосередній близькості до силових ключів потужного гібридного інвертора створює агресивне електромагнітне середовище (високочастотні завади від ШІМ-модуляції), що висуває жорсткі вимоги до завадостійкості та обов'язкової гальванічної ізоляції вимірювальних трактів.

Для задоволення цих вимог - забезпечення мілівольтової точності вимірювань, масштабованості та абсолютної електричної безпеки процесорного ядра - апаратну архітектуру ІВС було спроектовано за децентралізованим (розподіленим) принципом просторової топології. Це дозволило фізично розділити процеси зняття аналогових потенціалів та їх подальшої цифрової обробки.

Структурно розроблена апаратна частина поділяється на три взаємопов'язані ієрархічні рівні, які функціонують як єдиний вимірювальний комплекс:

Сенсорний рівень (нижній рівень) - безпосередній фізичний інтерфейс із силовими компонентами електрохімічної батареї, який відповідає за первинне перетворення фізичних величин в електричні сигнали.

Рівень локального збору даних (вимірювальні Slave-модулі) - проміжний рівень, що забезпечує оцифрування аналогових сигналів, локальне балансування та гальванічну ізоляцію магістралі передачі даних.

Рівень прийняття рішень (головний Master-модуль) - центральне високопродуктивне обчислювальне ядро, яке консолідує цифрові пакети даних, виконує алгоритми математичного аналізу та керує зовнішнім силовим обладнанням.

2.2.1. Сенсорний рівень (Первинне перетворення)

Сенсорний рівень є фундаментальним, найнижчим апаратним рівнем архітектури розробленої інформаційно-вимірювальної системи (рис.2.3.). Він

безпосередньо контактує з акумуляторними модулями (хімії NMC) та головними силовими шинами. З метрологічної точки зору, його головна задача полягає у високоточному первинному перетворенні фізичних величин (диференційної напруги комірок, загального струму та температури) в аналогові електричні сигнали, придатні для подальшого оцифрування.

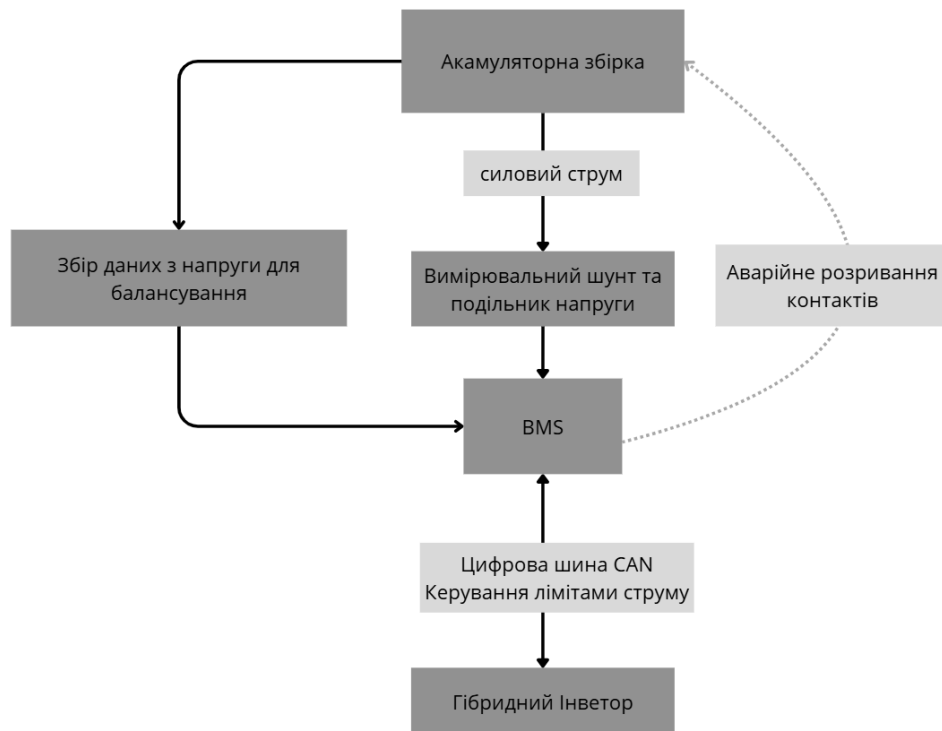


Рисунок 2.3. – Блок схема вимірювання струму і напруги в збірці акумуляторів

Оскільки будь-яка інструментальна похибка або електромагнітна завада, що виникає на цьому етапі, неминуче поширюється на вищі рівні обробки та спотворює розрахунки SoC і SoH. На цьому рівні фізично розміщено наступні елементи:

-Балансувальні та вимірювальні шлейфи комірок (88 точок підключення). Для зняття диференційної напруги з кожного окремого елемента конфігурації 88S підключення до струм знімальних клем акумуляторних блоків. Для мінімізації впливу перехідного контактного опору на результати вимірювань, клеми були ретельно очищені та обтиснуті спеціальними кільцевими наконечниками.

Довжина кожного вимірювального дроту підбиралася мінімально необхідною для зменшення площі контуру, що, у свою чергу, дозволило суттєво знизити індуктивне наведення від високочастотних силових ключів гібридного інвертора.

-Мережа температурних сенсорів (8 NTC-термісторів по 10 кОм). Як зазначалося раніше, датчики розподілені по поверхнях 9 фізичних акумуляторних блоків. Для забезпечення мінімального теплового опору між корпусом комірки та чутливим елементом термістора, при їх монтажі шар теплопровідного компаунда. Зверху сенсори надійно зафіксовані шарами термостійкого поліамідного скотчу (Kapton tape). Це гарантує, що датчик вимірює реальну температуру електрохімічного елемента, а не температуру навколишнього повітря в серверній стійці, що є критично важливим для швидкості реакції системи на локальний перегрів.

-Вимірювальний шунт (100 мкОм). Цей прецизійний марганіновий елемент встановлено безпосередньо у розрив загальної мінусової магістралі акумуляторної стійки. Вибір саме мінусової шини зумовлений необхідністю мінімізації синфазної напруги на входах АЦП каналу вимірювання струму головного модуля. Для зняття корисного сигналу (падіння напруги, пропорційного струму). Це дозволило повністю виключити вплив опору масивних силових болтових з'єднань на точність вимірювання струмових потоків заряду та розряду.

-Прецизійний подільник загальної напруги. Встановлений паралельно головним вихідним клемам високовольтової стійки, цей вузол відповідає за масштабування загальної напруги стеку яка може досягати 370 В і більше і до безпечного низьковольтного діапазону, з яким може працювати АЦП Master-модуля. Це створює незалежний, дублюючий апаратний канал моніторингу загальної напруги, який діє паралельно з даними, що консолідуються від Slave-модулів, значно підвищуючи загальну надійність та поступова деградація ІВС перед передачею даних до інвертора.

-Підсистема апаратного захисту вимірювальних кіл. Усі сенсорні лінії (як напруги, так і температури) виконані мідними багатожильними дротами в спеціальній термостійкій силіконовій ізоляції, яка не плавиться і не втрачає гнучкості навіть при критичному нагріванні. Окрім того, кожна точка підключення балансувальних шлейфів до силових клем додатково оснащена плавкими запобіжниками номіналом 1 А. Це інженерне рішення є обов'язковою вимогою безпеки: у разі випадкового механічного пошкодження ізоляції та короткого замикання тонкого вимірювального дроту на металевий корпус стійки, запобіжник миттєво перериває коло, не дозволяючи струму короткого замикання від потужної комірки розплавити провідник і спровокувати пожежу.

2.2.2. Рівень первинного збору даних (вимірювальні модулі)

Для уникнення передачі аналогових сигналів на великі відстані (що неминуче призводить до наведення електромагнітних завад від силового інвертора) та вирішення проблеми високої синфазної напруги, рівень збору даних реалізовано локально, безпосередньо на акумуляторних блоках. Оптимальна кількість температурних сенсорів та Slave-модулів визначається конкретною фізичною топологією акумуляторної стійки. Датчики закріплюються безпосередньо на алюмінієвих міжкоміркових з'єднувальних шинах та поверхнях корпусів рівномірно по всьому об'єму системи.

Апаратно кожен вимірювальний модуль (Slave-плата) являє собою високоінтегрований друкований вузол, побудований на базі спеціалізованого багатоканального аналогового інтерфейсу (Analog Front-End - AFE, наприклад, рішень від Texas Instruments або Analog Devices). Архітектура такого вимірювального модуля включає наступні апаратні блоки:

Вхідні фільтри низьких частот (RC-фільтри): Встановлюються на кожному каналі вимірювання напруги для первинного апаратного придушення високочастотних шумів від ШІМ-модуляції інвертора та захисту чутливих входів мікросхеми від імпульсних перенапруг.

Прецизійне джерело опорної напруги (V_{ref}): Забезпечує стабільність вимірювань незалежно від коливань температури всередині акумуляторної стійки.

Комутаційну матрицю (Мультиплексор): Забезпечує надшвидке послідовне підключення кожної з комірок або термісторів до внутрішнього високороздільного АЦП.

Блок гальванічної ізоляції: Реалізується за допомогою спеціалізованих імпульсних трансформаторів (наприклад, для фірмового протоколу isoSPI) або цифрових ізоляторів, що гарантує надійну передачу даних та захист низьковольтних ліній.

До основного функціоналу вимірювальних Slave-модулів входить Мультиплексування та АЦП-перетворення: Аналогові сигнали від клем та термісторів надходять на входи AFE-мікросхем, які послідовно оцифровують напругу та температуру з високою роздільною здатністю (12–16 біт). Локальне пасивне балансування: За командою верхнього рівня (або за внутрішнім апаратним алгоритмом) Slave-модулі комутують вбудовані MOSFET-транзистори, підключаючи потужні SMD-резистори паралельно до комірок, що перезарядилися. Це дозволяє розсіювати надлишковий заряд у вигляді тепла (струмами балансування від 50 до 200 мА).

Гальванічно ізольована трансляція даних: Цифрові дані від кожного Slave-модуля передаються на наступний рівень через ізольовану шину. Це ключове рішення спроектованої структури, яке гарантує, що висока напруга акумуляторного стеку (до 370 В) залишається фізично ізольованою від керуючого мікроконтролера Master-модуля, забезпечуючи абсолютну безпеку системи.

2.2.3. Рівень головного контролера та інтерфейсів обміну

Верхній рівень - це «мозок» усієї інформаційно-вимірювальної системи. Він реалізований у вигляді головного контролера (Master-модуля), який фізично розміщено у нижній частині стійки.

-Консолідацію даних: Мікроконтролер (MCU) головного модуля безперервно опитує всі 9 Slave-плат через цифрову ізольовану магістраль, формуючи єдиний масив даних про напруги (88 значень) та температури (8 значень).

-Вимірювання струму та загальної напруги: АЦП головної плати оцифровує сигнали від вимірювального шунта та головного подільника напруги.

-Обчислювальне ядро (рис 2.4.) (Метрологічна обробка): Саме тут реалізуються математичні алгоритми цифрової фільтрації (для згладжування пульсацій від інвертора), розраховується ступінь заряду (SoC) методом кулонівського інтегрування з OCV-корекцією та оцінюється стан здоров'я (SoH).

-Рівень захисту (Protection Logic): У разі виявлення критичних відхилень мікроконтролер подає апаратний сигнал на відключення головних електромагнітних контакторів (реле), фізично від'єднуючи батарею від інвертора.

-Зовнішня комунікація: Master-модуль оснащено інтерфейсом CAN-шини. Завдяки цьому BMS виступає як повноцінний вузол розумної мережі, передаючи інвертору, дані про дозволені струми заряду/розряду, поточний SoC та аварійні помилки.

Запропонована трирівнева структура IBC (Сенсори → Slave-АЦП → Master-MCU) забезпечує високу завадостійкість, масштабованість, безпеку експлуатації та задовольняє всі вимоги до точності вимірювань у системах накопичення енергії.

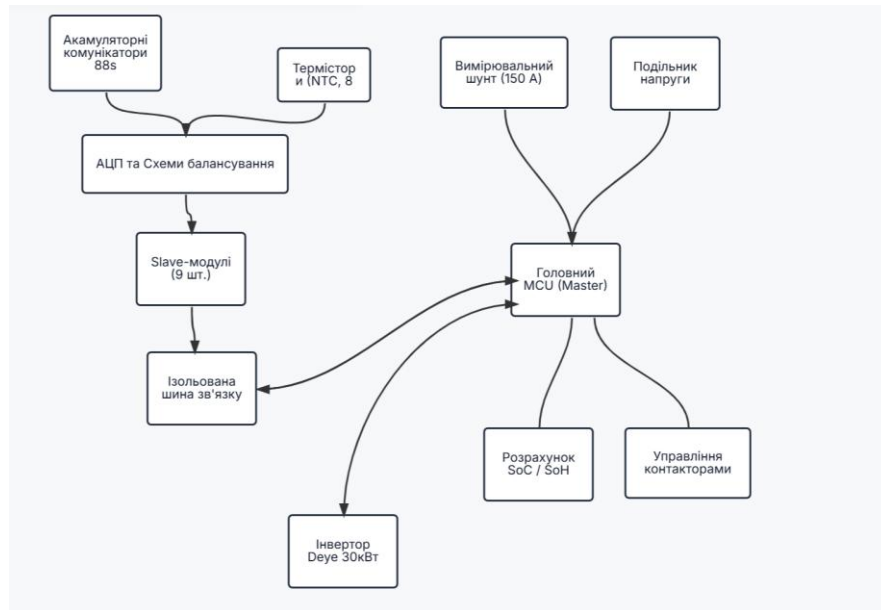


Рисунок 2.4. – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи (BMS) з топологією Master-Slave

Акумуляторні комунікатори. Цей блок представляє фізичний інтерфейс підключення вимірювальних шлейфів до клем 88 послідовно з'єднаних літій-іонних комірок (NMC). Його головна функція - зняття аналогових потенціалів диференційної напруги з кожного окремого елемента стеку.

Термістор (NTC, 8) Мережа з 8 напівпровідникових датчиків температури (NTC-термісторів), які фізично розміщені на поверхнях акумуляторних блоків. Вони перетворюють тепловий стан комірок у зміну електричного опору, забезпечуючи первинні дані для системи теплового захисту від перегріву (Thermal Runaway).

АЦП та Схеми балансування Апаратно-програмний вузол, інтегрований у підлеглі модулі.

АЦП (Аналого-цифровий перетворювач): Здійснює прецизійне перетворення аналогових сигналів напруги (від комірок) та опору (від термісторів) у цифровий код.

Схеми балансування: Матриця транзисторних ключів та баластних резисторів. Забезпечує пасивне вирівнювання напруги комірок шляхом розсіювання надлишкового заряду з найбільш заряджених елементів у вигляді тепла.

Slave-модулі (9 шт.) Локальні плати збору даних (рівень збору даних). Розподіл системи на 9 окремих модулів дозволяє розмістити їх безпосередньо біля акумуляторних блоків, що мінімізує довжину вимірювальних дротів, знижує вплив електромагнітних завад та зменшує синфазну напругу на входах АЦП. Вони консоліднують оцифровані дані та керують процесом локального балансування.

Ізольована шина зв'язку Критичний елемент безпеки архітектури. Забезпечує гальванічну розв'язку між високовольною частиною збірки (Slave-модулями, де напруга сягає 370 В) та низьковольною логікою головного контролера (Master). Дані передаються у цифровому вигляді, гарантуючи захист процесора від високих потенціалів.

Вимірювальний шунт (75 А) Прецизійний струмовий датчик (марганіновий резистор на 100 мкОм), встановлений у розрив головної силової шини. Перетворює струм заряду/розряду всієї системи у пропорційне падіння мілівольтової напруги. Забезпечує первинні дані для алгоритму кулонівського інтегрування.

Подільник напруги Схема на базі прецизійних резисторів, яка масштабує загальну високу напругу акумуляторного стеку до низьковольтного діапазону (наприклад, 0–3,3 В). Слугує незалежним апаратним каналом вимірювання для головного MCU, дублюючи дані, отримані від Slave-модулів, для підвищення надійності.

Головний MCU (Master) Центральний мікроконтролер системи (рівень прийняття рішень). Виконує роль обчислювального ядра: збирає цифрові пакети від Slave-модулів через ізольовану шину, оцифровує дані безпосередньо з шунта та подільника, здійснює математичну обробку сигналів та керує загальною логікою безпеки.

Розрахунок SoC / SoH Програмний алгоритмічний блок всередині головного мікроконтролера.

SoC (Ступінь заряду): Розраховується за допомогою комбінованого алгоритму підрахунку кулонів та корекції за напругою розімкненого кола (OCV).

SoH (Стан здоров'я): Обчислюється на основі динамічних змін внутрішнього еквівалентного опору під час стрибків навантаження.

Управління контакторами Виконавчий апаратний вузол Master-модуля. Представляє собою драйвери та силові електромагнітні реле, які за командою MCU можуть фізично розірвати силове коло, відключивши батарею від інвертора у разі фіксації критичних аварійних станів (Overvoltage, Undervoltage, Overcurrent, Overtemperature).

Інвертор 30кВт Зовнішній вузол перетворення енергії. Взаємодіє з головним MCU через промислову шину зв'язку (CAN). BMS безперервно передає інвертору поточні параметри батареї (SoC, напругу, температуру) та динамічні ліміти струмів заряду/розряду, що дозволяє інвертору адаптивно керувати потужністю та запобігати аварійним відключенням.

2.3. Вибір мікроконтролера та параметрів АЦП для забезпечення заданої точності

Наступним кроком у проектуванні апаратної частини інформаційно-вимірювальної системи став вибір керуючого мікроконтролера (MCU) для головного Master-модуля та розрахунок необхідних параметрів аналого-цифрового перетворення. Оскільки Master-модуль виконує роль центрального обчислювального ядра, від продуктивності його процесора та метрологічних характеристик АЦП безпосередньо залежить точність розрахунку енергозапасу і стабільність роботи всієї високовольтної збірки.

2.3.1 Вибір мікроконтролера

При виборі мікроконтролера класичні 8-бітні архітектури (наприклад, AVR або базові PIC) через їхню низьку обчислювальну потужність та відсутність апаратної підтримки складних математичних операцій. Розрахунок SoC за методом кулонівського інтегрування, цифрова фільтрація завад від інвертора та

оцінювання стану здоров'я (SoH) вимагають інтенсивної роботи з числами з плаваючою комою.

Використовуючи 32-бітні рішення і вибір зупинився на мікроконтролері сімейства ARM Cortex-M4 (зокрема, з лінійки STM32G4 або STM32F4 від STMicroelectronics). Вибір саме цієї архітектури зумовлюються трьома ключовими факторами:

- Наявність апаратного математичного співпроцесора FPU: Це дозволяє мікроконтролеру виконувати складні алгоритми цифрової фільтрації (наприклад, фільтр Калмана) у режимі реального часу без затримок.

- Багатий набір комунікаційних інтерфейсів: Наявність вбудованого контролера CAN 2.0B є критично важливою для мого проєкту, оскільки це єдиний надійний промисловий стандарт для інформаційної взаємодії BMS із гібридним інвертором. Також мікроконтролер має високошвидкісні інтерфейси SPI для зв'язку з ізольованою шиною Slave-модулів.

- Високопродуктивна аналогова периферія: Мікроконтролери цієї серії оптимізовані для задач обробки сигналів і мають розвинену підсистему прямого доступу до пам'яті (DMA), що дозволяє збирати дані з АЦП без навантаження на основний процесор.

Оцінювання стану здоров'я акумулятора є одним із обчислювальних завдань для системи управління. Показник SoH відображає рівень деградації літій-іонних комірок - втрату номінальної ємності та зростання внутрішнього еквівалентного опору порівняно з їхнім ідеальним станом (нової батареї). Цей параметр є критично важливим індикатором безпеки та залишкового ресурсу. Його безперервний моніторинг дозволяє BMS динамічно адаптувати ліміти струмів заряду і розряду, запобігаючи тепловому розгону або перевантаженню зношених модулів. Оскільки алгоритм визначення SoH у реальному часі спирається на фіксацію мікросекундних просадок напруги під час різких стрибків струму від інвертора та обчислення опору за законом Ома, це створює значне та безперервне математичне навантаження на процесорне ядро.

2.3.2 Вибір розрядності АЦП

Розрядність АЦП визначає роздільну здатність інформаційно-вимірювальної системи - мінімальну зміну фізичної величини, яку система здатна зафіксувати. Для обґрунтування цього параметра були проведені розрахунки ціни найменшого розряду (LSB) для двох критичних каналів вимірювання.

Для вимірювання диференційної напруги комірок (Slave-рівень): Робочий діапазон комірки становить 3,0 – 4,2 В. На пологій ділянці розрядної кривої (SoC від 80% до 20%) напруга змінюється надзвичайно повільно. Якщо використати стандартний 12-бітний АЦП (який має $2^{12} = 4096$ кроків квантування) при опорній напрузі 5 В, то крок квантування становитиме 1,22 мВ за формулою (2.3):

$$\Delta U_{12bit} \frac{5V}{4096} \approx 1,22 \text{ мВ} \quad (2.3)$$

Цього значення теоретично достатньо, але з урахуванням шумів реальна ефективна розрядність (ENOB) впаде до 10 біт (близько 5 мВ похибки). Тому для модулів збору даних було обрано архітектуру з використанням спеціалізованих АФЕ-чипів, що мають 16-бітні сигма-дельта АЦП. Для 16 біт (65536 кроків) роздільна здатність становить за формулою (2.4):

$$\Delta U_{16bit} \frac{5V}{65536} \approx 0.078 \text{ мВ} \quad (2.4)$$

Це забезпечує цифрової фільтрації та точного визначення ступеня заряду. Для вимірювання загальної напруги стеку (Master-рівень):

Максимальна напруга (88S) може досягати 370 В. Подільник напруги масштабує ці 75 В до опорної напруги мікроконтролера 3,3 В. Якщо застосувати 12-бітний АЦП мікроконтролера, крок квантування у перерахунку на високу напругу складе:

$$\Delta U_{stack} \frac{370B}{4096} \approx 90mV \quad (2.5)$$

Похибка майже в 0,1 В на загальній шині є неприпустимою для прецизійної системи. Тому для оцифрування каналів загальної напруги та струмового шунта на платі Master BMS я також заклав використання зовнішнього прецизійного 16-бітного АЦП (наприклад, ADS1115 або аналогів), що зменшує похибку квантування до 5,6 мВ на всі 75 В.

2.3.2 Вибір частоти дискретизації

Останнім завданням було визначення частоти дискретизації (f_s) - кількості вимірювань за секунду. При роботі з інвертором потужністю 30 кВт силова шина системи накопичення дають значні високочастотні імпульсні завади, спричинені широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) силових транзисторів інвертора (зазвичай частота комутації становить 16–20 кГц).

Згідно з теоремою Котельникова-Шеннона, для уникнення ефекту накладання спектрів (аліасингу) частота дискретизації повинна щонайменше вдвічі перевищувати максимальну частоту корисного сигналу [4]. Однак, фізичні параметри акумулятора змінюються повільно. Тому метод передискретизації (Oversampling) із подальшим проріджуванням даних:

-Для каналу вимірювання струму: Струм змінюється найбільш динамічно під час перехідних процесів інвертора. Із заданою частотою дискретизації АЦП струмового каналу на рівні 1 кГц (1000 вимірювань на секунду). Це дозволяє ІВС захоплювати короткочасні сплески струму, після чого мікроконтролер усереднює кожні 100 значень і видає в алгоритм кулонівського інтегрування очищене значення з частотою 10 Гц.

-Для каналів напруги комірок та температури: Ці параметри є інерційними. Частота дискретизації налаштована на рівні 10–20 Гц, чого абсолютно достатньо для гарантованого спрацювання захисту (час реакції менше 100 мс) та суттєво розвантажує ізольовану шину зв'язку між Slave та Master модулями.

Такий обґрунтований підхід до вибору мікроконтролера, 16-бітної розрядності та адаптивної частоти дискретизації створив міцний апаратний фундамент для реалізації складних математичних алгоритмів, які будуть розглянуті у наступному розділі.

Висновки до розділу 2

У другому розділі здійснено практичне проектування апаратної архітектури інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для моніторингу високовольної акумуляторної збірки (конфігурація 88S, хімія NMC), адаптованої для роботи з гібридним інвертором Deue потужністю 30 кВт. За результатами виконаної роботи сформульовано наступні висновки:

-Обґрунтовано вибір первинних перетворювачів струму: Для забезпечення максимальної точності алгоритму підрахунку кулонів (Coulomb Counting) доведено доцільність використання прецизійного марганінового шунта (100 мкОм) замість датчиків на ефекті Холла. Таке рішення нівелює похибки магнітного гістерезису та температурного дрейфу нуля при робочих струмах до 75 А, а питання безпеки та гальванічної ізоляції вирішено на рівні цифрового інтерфейсу спеціалізованого чіпа.

-Канали вимірювання напруги та температури: Для прецизійного контролю загальної напруги стеку (до 75 В) на базі металоплівкових резисторів високої точності (допуск $\pm 0,1\%$, ТКО ≤ 15 ppm/°C). Для багатоточкового теплового аудиту стійки розроблено топологію розміщення 8 напівпровідникових NTC-термісторів, що дозволяє головному контролеру здійснювати предиктивне обмеження струмів заряду при виникненні локальних перегрівів у масивних блоках акумуляторів.

-Розроблено ієрархічну структурну схему ІВС: Для вирішення проблема великого потенціалу відносно землі та електромагнітних завад від силового інвертора спроектовано розподілену трирівневу архітектуру за принципом «Master-Slave». Вона включає сенсорний рівень, рівень збору даних (9 локальних

Slave-модулів для оцифрування сигналів та пасивного балансування) та рівень прийняття рішень (Master BMS).

-Забезпечено надійну інтеграцію та захист: Доведено, що локальне перетворення аналогових сигналів у цифрові безпосередньо на акумуляторних блоках з подальшою передачею даних через ізольовану магістраль гарантує високу завадостійкість. Наявність інтегрованого CAN-інтерфейсу на керуючому Master-рівні дозволяє системі не лише виконувати захисні функції, але й функціонувати як повноцінний інформаційний вузол, керуючи енергетичними потоками гібридного інвертора в режимі реального часу.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНЕ РЕАЛІЗУВАННЯ

Для практичної перевірки розробленої архітектури інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) та алгоритмів обробки даних було використано реальний об'єкт дослідження - багатoelementну систему накопичення енергії, інтегровану з гібридним інвертором Deue потужністю 30 кВт. Акумуляторна збірка побудована на базі літій-іонних модулів електромобільного класу (від Ford Focus Electric) з електрохімічною системою NMC (літій-нікель-марганець-кобальт-оксид). Фізична топологія стеку являє собою послідовне з'єднання 88 комірок (конфігурація 88S), розділених на 9 фізичних блоків. Номінальна напруга системи становить близько 325 В (з максимальним порогом заряду до 370 В), а налаштована ємність системи складає 424 А·год. Загальний енергозапас такої збірки вимагає прецизійного алгоритмічного контролю, оскільки похибки в розрахунках можуть призвести до значних втрат ефективності або аварійних ситуацій.

3.1. Розрахунку ступеня заряду (SoC): порівняння методу підрахунку кулонів (Coulomb Counting) та вимірювання напруги розімкненого кола (OCV)

У структурі програмного забезпечення розробленої ІВС алгоритм визначення ступеня заряду є одним із найбільш відповідальних обчислювальних вузлів. Показник SoC відображає поточний рівень доступної енергії в акумуляторному стеку відносно його максимального значення і виражається у відсотках від 0% (повний розряд) до 100% (повний заряд). Оскільки пряме вимірювання кількості електрохімічної енергії всередині герметичних NMC-комірок є неможливим, для розрахунку SoC у реальному часі мною було проаналізовано та інтегровано два базові метрологічні підходи: метод інтегрування струму за часом (підрахунок кулонів) та метод оцінювання за напругою розімкненого кола (OCV).

Метод підрахунку кулонів базується на фундаментальному законі збереження заряду [7]. Математично цей процес описується безперервним інтегруванням миттєвих значень струму, що протікає через силовий прецизійний шунт. Для дискретної реалізації цього методу в мікроконтролері Master BMS використовується наступне рівняння чисельного підсумування за формулою (3.1):

$$\begin{aligned} \text{SoC}(k) &= 80\% - \frac{I(k) \times \Delta t}{3600 \times 424(\text{А} \times \text{год})} \times 100\% \\ &= 80\% - \frac{10}{1526400} \times 100\% = 80\% - 0,000655\% \\ &= 79,9\% \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $\text{SoC}(k)$ та $\text{SoC}(k-1)$ - значення ступеня заряду на поточному (k) та попередньому ($k-1$) кроках дискретизації, %;

$I(k)$ - оцифроване та відфільтроване значення загального струму стеку на поточному кроці, А (знак «+» відповідає розряду, «-» - заряду);

Δt - інтервал часу між вимірюваннями, с (налаштовано на 0,1 с);

C_{Ah} - ємність акумуляторного стеку в Ампер-годинах (для досліджуваної збірки $C_{Ah} = 424\text{А} \times \text{год}$).

Як видно з результату, за один цикл програми (0,1 секунди) навантаження у 100 А зменшує загальний заряд масивної батареї лише на 0,000655%. Ця математична операція вимагає від мікроконтролера використання змінних типу `double` (числа з плаваючою комою подвійної точності), що підтверджує раніше наведене обґрунтування необхідності використання 32-бітного процесора з апаратним співпроцесором FPU

Головною перевагою кулонівського підрахунку є висока динамічна точність. Алгоритм безперервно відстежує великі струми під час інтенсивного заряду від сонячного інвертора або розряду на навантаження. Проте метод має суттєвий метрологічний недолік - кумулятивне накопичення похибки. Будь-яка випадкова

похибка вимірювання струму (зумовлена шумами квантування АЦП або температурним зміщенням нуля шунта) з часом призводить до лінійного зростання інтегральної помилки. При безперервній роботі СЕС протягом кількох діб без досягнення повних циклів заряду-розряду цей дрейф може скласти 5–10%, що робить показання недостовірними.

Для усунення цього недоліку в ІВС реалізовано метод визначення SoC за напругою розімкненого кола. Метод базується на стійкій нелінійній залежності між ЕРС комірки та рівнем її заряду. Математична модель OCV-методу закладається у пам'ять мікроконтролера у вигляді табличної функції (3.2):

$$\text{SoC}_{\text{OCV}} = f(U_{\text{OCV}}, T) \quad (3.2)$$

Де U_{OCV} - стабілізована напруга комірки у стані спокою, В; T - поточна температура модуля, °С.

Для оцінки макроскопічних змін, розрахуємо падіння SoC за 1 хвилину (60 секунд) безперервної роботи під тим самим навантаженням 100 А (потужність розряду близько 32,5 кВт) за формулою (3.3):

$$\begin{aligned} \text{SoC}_{1\text{хв}} &= 80\% - \frac{100\text{А} \times 60\text{с}}{3600 \times 424(\text{А} \times \text{год})} \times 100\% = 80\% - \frac{6000}{1526400} \times 100\% = \\ \text{SoC}_{1\text{хв}} &= 80\% - 0,393\% = 79,607\% \end{aligned} \quad (3.3)$$

Такий алгоритмічний підхід гарантує високу дискретність та плавність відображення ступеня заряду на інформаційних панелях BMS та безперервну передачу точних значень по шині CAN на керуючий контролер інвертора Deue.

Проте літій-іонні комірки потребують часу хімічної релаксації, і для вимірювання істинного U_{OCV} акумулятор повинен перебувати у стані спокою. В умовах реальної експлуатації станції, де сонячна генерація постійно змінюється, батарея майже завжди знаходиться під струмом. Окрім цього, для NMC-хімії характерна відносно плоска розрядна крива на проміжку 3,65–3,80 В, де зміна напруги на 10 мВ відповідає зміні заряду на 8–10%.

Для поєднання переваг обох підходів мною розроблено комбінований алгоритм обробки:

Під час активної роботи інвертора система використовує підрахунок кулонів за дискретним рівнянням, що забезпечує високу плавність відстеження ємності. Як тільки струм у силовій шині падає нижче порогу 0,05 А і залишається стабільним (наприклад, вночі при переході інвертора в режим очікування), алгоритм переходить у режим очікування релаксації. Після стабілізації хімічних процесів система зчитує точні значення напруги з усіх 88 комірок, усереднює їх і за OCV-матрицею обчислює істинний рівень SoC_{OCV} . Обчислене значення SoC_{OCV} приймається за нову опорну точку $SoC(t_0)$, повністю обнуляючи накопичену апаратну похибку вимірювального шунта.

Така математична синергія дозволила забезпечити сумарну похибку визначення ступеня заряду високовольтного стеку на рівні не більше $\pm 2\%$, що гарантує коректну інформаційну взаємодію з гібридним інвертором.

3.1.2. Математична модель оцінювання стану здоров'я (SoH) на основі внутрішнього опору

Окрім визначення поточного заряду, критично важливим завданням інформаційно-вимірювальної системи є безперервний моніторинг деградації акумуляторних модулів - оцінка їхнього стану здоров'я. Для високовольтних систем накопичення енергії, які будуються на базі вживаних електромобільних модулів (Second Life), цей показник є індикатором безпеки та залишкового ресурсу.

Процес старіння літій-іонних комірок супроводжується двома пов'язаними явищами: втратою номінальної ємності та зростанням внутрішнього еквівалентного опору. Оскільки для вимірювання втрати ємності необхідно провести повний цикл заряду-розряду від 0% до 100%, що в умовах реальної роботи сонячної електростанції відбувається вкрай рідко, алгоритм оцінки SoH у моїй системі базується на динамічному вимірюванні внутрішнього

еквівалентного опору (R_{int}) за формулою (3.4) під час різких змін струмового навантаження.

Математична модель вимірювання опору спирається на закон Ома для повного кола і розраховується мікроконтролером як відношення зміни напруги до зміни струму за короткий проміжок часу (Δt):

$$R_{int} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U(t1) - U(t2)}{I(t1) - I(t2)} \quad (3.4)$$

де $U(t_1)$, $I(t_1)$ - напруга і струм до моменту підключення потужного навантаження (наприклад, у стані очікування);

$U(t_2)$, $I(t_2)$ - напруга і струм у момент пікового навантаження від гібридного інвертора Deye.

Для отримання достовірних даних Master-модуль BMS очікує перехідного процесу - моменту, коли інвертор різко збільшує споживання струму (наприклад, стрибок $\Delta I > 20A$). У цей момент алгоритм фіксує миттєве падіння напруги. Знаючи поточний внутрішній опір, мікроконтролер обчислює стан здоров'я за формулою (3.5):

$$SoH_R = \left(1 - \frac{R_{поточ} - R_{початок}}{R_{eol} - R_{початок}} \right) \times 100\% \quad (3.5)$$

Де SoH_R - стан здоров'я батареї, розрахований за критерієм опору, %;
 $R_{поточ}$ - динамічно виміряний поточний опір акумуляторного стеку, Ом;
 $R_{початок}$ - еталонний початковий опір нової збірки, Ом;
 R_{eol} (End of Life) - гранично допустимий опір, при якому батарея вважається зношеною (для хімії NMC зазвичай приймається зростання опору на 100% від початкового, тобто $R_{eol} = 2 \times R_{початок}$).

3.1.3. Практична реалізація розрахунку SoH

Для розробленої збірки конфігурації 88S (рис3.1) на базі модулів Ford Focus Electric.



Рисунок 3.1 – Збірка акумуляторів 88s

Типовий початковий внутрішній опір однієї нової комірки становить близько 1,5мОм. Відповідно, еталонний опір усього послідовного ланцюга становить 132мОм за формулою (3.6):

$$R_{\text{початок}} = 88 \times 1,5\text{мОм} = 132\text{мОм} \quad (3.6)$$

Граничний опір зношеної батареї становить за формулою (3.7) 264мО.

$$R_{\text{eol}} = 132 \times 2 = 264\text{мОм} \quad (3.7)$$

Припустимо, що під час експлуатації станції виникла різка потреба в енергії (наприклад, увімкнулося потужне обладнання). ІВС зафіксувала такі показники:

- У стані спокою струм $I_1 = 0$ А, загальна напруга стеку $U_1 = 330,0$ В.

-Після підключення навантаження струм різко зріс до $I_2 = 100$ А, а напруга під навантаженням просіла до $U_2 = 315,0$ В.

Мікроконтролер обчислює миттєвий поточний опір стеку (3.8):

$$R_{\text{поточ}} \frac{330\text{В} - 315\text{В}}{0\text{А} - 100\text{А}} = \frac{15}{100} = 0,150 \text{ Ом} (150\text{мОм}) \quad (3.8)$$

Маючи значення поточного опору (150мОм), алгоритм визначає ступінь деградації збірки (3.9):

$$\begin{aligned} SoH_R &= \left(1 - \frac{0.150 - 0.132}{0.264 - 0.132} \right) \times 100\% = \left(1 - \frac{0.018}{0.132} \right) \times 100\% = \\ &= (1 - 0.136) \times 100\% = 86.4\% \end{aligned} \quad (3.9)$$

Отриманий результат (86,4%) свідчить про те, що акумуляторні модулі є частково зношеними (що є типовим для Second Life батарей з електромобілів), проте мають значний залишковий ресурс і є цілком придатними для подальшої експлуатації.

Розроблений алгоритм дозволяє інформаційно-вимірювальній системі безперервно коригувати значення максимально допустимого струму заряду/розряду: у міру падіння SoH, мікроконтролер надсилає по CAN-шині команди інвертору на поступове зниження струмових навантажень, що ефективно запобігає перегріву старих комірок та продовжує термін їхньої безпечної служби.

3.2. Багаторівневого захисту інформаційно-вимірювальної системи

Забезпечення безпечної експлуатації є найважливішим завданням інформаційно-вимірювальної системи, оскільки електрохімічна система NMC володіє високою щільністю енергії та є критично чутливою до виходу за межі зони безпечної експлуатації. Розроблена архітектура IBC реалізує дворівневу логіку захисту: програмний рівень (інформаційна взаємодія з гібридним інвертором Deue 30 кВт по шині CAN для превентивного коригування режимів) та апаратний рівень (миттєве фізичне розмикання головних силових електромагнітних контакторів).

Програмне забезпечення мікроконтролера Master BMS безперервно порівнює оцифровані результати вимірювань із жорстко заданими експлуатаційними порогоми, які розраховані спеціально для конфігурації 88S на базі модулів Ford Focus Electric. Логіка захисту розділена на три ключові вектори:

3.2.1.Захист акумуляторних комірок

Найчастішою причиною деградації літій-іонних комірок є перезаряд або глибокий розряд. Оскільки збірка складається з 88 послідовно з'єднаних елементів, контроль загальної напруги стеку є недостатнім - система моніторить диференційну напругу кожної окремої комірки через Slave-модулі.

3.2.1.1. Захист від перенапруги

Максимально допустимий поріг встановлено на рівні 4,20 В на комірку. Якщо напруга будь-якого з 88 елементів досягає цієї позначки, мікроконтролер негайно надсилає по шині CAN команду інвертору зупинити струм заряду. Якщо збійний інвертор продовжує подавати струм і напруга перетинає критичну межу

(наприклад, 4,25 В), BMS ініціює апаратне відключення контакторів, запобігаючи руйнуванню електроліту та виділенню газів.

3.2.1.2. Захист від глибокого розряду

Мінімальний робочий поріг встановлено на рівні 2,8В. При падінні напруги на найслабшій комірці до цього значення алгоритм зупиняє процес розряду. Це запобігає незворотному розчиненню мідного струмознімача всередині комірки, що могло б призвести до внутрішнього короткого замикання при подальших циклах заряду.

3.2.2 Струмівий захист

Динаміка струмових навантажень відслідковується через прецизійний марганіновий шунт. Враховуючи, що розрахунковий максимальний струм розряду інвертора потужністю 30 кВт при мінімальній напрузі становить близько 113,6 А, поріг струмового захисту було налаштовано з необхідним технологічним запасом на рівні 145 А. Даний запас дозволяє системі безперебійно витримувати пускові струми потужного обладнання об'єкта (наприклад, компресорів чи насосів). Однак, якщо струм у силовій шині перевищує 145 А навіть на короткий проміжок часу (що може свідчити про коротке замикання в магістралі або пробій транзисторів інвертора), мікроконтролер Master-модуля ігнорує програмну CAN-комунікацію і віддає команду на екстрене розмикання силового кола за час, що не перевищує кількох мілісекунд.

3.2.3. Тепловий захист

Оскільки перегрів літій-іонних батарей NMC може ініціювати лавиноподібний тепловий розгін, тепловий аудит має найвищий пріоритет у

логіці переривань мікроконтролера. Дані постійно зчитуються з 8 NTC-термісторів їх можна побачити на (рис 3.2), розподілених по стійці. Гранична температура безпечної експлуатації встановлена на рівні 55 °С. Алгоритм працює превентивно: при досягненні температури 45–50 °С система подає команду інвертору на пропорційне зниження потужності. Якщо локальний нагрів будь-якого фізичного блоку продовжує зростати і перетинає межу 55 °С, BMS повністю блокує всі енергетичні потоки і генерує аварійний сигнал критичної помилки. Відновлення роботи системи блокується на апаратному рівні доти, поки акумуляторні модулі не охолонуть до безпечних показників нормалізованого (нижче 40 °С).



Рисунок 3.2 – Збірка датчиків для збору даних

Запропонована комбінована логіка гарантує стійкість: навіть у випадку зависання гібридного інвертора або пошкодження цифрових ліній зв'язку, ІВС здатна самостійно локалізувати аварію та фізично відключити акумуляторну збірку від зовнішнього середовища.

3.3. Інформаційної взаємодії системи управління батареями (BMS) з гібридним інвертором Deye

У сучасних високопотужних системах накопичення енергії (СНЕ) система управління акумуляторними батареями не повинна функціонувати як ізольований пристрій, що здатен лише на жорстке апаратне відключення контакторів у разі аварії. Раптове фізичне розмикання силового кола при робочих струмах до 75 А під час активної генерації або споживання може призвести до виникнення електричної дуги, швидкого зносу контактних груп реле та аварійної зупинки (збою) самого інвертора. Тому ключовим етапом програмної реалізації моєї ІВС стала розробка алгоритмів безперервної інформаційної взаємодії між Master-модулем BMS та трифазним гібридним інвертором Deye 30 кВт (рис 3.3) [12].



Рисунок 3.3 - гібридний інвертор Deye SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3

Фізичний рівень взаємодії реалізовано на базі промислового стандарту цифрового зв'язку - шини CAN 2.0В. Цей інтерфейс характеризується високою

завадостійкістю завдяки диференційному способу передачі сигналів, що є критично важливим при роботі в умовах сильних електромагнітних полів, які генеруються ШІМ-модуляторами потужного інвертора. Для додаткового захисту мікроконтролера IBC, трансивер CAN-шини має обов'язкову гальванічну ізоляцію.

Програмний рівень взаємодії базується на циклічній передачі стандартизованих кадрів даних від BMS до інвертора Deue з частотою 1 Гц (один раз на секунду). Алгоритм формує цифрові пакети, які містять три основні масиви метрологічної та керуючої інформації:

3.3.1. Статуси та результати вимірювань

-Поточне значення ступеня заряду (SoC), ване за комбінованим алгоритмом (у відсотках).

-Поточне значення стану здоров'я (SoH).

-Загальна напруга стеку (V) та фактичний струм заряду/розряду (A).

-Температура найгарячішого акумуляторного блоку (°C).

-Призначення: Інвертор використовує ці дані для коректного відображення стану батареї на своєму дисплеї та в системі хмарного моніторингу, а також для синхронізації власних внутрішніх лічильників енергії.

3.3.2 Динамічні експлуатаційні ліміти

-Максимально дозволена напруга заряду. Для конфігурації 88S хімії NMC цей параметр передається як стала величина: $88 \times 4,2V = 369,6V$.

-Динамічний ліміт струму заряду.

-Динамічний ліміт струму розряду.

-Призначення: Це головний механізм керування. Замість того, щоб чекати аварії, BMS безперервно «диктує» інвертору, який струм є безпечним у даний момент часу. Повідомлення попереджень та аварій:

-Бітові маски, які сигналізують про наближення до критичних меж.

3.3.3 Завчасне обмеження струмів

Найбільшу практичну цінність в інформаційній взаємодії має розроблений алгоритм динамічного обмеження струмів. Він дозволяє плавно знижувати навантаження на акумуляторну збірку у відповідь на зміну температурних умов або наближення до крайніх меж заряду.

Логіка мікроконтролера реалізує наступну математичну залежність лімітів від температури:

У нормальному температурному діапазоні (від +15 до +45) BMS передає інвертору максимальні дозволені значення CCL та DCL на рівні 145 А.

Якщо температура найгарячішого термо-сенсора (NTC) досягає 45°C, алгоритм починає лінійно знижувати ліміт струму на 5А на кожен градус нагрівання. Таким чином, при 50°C інвертор отримає команду обмежити струм до 120А.

При досягненні критичної температури 55°C, мікроконтролер встановлює CCL=0А та DCL =0А і виставляє козначки. Отримавши нульові ліміти, інвертор Deue програмно зупиняє перетворення енергії без виникнення іскор на реле BMS. Фізичне розмикання контакторів IBC відбувається лише як резервний захід захисту (якщо інвертор проігнорував CAN-повідомлення).

Подібний алгоритм застосовується і для напруги: при наближенні SoC до 95%, BMS програмно знижує дозволений струм заряду (CCL) від 75 А до мікрострумів балансування (1–2 А). Це дає можливість Slave-модулям ефективно вирівняти напругу на всіх 88 комірках, не допускаючи ситуації, коли одна комірка різко «вилітає» за 4,20В і провокує аварійну зупинку всієї станції.

Впровадження протоколу CAN-комунікації перетворює розроблену багатoelementну високовольтну збірку із пасивного резервуара енергії на активного інтелектуального учасника розумної мережі, що суттєво підвищує загальну надійність та подовжує життєвий цикл літій-іонних елементів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі здійснено розроблення та практичну апробацію алгоритмічного і програмного забезпечення інформаційно-вимірювальної системи моніторингу для реальної багатoelementної високовольтної збірки (конфігурація 88S на базі модулів Ford Focus Electric, хімія NMC), що інтегрована з гібридним інвертором Deye 30 кВт. За результатами виконаної роботи сформульовано наступні висновки:

Розроблено комбінований алгоритм оцінювання ступеня заряду (SoC). Обґрунтовано та математично доведено, що синергія динамічного методу підрахунку кулонів (Coulomb Counting) під час активної роботи інвертора та періодичної корекції за напругою розімкненого кола (OCV) у стані спокою дозволяє ефективно нівелювати кумулятивну інструментальну похибку АЦП і шунта, забезпечуючи достовірність розрахунку залишкового енергозапасу на рівні $\pm 1-2\%$.

Сформовано математичну модель моніторингу стану здоров'я (SoH). Для оцінки рівня деградації вживаних електромобільних модулів (Second Life) застосовано метод динамічного вимірювання внутрішнього еквівалентного опору. Алгоритм, який фіксує просадки напруги під час різких стрибків струмового навантаження, дозволяє ІВС безперервно відстежувати знос батареї без необхідності проведення незручних повних циклів заряду-розряду.

Спроектовано багаторівневу логіку захисту системи. Визначено та інтегровано в програмний код мікроконтролера критичні експлуатаційні пороги для комірок NMC (відключення при перенапрузі понад 4,20 В, глибокому розряді нижче 2,80 В, надструмах понад 150 А та локальному нагріві вище 55 °C). Доведено, що незалежний апаратний контроль цих параметрів надійно запобігає незворотній деградації та тепловому розгону акумуляторів.

Реалізовано протокол інформаційної взаємодії з силовим обладнанням. Розроблено алгоритм передачі метричних даних та керуючих команд від BMS до інвертора Deye по ізольованій шині CAN. Впровадження механізму

предиктивного обмеження струмів дозволяє системі динамічно знижувати потужність заряду/розряду у відповідь на зростання температури, перетворюючи BMS із простого вузла захисту на інтелектуальний модуль активного управління енергетичними потоками сонячної електростанції.

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній бакалаврській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання - розроблено прецизійну інформаційно-вимірювальну систему моніторингу стану акумуляторних батарей (BMS), адаптовану для багатoeлементних високовольтних систем накопичення енергії сонячних електростанцій.

За результатами виконаних теоретичних та експериментальних досліджень зроблено такі висновки:

На основі аналізу сучасних методів моніторингу BESS встановлено, що для балансування генерації гібридних інверторів великої потужності (30 кВт) оптимальним є використання високовольтних літій-іонних збірок (конфігурація 88S, хімія NMC). Доведено, що безпечна експлуатація таких систем вимагає переходу від простих схем захисту до інтелектуальних вимірювальних комплексів із високою роздільною здатністю та алгоритмічною компенсацією похибок.

Спроектовано розподілену ієрархічну апаратну архітектуру IBC (Master-Slave). Обґрунтовано вибір первинних вимірювальних перетворювачів: для каналу струму застосовано прецизійний шунт (100 мкОм), що нівелює проблему дрейфу нуля, а для вимірювання напруги комірок - інтегральні AFE-модулі з 16-бітними сигма-дельта АЦП. Застосування цифрової ізоляції шини зв'язку між Slave-модулями та 32-бітним мікроконтролером (Master) гарантує високу завадостійкість і безпеку від високих потенціалів (до 370 В).

Розроблено та програмно реалізовано комбінований алгоритм розрахунку ступеня заряду (SoC). Синергія динамічного методу підрахунку кулонів під час активної роботи сонячної станції та періодичної корекції накопиченої похибки за напругою розімкненого кола (OCV) у стані спокою дозволила досягти високої достовірності оцінки залишкового енергозапасу з похибкою не більше $\pm 1-2\%$.

Сформовано математичну модель оцінювання стану здоров'я (SoH) комірок (Second Life). Метод, що базується на динамічному вимірюванні внутрішнього

еквівалентного опору під час різких стрибків навантаження від інвертора, дозволяє ІВС безперервно відстежувати деградацію акумуляторів без необхідності проведення повних циклів заряду-розряду.

Реалізовано багаторівневу логіку захисту та інформаційної взаємодії. Визначено критичні експлуатаційні пороги (перенапруга 4,20 В, глибокий розряд 2,80 В, надструм 150 А, перегрів понад 55 °С) для апаратного відключення системи. Впровадження протоколу CAN-комунікації між BMS та інвертором Deye дозволило реалізувати алгоритм предиктивного обмеження струмів (Derating), що перетворює розроблену систему на активного учасника інтелектуального управління енергетичними потоками та суттєво продовжує життєвий цикл батарей.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Найкращі акумуляторні батареї для сонячних електростанцій у 2025 році. *Energy.ua*. URL: <https://energy.ua/naikrashchi-akumuliatorni-batarei-dlia-soniachnykh-elektrostantsii-u-2025-rotsi-vybir-vid-energy-ua/> (дата звернення: 10.05.2026).
2. Співак В. М., Гуржий А. М. Загальна електротехніка з основами електроніки : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2020. 266 с. URL: https://vpusp.vn.ua/wp-content/uploads/2023/01/pick_elektrotehnika_ta_osnovi_elektroniki_gurzhiy.pdf (дата звернення: 11.05.2026).
3. Мілих В. І., Шавлукун Н. В. Електротехніка та електромеханіка : підручник. Київ : Каравела, 2007. 688 с.
4. Величко О. М. Основи метрології та інформаційно-вимірювальної техніки : навчальний посібник. Київ : Одеса : ОНМА, 2014. 288 с.
5. ДСТУ EN 62619:2017. Акумулятори та акумуляторні батареї, що містять лужний або інші некислотні електроліти. Вимоги щодо безпеки літєвих акумуляторів і батарей для промислового застосування. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 32 с.
6. ДСТУ ГОСТ 8.009:2008. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 25 с.
7. Piller S., Perrin M., Jossen A. Methods for state-of-charge determination and their applications. *Journal of Power Sources*. 2001. Vol. 96, Is. 1. P. 113–120.
8. Lu L., Han X., Li J., Hua J., Ouyang M. A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*. 2013. Vol. 226. P. 272–288.
9. Texas Instruments. bq76952 3-Series to 16-Series High Accuracy Battery Monitor : datasheet. 2021. 142 p.
10. Analog Devices. LTC6811-1/LTC6811-2 Multicell Battery Monitors : datasheet. 2019. 88 p.

- 11.STMicroelectronics. STM32G4 Series Advanced Analog Microcontrollers : reference manual. 2020. 1140 p.
- 12.Deye SUN-30K-SG01HP3-EU-AM2 Three Phase Hybrid Inverter : User Manual. Ningbo Deye Inverter Technology Co., Ltd., 2024. 68 p. URL: <https://sun-energy.com.ua/solar-power/solar-inverters/sun-30k-sg01hp3-eu-bm3> (дата звернення: 12.05.2026).
- 13.Розуміння стану заряду (SOC): Ключ до безпечних, ефективних і довговічних акумуляторів. URL: <https://batteryswapstation.com/uk/understanding-state-of-charge-soc/>

ДОДАТОК А

Технічні характеристики гібридного інвертора Deye SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3`

Модель:	SUN-30K-SG01HP3-EU-BM3
Країна - виробник:	Китай
Тип інвертора:	гібридний
Кількість фаз:	3
Кількість MPPT :	3/2
ККД, %:	97.6
Інтерфейс:	RS485,CAN, WiFi/GPRS (опціонально)
Вхідні характеристики сонячного поля	
Номінальна потужність, Вт:	30000
Максимальна потужність, Вт:	39000
Діапазон вхідної напруги, В:	150~850
MPPT діапазон напруги, В:	150~850
Максимальна напруга, В:	1000
Вхідний струм, А:	36+36+36
Максимальний струм MPPT трекера, А:	55+55+55
Вхідні характеристики від мережі	
Номінальна вихідна потужність в режимі інвертора:	30000
Номінальна вхідна напруга:	380
Максимальна вхідна напруга змінного струму:	500
Максимальний вхідний струм змінного струму:	45,5
Вихідні характеристики	
Номінальна потужність, Вт:	30000
Максимальна потужність, Вт:	33000
Вихідний струм, А:	45.5/43.5
Вихідна напруга, В:	220/380
Форма синусоїди:	правильна
Частота , Гц:	50/60