

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

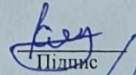
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 022040.22.03.84 ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, гр. КІ2-22-3


Підпис

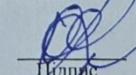
Ярослав КОСТУШЕВИЧ

Ініціали, прізвище

Керівник

д.ф., доцент

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

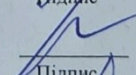
Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

к.ф.-мат.наук, доцент

Науковий ступінь, учене звання

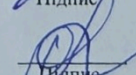

Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

«9» червня 2026 р.


Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

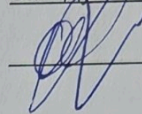
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Костушевичу Ярославу Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги

Керівник проекту (роботи) Павлова Ольга Олександрівна, д.ф., доцент.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів та постановка задачі щодо її розробки

Проектування апаратних та програмних підсистем кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Копія креслення «Схема електрична принципова»

Копія креслення «Блок-схеми алгоритмів роботи програмного забезпечення»

Копія креслення «Графічний інтерфейс користувача»

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів та проектування апаратних та програмних підсистем кіберфізичної системи моніторингу літій-іонних акумуляторів	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування кіберфізичної системи моніторингу літій-іонних акумуляторів	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

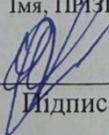
Здобувач


Підпис

Ярослав КОСТУШЕВИЧ

Імя, ПРИЗВИЩЕ





Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Імя, ПРИЗВИЩЕ

№ р я д к а	ф о р м а т	Позначення	Найменування	К і л · л и с т і в	№ ек з	П р и м і т к а
			<u>Текстові документи</u>			
1		КВРКІ 022040.22.03.84 ПЗ	Пояснювальна записка	65		
			<u>Графічні матеріали</u>			
2		КВРКІ 022040.22.03.84 Е8	Схема електрична принципова	1		
3		КВРКІ 22040.22.03.84 Е8	Блок-схеми алгоритмів роботи програмного забезпечення	1		
4		КВРКІ 022040.22.03.84 Е8	Графічний інтерфейс користувача	1		

					КВРКІ 02040.22.03.84 ВП					
Зм	Арк	№ докум	Підпис	Дата	Відомість проекту			Літера	Аркуш	Аркушів
Розробив		Костушевич						У	1	1
Перевір.		Павлова		11.06				ХНУ, КІ2-22-3		
Н. контр.		Кисіль								
Затв.		Павлова		01.06						

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги».

Автор роботи: Ярослав КОСТУШЕВИЧ.

Керівник роботи: Ольга ПАВЛОВА.

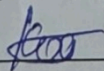
Пояснювальна записка: 65 с., 32 рис., 0 табл., 3 дод., 43 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АКУМУЛЯТОР, ЕЛЕКТРОННЕ НАВАНТАЖЕННЯ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ЛІТІЙ-ІОННИЙ ЕЛЕМЕНТ, МОНІТОРИНГ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню прототипу автоматизованої кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів на базі мікроконтролера. Актуальність теми зумовлена масовим використанням літій-іонних джерел живлення та критичною необхідністю контролю їхньої деградації для гарантування безпеки і надійності роботи. Своєчасний контроль напруги, струму та температури, а також автоматизація циклів розряду дають змогу виявляти зношені елементи, попереджати аварійні ситуації та оптимізувати процес повторного використання елементів живлення.

Метою роботи є проектування, практична реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для точного вимірювання реальної ємності та стану здоров'я батарей із можливістю віддаленої візуалізації даних. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз методів кулонометрії, обрано мікроконтролерну платформу, розроблено архітектуру пристрою з використанням керованого електронного навантаження, спроектовано мікропрограмне забезпечення та реалізовано інтеграцію з хмарною платформою Інтернету речей для моніторингу результатів у реальному часі.



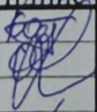
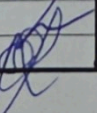

Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів та постановка задачі щодо її розробки	5
1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей систем моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів	5
1.2 Порівняльний аналіз існуючих апаратно-програмних засобів діагностики хімічних джерел струму	11
1.3 Методологічні підходи до побудови кіберфізичної системи моніторингу на базі мікроконтролерної платформи	16
1.4 Висновки до першого розділу	22
2 Проектування апаратних та програмних підсистем кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів.....	24
2.1 Визначення архітектури та основних підсистем програмно-технічного засобу	24
2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази кіберфізичної системи.....	26
2.3 Проектування алгоритмічного та програмного забезпечення мікроконтролера.....	34
2.4 Розробка локального інтерфейсу користувача та підсистеми віддаленого моніторингу	38
2.5 Розробка схеми електричної принципової проекту.....	41
2.6 Висновки до другого розділу	44
3. Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи.....	46
3.1 Проектування та виготовлення корпусу пристрою методом 3D-друку	46
3.2 Технічний монтаж та апаратна комутація модулів системи	50
3.3 Розробка програмного забезпечення та налаштування віддаленого моніторингу	55

КвРКІ. 022040.22.03.84ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Виконав		Вірослав КОСТУШЕВИЧ		
Перевір.		Ольга ПАВЛОВА		
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги				
		Літера	Аркш	Аркшів
		у	2	74
ХНУ КІ2-22-3				

3.4	Налагодження та тестування функціональних режимів роботи системи	60
3.5	Аналіз точності вимірювань та ефективності терморегуляції.....	63
3.6	Висновки до третього розділу	66
	Висновки.....	68
	Перелік джерел посилань	70
	Додаток А Копія креслення «Схема електрична принципова»	75
	Додаток Б Копія креслення «Блок-схеми алгоритмів роботи програмного забезпечення»	76
	Додаток В Копія креслення «Графічний інтерфейс користувача».....	77

ВСТУП

Актуальність дослідження. Стрімкий розвиток портативної електроніки, електротранспорту та систем резервного живлення зумовив масове використання літій-іонних акумуляторів як основного джерела енергії. Завдяки високій щільності енергії та низькому саморозряду вони стали стандартом індустрії, проте їх експлуатація пов'язана з низкою критичних викликів. З часом хімічні джерела струму неминуче деградують: зростає внутрішній опір, знижується ємність, а порушення температурних режимів під час заряджання чи розряджання можуть призвести до їх виходу з ладу. У цьому контексті моніторинг технічного стану акумуляторів стає необхідною умовою безпеки та надійності роботи сучасних приладів.

Існуючі на ринку рішення для діагностики часто є або простими тестерами напруги без навантаження, або громіздкими лабораторними комплексами. Більшості доступних пристроїв бракує автоматизації тестування та інтеграції з інформаційними технологіями. Тому розробка кіберфізичної системи, яка поєднує точні вимірювання з передачею даних у мережу, є актуальним завданням для забезпечення доступної і безпечної діагностики.

Метою дипломної роботи є розробка прототипу автоматизованої кіберфізичної системи моніторингу літій-іонних акумуляторів на базі мікроконтролера ESP32, що забезпечує збір, обробку та мережеву передачу даних з датчиків температури і напруги.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та діагностики технічного стану літій-іонних акумуляторів.

Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги.

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ЩОДО ЇЇ РОЗРОБКИ

1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей систем моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів

Сучасний етап розвитку техніки, який характеризується переходом до концепцій Індустрії 4.0 та Інтернету речей, тісно пов'язаний із тотальною електрифікацією мобільних систем. Літій-іонні акумулятори, завдяки своїй високій питомій енергоємності, відсутності ефекту пам'яті та низькому саморозряду, стали безальтернативним джерелом енергії для широкого спектра пристроїв: від портативної електроніки та медичного обладнання до електротранспорту та систем накопичення енергії відновлюваних джерел. Проте, на відміну від пасивних електронних компонентів, акумулятор є складною нелінійною електрохімічною системою, параметри якої динамічно змінюються в часі та критично залежать від умов експлуатації.

Предметною областю дослідження є методи та засоби діагностики хімічних джерел струму в рамках кіберфізичних систем. Такий підхід передбачає глибоку інтеграцію обчислювальних ресурсів із фізичними процесами, де сенсори знімають фізичні показники, мікроконтролер обробляє їх у реальному часі, а мережеві інтерфейси забезпечують передачу масивів даних у хмарне середовище для глобального моніторингу, аналізу та прогнозування залишкового ресурсу.

Важливим фактором при експлуатації Li-ion акумуляторів є незворотний процес їх деградації, який відбувається як під час циклів заряд-розряд, так і в процесі календарного зберігання. Фізико-хімічна природа старіння пов'язана з низкою факторів, серед яких домінуючу роль відіграє зростання шару Solid Electrolyte Interface на аноді. Ця плівка, що утворюється з продуктів розкладання електроліту, поступово збільшує внутрішній опір джерела живлення, що

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до падіння напруги під навантаженням. Паралельно відбувається втрата активного літію, іони якого стають недоступними для перенесення заряду, а також можлива металізація літію на електродах, особливо при заряджанні високими струмами або за низьких температур. Зазначені процеси знижують ефективність роботи акумулятора та створюють передумови для внутрішніх коротких замикань [4, 6, 21]. Загальний принцип роботи та схему переміщення іонів у літій-іонному акумуляторі під час циклів заряду та розряду наведено на рисунку 1.1.

LITHIUM-ION BATTERY

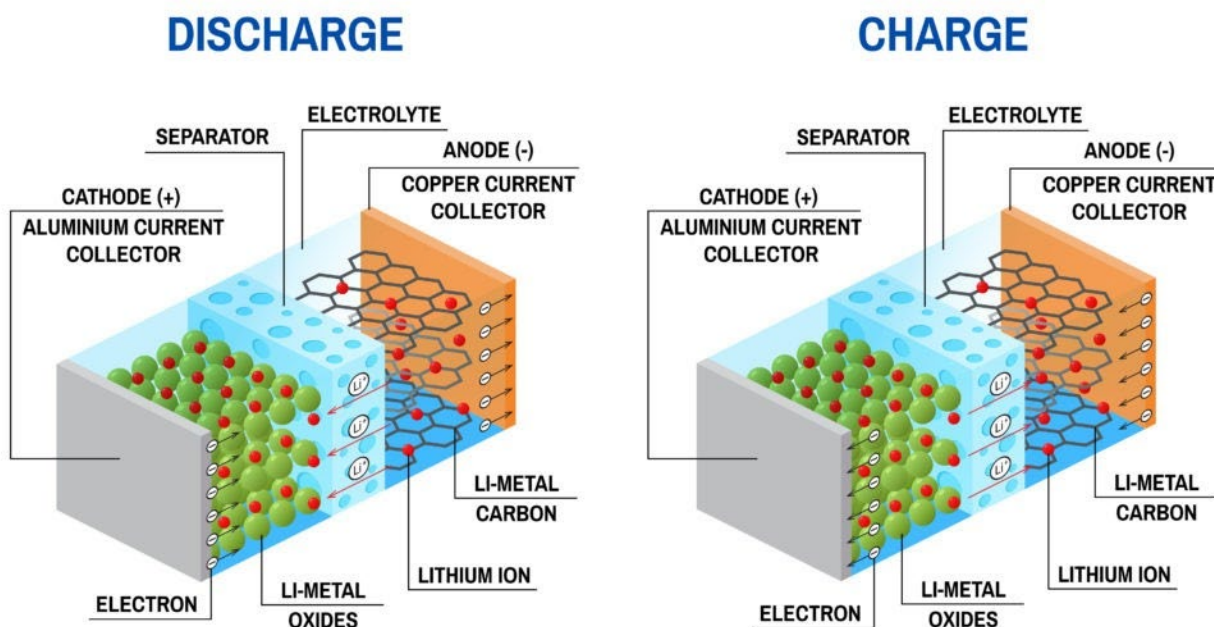


Рисунок 1.1 – Принцип роботи та переміщення іонів у літій-іонному акумуляторі [31]

Для оцінки поточного стану акумулятора в інженерній практиці використовуються інтегральні показники: стан заряду та стан здоров'я. Визначення SoC виключно за напругою розімкнутого кола є недостатньо точним

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

через нелінійність розрядної кривої та явище гістерезису, тому більш надійним методом вважається кулонометрія - підрахунок кількості енергії, що надійшла або була віддана акумулятором [2, 3, 23]. Показник SoH, який відображає відношення поточної максимальної ємності до номінальної, є ще складнішим для визначення, оскільки вимагає проведення повного контрольованого циклу розряду або застосування методів імпедансної спектроскопії, що зазвичай не реалізовано у стандартних контролерах заряду побутових пристроїв.

Важливо зазначити, що сьогодні найпопулярнішим форматом літій-іонних акумуляторів є циліндричні елементи типу 18650 та їх аналоги. Вони масово використовуються у павербанках, ліхтариках, батареях для ноутбуків, електросамокатах та безперебійних джерелах живлення. Дуже часто на практиці виникає потреба повторного використання таких акумуляторів так зване «друге життя». Наприклад, коли батарея ноутбука перестає тримати заряд, проблема часто полягає лише в одному несправному елементі, тоді як інші залишаються повністю робочими. Проте зовнішній вигляд акумулятора не дає жодної інформації про його реальний технічний стан [16].

Економічна та екологічна доцільність повторного використання літій-іонних акумуляторів є ще одним важливим аргументом на користь розробки доступних систем діагностики. Зі зростанням кількості портативної електроніки проблема утилізації відпрацьованих батарей набуває глобальних масштабів. Відновлення та сортування вживаних комірок 18650 дозволяє не лише знизити вартість кінцевих пристроїв резервного живлення, але й суттєво зменшити обсяги електронного сміття [15]. Проте, окрім залишкової ємності, критичним фактором відбраковування є внутрішній опір елемента. У міру старіння комірки та потовщення шару SEI, внутрішній опір зростає, що викликає різке падіння напруги під час підключення навантаження. У реальних умовах експлуатації це призводить до того, що система захисту акумулятора відключає живлення через просадку напруги ще до того, як комірка віддасть усю свою накопичену енергію. Ефективно виміряти цей динамічний параметр без спеціалізованого

електронного навантаження та мікроконтролера з високою частотою опитування АЦП практично неможливо.

Якщо спробувати зібрати нову акумуляторну збірку з вживаних елементів, які мають різну залишкову ємність та різний внутрішній опір, це неминуче призведе до швидкого розбалансування всієї системи. Слабші елементи будуть розряджатися швидше за інші, перегріватися і можуть навіть вийти з ладу або спричинити займання. Навіть наявність вбудованих систем керування батареями не здатна ефективно компенсувати таку значну різницю параметрів, що призводить до непередбачуваного падіння напруги та передчасного відключення всього блоку живлення під навантаженням. Саме тому перед конструюванням будь-яких пристроїв на базі вживаних літій-іонних елементів їх необхідно ретельно протестувати. Звичайні мультиметри тут не допоможуть: акумулятор може показувати ідеальні 4.2 В у стані спокою, але під навантаженням напруга миттєво просяде через високий внутрішній опір. Тому повноцінний процес діагностики обов'язково має включати етап розряду стабільним струмом. Автоматизація цього процесу за допомогою мікроконтролера звільняє людину від рутинної роботи та забезпечує високу точність вимірювань.

Окремої уваги заслуговує вплив температурного режиму на безпеку та довговічність джерел живлення. Літій-іонні акумулятори мають вузький діапазон безпечних робочих температур. Експлуатація за межами рекомендованих виробником значень призводить до прискореної деградації хімічної структури, а критичний перегрів може ініціювати ланцюгову реакцію теплового розгону. Цей процес характеризується стрімким підвищенням температури, виділенням горючих газів і може завершитися займанням або вибухом, що підкреслює необхідність безперервного температурного моніторингу в системах керування живленням [25, 26, 27]. Відповідно, розроблювана кіберфізична система повинна не лише пасивно фіксувати теплові показники, а й реагувати на них. Інтеграція цифрових термодатчиків дозволить мікроконтролеру миттєво переривати навантажувальний цикл при досягненні

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гранично допустимих температурних порогів, тим самим гарантуючи абсолютну апаратну безпеку процесу діагностики. Загальну залежність кількості робочих циклів та деградації ємності акумулятора від температури експлуатації подано на рисунку 1.2.

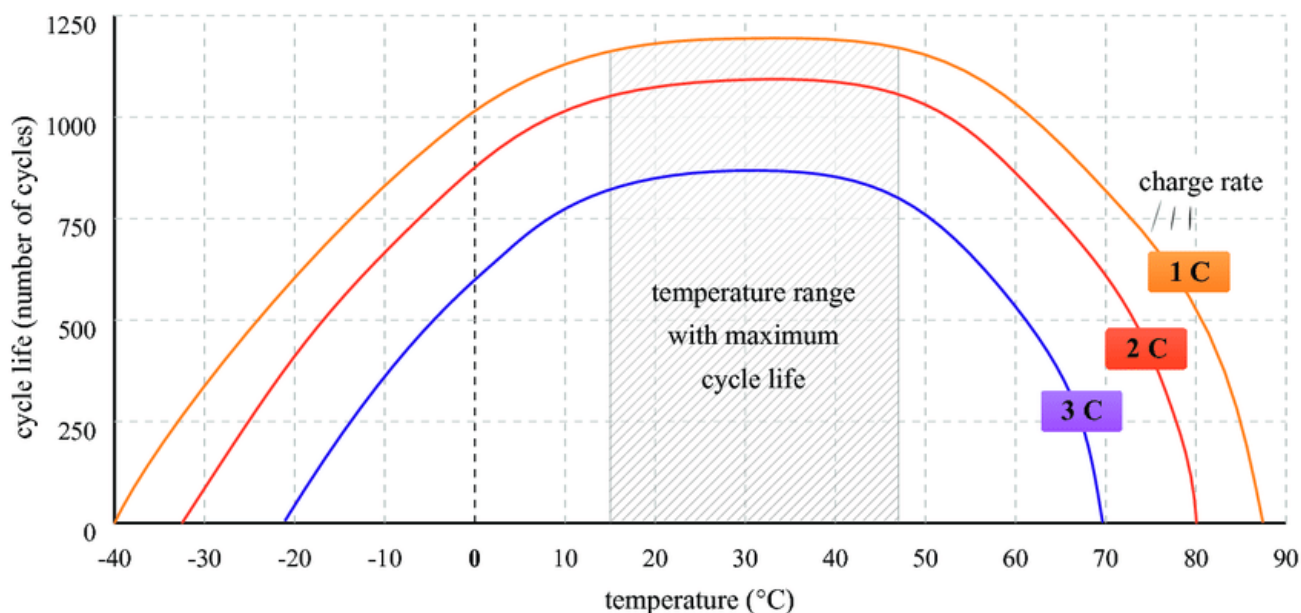


Рисунок 1.2 – Графік залежності деградації ємності акумулятора від температури експлуатації [32]

Аналіз існуючих технічних рішень виявляє суттєвий розрив між потребами користувачів та доступними засобами діагностики. З одного боку, ринок насичений простими вольтметрами та USB-тестерами, які вимірюють лише миттєві значення напруги та струму, не надаючи комплексної оцінки внутрішнього опору та реальної ємності під навантаженням. З іншого боку, професійне лабораторне обладнання для аналізу хімічних джерел струму є надзвичайно вартісним, громіздким та складним в обслуговуванні. Більшість вбудованих BMS працюють за принципом «чорної скриньки», приховуючи від користувача детальну телеметрію та історію експлуатації, що унеможливорює своєчасне виявлення потенційно небезпечних елементів.

На основі проведеного аналізу предметної області постає необхідність розробки спеціалізованої кіберфізичної системи, яка б заповнила нішу між побутовими індикаторами та лабораторними комплексами. Основними завданнями при проектуванні такої системи є забезпечення апаратної можливості створення керованого навантаження для проведення повних діагностичних циклів, реалізація прецизійного вимірювання струму для точного розрахунку ємності та внутрішнього опору, а також інтеграція цифрових датчиків температури для захисту від перегріву. Крім того, критично важливим є використання технологій Інтернету речей для передачі даних на віддалений сервер, що дозволить оператору спостерігати за процесом у реальному часі, накопичувати статистику та аналізувати графіки розрядних характеристик через зручний веб-інтерфейс або мобільний додаток. Структурну схему взаємодії компонентів у такій кіберфізичній системі моніторингу наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Структурна схема взаємодії компонентів у кіберфізичній системі моніторингу

1.2 Порівняльний аналіз існуючих апаратно-програмних засобів діагностики хімічних джерел струму

Ринок засобів діагностики хімічних джерел струму на сьогоднішній день характеризується значною насиченістю, пропонуючи рішення від найпростіших кишенькових індикаторів до складних стаціонарних лабораторних комплексів. Проте, детальний аналіз функціональних можливостей доступних пристроїв показує суттєву технологічну прогалину між побутовими засобами обслуговування акумуляторів та професійним діагностичним обладнанням, особливо в контексті інтеграції з сучасними інформаційними системами та хмарними сервісами [17, 24]. Відсутність проміжних рішень змушує інженерів та розробників автономних систем миритися з низькою інформативністю побутових приладів або витратити значні кошти на надлишкове лабораторне устаткування.

Найбільш поширеним класом пристроїв для перевірки стану елементів живлення є цифрові мультиметри та найпростіші індикатори напруги. Головною перевагою таких засобів є їх низька вартість, компактність та загальна доступність. Вони дозволяють миттєво оцінити напругу на клеммах акумулятора, що дає користувачеві базове уявлення про рівень заряду. Однак, суттєвим недоліком цього методу є неможливість оцінки внутрішнього опору джерела струму та його реальної ємності. Вимірювання напруги «холостого ходу» не враховує динамічні процеси, що відбуваються під навантаженням. Часто деградований акумулятор може показувати номінальну напругу у стані спокою, але миттєво «просідати» при підключенні споживача, що робить такі вимірювання малоінформативними для визначення реального технічного стану [9]. Це явище зумовлене тим, що у процесі старіння на електродах зростає пасивуючий шар, який перешкоджає вільному руху іонів та викликає стрімке падіння потенціалу при підключенні навантаження.

Наступним рівнем еволюції діагностичних засобів є так звані «розумні» універсальні зарядні пристрої наприклад, LiitoKala, Opus, SkyRC та їх аналоги. Ці пристрої здатні виконувати цикли заряду та розряду, вимірювати ємність у міліампер-годинах та оцінювати внутрішній опір. Безперечною перевагою таких систем є автоматизація процесу обслуговування та можливість роботи з різними типами хімії Li-Ion, Ni-MH, LiFePO4 [8]. Завдяки цим функціям вони добре підходять для базового побутового використання, дозволяючи відбракувати повністю несправні елементи перед їх подальшим застосуванням у невимогливих схемах. Зовнішній вигляд типового універсального зарядного пристрою з функцією тестування ємності наведено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд типового універсального зарядного пристрою з функцією тестування ємності [33]

Проте, незважаючи на широку функціональність, такі пристрої мають ряд критичних недоліків у контексті завдань дослідження. По-перше, більшість із них реалізують вимірювання внутрішнього опору методом короткочасного

імпульсного навантаження, що часто дає значну похибку через перехідні процеси на контактах слота. По-друге, вони є замкнутими системами без можливості експорту даних. Результат тестування відображається на невеликому монохромному дисплеї лише по завершенню процесу, і користувач не має можливості переглянути графік розрядної кривої, проаналізувати динаміку падіння напруги або зберегти історію вимірювань у цифровому вигляді для подальшого аналізу. Також частою проблемою є перегрів таких пристроїв при розряді струмами вище 500 мА, що спотворює результати вимірювань через температурний дрейф параметрів.

Розглянемо детальніше конструктивні недоліки масових зарядних пристроїв серії LiitoKala та Orus. Їхня архітектура передбачає розміщення розрядних резисторів у безпосередній близькості до акумуляторних відсіків у єдиному пластиковому корпусі. Під час тестування елементів струмом навіть 1 А виділяється значна кількість теплової енергії. Через відсутність ефективного ізолювання, це тепло передається на самі акумулятори. Нагрівання хімічного джерела струму під час діагностики не лише пришвидшує його деградацію, але й суттєво змінює внутрішній опір та розрядну характеристику, що робить результати тестування нерелевантними. Крім того, використання звичайних підпружинених контактів додає паразитний перехідний опір. Цей опір може динамічно змінюватися від найменших мікрорухів комірки у слоті чи окислення контактних майданчиків, що остаточно унеможлиблює прецизійне вимірювання міліомних значень внутрішнього опору акумулятора.

Окремою категорією є спеціалізовані електронні навантаження та USB-тестери. Ці модулі дозволяють гнучко налаштовувати струм розряду та забезпечують досить високу точність вимірювань [20]. Вони часто використовуються радіоаматорами для тестування ємності павербанків та окремих комірок. Приклад такого модуля електронного навантаження для тестування акумуляторів наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Приклад модуля електронного навантаження для тестування акумуляторів [34]

Хоча деякі моделі цього класу мають можливість підключення до персонального комп'ютера через USB або Bluetooth, програмне забезпечення зазвичай є пропрієтарним, застарілим та обмеженим у функціоналі. Головним недоліком залишається відсутність автономності та інтеграції з глобальною мережею Інтернет. Для проведення тривалого тестування необхідна постійна робота підключеного ПК, а дані зберігаються локально, що унеможливує віддалений моніторинг процесу та створення єдиної бази даних результатів вимірювань.

Ще однією проблемою електронних навантажень, залежних від персонального комп'ютера, є надійність самого процесу збору телеметрії. Повний цикл діагностики як заряд-розряд, вискоємнісного акумулятора може тривати від 6 до 10 годин. Використання десктопного ПК або ноутбука як логера даних протягом такого тривалого часу є енергозатратним і вкрай ненадійним рішенням. Будь-яке автоматичне оновлення операційної системи, перехід ПК у сплячий режим, фонове зависання програми або короткочасний збій у роботі драйвера віртуального СОМ-порту неминуче призводить до переривання запису

графіка. У результаті користувач втрачає масив даних і змушений починати багатогодинний процес спочатку. Цей фактор яскраво підкреслює необхідність переходу до автономних вбудованих систем, які здатні локально акумулювати дані у власній енергонезалежній пам'яті та асинхронно відправляти їх на безвідмовні хмарні сервери без участі зовнішнього комп'ютера [10].

Найбільш досконалими діагностичними засобами є професійні аналізатори батарей, зокрема виробництва Cadex або Massor. Ці комплекси використовують передові методи, такі як спектроскопія електрохімічного імпедансу, що дозволяє з високою точністю визначити стан здоров'я акумулятора за лічені хвилини без необхідності повного циклування. Вони забезпечують термостатування комірок, високу точність вимірювань та детальне протоколювання. Однак, вартість такого обладнання вимірюється тисячами доларів, а його габарити та складність експлуатації роблять його недоступним для широкого кола користувачів та використання у польових умовах або побуті. Зовнішній вигляд такого професійного лабораторного комплексу для аналізу хімічних джерел струму наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Професійний лабораторний комплекс для аналізу хімічних джерел струму [35]

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Аналіз вбудованих систем керування батареями, що інтегруються безпосередньо в акумуляторні збірки показує, що хоча вони і здійснюють безперервний моніторинг, доступ до «сирих» даних для користувача зазвичай заблокований [18, 22]. Алгоритми розрахунку залишкового ресурсу є комерційною таємницею виробників, а сама система часто не дозволяє проводити примусове калібрування чи глибоку діагностику окремих елементів.

Результати порівняльного аналізу засвідчують відсутність на ринку універсального рішення з відкритим кодом, яке б інтегрувало функції автоматизованого навантажувального тестування та безпечного заряджання, точного вимірювання параметрів та сучасні технології Інтернету речей. Існуючі рішення або занадто примітивні та неточні, або позбавлені засобів комунікації та візуалізації, або ж є економічно недоцільними для масового використання.

Зазначене обґрунтовує доцільність розробки власної кіберфізичної системи на базі мікроконтролера ESP32, яка вирішить виявлені проблеми шляхом поєднання доступної елементної бази, гнучких алгоритмів керування навантаженням та хмарної платформи для візуалізації та зберігання даних [12, 13, 29]. Така система дозволить заповнити нішу між аматорськими тестерами та професійним обладнанням, надаючи користувачеві інструмент для об'єктивної оцінки технічного стану акумуляторів із можливістю віддаленого контролю.

1.3 Методологічні підходи до побудови кіберфізичної системи моніторингу на базі мікроконтролерної платформи

Моніторинг стану літій-іонних акумуляторів доцільно реалізовувати в межах кіберфізичних систем, що забезпечує системність аналізу даних. проєктована система повинна поєднувати методи точних апаратних вимірювань фізичних величин із програмними алгоритмами цифрової обробки сигналів, технологіями локального веб-серверного хостингу та хмарної телеметрії. Такий підхід забезпечує багаторівневу децентралізовану структуру взаємодії, де

пристрій зберігає повну автономність і працездатність навіть за повної відсутності доступу до глобальної мережі Інтернет. Оскільки показник стану здоров'я акумулятора та його реальну ємність неможливо визначити миттєвим вимірюванням напруги, основним методом діагностики у даній роботі обрано метод проведення повністю автоматизованого циклу, що включає контрольований заряд та з використанням кулонометрії.

Метод кулонометрії полягає у безперервному математичному обчисленню струму розряду або заряду в часі. Фізична суть цього підходу зводиться до підрахунку загальної кількості електричного заряду що пройшов через вимірювальний шунт від моменту повного заряду комірки до досягнення нею мінімально допустимої напруги відсічки. Для забезпечення мінімальної похибки цього методу важливо підтримувати стабільний струм розряду. З цією метою методологія розробки передбачає використання мікроконтролера як ядра системи автоматичного керування, яке за допомогою широтно-імпульсної модуляції динамічно керує потужним польовим транзистором. Транзистор, працюючи в лінійному режимі та розсіюючи енергію на потужному резисторі або радіаторі, виконує роль активного електронного навантаження, здатного підтримувати режим постійного струму незалежно від падіння напруги на самому акумуляторі в процесі розряду [1]. Завдяки такому підходу система автоматично компенсує будь-які коливання потенціалу, гарантуючи, що площа під кривою струму відносно часу максимально точно відобразить реальну віддану ємність. Це дозволяє ефективно нівелювати похибки, які зазвичай виникають при використанні звичайних пасивних резисторів як навантаження.

Для забезпечення високої достовірності вихідних даних необхідно враховувати апаратні обмеження обраної платформи. Мікроконтролер ESP32, попри свою високу обчислювальну потужність та наявність вбудованих модулів бездротового зв'язку, має суттєві недоліки в роботі внутрішніх аналого-цифрових перетворювачів, зокрема високу нелінійність та шум на краях діапазону вимірювань. Тому методологічно обґрунтованим є винесення функцій

вимірювання струму та напруги на зовнішні спеціалізовані інтегральні схеми - цифрові монітори потужності такі як INA219 або INA226, що обмінюються даними з ядром по шині I2C. Використання спеціалізованого АЦП з високою розрядністю та вбудованим підсилювачем з програмованим коефіцієнтом підсилення гарантує прецизійність зняття показань, що є критичним для алгоритму інтегрування ємності. Крім того, апаратне усереднення результатів вимірювань безпосередньо всередині мікросхеми INA226 суттєво розвантажує центральний процесор ESP32. Це дозволяє мікроконтролеру стабільно підтримувати мережеве з'єднання для безперебійної передачі телеметрії в хмарну платформу, не пропускаючи при цьому жодного циклу високоточного збору даних. Концептуальну архітектуру апаратної частини розробленої системи з відображенням усіх вищезазначених компонентів та ліній зв'язку між ними наведено на рисунку 1.7.

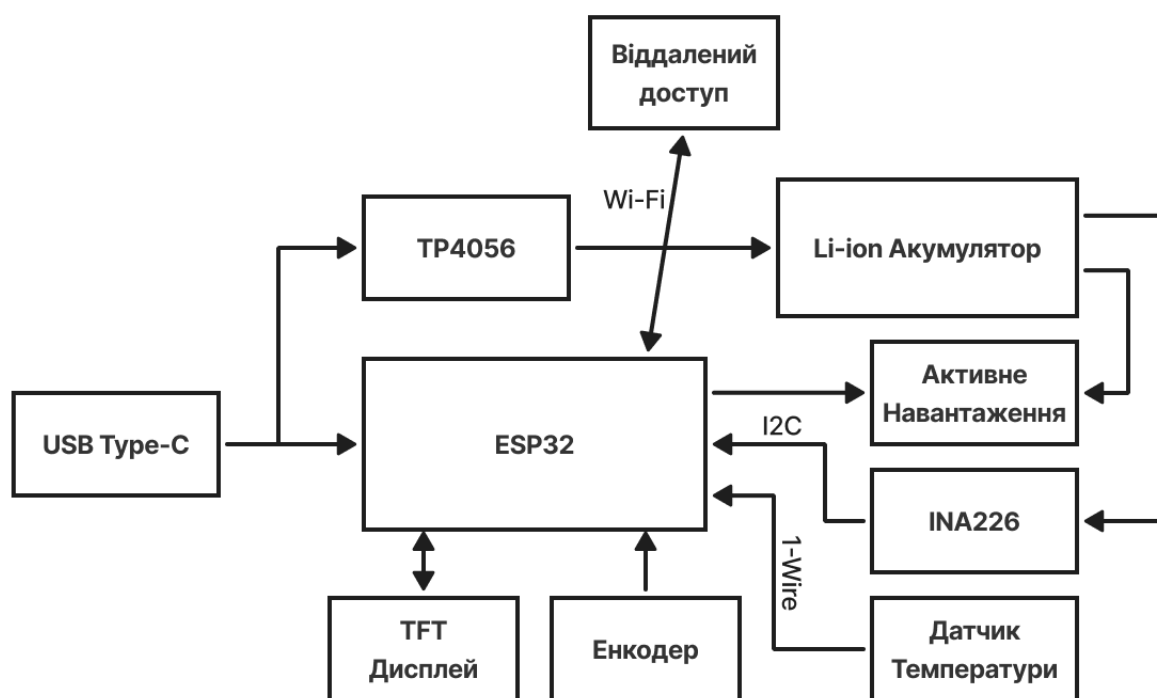


Рисунок 1.7 – Концептуальна архітектура апаратної частини

Крім вибору прецизійного АЦП, важливою вимогою є спосіб фізичного підключення вимірювальних контактів до акумулятора. При струмах в 1-2

ампери навіть короткі з'єднувальні дроти та контактні площадки тримача мають власний паразитний опір, на якому відбувається падіння напруги. Якщо вимірювати напругу безпосередньо на головній платі керування, мікроконтролер отримає занижені показники і передчасно зупинить процес розряду. Тому методологія вимагає використання чотирипровідної схеми вимірювання. У такій конфігурації силові лінії, якими протікає струм навантаження, та сигнальні лінії, якими АЦП зчитує потенціал, розділені і сходяться лише безпосередньо на клеммах самого акумулятора. Оскільки сигнальні лінії майже не споживають струму, падіння напруги на них відсутнє, що гарантує отримання максимально достовірних результатів незалежно від якості контактів силового контуру.

Коректна апаратна та програмна реалізація циклу заряджання є самою важливою умовою функціонування системи. Літій-іонні акумулятори є вкрай чутливими до перезаряду. Тому процес відновлення їхньої енергії повинен чітко слідувати стандартизованому двохетапному алгоритму CC/CV. На першому етапі система заряджає акумулятор постійним струмом, поки напруга на ньому не досягне позначки 4.2 В. Після цього починається другий етап: система фіксує напругу на рівні 4.2 В, а зарядний струм починає плавно знижуватися. Коли струм падає до мінімальних значень (зазвичай близько 10% від початкового), мікроконтролер має зафіксувати завершення заряду та відключити живлення, щоб запобігти деградації хімічної структури елемента [11].

Функціонування системи передбачає реалізацію багаторівневого захисту акумулятора на етапі вимірювання ємності. Відомо, що падіння напруги на літій-іонній комірці нижче критичного порогу, зазвичай 2.5–2.8 В, запускає незворотні процеси руйнування мідного струмоznімача на аноді, що може назавжди вивести елемент із ладу. Тому програмно-апаратний комплекс повинен містити надійний алгоритм відсічки. Методика передбачає постійне порівняння поточної напруги під навантаженням із заданим мінімальним порогом. Як тільки напруга комірки досягає цієї межі, мікроконтролер зобов'язаний миттєво відключити електронне навантаження, припинити підрахунок ємності та зафіксувати фінальний

результат. Додатково методика передбачає паузу після зняття навантаження для фіксації напруги відновлення, що дає системі додаткову інформацію про ступінь внутрішньої деградації елемента.

Програмна частина системи також реалізує алгоритми оцінки технічного стану та спеціалізовані режими обслуговування акумуляторів. Головний критерій діагностики, показник SoH – обчислюється мікроконтролером автоматично після завершення циклу розряду [19]. Для цього програма знаходить відсоткове відношення фактично відданої акумулятором ємності до його номінальної ємності, значення якої користувач задає перед стартом тесту. Якщо розрахований показник падає нижче 70–80%, система маркує елемент як деградований.

Архітектурно взаємодія з користувачем реалізується на чотирьох взаємопов'язаних і синхронізованих рівнях. Перший рівень – це автономний фізичний інтерфейс з TFT-дисплей та енкодер KY-040. Другий рівень передбачає роботу мікроконтролера в режимі точки доступу. Третій рівень розгортає повноцінний локальний веб-сервер у вигляді односторінкового додатка із динамічним рендерингом графіків та буферизацією історії тестування. Четвертий рівень інтегрує пристрій із глобальною хмарою Blynk IoT, забезпечуючи двосторонню синхронізацію налаштувань і аварійних тригерів з будь-якої точки світу. [7]. Для цього в архітектуру інтегрується локальний дисплей та блок енкодера. Управління передбачає створення ієрархічного меню, через яке оператор може вибрати потрібний режим роботи: лише заряд, лише розряд або повний автоматизований цикл (заряд-розряд-заряд). Під час виконання циклу мікроконтролер динамічно оновлює на екрані ключову телеметрію: поточну напругу комірки, струм, температуру, час від початку тесту та накопичену ємність у міліампер-годинах. Такий дубльований підхід у вигляді локального екрана плюс хмарного додатку робить пристрій максимально гнучким: його можна використовувати як портативний тестер у польових умовах без доступу до Wi-Fi, так і як стаціонарний стенд із глобальним моніторингом.

Важливим етапом розробки стало забезпечення надійності збереження даних. Оскільки повний цикл тестування може тривати кілька годин, існує ризик тимчасового збою в роботі Wi-Fi мережі або відключення інтернету. Щоб не втратити результати тесту, програма для ESP32 будується таким чином, щоб усі головні обчислення та накопичення показників ємності відбувалися локально на самому пристрої. Поточні результати регулярно зберігаються у внутрішній пам'яті [14]. У випадку, якщо зв'язок із хмарним сервісом обривається, пристрій не зупиняє роботу, а продовжує тестування в автономному режимі. Як тільки мережеве з'єднання відновлюється, мікроконтролер автоматично синхронізує актуальні дані з мобільним додатком. Крім того, на рівні програмного коду реалізується цифрова фільтрація показників із датчиків, щоб згладити дрібні стрибки напруги і зробити результати вимірювань максимально точними.

Під час проєктування особливу увагу приділено безпеці процесу та температурному контролю акумулятора. Оскільки електрохімічна ємність та внутрішній опір акумулятора мають яскраво виражену температурну залежність, а процес розряду струмами понад 1А супроводжується значним тепловиділенням, система повинна реалізовувати метод безперервного температурного моніторингу. Для цього передбачається використання цифрових термодатчиків з інтерфейсом 1-Wire, які забезпечують високу стійкість до електромагнітних завад, що генеруються імпульсними перетворювачами напруги. Програмна частина системи повинна включати алгоритми цифрової фільтрації «сирих» даних для усунення високочастотних шумів перед тим, як дані будуть використані для розрахунків або прийняття рішень про аварійне відключення навантаження при досягненні критичної температури.

Завершальним етапом розробки є інтеграція пристрою в екосистему Інтернету речей. Замість локального зберігання масивів телеметричних даних, які генеруються протягом тривалих годин тестування, застосовується підхід хмарної синхронізації. Мікроконтролер ESP32, використовуючи модуль Wi-Fi, встановлює асинхронне з'єднання з IoT-платформою, куди з заданою

періодичністю передає пакети даних: поточну напругу, струм, температуру та розраховану накопичену ємність [5]. Цей крок перетворює ізольований вимірювальний прилад на повноцінний вузол кіберфізичної системи, дозволяючи оператору здійснювати віддалений нагляд за процесом у реальному часі через графічний інтерфейс смартфона або веб-панель, аналізувати розрядні графіки та миттєво отримувати сповіщення про завершення тесту чи виникнення аварійних ситуацій.

1.4 Висновки до першого розділу

У межах першого розділу на основі проведеного аналізу предметної області, виявлених недоліків існуючих комерційних рішень та обраних підходів, головною метою дипломної роботи визначається проектування та практична реалізація кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів. Визначено, що розроблюваний апаратно-програмний комплекс має вирішити проблему відсутності доступних, високоточних та інтегрованих у хмарне середовище інструментів для об'єктивної оцінки реальної ємності та загального стану хімічних джерел струму, забезпечуючи автоматизований цикл діагностики з віддаленим контролем.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних апаратних та програмних завдань. Апаратна частина пристрою передбачає розробку схеми електричної принципової на базі мікроконтролера ESP32, інтеграцію модуля контролера заряду та вузла керованого електронного навантаження для стабільного розряду. Окрім цього, обґрунтовано застосування цифрових моніторів потужності, датчиків температури, локального дисплея та живлення від універсального інтерфейсу USB Type-C 5 В.

Логічним етапом розробки є створення повноцінного фізичного прототипу пристрою. Оскільки апаратна частина складатиметься з мікроконтролера, дисплея, силових модулів та тримача для акумуляторів, усі ці компоненти

необхідно надійно та безпечно зафіксувати. Для цього передбачається 3D-моделювання ергономічного корпусу з подальшим його виготовленням методом FDM-друку. Конструкція корпусу має бути спроектована таким чином, щоб забезпечити зручний доступ до кнопок керування, надійну фіксацію акумулятора під час тестування.

Програмна частина системи реалізує алгоритми керування режимами тестування та високоточного розрахунку ємності акумулятора на етапі розряду. Програмна логіка повинна включати автоматизовані сценарії, надійні механізми захисту від глибокого розряду, перезаряду та критичного перегріву, а також обробку переривань від користувачького інтерфейсу. Важливим етапом роботи є реалізація мережевої складової, що передбачає конфігурацію бездротового каналу зв'язку Wi-Fi та розробку алгоритмів трансляції даних на хмарну платформу. Це дозволить здійснювати віддалений моніторинг динаміки напруги і температури, будувати графіки у реальному часі та зберігати історію тестувань для подальшого аналізу.

Одним з основним етапом програмної роботи є налаштування зручного інтерфейсу в мобільному додатку. Оскільки повний цикл діагностики акумулятора може тривати кілька годин, користувачеві необхідна можливість віддалено стежити за процесом. Додаток має відображати ключові показники у вигляді наочних графіків на екрані смартфона. Це дозволить пристрою самостійно надсилати повідомлення на телефон оператора, коли тестування успішно завершено, або ж миттєво сигналізувати про нештатні ситуації, наприклад, при досягненні критичної температури батареї [28, 30].

Кінцевим результатом виконання роботи має стати повнофункціональний фізичний прототип тестера-аналізатора. Завдання передбачає проведення серії експериментальних досліджень на реальних літій-іонних елементах для верифікації точності вимірювань, перевірки стабільності підсистем та оцінки надійності хмарної синхронізації з подальшим оформленням технічної документації та висновків.

2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНИХ ТА ПРОГРАМНИХ ПІДСИСТЕМ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЛІТІЙ-ІОННИХ АКУМУЛЯТОРІВ

2.1 Визначення архітектури та основних підсистем програмно-технічного засобу

Процес проєктування програмно-технічного засобу розпочинається з визначення його загальної архітектури та виділення базових підсистем, які будуть взаємодіяти між собою для виконання поставленого завдання. Розроблювана кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів являє собою комплексний апаратно-програмний пристрій. Його головна мета полягає у забезпеченні безпечного та високоточного тестування хімічних джерел струму шляхом глибокої інтеграції обчислювальних алгоритмів з фізичними процесами заряду та розряду. Успішна реалізація такого діагностичного стенду вимагає ретельного підходу до вибору топології інформаційних та силових зв'язків між усіма мікроелектронними компонентами.

Головним принципом побудови такої архітектури обрано модульність, що дозволяє чітко розділити логіку керування, процеси вимірювання фізичних величин та інтерфейс взаємодії з користувачем. Такий підхід не лише спрощує етап розробки та налагодження програмного коду кожної окремої ланки, але й значно підвищує загальну апаратну надійність пристрою. Враховуючи специфіку роботи з акумуляторами, де протікають значні струми та існує потенційний ризик перегріву елементів, архітектура повинна гарантувати фізичну та логічну ізоляцію слабострумівих обчислювальних кіл від силових ліній навантаження. Інформаційні потоки в розроблюваній системі мають сувору ієрархію: від збору фізичних показників середовища через їхнє перетворення високоточними цифровими датчиками до математичного аналізу безпосередньо в центральному ядрі.

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливістю розробленої архітектури є концепція розділеного живлення та керування енергетичними станами. Для того, щоб вимірювальні та обчислювальні процеси не зазнавали впливу від перепадів напруги під час підключення потужного навантаження, загальна лінія живлення розділяється на незалежні контури ще на етапі входу. Це дозволяє мікроконтролеру залишатися стабільним навіть у моменти пікових навантажень на тестовану батарею. Крім того, архітектура передбачає використання цифрових шин передачі даних замість аналогових ліній. Це рішення унеможливорює вплив електромагнітних завад від силових транзисторів на точність результатів кулонометрії, що є критично важливим для достовірної оцінки стану здоров'я акумулятора.

Кожна інтегрована підсистема виконує чітко визначені функції, працюючи в синхронному режимі. Зокрема, центральний блок керування відіграє роль координатора, який безперервно аналізує вхідну телеметрію та приймає рішення про перемикання станів системи. Підсистема комутації та навантаження виконує роль фізичного виконавчого механізму, керуючи підключенням зарядного контуру або розрядного резистора за командами від ядра. Вимірювально-сенсорний блок відповідає виключно за високоточну фіксацію динаміки напруги, струму та температури у реальному часі. Для взаємодії з оператором реалізовано багаторівневу структуру інтерфейсів. Вона об'єднує фізичний модуль для повністю автономної роботи та розширену мережеву підсистему. Мережева частина включає режим точки доступу для початкового налаштування Wi-Fi, локальний веб-сервер для відображення графіків у межах домашньої мережі та підключення до платформи Blynk IoT для глобального доступу через Інтернет.

Відповідно до цього, загальну структуру пристрою поділено на такі базові підсистеми: центральний блок керування, підсистема комутації та навантаження, вимірювально-сенсорний вузол, а також комплекс дубльованих інтерфейсів користувача. Особливістю підсистеми комутації є використання гібридного підходу: для керування зарядним контуром застосовано електромагнітне реле,

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що забезпечує надійне розмикання лінії живлення, а для регулювання розрядного струму – напівпровідниковий MOSFET-ключ. Зв'язок між цими підсистемами, їхня взаємодія та функціональна підпорядкованість у межах загальної концепції розроблюваного пристрою наочно зображено на рисунку 2.1.

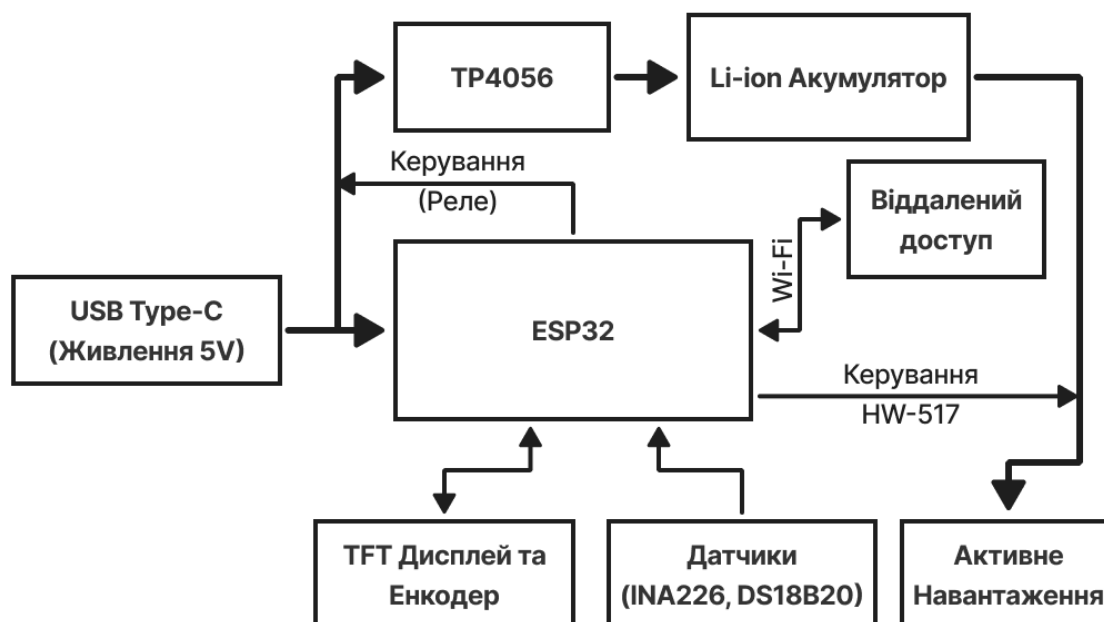


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема кіберфізичної системи моніторингу акумуляторів

2.2 Вибір та обґрунтування елементної бази кіберфізичної системи

Вибір елементної бази є одним із найвідповідальніших етапів створення кіберфізичної системи, оскільки від апаратних характеристик компонентів безпосередньо залежить точність вимірювань, стабільність роботи та надійність діагностичного комплексу загалом. Ядром розроблюваної системи виступає центральний блок керування, який базується на мікроконтролері ESP32 у модифікації WROOM-32. Вибір на користь цієї сучасної платформи, замість класичних 8-бітних рішень сімейства AVR моделей як Arduino Uno чи Nano, зумовлений значно вищими вимогами до обчислювальних ресурсів. Процес

одночасного прецизійного збору даних з кількох датчиків, математичного інтегрування значень струму, оновлення графічного інтерфейсу та підтримання активного Wi-Fi з'єднання потребує високої тактової частоти та достатнього обсягу оперативної пам'яті. Двоядерна архітектура ESP32 дозволяє ефективно розділити ці процеси: одне ядро може відповідати за безперервний мережевий стек та відправку телеметрії у хмарну платформу, тоді як інше повністю виділяється під критично важливі вимірювальні цикли без ризику програмних затримок [12]. Зовнішній вигляд обраного мікроконтролера наведено на рисунку 2.2.

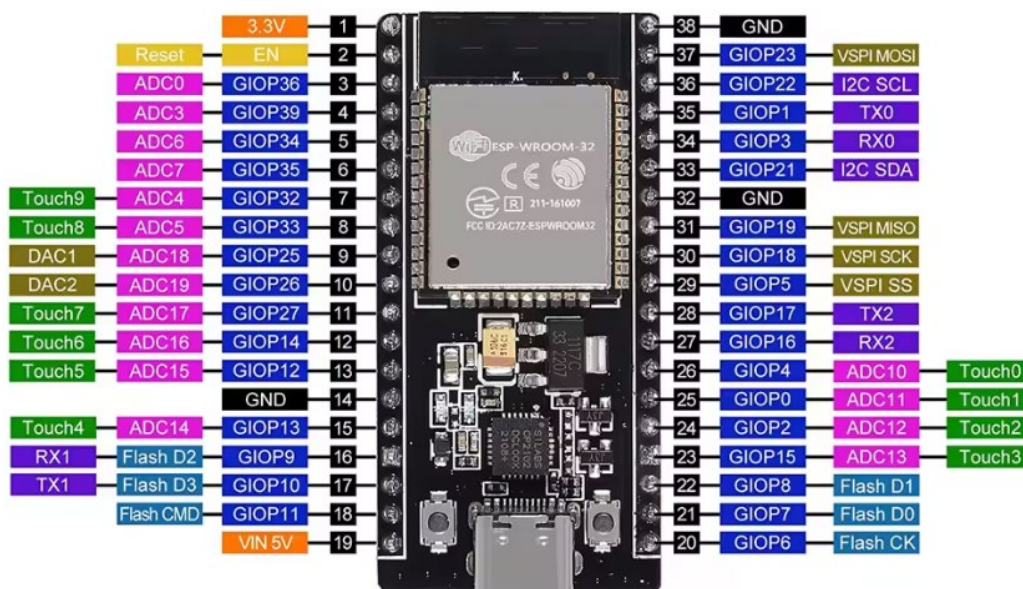


Рисунок 2.2 – Мікроконтролер ESP32-WROOM-32 [36]

Силова частина пристрою має специфічну інтегровану архітектуру з паралельним розподілом живлення. Енергозабезпечення усієї системи здійснюється від єдиного вхідного порту USB Type-C. З метою гарантування стабільної роботи обчислювального ядра та уникнення просадок напруги під час навантажувального тестування, вхідна лінія 5 В фізично розгалужується: одна гілка йде безпосередньо на контакти живлення мікроконтролера ESP32, а інша –

незалежно подається на вхід модуля контролера заряду TP4056. Досліджуваний літій-іонний акумулятор підключається вже безпосередньо до вихідних контактів цього модуля. Така конфігурація дозволяє максимально ефективно використовувати апаратні можливості плати TP4056, оскільки лінія стабільного електронного навантаження такого як, цементний резистор номіналом 4 Ом, також замикається через її захисні контакти. Це забезпечує додатково залучити вбудовані апаратні механізми захисту акумулятора від критичного перерозряду [11, 30]. Зовнішній вигляд модуля контролера заряду наведено на рисунку 2.3.

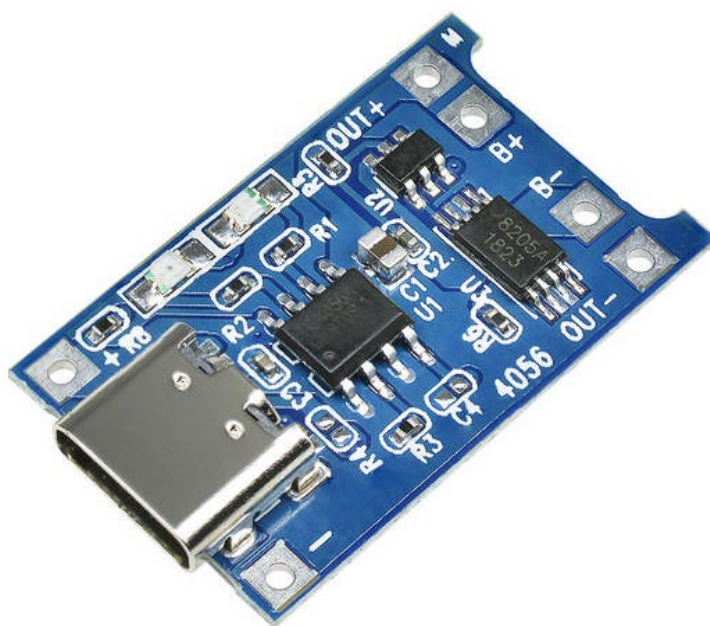


Рисунок 2.3 – Модуль контролера заряду літій-іонних акумуляторів TP4056 [37]

Для керування ланцюгом зарядки в проєкті було вирішено використати одноканальний модуль реле 5 В високого рівня. Його основна функція полягає у фізичному підключенні або відключенні напруги від вхідного порту до модуля TP4056. Вибір електромагнітного реле для цього вузла замість транзистора пояснюється тим, що механічні контакти реле мають практично нульовий опір у замкненому стані. Це дозволяє уникнути падіння напруги на самому перемикачі, що є дуже важливим для правильної роботи контролера заряду та точного дотримання профілю зарядки акумулятора [8]. Даний модуль споживає для

спрацювання невеликий струм у межах 5-20 мА, тому мікроконтролер ESP32 може керувати ним безпосередньо через свої цифрові піни без додаткових схем підсилення. Крім того, конструкція реле забезпечує повну ізоляцію силової частини від цифрової, що робить пристрій надійнішим у разі виникнення помилок у колі живлення. Зовнішній вигляд релейного модуля, обраного для комутації заряду, наведено на рисунку 2.4.

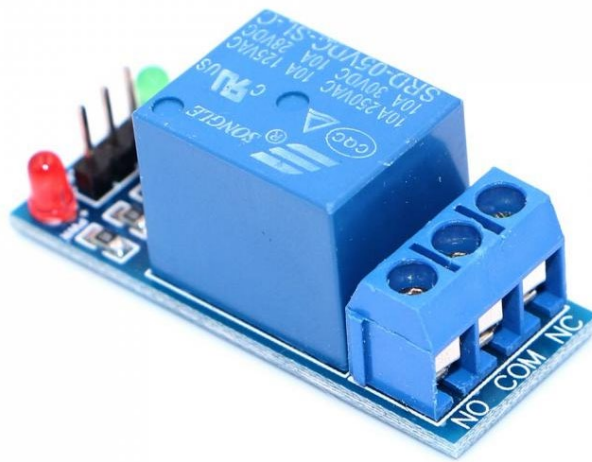


Рисунок 2.4 – Модуль електромагнітного реле 5 В [38]

На відміну від зарядного контуру, для підсистеми розряду було обрано напівпровідниковий ключ – MOSFET-модуль HW-517. У даному проєкті він працює в режимі ключа, виконуючи функцію швидкого підключення та відключення розрядного резистора за командою мікроконтролера. Вибір польового транзистора AOD4184 замість другого механічного реле на цій ділянці пояснюється його здатністю миттєво розривати коло. Це є необхідною умовою для точного завершення тесту: як тільки напруга на акумуляторі досягає встановленого порогу відсічки, мосфет миттєво відключає навантаження, що дозволяє уникнути глибокого розряду та зафіксувати максимально точний результат ємності [20, 28]. Оскільки транзистор не має рухомих деталей, він не схильний до підгоряння контактів чи механічного зносу, що робить його ідеальним для багаторазових циклів діагностики. Крім того, дуже низький

внутрішній опір модуля мінімізує втрати енергії на самому ключі. Завдяки цьому майже вся енергія акумулятора розсіюється саме на цементному резисторі, що значно підвищує достовірність розрахунків кулонометрії та запобігає зайвому нагріванню плати керування. Зовнішній вигляд транзисторного модуля наведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Транзисторний модуль керування навантаженням HW-517 [39]

Основним компонентом вимірювального вузла став прецизійний цифровий монітор струму та напруги INA226. Вбудовані аналого-цифрові перетворювачі мікроконтролера ESP32 мають значну нелінійність та високий рівень шумів, що робить їх непридатними для точного підрахунку ємності методом кулонометрії [2, 3]. Натомість зовнішня мікросхема INA226 має 16-бітний АЦП, передає дані по захищеній цифровій шині I2C та здійснює апаратне усереднення показників. Проте заводська конфігурація цього модуля передбачає використання струмовимірювального шунта номіналом 0,1 Ом. При струмі розряду в 4 ампера на такому резисторі розсіювалася б потужність 1,6 Вт, що призвело б до його перегріву та температурного дрейфу опору. Для вирішення цієї проблеми була проведена апаратна модифікація: заводський шунт замінено на інший резистор номіналом 0,02 Ом. Це знизило тепловиділення до безпечних 0,32 Вт, розширило динамічний діапазон вимірювань і дозволило системі стабільно працювати з високими струмами без втрати точності. Додатковою

перевагою цієї мікросхеми є наявність вбудованих програмованих фільтрів та апаратного усереднення. Ця функція ефективно пригнічує високочастотні імпульсні завади, що неминуче виникають у силових колах під час комутації транзисторів. Такий підхід гарантує отримання максимально чистих та достовірних даних для подальшої математичної обробки центральним процесором без додаткового навантаження на програмний код. Зовнішній вигляд вимірювального модуля наведено на рисунку 2.6.

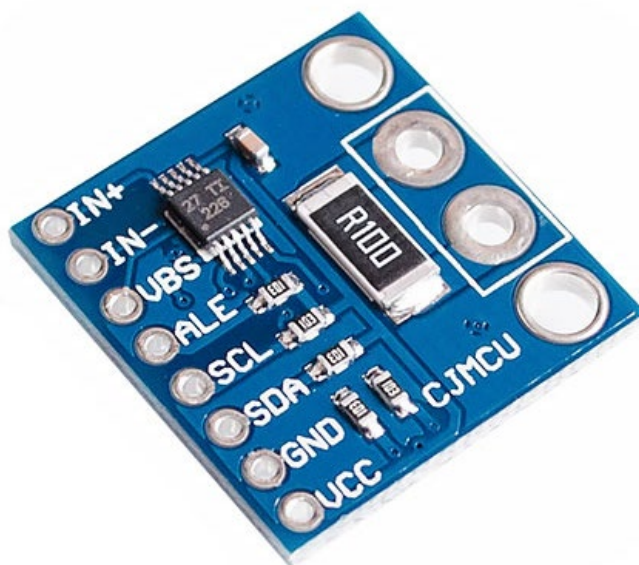


Рисунок 2.6 – Цифровий монітор потужності INA226 [40]

Для контролю теплового стану літій-іонного акумулятора під час тестування було обрано цифровий датчик температури DS18B20. Альтернативним варіантом могло бути використання звичайних аналогових NTC-термісторів, однак вони потребують встановлення додаткових діляників напруги та реалізації складних математичних рівнянь у програмному коді для перетворення опору в градуси. Натомість DS18B20 є повністю відкаліброваним на заводі приладом, який передає вже готові значення температури по однопровідній шині 1-Wire. Це гарантує високу стійкість до електромагнітних завад від силової частини пристрою та дозволяє мікроконтролеру миттєво реагувати на критичне підвищення температури корпусу батареї, зупиняючи

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

процес діагностики для уникнення теплового розгону [25, 26]. Важливою характеристикою DS18B20 є можливість програмного налаштування роздільної здатності перетворення в діапазоні від 9 до 12 біт, що дозволяє оптимізувати час опитування шини мікроконтролером. Для мінімізації часу відгуку на перегрів датчик розміщується впритул до корпусу літій-іонного елемента, забезпечуючи прямий тепловий контакт із зоною найвищого виділення енергії. Зовнішній вигляд датчика температури наведено на рисунку 2.7.

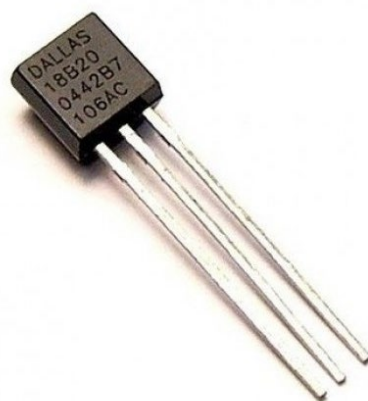


Рисунок 2.7 – Цифровий датчик температури DS18B20 [41]

Останнім етапом формування апаратної бази став вибір компонентів для модуля локального інтерфейсу, що забезпечує взаємодію з оператором. Для візуалізації телеметричних даних було обрано кольоровий TFT дисплей з діагоналлю 1.8 дюйма на базі технології IPS. На відміну від дешевших TN-матриць або монохромних екранів, IPS-панель забезпечує високу контрастність та широкі кути огляду, що робить процес зчитування графіків комфортним за будь-якого освітлення. В якості основного елемента керування було обрано інкрементний поворотний енкодер KY-040 із вбудованою кнопкою. Практика показує, що для налаштування числових параметрів енкодер є значно зручнішим та швидшим інструментом, ніж масив звичайних тактових кнопок. Користувач може інтуїтивно прокручувати меню та підтверджувати вибір натисканням на

вісь енкодера. Зовнішній вигляд компонентів локального інтерфейсу наведено на рисунках 2.8 та 2.9.

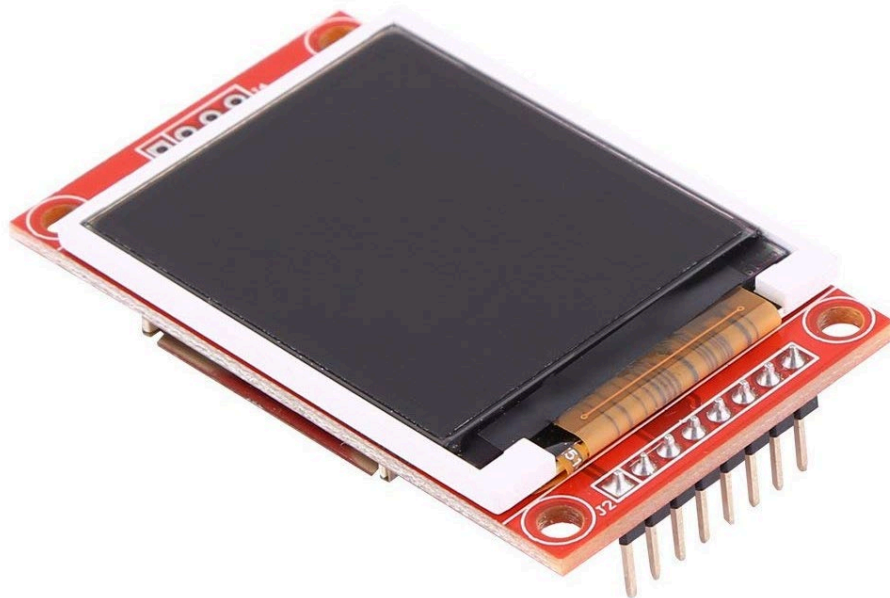


Рисунок 2.8 – Кольоровий TFT IPS дисплей 1.8 дюйма [42]

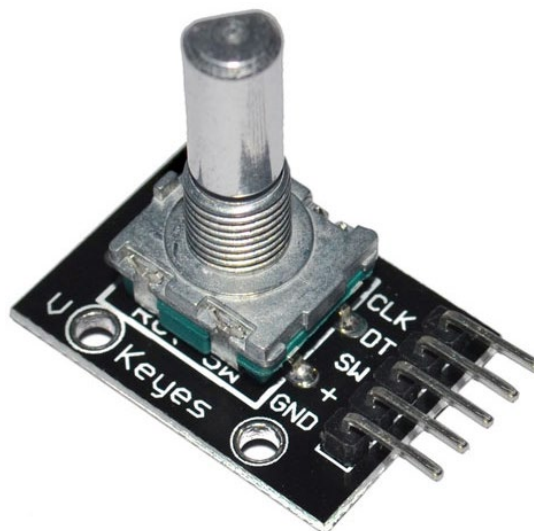


Рисунок 2.9 – Поворотний енкодер керування KY-040 [43]

Поєднання обраних та модифікованих компонентів дозволяє реалізувати апаратну платформу, яка відповідає вимогам до професійних систем моніторингу акумуляторів. Використання прецизійних цифрових датчиків у

поєднанні з потужними напівпровідниковими комутаторами та високопродуктивним мікроконтролером забезпечує не лише необхідну точність вимірювань, але й високий рівень пожежної та електричної безпеки розробленого пристрою.

2.3 Проєктування алгоритмічного та програмного забезпечення мікроконтролера

Програмне забезпечення мікроконтролера є одним з головних компонентом кіберфізичної системи, оскільки саме воно перетворює набір апаратних модулів на інтелектуальний діагностичний пристрій. Розробка мікропрограми для ESP32 базується на принципах модульності та поділу функціональних обов'язків між ядрами процесора. Головним завданням коду є забезпечення безперервного циклу зчитування фізичних параметрів, їх математична обробка та миттєва реакція на зміну станів системи. Програмна архітектура побудована таким чином, щоб забезпечити високу точність розрахунків ємності в реальному часі, одночасно підтримуючи роботу графічного інтерфейсу та стабільне мережеве з'єднання з хмарною платформою. В основі програмної реалізації лежить використання операційних систем реального часу, що є базовим середовищем для мікроконтролерів сімейства ESP32. Застосування такого підходу дозволяє жорстко контролювати таймінги для критичних процесів, зокрема для високочастотного опитування вимірювальних мікросхем, повністю виключаючи ймовірність пропуску тактів інтегрування струму. Крім того, архітектура передбачає багаторівневу систему апаратних та програмних переривань. Це гарантує, що будь-які пріоритетні події, такі як введення команд оператором або раптове перевищення допустимої температури акумулятора, будуть оброблені ядром миттєво, перериваючи менш важливі фонові мережеві задачі. Загальну логіку функціонування розробленого програмного забезпечення та послідовність виконання основних операцій

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відображено на узагальненій блок-схемі алгоритму роботи системи на рисунку 2.10.

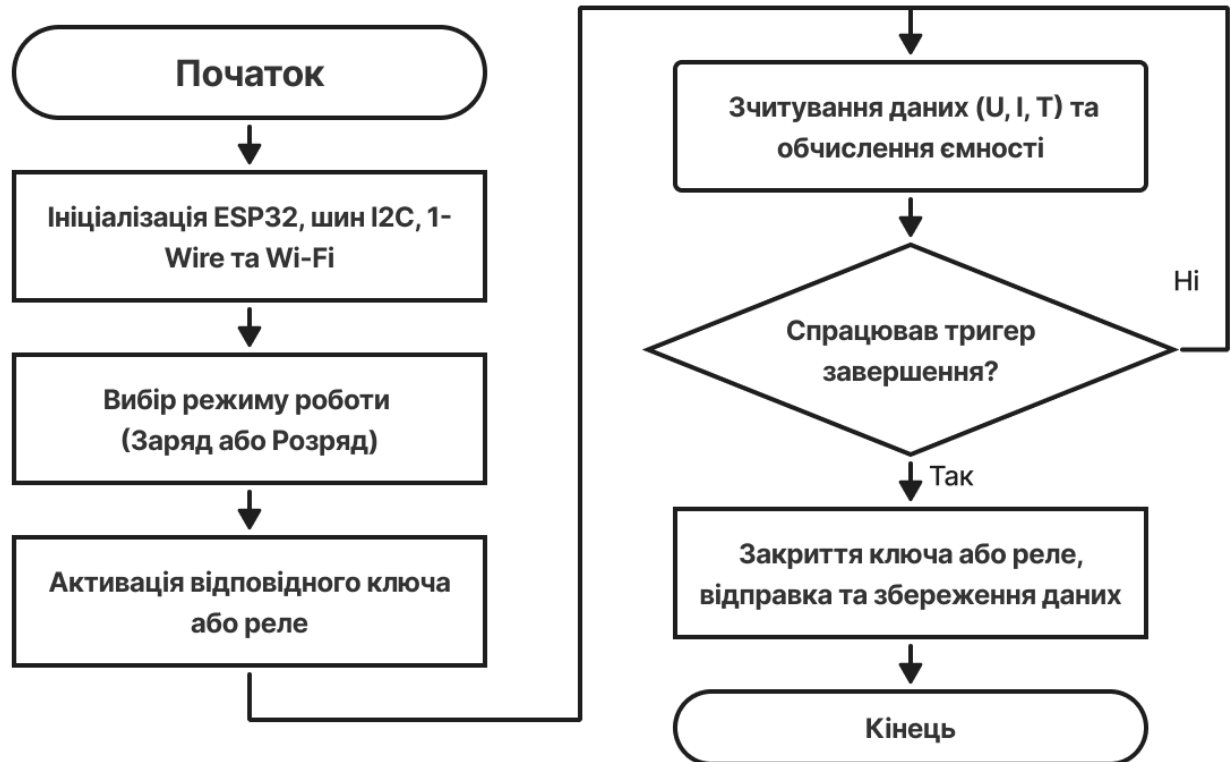


Рисунок 2.10 – Узагальнена блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення

Початковий етап роботи програми полягає у ініціалізації всіх модулів та перевірці їхньої працездатності. Після подачі живлення мікроконтролер конфігурує порти вводу-виводу, встановлює зв'язок із монітором потужності INA226 через шину I2C та проводить калібрування датчика температури DS18B20. Окремим критично важливим етапом є запуск мережевого модуля Wi-Fi та спроба встановлення з'єднання з визначеною точкою доступу для синхронізації з IoT-сервером. Якщо з'єднання встановлено успішно, система переходить у режим готовності, виводячи на локальний дисплей актуальну інформацію про стан підключеної батареї. Логіка вибору режимів роботи реалізована через обробку переривань від поворотного енкодера, що дозволяє користувачеві навігувати по меню без затримок у виконанні основних

вимірювальних завдань. Структуру взаємодії програмних модулів під час ініціалізації та переходу між станами очікування наведено на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Діаграма станів програмного забезпечення мікроконтролера

Центральним алгоритмом є реалізація методу кулонометрії для точного визначення ємності акумулятора. Програма здійснює циклічне опитування регістрів INA226 з фіксованим кроком у часі, що дозволяє застосувати метод чисельного інтегрування [23, 24]. Оскільки струм розряду може незначно коливатися залежно від нагріву навантажувального резистора, мікроконтролер виконує підрахунок накопиченої енергії на кожній ітерації циклу, підсумовуючи отримані значення у змінній з плаваючою комою. Паралельно з цим програмний фільтр здійснює усереднення показників напруги для відсікання випадкових сплесків та завад. Алгоритм безперервно порівнює поточну напругу з програмно заданим порогом безпеки, і при досягненні ліміту розряду програма негайно подає сигнал на закриття транзисторного ключа, або реле, фіксуючи кінцевий результат тестування. Послідовність кроків алгоритму підрахунку ємності та контролю параметрів розряду зображено на рисунку 2.12.

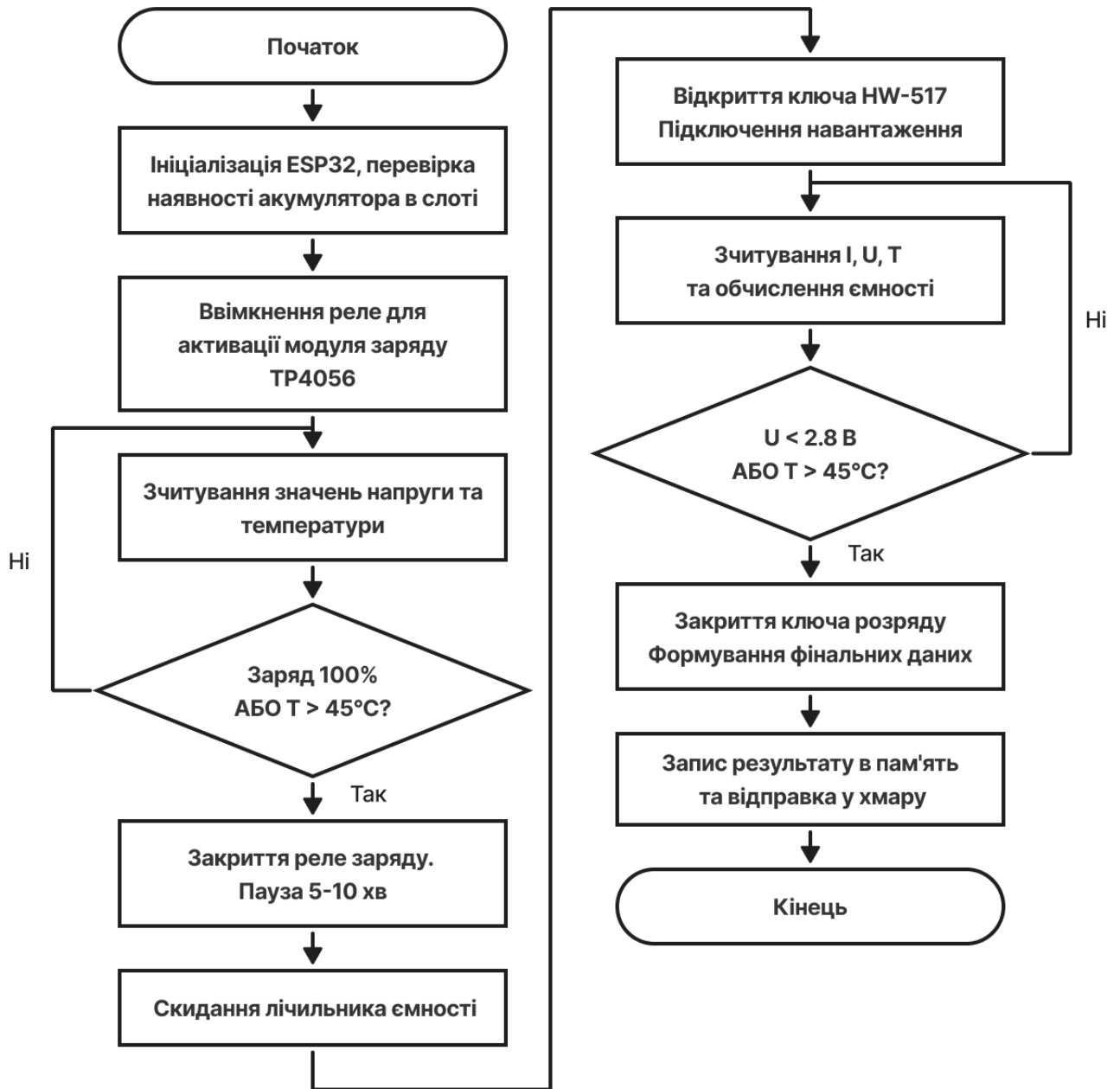


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритму процесу діагностики та підрахунку ємності

Забезпечення апаратної безпеки в програмному коді реалізовано через систему перевірок у головному циклі програми. Кожна ітерація вимірювання супроводжується запитом до цифрового датчика температури. У випадку, якщо програмний код фіксує перевищення заданого температурного порогу, виконання будь-якого активного сценарію тестування переривається в екстремому порядку. Система автоматично переходить у стан "Аварія",

розмикаючи всі силові ланцюги та виводячи відповідне попередження на дисплей і в мобільний додаток. Крім того, програмне забезпечення включає механізм антидребезгу для кнопок енкодера та алгоритм програмної корекції вимірювань, що дозволяє досягти лабораторної точності результатів на доступній елементній базі.

Фінальна частина програмного забезпечення відповідає за мережеву комунікацію та візуалізацію результатів вимірювань. Дані, які накопичуються під час діагностики акумулятора, транслюються на хмарний сервер Інтернету речей для побудови детальних графіків розрядної кривої та збереження історії тестування на віддалених пристроях оператора. Для мінімізації впливу мережевого обміну, функції зв'язку програмно оптимізовані та відокремлені від основного циклу інтегрування струму.

На локальний IPS дисплей інформація виводиться за допомогою спеціалізованих графічних бібліотек, які використовуються для формування зручного текстового інтерфейсу, елементів багаторівневого меню та динамічного відображення поточних числових параметрів, статусів системи та критичних попереджень. Така організація програмного забезпечення утворює надійну структуру, що гарантує автономність, високу точність та апаратну безпеку роботи всієї кіберфізичної системи.

2.4 Розробка локального інтерфейсу користувача та підсистеми віддаленого моніторингу

Проектування інтерфейсу користувача для кіберфізичної системи моніторингу акумуляторів вимагало розв'язання задачі ефективного представлення великого масиву динамічних даних на обмеженій площі дисплея. Локальний інтерфейс побудовано на базі кольорового TFT IPS дисплея, що було обрано замість традиційних символічних чи OLED-екранів через необхідність тривалого відображення статичних елементів меню без ризику вигорання

пікселів та потребу в широких кутах огляду. Програмна реалізація графічної оболонки використовує принцип контекстних вікон, де основний акцент зроблено на великих цифрових індикаторах напруги та струму, оскільки саме ці параметри є критичними для оператора під час запуску тесту. Вибір кольорової палітри також має функціональне значення: зелений колір позначає стан готовності або режим заряду, тоді як жовтий чи червоний сигналізують про активний процес розряду або перехід системи у передварійний стан. Це дозволяє оператору зчитувати статус пристрою навіть на відстані, не заглиблюючись у цифрові значення. Загальне компонування інформаційних полів на локальному екрані та логіку їх візуального розділення наведено на рисунку 2.13.

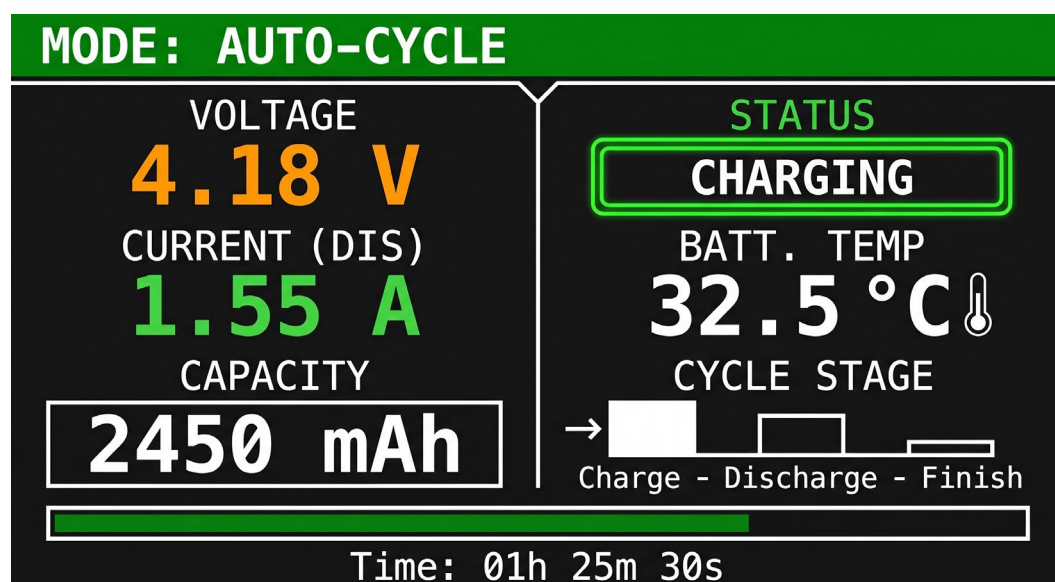


Рисунок 2.13 – Концепція візуалізації даних на локальному дисплеї

Обґрунтування вибору енкодера як основного органу керування базується на необхідності реалізації зручного введення числових значень. На відміну від клавіатури або набору кнопок, поворотний енкодер дозволяє швидко змінювати параметри, такі як напруга відсічки або інші налаштування, з високою точністю кроку. Це особливо важливо під час роботи з різними типами літій-іонних елементів, де різниця у 0.1 В може бути критичною для безпеки. Програмна обробка сигналів енкодера реалізована через систему переривань, що забезпечує

миттєвий відгук інтерфейсу навіть під час виконання ресурсомістких обчислень ємності в основному циклі програми. Такий підхід мінімізує програмні затримки та робить навігацію по ієрархічному меню інтуїтивно зрозумілою. Крім того, відсутність механічних контактів, схильних до окислення, підвищує загальний термін експлуатації приладу в порівнянні зі звичайними тактовими кнопками.

Мережева підсистема моніторингу та керування побудована за двома напрямками: локальним та глобальним, що значно розширює можливості використання стенда. Локальний рівень працює на базі вбудованого веб-сервера мікроконтролера. Якщо пристрій не підключено до домашньої мережі, він автоматично запускає режим точки доступу. Це дає можливість підключитися до пристрою безпосередньо зі смартфона для перегляду даних або введення налаштувань. У штатному режимі підключення до роутера веб-інтерфейс реалізовано у вигляді односторінкового додатка, що завантажується з пам'яті ESP32. Головною перевагою такої інтеграції є автоматичне збереження результатів тестування та побудова детального графіка розрядної характеристики в реальному часі на екрані смартфона чи комп'ютера. На відміну від фізичного дисплея, який показує лише поточні цифрові значення, графік у браузері дозволяє наочно відстежувати динаміку падіння напруги під навантаженням. Для цього в пам'яті пристрою виділено масив на 2000 точок, що дозволяє зберігати до 16,5 годин історії безперервного тесту. Рендеринг графіків виконується на стороні клієнта з функцією перехрестя для перегляду точних значень у конкретній точці часу, а обмін даними йде через асинхронні AJAX/JSON запити. Глобальний рівень використовує платформу Blynk IoT для віддаленого зв'язку через Інтернет. У системі працює двостороння синхронізація: зміна параметрів відсічки в додатку Blynk миттєво оновлює налаштування в пам'яті пристрою та відображається на фізичному екрані. Після завершення автоматичних тестів система надсилає підсумковий звіт та сповіщення у мобільний додаток, що звільняє оператора від необхідності постійно перебувати поруч із вимірювальним стендом.

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Розробка схеми електричної принципової проекту

Розробка схеми електричної принципової є завершальним етапом проектування апаратної частини, на якому визначаються конкретні фізичні зв'язки між усіма раніше обраними модулями. На відміну від концептуальної архітектури, принципова схема враховує електричні режими роботи компонентів, спільні шини живлення та стратегію об'єднання потенціалів заземлення. Під час розробки схемотехнічних рішень особливу увагу було приділено розмежуванню слабкострумових цифрових ліній зв'язку та силових контурів, якими протікають робочі струми заряду та розряду. Такий підхід є необхідним для запобігання впливу електромагнітних завад на вимірювальні інтерфейси I2C та 1-Wire, що гарантує високу метрологічну точність роботи діагностичного стенда. Основним джерелом енергії для всього діагностичного комплексу обрано універсальний інтерфейс USB Type-C, який забезпечує стабільну вхідну напругу 5 В. Унікальною особливістю розробленої схеми є паралельне розгалуження живлення безпосередньо від вхідного роз'єму USB Type-C: одна лінія спрямовується на контакт Vin мікроконтролера ESP32, а інша – на вхідні контакти електромагнітного реле. При отриманні команди від ядра, реле замикає силовий ланцюг і подає 5 В на вхід модуля заряду TP4056. Така топологія живлення дозволяє повністю ізолювати зарядний вузол, коли система перебуває в режимі очікування або розряду, що запобігає виникненню перехресних завад та підвищує загальну енергоефективність пристрою. Слід також зазначити, що для надійного узгодження логічних рівнів уся цифрова периферія, включаючи мікросхему монітора потужності INA226, датчик температури DS18B20 та керівні контакти TFT-дисплея, живиться від єдиної стабілізованої лінії 3.3 В, яку генерує внутрішній лінійний стабілізатор безпосередньо на платі ESP32 [12, 13]. Таке рішення дозволяє фізично розділити енергетичні потоки обчислювального ядра та силового зарядного вузла, мінімізуючи вплив перехідних процесів у акумуляторі на стабільність роботи

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесора. Повну схему електричну принципову кіберфізичної системи моніторингу наведено на рисунку 2.14.

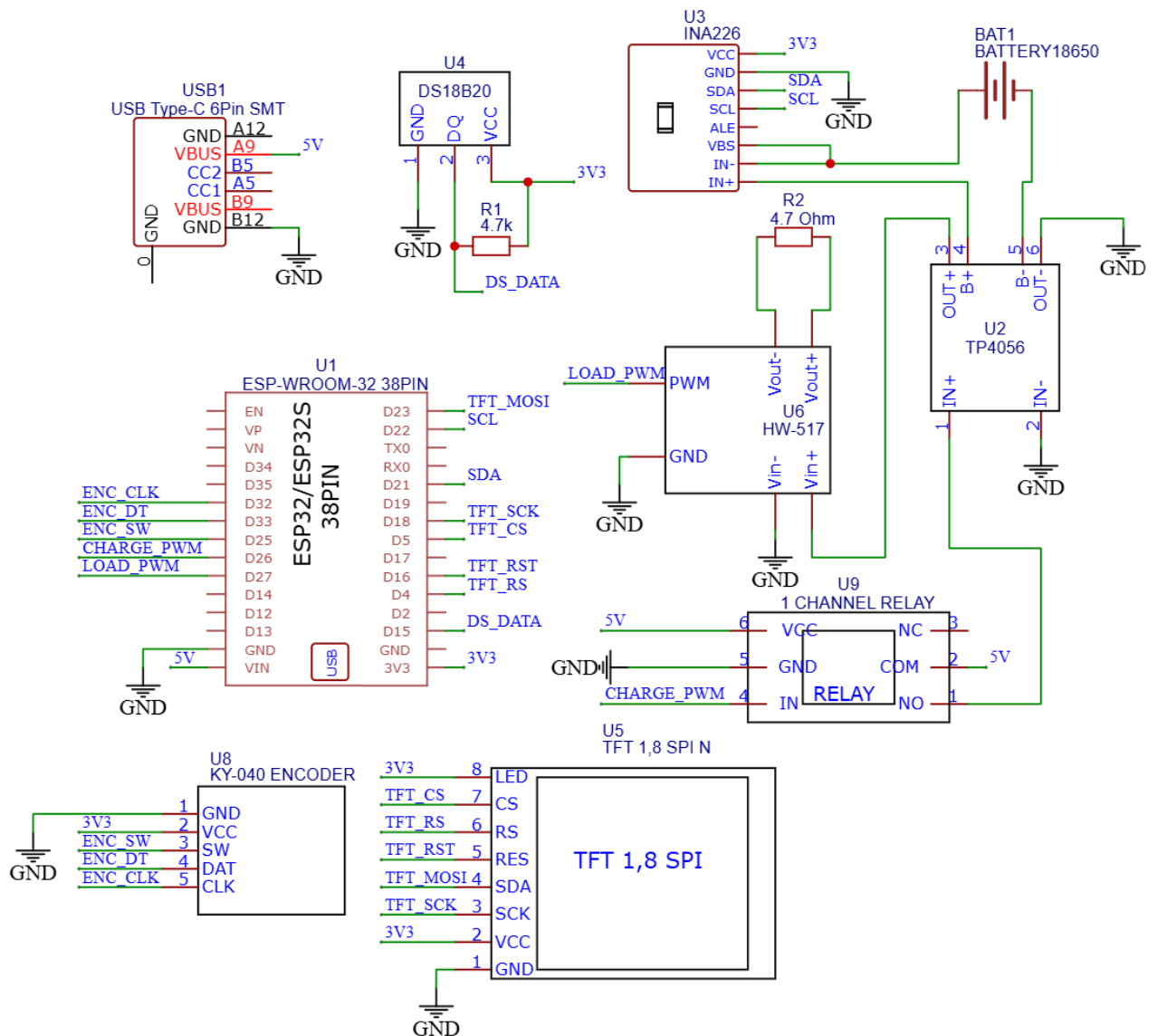


Рисунок 2.14 – Схема електрична принципова кіберфізичної системи моніторингу

Особливу увагу в розробленій схемі приділено організації «загальної землі» та інтеграції багаторівневої системи захисту акумулятора. У даній архітектурі вбудована в модуль TP4056 мікросхема захисту DW01A розглядається як додатковий апаратний рубіж безпеки, що виконує функцію дублюючого захисту на випадок критичних збоїв у роботі програмних

алгоритмів мікроконтролера. Для того, щоб цей вузол міг коректно виконувати свої функції у позаштатних ситуаціях, мінусовий контакт самого акумулятора підключається виключно до точки В- на платі контролера. Уся інша електронна периферія, включаючи мікроконтролер ESP32, датчики та дисплей, об'єднується спільною лінією заземлення, яка підключена до контакту OUT- модуля TP4056. Така топологія дозволяє апаратному захисту виступати в ролі запобіжника останньої інстанції, розриваючи від'ємний ланцюг усієї системи при критичному перерозряді комірки, одночасно зберігаючи єдиний опорний потенціал для всіх вимірювальних вузлів. Це гарантує, що цифрові датчики не втратять зв'язок із ядром у штатному режимі, але будуть надійно знеструмлені у разі аварійної просадки напруги на літій-іонному елементі.

Інформаційна взаємодія між центральним процесором та вимірювальними модулями побудована на використанні послідовних шин передачі даних з різними фізичними протоколами. Монітор потужності INA226 інтегрований у систему за схемою High-Side, що передбачає встановлення вимірювального шунта в розрив позитивної лінії живлення між контролером заряду та акумулятором. Це дозволяє точно фіксувати струм без внесення додаткового опору в лінію заземлення. Зв'язок із INA226 здійснюється по шині I2C через пini SDA та SCL. Для контролю температури використовується цифровий датчик DS18B20, підключений по протоколу 1-Wire. Важливою деталлю схеми є встановлення підтягуючого резистора номіналом 4.7 кОм між лінією даних датчика та шиною 3.3 В, що необхідно для формування чітких логічних рівнів при передачі сигналу. Візуалізація даних забезпечується TFT дисплеєм, який підключений по швидкісній шині SPI, яка відповідає за передачу даних та синхронізацію, а лінія підсвітки живиться безпосередньо від шини 3.3 В для зниження енергоспоживання.

Підсистема керування навантаженням побудована на потужному MOSFET-модулі HW-517. Керуючий сигнал від мікроконтролера подається безпосередньо на його вхід, активуючи розрядний контур. Схема підтримує

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програмний алгоритм захисного блокування: при перегріві понад 40 °C або падінні напруги нижче 2.8 В, ESP32 скидає сигнал до логічного нуля, миттєво розмикаючи силовий ланцюг. Система ігнорує хибне відновлення напруги після зняття навантаження, унеможливаючи самовільне повторне ввімкнення. Така конфігурація гарантує точність кулонометрії та надійний багаторівневий захист акумулятора.

2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи було проведено комплексний науково-технічний аналіз та проєктування основних підсистем кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів. На початкових етапах розроблено багаторівневу архітектуру пристрою, яка базується на принципах модульності та апаратної незалежності обчислювальних і силових контурів. В основу системи покладено потужний двоядерний мікроконтролер ESP32, обчислювальні можливості якого дозволяють одночасно виконувати прецизійні вимірювання, підтримувати роботу графічного інтерфейсу та забезпечувати безперебійне з'єднання з хмарною платформою за допомогою вбудованого Wi-Fi модуля. Обрана архітектура дозволяє реалізувати концепцію, де фізичні параметри комірки в реальному часі синхронізуються з інформаційною моделлю у хмарі. Такий підхід забезпечує цілісність інформаційних потоків у межах єдиної програмно-технічної платформи.

Обґрунтування елементної бази пристрою ґрунтувалося на досягненні високої точності та надійності комутації силових ліній. Для вирішення проблеми нелінійності АЦП мікроконтролера інтегровано цифровий монітор потужності INA226 із шунтом 0,02 Ом. Важливою інженерною особливістю стало впровадження гібридної системи комутації: для зарядного контуру обрано електромагнітне реле, що гарантує повний фізичний розрив ланцюга, а для розрядного вузла – MOSFET-модуль, який забезпечує миттєву відсічку

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

навантаження. Тепловий контроль та апаратна безпека забезпечуються цифровим датчиком температури DS18B20.

Програмне забезпечення мікроконтролера спроектоване з використанням систем реального часу, що забезпечує гарантований час відгуку при виконанні критичних завдань. Головний алгоритм системи реалізує метод кулонометрії, який базується на чисельному інтегруванні значень струму в часі для точного розрахунку фактичної ємності акумулятора. Важливою особливістю програмної реалізації є розробка логіки кінцевого автомата, що дозволяє системі автономно проходити повні цикли заряду, стабілізації та розряду без втручання оператора. Впроваджена система програмних тригерів та аварійних переривань гарантує миттєве припинення силових процесів при виявленні перегріву або небезпечного зниження напруги, що мінімізує ризики займання літєвих елементів та робить логічну послідовність роботи програмних модулів максимально безпечною.

Розробка інтерфейсів забезпечила створення ергономічного середовища для оператора. Локальний інтерфейс на базі TFT IPS дисплея та інкрементного енкодера слугує для зручного налаштування параметрів тестування безпосередньо на робочому місці. Водночас підсистема віддаленого моніторингу перетворює пристрій на вузол Інтернету речей з передачею телеметрії у хмарне середовище, що дозволяє накопичувати масиви даних для аналізу деградації елементів живлення та отримувати оперативні Push-сповіщення на smartphone користувача.

Завершальним етапом розділу стала розробка схеми електричної принципової. Особливу увагу приділено топології живлення та організації «загальної землі», що дозволило інтегрувати апаратний захист модуля TP4056 як дублюючий рубіж безпеки. Схема паралельного живлення від єдиного входу Type-C 5 В забезпечила стабільність роботи ESP32 незалежно від процесів у силовій частині. Таким чином, створено цілісну інженерну модель кіберфізичної системи, яка містить усі необхідні з'єднання і є повністю готовою до практичного монтажу та верифікації на наступних етапах роботи.

3. ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Проектування та виготовлення корпусу пристрою методом 3D-друку

Перехід від етапу схемотехнічного проектування до створення фізичного прототипу кіберфізичної системи розпочався з розробки спеціалізованого корпусу. Головне завдання корпусу полягає не лише в механічному захисті електронних компонентів, але й у забезпеченні належної ергономіки керування та ефективного відведення тепла від силових елементів навантаження. Для реалізації цього етапу було використано середовище автоматизованого проектування Autodesk Fusion 360. Вибір цієї САПР зумовлений її потужними інструментами тривимірного моделювання, що дозволяє легко коригувати розміри посадкових місць після проведення тестових замірів реальних радіодеталей. Габарити внутрішнього простору розраховувалися з урахуванням площі, необхідної для розміщення плати мікроконтролера ESP32, електромагнітного реле, MOSFET-модуля та розв'язки комутаційних проводів намагаючись при цьому зберегти оптимальну компактність загальної конструкції приладу. В основу конструкції було покладено модульний підхід: корпус спроектовано як збірну систему з трьох основних деталей: несучої нижньої основи з боковими стінками, фронтальної похилої панелі під ергономічним кутом для зручної взаємодії з дисплеєм, та верхньої кришки. Це значно спрощує процес монтажу, забезпечує зручний доступ до контактних площадок для пайки та дозволяє друкувати кожен деталь у найбільш вигідній орієнтації без використання надмірної кількості підтримок. Для надійної фіксації складових корпусу між собою передбачені інтегровані напрямні та посадкові місця під кріпильні гвинти. Загальний вигляд розробленої тривимірної моделі наведено на рисунку 3.1.

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

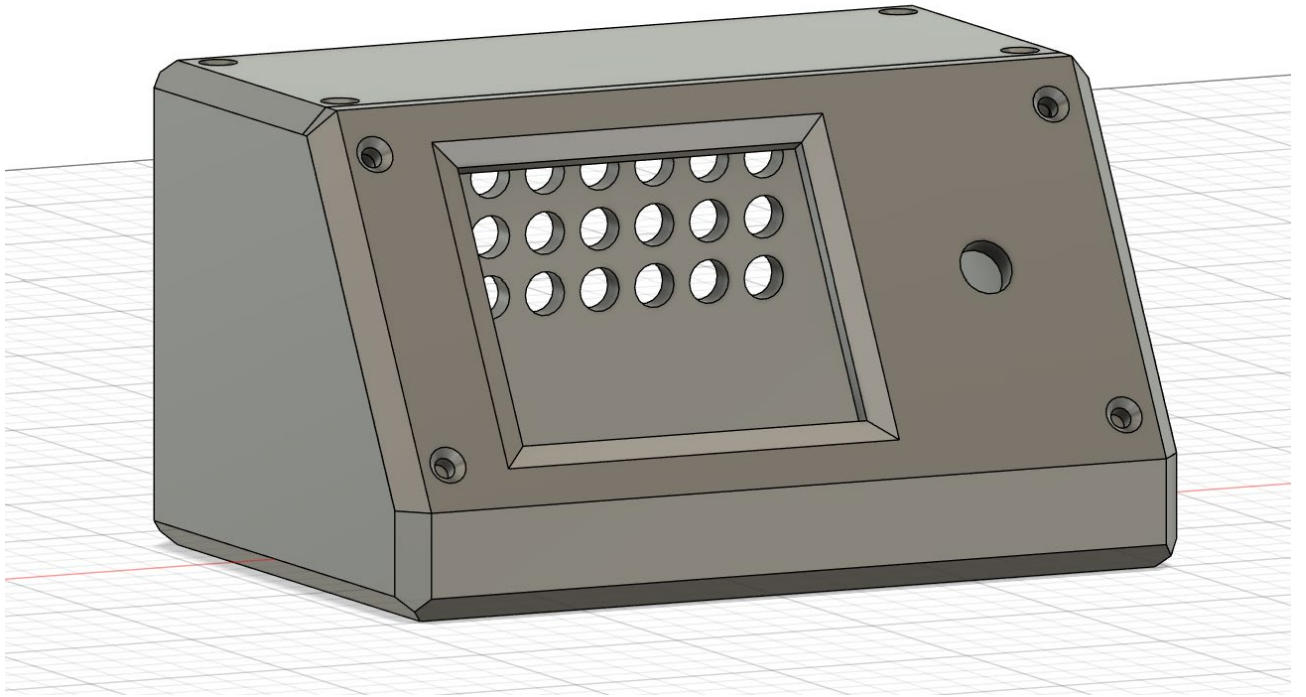


Рисунок 3.1 – Тривимірна параметрична модель корпусу пристрою у середовищі Fusion 360

Особливу увагу під час моделювання було приділено ергономічним показникам пристрою як настільного лабораторного стенда. Для забезпечення максимального комфорту під час зчитування телеметрії та взаємодії з меню, фронтальну панель було спроектовано під кутом 30 градусів відносно горизонтальної площини. Такий нахил є оптимальним для кольорового TFT IPS дисплея, оскільки він перпендикулярний до лінії зору оператора, що сидить за робочим столом, і мінімізує відблиски. На цій же похилій площині передбачено посадкове місце для інкрементного енкодера, що робить процес обертання ручки природним для кисті руки. Інтерфейс живлення, реалізований через роз'єм USB Type-C, було винесено на бокову грань корпусу. Це рішення дозволяє уникнути перегинів кабелю та не захаращує фронтальну робочу зону пристрою. Усі отвори під периферію моделювалися з допуском 0.2 мм для забезпечення щільної фіксації компонентів без використання термоклею. Загальний вигляд передньої панелі та внутрішніх кріплень дисплея наведено на рисунку 3.2.

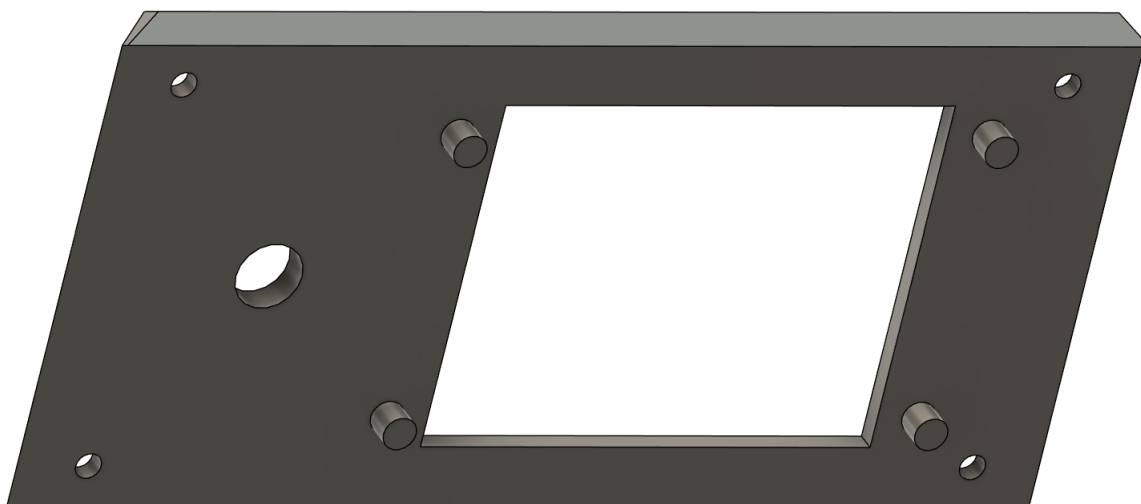


Рисунок 3.2 – Візуалізація передньої панелі, внутрішніх кріплень та посадкового місця дисплея

Однією з головних конструктивних вимог при розробці пристрою стала необхідність забезпечення належної терморегуляції внутрішнього простору. Оскільки під час тестування літій-іонних акумуляторів на ємність уся надлишкова енергія розсіюється на силовому цементному резисторі у вигляді тепла, елементи схеми всередині корпусу можуть зазнавати теплового навантаження. Для запобігання перегріву чутливих цифрових компонентів, зокрема мікроконтролера ESP32 та вимірювального модуля INA226, у середовищі Fusion 360 було передбачено систему пасивного відведення тепла у вигляді серії вентиляційних отворів, розміщених виключно на задній панелі корпусу. Таке розташування дозволяє ефективно відводити нагріте повітря від резистора безпосередньо за межі пристрою, що захищає внутрішню електроніку від накопичення теплової енергії та не заважає оператору під час роботи з фронтальною панеллю. Крім того, на внутрішній поверхні нижньої частини пристрою були змодельовані спеціальні монтажні стійки, які підіймають друковані плати модулів над основою, що покращує повітряний обмін під ними та унеможливорює випадкове коротке замикання контактів. Візуальне

представлення виготовлених деталей корпусу перед початком фінальної збірки наведено на рисунку 3.3.

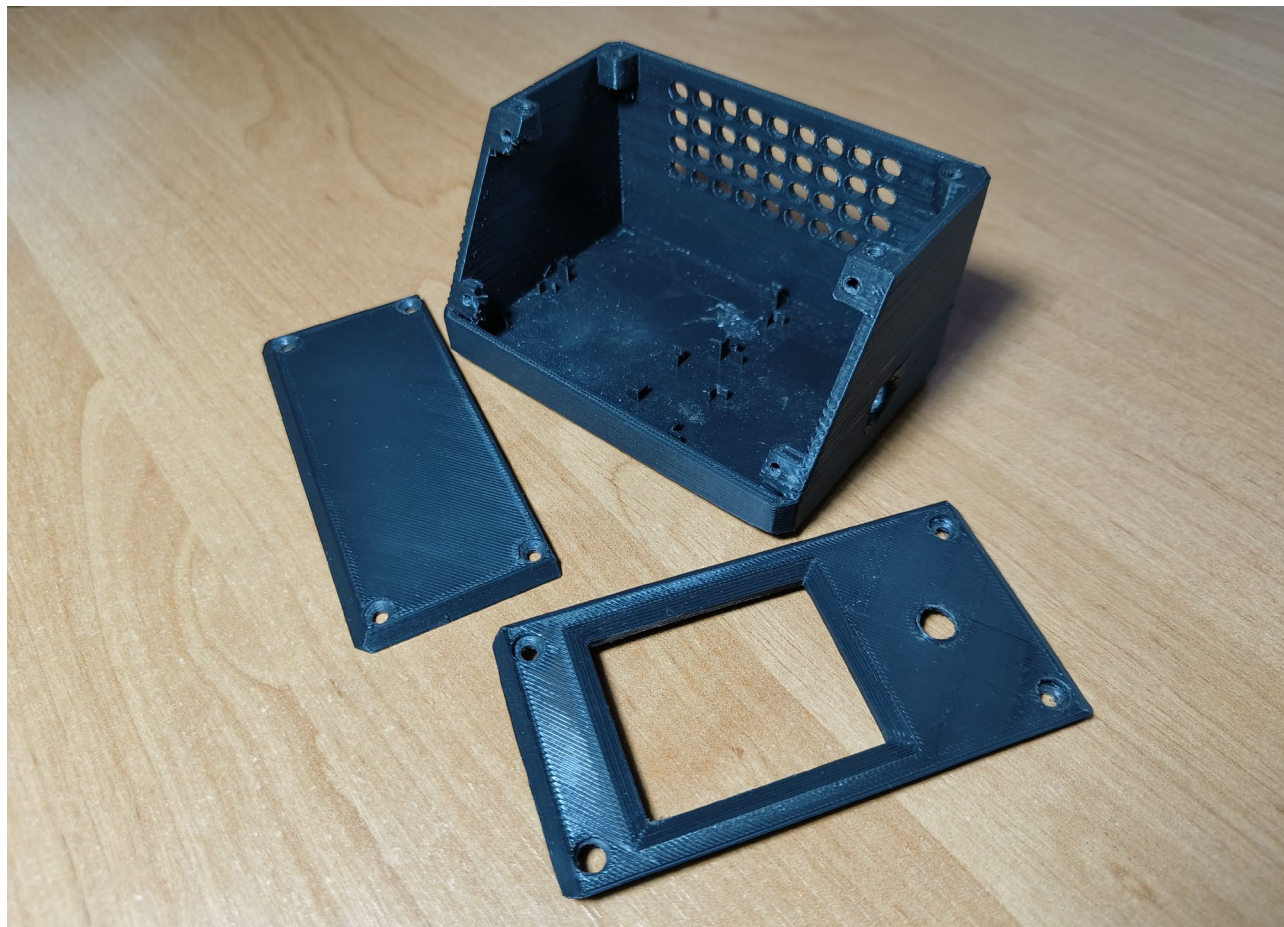


Рисунок 3.3 – Роздруковані деталі корпусу перед монтажем

Фізичне виготовлення спроектованих деталей здійснювалося за технологією моделювання методом пошарового наплавлення. Цей метод 3D-друку забезпечує достатню структурну міцність пристрою та високу швидкість створення прототипів. Перед початком друку тривимірні моделі були експортовані у формат STL та оброблені у програмі-слайсері. Для досягнення балансу між якістю поверхні та часом виготовлення було обрано висоту шару екструзії 0.2 мм. Щільність внутрішнього заповнення встановлено на рівні 20 відсотків, чого цілком достатньо для забезпечення жорсткості стінок корпусу при натисканні на енкодер. Як витратний матеріал використовувався міцний термопласт, стійкий до помірних теплових навантажень. Процес виготовлення

					КвРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пройшов без дефектів розшарування пластику, а отримана точність розмірів дозволила зібрати трикомпонентний корпус без необхідності додаткової механічної постобробки. Представлення загального вигляду виготовленого корпусу наведено на рисунку 3.4.

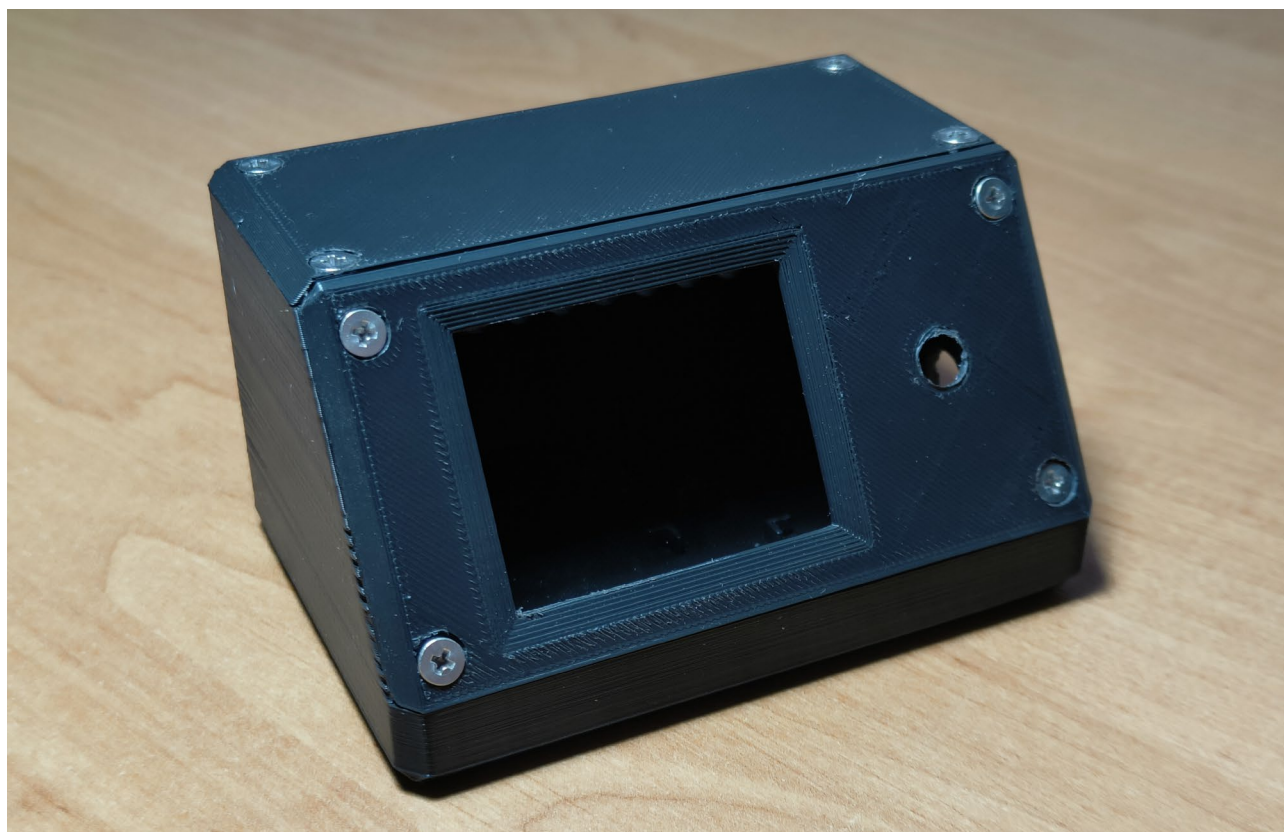


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд виготовленого корпусу після 3D-друку

3.2 Технічний монтаж та апаратна комутація модулів системи

Наступним етапом після успішного виготовлення деталей корпусу стало проведення технічного монтажу та безпосередньої апаратного з'єднання всіх електронних компонентів у єдину діючу систему. Процес фізичної збірки розпочався з підготовки та розміщення друкованих плат всередині нижнього відсіку роздрукованого корпусу. Центральний мікроконтролер ESP32, плата електромагнітного реле, силовий MOSFET-модуль HW-517 та цифровий вимірювач INA226 були стабільно зафіксовані на відповідних пластикових

монтажних стійках. Таке розміщення дозволило уникнути вільного переміщення плат всередині пристрою при перенесенні або підключенні зовнішніх елементів. Компоненти локального інтерфейсу, до яких належать кольоровий TFT IPS дисплей та інкрементний енкодер з кнопкою керування, були встановлені у відповідні пази на фронтальній похилій кришці пристрою. Завдяки високій точності тривимірного моделювання та врахуванню технологічних допусків, дисплей щільно увійшов у внутрішні напрямні кріплення, що дозволило обійтися без використання клейових сумішей і забезпечило високу ремонтпридатність конструкції у разі потреби заміни екрана.

Важливим кроком під час виконання паяльних робіт став правильний підбір провідників залежно від їхнього функціонального призначення та величини струму, що через них проходить. Усі лінії, що утворюють силові контури пристрою, а саме ланцюг живлення від входу USB Type-C, дроти від комутаційних ключів до акумулятора та лінії підключення навантажувального резистора, були виконані за допомогою гнучких мідних дротів збільшеного перерізу. Це дозволило мінімізувати їхній власний внутрішній опір, попередити можливе падіння напруги на провідниках при проходженні великих струмів і виключити ризик їхнього нагрівання під час тривалих циклів тестування. Водночас для підключення інформаційних сигнальних ліній датчиків та органів керування було використано тонші гнучкі монтажні дроти, що дозволило значно заощадити внутрішній простір корпусу та забезпечити акуратне укладання кабельних трас. Особлива увага приділялася надійності ізоляції кожного паяного з'єднання, для чого застосовувалися термоусадкові трубки, що повністю виключають можливість випадкового короткого замикання між сусідніми контактами плат.

Одним із найважливіших етапів внутрішнього монтажу стало створення надійної та спільної лінії заземлення, оскільки пристрій суміщає у своєму корпусі чутливу цифрову логіку та потужну силову частину. Для запобігання виникненню паразитних наведень, контурів заземлення та цифрових шумів, які

могли б спотворити результати прецизійних вимірювань, абсолютно всі мінусові контакти модулів, датчиків, екрана та мікроконтролера були фізично зведені в єдину магістраль мінуса за топологією «зірки». Ця спільна шина заземлення стала стабільною точкою відліку для керівних сигналів мікроконтролера та дозволила модулю вимірювання енергії INA226 фіксувати падіння напруги на струмовимірювальному шунті з максимальною точністю, повністю ізолюючи вимірювальний канал від перехідних процесів, що виникають під час замикання контактів реле чи відкриття польового транзистора. Реальний процес покрокового розведення провідників, пайки контактних майданчиків та проміжне компонування елементів у внутрішньому просторі виготовленого корпусу відображено на рисунку 3.5.

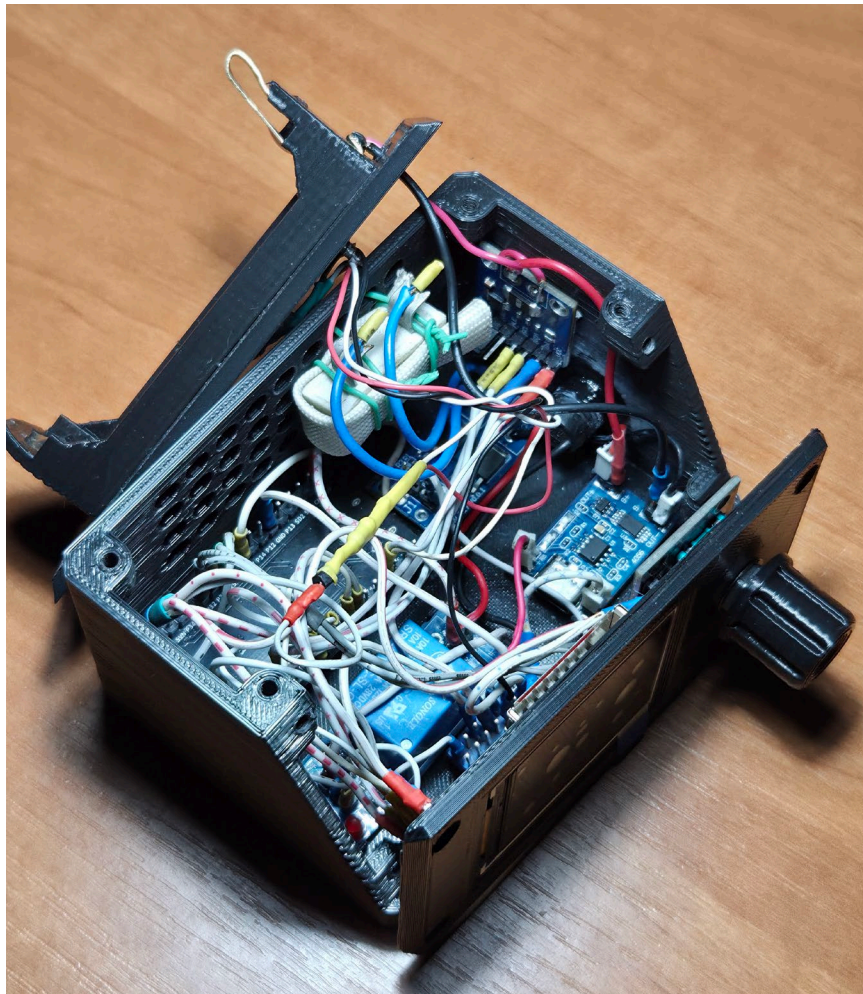


Рисунок 3.5 – Процес технічного монтажу та пайки компонентів всередині корпусу

Підключення силових контурів заряду і розряду виконувалося згідно з розробленою схемою. Вхідний плюс напруги 5 В від розпаяного на боковій панелі роз'єму USB Type-C було розділено на дві паралельні гілки: перша спрямована на вивід живлення плати ESP32 для забезпечення роботи обчислювального ядра, а друга підключена до вхідного загального контакту електромагнітного реле. Вихідний нормально розімкнений контакт реле за допомогою силового дроту з'єднали з входом живлення зарядного модуля TP4056, вихід якого через вимірювальні ланцюги підключається до позитивного полюса літій-іонного акумулятора. Для контуру розряду плюсовий дріт від акумулятора було пропущено через шину вимірювання струму модуля INA226 і підведено до потужного цементного резистора. Мінусова лінія від резистора підключена до стоку N-канального MOSFET-транзистора на модулі HW-517, який виступає в ролі нижнього ключа та замикає коло на загальну землю при отриманні сигналу від мікроконтролера. Оскільки цементний резистор під час розрядного тесту виділяє велику кількість тепла, його було фізично ізольовано від інших плат і змонтовано у задній частині корпусу безпосередньо навпроти вентиляційних отворів, що забезпечило пряме виведення гарячого повітря за межі пристрою.

Фінальним етапом апаратної комутації стало розведення інформаційних ліній зв'язку між периферійними пристроями та портами введення-виведення мікроконтролера ESP32. Кольоровий дисплей був підключений до відповідних цифрових пінів плати ESP32 за допомогою окремих гнучких монтажних дротів. Кожен провідник був акуратно вкладений вздовж внутрішніх стінок корпусу на безпечній відстані від силових ліній реле, що дозволило уникнути спотворення графічних даних через електромагнітні завади. За аналогічним принципом окремими проводами було підключено контакти інкрементного енкодера для чіткої реєстрації обертання ручки та натискання вбудованої кнопки. Цифровий модуль INA226 було з'єднано з апаратними пінами інтерфейсу I2C мікроконтролера за допомогою максимально коротких ліній зв'язку для

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збереження чистоти форми цифрового сигналу. Окрему увагу було приділено монтажу цифрового термодатчика DS18B20. Замість зовнішнього підключення, датчик був жорстко інтегрований безпосередньо у батарейний тримач таким чином, щоб його чутливий елемент мав постійний фізичний контакт із нижньою частиною корпусу тестованого акумулятора. Це технічне рішення гарантує мінімальну теплову інерцію та дозволяє системі миттєво реагувати на критичний нагрів елемента під час розряду. При підключенні датчика до мікроконтролера, між його сигнальною лінією та шиною живлення 3.3 В було впаяно підтягуючий резистор номіналом 4.7 кОм для забезпечення стабільного обміну даними по протоколу 1-Wire. Після завершення монтажу, ретельної перевірки всіх з'єднань мультиметром на відсутність коротких замикань та візуального контролю якості пайки, всі деталі корпусу були скріплені між собою, утворюючи готовий до роботи діагностичний стенд, загальний вигляд якого у зборі разом із тестованим акумулятором представлено на рисунку 3.6.

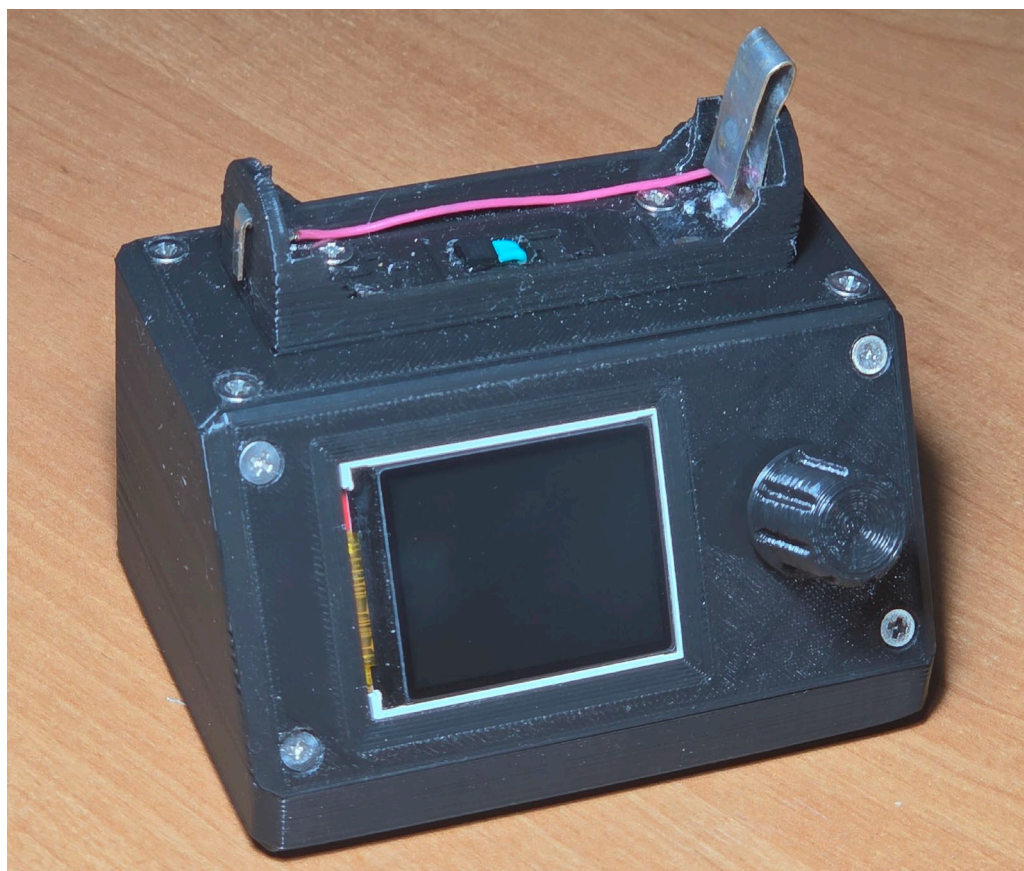


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд зібраного пристрою

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Розробка програмного забезпечення та налаштування віддаленого моніторингу

Програмне забезпечення мікроконтролера ESP32 розроблялося в інтегрованому середовищі Arduino IDE з використанням офіційного пакету інструментів для сімейства платформ ESP32. Основне завдання розробленої прошивки полягає у координації роботи вимірювальних модулів, обробці сигналів від органів керування, логічному перемиканні режимів роботи пристрою та забезпеченні стабільного каналу бездротового зв'язку для віддаленого моніторингу. Для керування електронними компонентами у коді використано низку спеціалізованих бібліотек. Низькорівневий обмін даними за інтерфейсами I2C та SPI забезпечується стандартними системними бібліотеками Wire.h та SPI.h. Для реалізації графічного інтерфейсу та виведення інформації на кольоровий дисплей застосовано зв'язку бібліотек Adafruit_GFX.h та Adafruit_ST7735.h, що дозволяє оптимізувати швидкість малювання елементів меню та текстових полів. Робота з цифровим монітором потужності організована за допомогою бібліотеки INA226.h, яка забезпечує пряме зчитування показників напруги та струму безпосередньо в цифровому форматі через регістри модуля. Отримання даних про температурний стан акумулятора з датчика DS18B20 реалізовано за допомогою бібліотек OneWire.h та DallasTemperature.h, які беруть на себе всю логіку роботи з протоколом 1-Wire. Окреме місце в архітектурі програми займає бібліотека Preferences.h, яка використовується для роботи з енергонезалежною пам'яттю мікроконтролера. Вона дозволяє надійно зберігати встановлені користувачем налаштування напруги відсічки, конфігурацію режимів тестування, а також проміжні результати вимірювань ємності по циклах, захищаючи дані від втрати у разі раптового знеструмлення пристрою. Обробка сигналів від інкрементного енкодера реалізована через механізм зовнішніх апаратних переривань мікроконтролера, що виключає пропуски кроків при швидкому обертанні ручки користувачем.

В основі архітектури програмного забезпечення лежить концепція кінцевого автомата, яка реалізована з використанням неблокуючого підходу. Це дозволяє системі одночасно зчитувати дані з датчиків, оновлювати екран та підтримувати мережеве з'єднання без зависань. У програмі реалізовано три основні функціональні режими роботи: заряджання, розряджання та автоматичний циклічний тест. У режимі заряджання мікроконтролер подає високий логічний рівень на керівний вхід електромагнітного реле, яке замикає коло живлення модуля TP4056. Важливим етапом ініціалізації пристрою є налаштування бездротового зв'язку. Програма спочатку намагається підключитися до збереженої Wi-Fi мережі. Якщо протягом заданого часу з'єднання не встановлено, ESP32 автоматично переходить у режим точки доступу з IP-адресою 192.168.4.1 для початкового налаштування. З метою захисту акумулятора від розряду самою системою реалізовано алгоритм енергозбереження: якщо користувач не проявляє активності, точка доступу автоматично вимикається через 60 секунд. Протягом усього циклу програма виконує безперервно підсумовує показники струму в часі, розраховуючи кількість переданих акумулятору міліампер-годин. Режим розряджання функціонує за аналогічним принципом, але в ньому ESP32 активує силове коло за допомогою MOSFET-модуля HW-517, підключаючи до акумулятора цементний резистор. Відключення навантаження відбувається миттєво при падінні напруги до нижнього безпечного порогу, встановленого користувачем, а обчислена ємність фіксується в пам'яті як чистий показник енерговіддачі комірки.

Особливою складністю та метрологічною цінністю відрізняється автоматичний режим роботи. Цей режим спроектовано для отримання максимально точних та об'єктивних даних про реальну ємність літій-іонного акумулятора шляхом проведення кількох послідовних випробувань. При його активації пристрій спочатку запускає повний цикл заряджання акумулятора до максимального рівня напруги без підрахунку ємності, щоб привести

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досліджуваний елемент у базовий стан повної готовності. Після досягнення максимуму програма переходить у стан очікування, вимикаючи всі силові ключі на фіксований час стабілізації. Ця пауза є технологічно необхідною для завершення внутрішніх електрохімічних процесів усередині акумулятора та вирівнювання його температурного балансу. Після відпочинку системи запускається серія циклів розряду та повторного заряду із безперервним вимірюванням ємності. Кількість таких ітерацій користувач може самостійно задавати в меню налаштувань. Завдяки можливостям бібліотеки Preferences.h, усі отримані значення міліампер-годин для кожного циклу надійно записуються в пам'ять, після чого алгоритм проводить математичне усереднення результатів для нівелювання випадкових похибок вимірювання та виводить підсумкові дані по кожному циклу разом із середнім арифметичним значенням ємності на екран пристрою та у віддалений інтерфейс.

Мережева складова програмного забезпечення організована у вигляді взаємодії локального веб-сервера та хмарного сервісу. Локальний веб-сервер побудований на обробці асинхронних HTTP-запитів, а весь код односторінкового додатка розміщений безпосередньо в енергонезалежній пам'яті мікроконтролера за допомогою директиви PROGMEM у вигляді масиву символів. Для передачі поточних параметрів акумулятора розроблено окремі кінцеві точки, такі як /status, /command, /config та /history.

Коли користувач відкриває веб-інтерфейс, браузер регулярно надсилає асинхронні AJAX-запити до пристрою, а мікроконтролер у відповідь формує текстові рядки у форматі JSON. Це дає змогу динамічно фіксувати й оновлювати показники струму, напруги та температури на екрані смартфона чи комп'ютера без повного перезавантаження сторінки. Для візуалізації графіків розрядних характеристик в оперативній пам'яті ESP32 виділено кільцевий буфер ємністю 2000 структурованих елементів логу LogPoint, що дозволяє накопичувати телеметрію протягом майже 16,5 годин і послідовно передавати її масивом за запитом клієнта. Глобальний рівень зв'язку та керування реалізовано через

хмарну платформу Blynk IoT, де взаємодія з сервером побудована на використанні віртуальних пінів від V0 до V21. У мікропрограмі налаштовано алгоритм двосторонньої синхронізації конфігурації між усіма інтерфейсами користувача. Коли оператор змінює граничні параметри тестування або безпеки через мобільний додаток Blynk або через форму на локальній веб-сторінці, відповідні функції обробки перехоплюють ці значення та змінюють глобальні змінні в коді пристрою.

Після цього оновлені ліміти відразу записуються в енергонезалежну пам'ять за допомогою методів бібліотеки Preferences.h, відображаються на локальному TFT-дисплеї завдяки виклику прапорців повного перемальовування екранних форм та дублюються назад у хмару. Таке програмне рішення забезпечує ідентичність відображення поточної інформації та внесених конфігурацій незалежно від того, який саме канал зв'язку чи фізичний орган керування використовує оператор у поточний момент часу.

Програмне забезпечення віддаленого інтерфейсу на мобільному телефоні повністю дублює фізичний функціонал настільного стенда, що дозволяє оператору відійти від вимірювальної лабораторії без втрати контролю над процесом. Через екран смартфона користувач може дистанційно обирати режими роботи, змінювати критичні параметри напруги відсічки, задавати кількість циклів для автоматичного тесту та примусово зупиняти процеси. Окреме місце в коді присвячено системі безпеки та оповіщення. Програма безперервно аналізує дані з термодатчика DS18B20, що встановлений у холдері під акумулятором. У разі виявлення критичного перегріву або виходу напруги за рамки безпечного діапазону, на програмному рівні миттєво спрацьовує переривання: мікроконтролер аварійно скидає сигнали з реле та мосфета, повністю ізолюючи акумулятор, а на екран пристрою та на мобільний телефон користувача через додаток Blynk надходить миттєве Push-сповіщення про аварійну зупинку. Аналогічно система надсилає повідомлення про штатні події, такі як успішне завершення тестування чи закінчення формування звітів по

циклах ємності. Візуальний моніторинг параметрів та керування стендом за допомогою смартфона може здійснюватися у двох режимах: через хмарну платформу Blynk IoT за наявності доступу до мережі Інтернет або через адаптивну локальну веб-сторінку у браузері телефону при прямому підключенні до Wi-Fi мережі пристрою. Локальний веб-інтерфейс проектувався за принципом мобільної адаптивності, тому його блоки та графіки автоматично підлаштовуються під розмір екрана конкретного смартфона. Це дозволяє управляти стендом з браузера будь-якого телефону без встановлення додаткових програм. Приклади відображення графічних інтерфейсів для обох випадків наведено на рисунку 3.7.

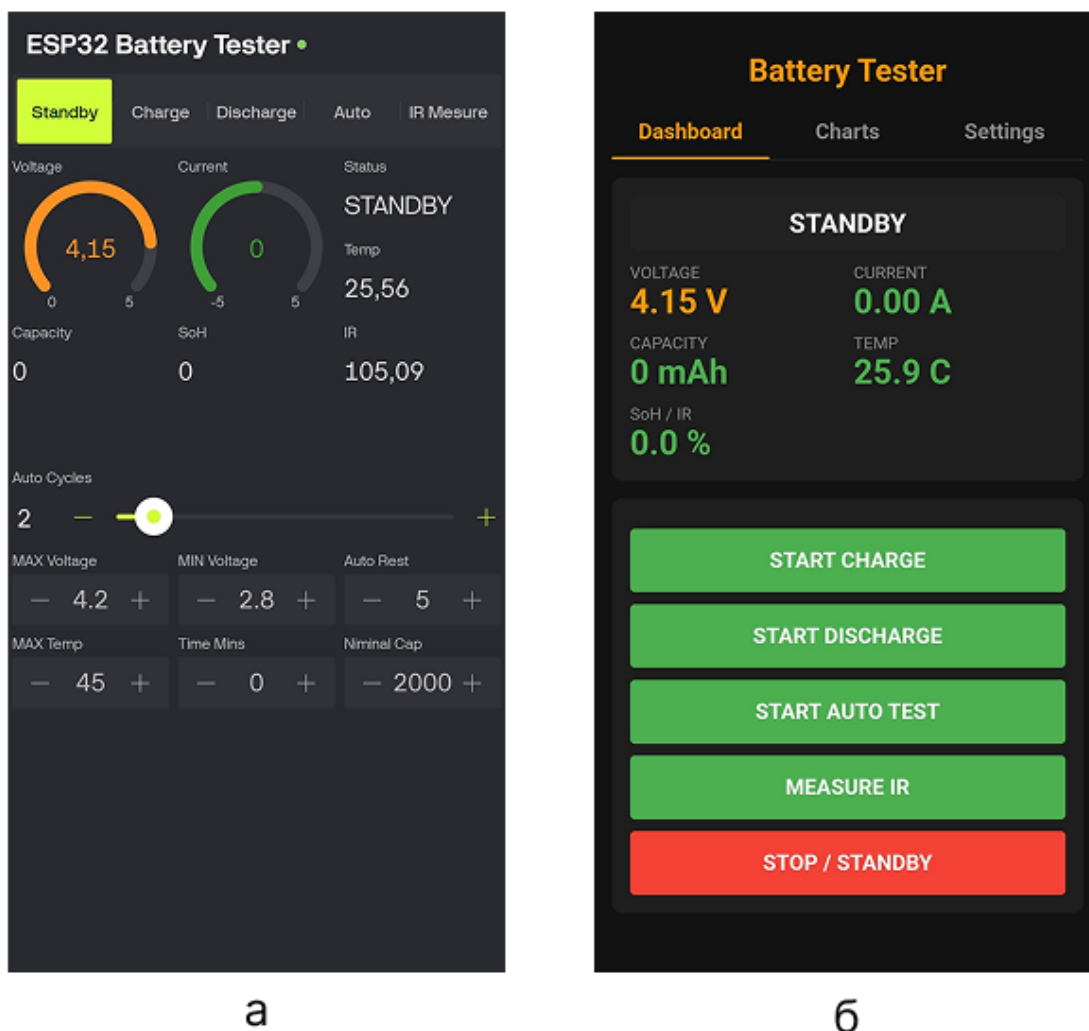


Рисунок 3.7 – Інтерфейси керування та моніторингу на екрані смартфона
 а) додаток на платформі Blynk IoT; б) сторінка локального веб-сервера системи

3.4 Налагодження та тестування функціональних режимів роботи системи

Налагодження системи розпочалося з тестування апаратної частини та перевірки прошивки мікроконтролера в реальних умовах. При ввімкненні через USB Type-C відбувалася ініціалізація модулів за протоколами I2C та 1-Wire, після чого на TFT-дисплеї відображалася стартове меню. Паралельно перевірявся алгоритм бездротового підключення ESP32. У штатному сценарії пристрій зчитував налаштування, підключався до роутера та запускав з'єднання з сервером Vlynk.io і локальний веб-сервер за власною IP-адресою. За відсутності мережі мікроконтролер за таймаутом розгортав точку доступу «Battery-Tester». При підключенні смартфона відкривалася сторінка конфігурації для вибору мережі та введення пароля. Після підтвердження дані записувалися в пам'ять через Preferences.h, а плата перезавантажувалася. Завдяки розміщенню веб-сторінки в PROGMEM, локальний інтерфейс працює стабільно без доступу до інтернету.

Наступним кроком стало практичне випробування функціонального режиму заряджання акумулятора, яке запускалося як локально за допомогою обертання та натискання ручки енкодера, так і дистанційно через інтерфейс смартфона. При активації режиму «Charge» мікроконтролер ESP32 виставив високий логічний рівень на цифровому піні керування силовим комутатором. Спрацювання модуля електромагнітного реле супроводжувалося чітким механічним замиканням контактів, після чого вхідна напруга 5 В була успішно подана на вхід контролера заряду TP4056. Під час тестування вимірювальний вузол INA226 фіксував стабільний струм заряду, а розроблений алгоритм здійснював безперервний підрахунок накопичених міліампер-годин. При досягненні напруги на акумуляторі верхньої межі, мікроконтролер миттєво знеструмив обмотку реле, що припинило зарядку і підтвердило безпеку роботи силового контуру. Під час цього етапу було перевірено механізм синхронізації: зміна порогу напруги як через хмару Vlynk, так і через форму на локальній веб-

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сторінці, приводила до миттєвого оновлення параметрів у кодї мікроконтролера та відображення нових даних на вбудованому TFT-дисплеї.

Тестування режиму «Discharge» дозволило перевірити роботу силового ключа на базі MOSFET-модуля HW-517 та розсіювання енергії на резисторі. При запуску режиму мікроконтролер повністю відкрив канал польового транзистора сигналом на затворі. Струм від акумулятора спрямовувався на навантаження, а модуль INA226 через I2C шину безперервно передавав дані про напругу та струм до ESP32. Мікроконтролер відправляв ці показники на хмарний сервер і паралельно записував їх у локальний кільцевий буфер оперативної пам'яті.

Випробування показало, що плавний графік розрядної кривої будується одночасно у додатку Vlynk та на локальній веб-сторінці за допомогою Canvas API. Веб-інтерфейс дозволяє автономно переглядати графік на екрані смартфона, а функція перехрестя коректно виводить точні значення телеметрії при тапі на екран. Після падіння напруги до нижньої межі мосфет закрився, зупинивши тест із фіксацією ємності. Приклади відображення графіків розряду наведено на рисунку 3.8.

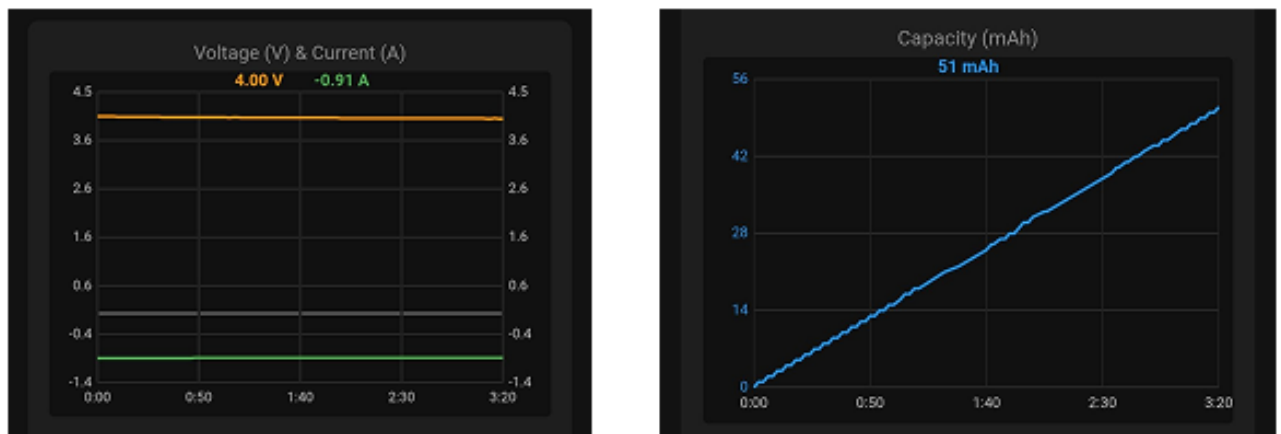


Рисунок 3.8 – Візуалізація графіка розряду акумулятора

Особлива увага була приділена налагодженню комплексного автоматичного циклічного режиму «Auto», який вимагав безпомилкового відпрацювання послідовності всіх станів кінцевого автомата. Під час тривалого

тестування пристрій успішно виконав перший етап повного заряджання комірки до максимуму за допомогою реле, після чого автоматично перейшов у режим технологічної паузи. Протягом усього встановленого часу стабілізації акумулятор залишався відключеним від силових кіл, що дозволило йому знизити внутрішню хімічну напругу та стабілізувати температуру в холдері. Після завершення паузи система автоматично перейшла до виконання заданої в налаштуваннях кількості циклів розряду та повторного заряду. Кожен завершений етап супроводжувався записом поточного значення отриманої ємності в пам'ять пристрою за допомогою бібліотеки Preferences.h. Після виконання фінального циклу мікроконтролер провів математичний розрахунок середнього арифметичного значення ємності, успішно вивівши на екран детальний звіт по кожній ітерації та підсумкову усереднену ємність, що підтвердило стабільність довготривалої автономної роботи алгоритму.

Завершальним етапом випробувань стала перевірка апаратного захисту та системи екстрених сповіщень. Для перевірки захисту за температурою було проведено штучне нагрівання зони холдера акумулятора вище встановленої безпечної межі у 45 градусів за Цельсієм. Цифровий датчик DS18B20 миттєво зафіксував зміну температури під акумулятором, що викликало негайне програмне переривання в коді мікроконтролера. ESP32 за частки мілісекунди скинули керуючі сигнали з реле заряду та затвора мосфета, повністю ізолювавши досліджувану комірку від усіх силових контурів пристрою. На вбудованому TFT-дисплеї з'явилося вікно з попередженням про аварію, а на телефон через Blynk надійшло Push-сповіщення про перегрів. Одночасно з цим на локальній веб-сторінці за допомогою асинхронного AJAX-запиту статус системи миттєво змінився на «SYSTEM HALT» з блокуванням кнопок керування, що підтвердило синхронність роботи всіх рівнів інтерфейсу при аварійних ситуаціях. Система так само чітко передала дані при штатному завершенні тестів, що довело надійність комплексу. Загальний вигляд розробленого пристрою в робочому стані під час фінальних випробувань наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9– Загальний вигляд розробленого пристрою в робочому стані

3.5 Аналіз точності вимірювань та ефективності терморегуляції

Обов'язковою частиною випробувань стала перевірка точності показань та дослідження ефективності пасивного охолодження. Оскільки головною функцією пристрою є прецизійний моніторинг ємності літій-іонних акумуляторів за методом кулонометрії, будь-які похибки при зчитуванні струму та напруги можуть призвести до накопичення помилки в розрахунках підсумкового значення міліампер-годин. Для проведення експериментальної оцінки точності показники вбудованого цифрового монітора потужності INA226 порівнювалися з даними еталонного лабораторного мультиметра. Тестування каналу вимірювання напруги проводилося в усьому робочому діапазоні літій-іонної комірки від 2.7 В до 4.2 В. Результати порівняльного аналізу показав, що завдяки вбудованому 16-бітному аналого-цифровому перетворювачу модуля

INA226, максимальна абсолютна похибка при вимірюванні напруги не перевищила значення 0.01 В. Графік порівняння значень напруги, отриманих з вимірювального вузла системи та еталонного приладу, наведено на рисунку 3.10.

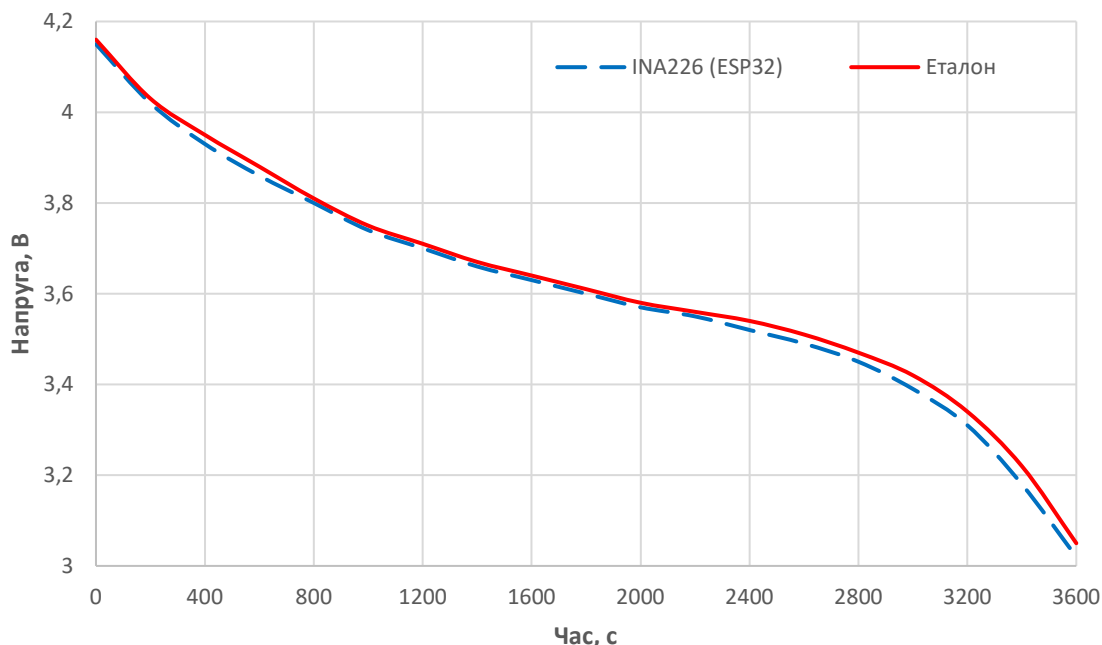


Рисунок 3.10 – Графік порівняльної оцінки точності вимірювання напруги

Особлива увага при аналізі метрологічних характеристик приділялася каналу вимірювання струму, оскільки штатний шунт модуля INA226 був замінений на низькоомний резистор номіналом 0.02 Ом. Перевірка точності зчитування амперажу здійснювалася в режимі активного розряду акумулятора через силовий MOSFET-модуль HW-517 на цементний резистор. Порівняння струму, що фіксувався прошивкою мікроконтролера ESP32, із показниками послідовно підключеного зразкового амперметра продемонструвало високу стабільність каналу телеметрії. Відносна похибка вимірювання струму розряду склала не більше 1.5 відсотка, що є відмінним результатом для діагностичних систем такого класу і повністю задовольняє вимоги технічного завдання. Така висока точність дозволяє мінімізувати інтегральну помилку кулонометричного алгоритму під час тривалих випробувань, гарантуючи достовірність отриманих

даних про залишкову ємність акумулятора. Графічну залежність відносної похибки вимірювання струму від його величини відображено на рисунку 3.11.

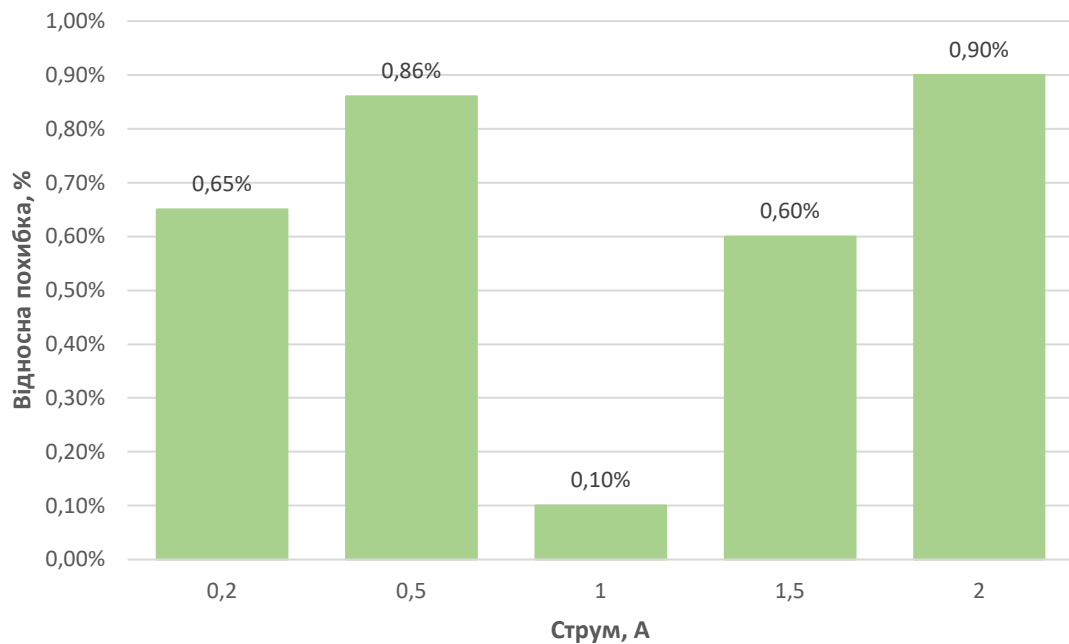


Рисунок 3.11 – Діаграма розподілу похибки вимірювання струму розряду

Наступним етапом випробувань став аналіз теплових процесів всередині роздрукованого корпусу пристрою. Головним джерелом тепловиділення в системі є цементний резистор, який під час режиму розряду розсіює всю енергію акумулятора, перетворюючи її на тепло. Завдяки тому, що при проектуванні у Fusion 360 цей резистор був конструктивно винесений у задню частину корпусу, вдалося локалізувати зону нагріву. Експериментальна перевірка температурного режиму за допомогою зовнішнього цифрового термометра показала, що вентиляційні отвори, розміщені виключно на задній панелі, ефективно справляються зі своїм завданням. Нагріте повітря від цементного резистора під дією природної конвекції безпосередньо залишає межі корпусу через ці прорізи. При цьому температура в передній та центральній частинах пристрою, де змонтовані чутливий мікроконтролер ESP32, плата INA226 та дисплей,

залишалася в межах норми і не перевищувала 35 градусів за Цельсієм навіть після двох годин безперервного тестування під навантаженням.

Паралельно було оцінено ефективність роботи цифрового термодатчика DS18B20, який конструктивно інтегрований у нижню частину батарейного холдера для безпосереднього контакту з акумулятором. Таке розташування дозволило практично повністю позбутися теплової інерції, яка зазвичай виникає при кріпленні датчиків на зовнішню оболонку елементів живлення. Датчик чітко реагував на найменші коливання температури самої комірки під час хімічних процесів заряду та розряду. Проведений аналіз підтвердив, що обрана топологія розміщення елементів та конфігурація задньої вентиляції забезпечують надійний тепловий захист системи, запобігають перегріву електронних компонентів та гарантують пожежну безпеку приладу при тривалій автономній експлуатації.

3.6 Висновки до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи було здійснено практичну реалізацію та комплексне експериментальне тестування розробленої кіберфізичної системи моніторингу літій-іонних акумуляторів.

На початковому етапі за допомогою САПР Autodesk Fusion 360 було спроектовано та виготовлено методом 3D-друку спеціалізований корпус. Його конструкція забезпечила надійну фіксацію всіх електронних компонентів, зручний доступ до фізичних органів керування стендом та ефективно пасивне відведення тепла від силового розрядного резистора через вентиляційні отвори. Після цього було проведено інтеграцію мікроконтролера ESP32 з вимірювальними та виконавчими модулями, з суворим дотриманням вимог щодо розділення цифрових і силових ліній та організації спільної шини заземлення для уникнення наведення завад на цифрові шини даних.

Програмне забезпечення, написане в середовищі Arduino IDE, успішно реалізувало логіку кінцевого автомата, забезпечивши автономне виконання

режимів заряду, технологічної паузи та розряду з підрахунком ємності методом кулонометрії. Головною особливістю реалізації стало створення чотирирівневої гібридної архітектури інтерфейсу користувача, яка поєднує повну автономність та широкі можливості віддаленого контролю. Окрім вбудованого TFT-екрана та хмарної платформи Blynk IoT, впроваджено локальний веб-сервер, код якого у вигляді односторінкового додатка оптимізовано та збережено безпосередньо в енергонезалежній пам'яті PROGMEM мікроконтролера.

Організація мережевого обміну через асинхронні AJAX/JSON запити дозволила здійснювати моніторинг параметрів станда й конфігурувати ліміти безпосередньо з браузера смартфона за відсутності доступу до мережі Інтернет. Розроблений веб-інтерфейс забезпечує динамічну побудову графіків розрядних характеристик у реальному часі за допомогою Canvas API, а впроваджений алгоритм двосторонньої синхронізації гарантує ідентичність відображення поточних налаштувань на всіх рівнях системи одночасно.

Експериментальна перевірка функціональних режимів підтвердила загальну стабільність роботи створеного прототипу в усіх станах кінцевого автомата. Завдяки проведенню серії тестових запусків та побудови графіків, було детально проаналізовано точність вимірювального вузла INA226. Абсолютна похибка вимірювання напруги на всьому діапазоні розрядної кривої склала менше 0.01 В, а аналіз розкиду точок похибки вимірювання струму розряду засвідчив, що відносна помилка не перевищила 1.5%. Тестування підсистеми безпеки довело надійність алгоритмів аварійного блокування: пристрій безвідмовно розмикав силові контури при падінні напруги на комірці нижче безпечної межі або при фіксації датчиком DS18B20 температури понад 45 °С.

Таким чином, створений фізичний прототип повністю відповідає поставленому технічному завданню, демонструє гнучкість управління завдяки поєднанню локальних та глобальних мережевих інтерфейсів, і підтверджує ефективність запропонованого кіберфізичного підходу для безпечної та точної діагностики технічного стану літій-іонних акумуляторів.

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було успішно вирішено актуальне інженерне завдання щодо розробки та дослідження працездатного прототипу автоматизованої кіберфізичної системи моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів. Створений апаратно-програмний комплекс дозволяє здійснювати прецизійний контроль ключових фізичних параметрів комірок із можливістю бездротової передачі телеметрії та віддаленої візуалізації даних у реальному часі. Досягнуто поставленої мети шляхом вирішення низки завдань, пов'язаних з аналізом існуючих засобів тестування, проектуванням надійної архітектури пристрою, його фізичною реалізацією та експериментальною верифікацією метрологічних характеристик.

У першому розділі проведено аналіз предметної області, фізико-хімічних факторів деградації літій-іонних акумуляторів та існуючих засобів їхнього обслуговування. Виявлено ключові технологічні недоліки масових побутових зарядних пристроїв та обґрунтовано доцільність створення власного вбудованого рішення. На основі проведеного дослідження обрано метод кулонометрії як найбільш ефективний математичний інструмент для визначення реального стану здоров'я комірок шляхом безперервного обліку струму під стабільним навантаженням.

У другому розділі проведено комплексне проектування архітектурно-функціональної моделі та підсистем пристрою. Створено модульну структуру з чітким логічним і фізичним розділенням цифрових та силових контурів. Обґрунтовано вибір елементної бази: мікроконтролер ESP32, монітор потужності INA226, датчик температури DS18B20 та розроблено схему електричну принципову пристрою. Особливу увагу приділено топології паралельного живлення від інтерфейсу USB Type-C та правильній організації

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спільної шини заземлення за схемою «зірки» для повної мінімізації цифрових шумів і наведень.

У третьому розділі здійснено практичну програмно-апаратну реалізацію комплексу та його всебічне експериментальне тестування. За допомогою САПР Autodesk Fusion 360 спроектовано й виготовлено методом 3D-друку ергономічний трикомпонентний корпус із системою пасивного відведення тепла від силового навантаження. Написано керівну мікропрограму в середовищі Arduino IDE, яка реалізує алгоритми чисельного інтегрування струму, роботу локального меню та асинхронну синхронізацію з IoT-платформою Blynk.io. Проведені випробування повністю підтвердили високу точність вимірювального вузла та безвідмовність алгоритмів захисного блокування при виникненні перегріву або критичного перерозряду комірки, що доводить надійність та експлуатаційну безпеку розробленого приладу при тривалій безперервній роботі.

Результатом виконання дипломної роботи є повнофункціональний фізичний прототип автономного тестера-аналізатора на базі мікроконтролера ESP32, який забезпечує автоматизоване виконання діагностичних циклів за логікою кінцевого автомата, прецизійний підрахунок ємності джерел живлення та багаторівневий захист від аварійних ситуацій. Спроектований пристрій успішно поєднує можливості локального офлайн-керування за допомогою дисплея та енодера з передовими технологіями Інтернету речей, що перетворює його на повноцінний вузол кіберфізичної системи з підтримкою віддаленого моніторингу через хмару. Запропоноване апаратне рішення є доступним у виготовленні, а гнучкі програмні налаштування дозволяють легко адаптувати пристрій під тестування різних типів елементів живлення. В результаті роботи отримано практичний і повністю функціональний прилад, який не потребує складного додаткового обладнання і готовий до щоденного використання як у домашніх майстернях, так і для проведення базових лабораторних перевірок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Gozuoglu A. IoT-enhanced battery management system for real-time SoC and SoH monitoring using STM32-based programmable electronic load. *Internet of Things*. 2025. Vol. 30. P. 101509.
2. Triawan M. A., Yolanda D., Humam F. Estimating SoC and SoH of Li-ion Battery Using Coulomb Counting Method in IoT Node Application. *2024 2nd International Symposium on Information Technology and Digital Innovation (ISITDI)*. IEEE, 2024. P. 96–101.
3. Syafii S., Fakhri I. E., Agung T. K., Azizah F. Design of battery state of charge monitoring and control system using coulomb counting method based. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2024. Vol. 33(2). P. 736.
4. Tang K. et al. The state of health estimation of lithium-ion batteries: A review of health indicators, estimation methods, development trends and challenges. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16(8). P. 429.
5. Isa A. A. H., Iqbal M. T. Remote low-cost web-based battery monitoring system and control using LoRa communication technology. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*. 2024. P. 134–159.
6. Rao K. D. et al. Fault mitigation and diagnosis for lithium-ion batteries: a review. *Frontiers in Energy Research*. 2025. Vol. 13. P. 1529608.
7. Ben-Festus B. N., Falode O. A. IoT-Enabled Monitoring System for Battery Management in Inverter Systems. *Next Research*. 2026. P. 101428.
8. Chen G. J., Liu C. L., Liu Y. H., Wang J. J. Implementation of constant temperature–constant voltage charging method with energy loss minimization for lithium-ion batteries. *Electronics*. 2024. Vol. 13(3). P. 645.
9. Jayakumar T. et al. Developing an On-Board Diagnostic Tool for Estimating the State of Charge for Battery in Electric Vehicle. *2025 International Conference on Electronics, AI and Computing (EAIC)*. IEEE, 2025. P. 1–6.

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Mulpuri S. K. et al. Design and Development of a Cloud-Assisted Cell Test Bench for Evaluating Cycle Life and Functional Performance of Electric Vehicle Batteries. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2025.

11. Tirones S., Hu Y. Reliable Microcontroller Standby Power Supply Using Li-Ion Batteries: Integrated Charger, Protection, and Boost Converter Design. 2025.

12. Serepas F. et al. Lightweight embedded IoT gateway for smart homes based on an ESP32 microcontroller. *Computers*. 2025. Vol. 14(9). P. 391.

13. Mirani A. A., Awasthi A., O'Mahony N., Walsh J. Industrial IoT-based energy monitoring system: Using data processing at edge. *IoT*. 2024. Vol. 5(4). P. 608–633.

14. Saha N., Aulia M. M., Rahman M. M., Khan M. S. A. IoT-driven cloud-based energy and environment monitoring system for manufacturing industry. *arXiv preprint arXiv:2404.11771*. 2024.

15. Askarzadehardestani M., Essmann S., Schröder D. Exploring the Impact of Prior Degradation on the Performance and Lifetime of Second-Life Li-Ion Batteries. *Batteries & Supercaps*. 2025. Vol. 8(12). P. e202500286.

16. Salek F. et al. A review of the technical challenges and solutions in maximising the potential use of second life batteries from electric vehicles. *Batteries*. 2024. Vol. 10(3). P. 79.

17. Su L., Xu Y., Dong Z. State-of-health estimation of lithium-ion batteries: A comprehensive literature review from cell to pack levels. *Energy Conversion and Economics*. 2024. Vol. 5(4). P. 224–242.

18. Krishna G. et al. IoT-based real-time analysis of battery management system with long range communication and FLoRa. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 23. P. 102770.

19. Souza K. M. D. et al. Online Estimation of Lithium-Ion Battery State of Charge Using Multilayer Perceptron Applied to an Instrumented Robot. *Batteries*. 2026. Vol. 12(1). P. 25.

20. Bhat A., Mutthalageri P. B., Jambavalikar S. H., Waderatti S. Li-Ion Cell Discharge Unit for Accurate Battery Capacity Measurement. *2025 International Conference on Advances in Renewable Energy & Electric Vehicles (AREEV)*. IEEE, 2025. P. 53–57.

21. Javadipour M. Condition Monitoring System for Electric Vehicle Battery Packs using Current Density Images of Lithium-ion Pouch Cells: Doctoral dissertation. Queen Mary University of London, 2023.

22. Sesidhar D. V. S. R. et al. State of charge estimation for li-ion batteries: An edge-based data-driven approach. *IEEE Access*. 2025.

23. Zhou Z. et al. Life-cycle state-of-charge estimation for lithium-ion battery considering coulomb efficiency and capacity decay. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024. Vol. 11(2). P. 6335–6343.

24. Allam A., Onori S. Online capacity estimation for lithium-ion battery cells via an electrochemical model-based adaptive interconnected observer. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2020. Vol. 29(4). P. 1636–1651.

25. Li P. et al. Embedded sensing-enabled distributed thermal modeling and nondestructive thermal monitoring of lithium-ion battery. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023. Vol. 10(3). P. 7019–7028.

26. Sridhar B. et al. Smart IoT-Enabled Cooling System for Real-Time EV Battery Temperature Management. *2025 10th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. IEEE, 2025. P. 272–277.

27. Mathews B. et al. Real-Time IoT Monitoring of Battery Packs in EVs using Thermal Imaging and Edge AI Models. *2026 9th International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*. IEEE, 2026. P. 544–549.

28. Li Y., Li T., Chen H., Huang B. Active safety warning system of energy storage system based on multi-sensor fusion. *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. IEEE, 2022. Vol. 6. P. 929–933.

29. Liu J. Design of Remote Lithium Battery Power Detection and Power Control System. *2025 4th International Conference on Electronics, Integrated Circuits and Communication Technology (EICCT)*. IEEE, 2025. P. 536–540.

30. Wenno L. A. et al. A Prototype Of An IoT Base Voltage Protection System For Batteries. *2025 International Conference on Informatics, Multimedia, Cyber and Information System (ICIMCIS)*. IEEE, 2025. P. 415–420.

31. Working Principle and Structure of Lithium-ion Battery. LinkedIn. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/working-principle-structure-lithium-ion-battery-davide-laverga> (дата звернення: 21.05.2026).

32. The life of Li-Ion batteries cycle life strongly depends on the operating temperature. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/figure/The-life-of-Li-Ion-batteries-cycle-life-strongly-depends-on-the-operating-temperature_fig6_312376975 (дата звернення: 21.05.2026).

33. Зарядний пристрій LiitoKala Lii-500 Engineer. LiitoKala Україна. URL: <https://liitokala.com.ua/product/liitokala-lii-500-ingenier-charger-li-ion-aaa-aa-18650-26650/> (дата звернення: 21.05.2026).

34. Електронне навантаження-тестер Atorch DL24 Bluetooth USB. Епіцентр. URL: <https://epicentrk.ua/shop/mplc-tester-atorch-dl24-bluetooth-usb-4-rezimi-150-vt-200-v-20a-510129-1effe45b-d3c7-69de-b415-293738a9efca.html> (дата звернення: 21.05.2026).

35. Cadex C7400ER Battery Analyzer 170 Watts. Cadex Electronics. URL: <https://shop.cadex.com/shop/products/c7400er-battery-analyzer-170-watts> (дата звернення: 21.05.2026).

36. ESP32 ESP-32S NodeMCU Development Board. AliExpress. URL: <https://www.aliexpress.com/item/1005004697683601.html> (дата звернення: 21.05.2026).

37. Модуль зарядного пристрою TP4056 з захистом для Li-ion акумуляторів. Prom.ua. URL: <https://prom.ua/p1029672265-tp4056-zaschitoj-kontroller.html> (дата звернення: 21.05.2026).

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

38. Модуль реле 5V 10A високого рівня (High Level). Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/prod2888-modyl-rele-5v-10a-visokogo-yrovnya-high-level> (дата звернення: 21.05.2026).

39. Модуль силового ключа HW-517 на двох MOSFET. Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/prod7069-modyl-silovogo-klucha-hw-517-na-dvoh-mosfet-28a> (дата звернення: 21.05.2026).

40. INA226 Датчик струму та напруги I2C. 1wire.com.ua. URL: <https://1wire.com.ua/ina226-datchik-toka-i-naprjazhenija-i2c.html> (дата звернення: 21.05.2026).

41. Цифровий датчик температури DS18B20. Mini-Tech. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/datchik-temperature-ds18b20> (дата звернення: 21.05.2026).

42. 1.8 inch TFT LCD Module 128x160 ST7735. ControllersTech. URL: <https://shop.controllerstech.com/products/1-8-inch-tft-lcd-module-128x160-st7735> (дата звернення: 21.05.2026).

43. Модуль інкрементального енкодера KY-040 на платі. Mini-Tech. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/encoder-na-plate-modul> (дата звернення: 21.05.2026).

					КВРКІ. 022040.22.03.84 ПЗ	Арк. 74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 20.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилоч в документах: 9%

ID: 272414 Назва: БКР Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги Додано в БД: 2026-05-27 Автора: Ярослав КОСТУШЕВИЧ Керівники: Ольга ПАВЛОВА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	107137	710	22244 (21%)	156 (22%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269585	Назва: Звіт з ПДП Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруг Додано в БД: 2026-02-28 Автора: Костушевич Я.О. Керівники: Капустян М.В. Консультанти: Опоненти:	21119 (20.0%)	142 (20.0%)

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Ярослав КОСТУШЕВИЧ

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги

Експерт: Ольга ПАВЛОВА

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.85%

Коефіцієнт подібності 2: 1.79%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-27 06:30:10.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.


Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-27

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Костушевич Ярослав Олександрович

Тема: Кіберфізична система моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів з використанням датчиків температури та напруги

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 65

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проектування, практична реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для моніторингу технічного стану літій-іонних акумуляторів.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі кваліфікаційної роботи проведено дослідження предметної області (проаналізовано структурні та функціональні особливості систем моніторингу акумуляторів, існуючі апаратно-програмні засоби діагностики хімічних джерел струму, а також методологічні підходи до побудови систем) та виконано постановку задачі дослідження.

В другому розділі кваліфікаційної роботи проведено проектування апаратних та програмних підсистем кіберфізичної системи, а саме: визначено архітектуру та основні підсистеми пристрою; виконано вибір та обґрунтування елементної бази (мікроконтролера ESP32, модулів INA226, TP4056 та датчиків); спроектовано алгоритмічне та програмне забезпечення; розроблено логіку підрахунку ємності за методом кулонометрії; розроблено локальний інтерфейс користувача з використанням дисплея та енкодера; спроектовано підсистему віддаленого моніторингу; побудовано схему електричну принципову проєкту.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано програмно-апаратну реалізацію кіберфізичної системи, а саме: спроектовано та виготовлено корпус пристрою методом 3D-друку; здійснено технічний монтаж та апаратну комутацію модулів; розроблено програмне забезпечення та налаштовано віддалений моніторинг; проведено тестування функціональних режимів роботи та проаналізовано точність вимірювань.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи та успішне створення повноцінно діючого фізичного прототипу.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага дослідженню роботи системи з акумуляторами інших хімічних типів, окрім літій-іонних.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на високому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (А / 93)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

К.Т.М., доц. Керує Ю.В.
доцент кафедри *ІІІ*

"28" травня 2026 р.

[Підпис] (підпис)

Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Ярослав КОСТУШЕВИЧ

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-3

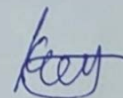
ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Інформаційна система моніторингу стану здоров'я пацієнтів із оптимізацією планування завдань

Автор Ярослав КОСТУШЕВИЧ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: д.ф., доцент Ольга ПАВЛОВА

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

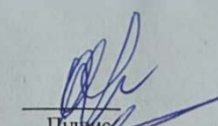
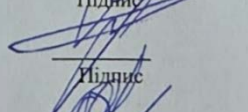
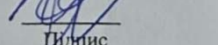
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3.85 %; та системою Anti-Plagiarism складає 20.0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


 Підпис

 Підпис

 Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ