

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32
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 022029.22.03.83 ПЗ

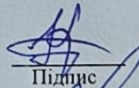
Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-3

Керівник д.ф., доцент,
Науковий ступінь, учене звання

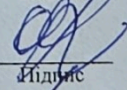
Нормоконтролер канд.фіз.-мат.наук, доц.
Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС
«О» червня 2026 р.

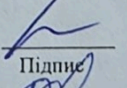
дата


Підпис

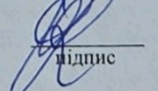
Богдан КАСЯНЧУК
Ініціали, прізвище


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ініціали, прізвище


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

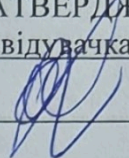
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІІС

 Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Касянчук Богдану Юрійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32

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) _____

Дослідження предметної області та вибір апаратно-програмних рішень для системи моніторингу електромережі

Проектування апаратної та програмної підсистем засобу моніторингу електромережі

Програмно-апаратна реалізація та тестування системи моніторингу електромережі

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

Схема електрична принципова підключення датчиків

Графічний інтерфейс користувача та візуалізація телеметрії

Структурна схема та специфікація апаратного забезпечення

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 напряму 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 вибір апаратно-програмних рішень для системи моніторингу електромережі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування апаратної та програмної підсистем засобу моніторингу електромережі	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація та тестування системи моніторингу електромережі	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

Богдан КАСЯНЧУК

Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Імя, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32».

Автор роботи: Богдан КАСЯНЧУК.

Керівник роботи: Ольга ПАВЛОВА.

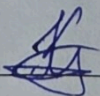
Пояснювальна записка: 61 с., 26 рис., 6 табл., 3 дод., 42 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ДАТЧИК, ЕЛЕКТРОМЕРЕЖА, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, МІКРОКОНТРОЛЕР, МОНІТОРИНГ, ПЕРИФЕРІЙНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню програмно-апаратного комплексу для безперервного моніторингу параметрів електромережі в режимі реального часу. Актуальність теми зумовлена постійним зростанням навантаження на побутові та комерційні електромережі, а також потребою в надійних інструментах контролю якості електроенергії для превентивного захисту чутливого комп'ютерного і телекомунікаційного обладнання від аварійних ситуацій.

Метою роботи є розробка та тестування незалежної системи збору, обробки й візуалізації телеметричних даних на базі ESP32. Спроектовано апаратну схему з обов'язковою гальванічною розв'язкою вимірювальних кіл та програмно реалізовано алгоритми обчислення середньоквадратичних значень напруги, струму і потужності. Для забезпечення конфіденційності розроблено власну серверну інфраструктуру: передача телеметрії відбувається за протоколом MQTT, збереження – у локальній базі даних, а візуалізація в реальному часі здійснюється через веб-дашборд на основі WebSockets.



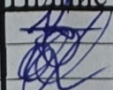
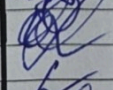
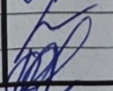
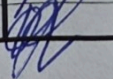
Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Дослідження предметної області та вибір апаратно-програмних рішень для системи моніторингу електромережі	5
1.1 Аналіз проблематики та вимог до сучасних систем контролю якості електроенергії.....	5
1.2 Теоретичні основи та фізичний зміст основних параметрів електромережі.....	8
1.3 Огляд та порівняльна характеристика існуючих засобів енергомоніторингу	10
1.4 Обґрунтування вибору апаратної платформи та вимірювальної бази датчиків	13
1.5 Обґрунтування вибору технологій передачі даних та середовища IoT	18
1.6 Постановка задачі на розробку системи моніторингу електромережі	21
1.7 Висновки до першого розділу.....	23
2 Проектування апаратної та програмної підсистем засобу моніторингу електромережі.....	25
2.1 Розробка загальної структурної схеми пристрою.....	25
2.2 Розробка електрично принципової схеми пристрою.....	27
2.3 Розробка архітектури програмного забезпечення та логічної моделі бази даних	30
2.4 Техніко-економічний аналіз співвідношення вартості та конфіденційності даних.....	33
2.5 Проектування модуля програмної симуляції телеметричних даних	35

КвРКІ 022029.22.03.83 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Богдан КАСЯНЧУК		01.06		у	2	70
Перевір.		Ольга ПАВЛОВА		01.06				
Н.контр.		Тетяна КИСІЛЬ		01.06				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		01.06			ХНУ КІ2-22-3	

2.6	Проектування графічного інтерфейсу користувача та візуалізації телеметрії	39
2.7	Висновки до другого розділу	42
3	Програмно-апаратна реалізація та тестування системи моніторингу електромережі	43
3.1	Апаратна реалізація та монтаж пристрою	43
3.1.1	Розробка корпусу для виробу	43
3.1.2	Монтаж силової підсистеми та вузла живлення	46
3.1.3	Реалізація вимірювальних кіл та вузла зміщення	47
3.1.4	Фінальна комутація та інтеграція мікроконтролера	49
3.2	Розробка вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера ESP32	51
3.3	Реалізація вбудованих мережевих сервісів та локального сховища даних	53
3.4	Калібрування вимірювальних каналів	55
3.5	Розробка клієнтського інтерфейсу користувача та візуалізація даних	58
3.6	Висновки до третього розділу	62
	Висновки	64
	Перелік джерел посилань	66
	Додаток А Копія креслення «Схема електрична принципова підключення датчиків»	71
	Додаток Б Копія креслення «Графічний інтерфейс користувача та візуалізація телеметрії»	72
	Додаток В Копія креслення «Структурна схема та специфікація апаратного забезпечення»	73

ВСТУП

Різні аспекти Інтернету речей активно впроваджується у побутову та промислову сфери. Однією з вимог до інфраструктури розумного будинку та телекомунікаційних мереж є забезпечення енергоефективності та стабільності електропостачання. Зростання навантаження на електромережі, а також періодичні коливання параметрів струму та напруги актуалізують потребу в доступних засобах інструментального контролю якості електроенергії. Традиційні прилади обліку фіксують переважно кумулятивні показники споживання, не надаючи користувачеві деталізованої інформації про миттєві параметри мережі, що ускладнює діагностику несправностей та захист чутливого електронного обладнання. Розробка власного програмно-технічного комплексу, що не залежить від сторонніх хмарних платформ, дозволяє гарантувати конфіденційність передачі телеметричних даних та організацію надійної клієнт-серверної взаємодії. Вибір платформи ESP32 для цієї задачі зумовлений її високою продуктивністю, енергоефективністю та наявністю вбудованих модулів бездротового зв'язку.

Метою дипломної роботи є проєктування, розробка та тестування незалежної програмно-технічної системи збору, обробки й віддаленої візуалізації телеметричних даних на базі мікроконтролера ESP32 для забезпечення оперативного контролю параметрів електропостачання.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого моніторингу параметрів електричної мережі змінного струму в режимі реального часу.

Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби, мережеві протоколи передачі даних та алгоритми цифрової обробки сигналів для вимірювання напруги, струму і потужності.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ВИБІР АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

1.1 Аналіз проблематики та вимог до сучасних систем контролю якості електроенергії

Розвиток енергетики та побутової електроніки характеризується підвищеними вимогами до якості електропостачання. Предметною областю даного дослідження є процеси автоматизованого безперервного моніторингу параметрів електричної мережі змінного струму в умовах житлових, комерційних та офісних приміщень. Зі збільшенням кількості чутливої мікропроцесорної техніки та впровадженням концепцій «розумного будинку», стабільність живлення є важливим фактором для забезпечення безпечної та безперебійної роботи обладнання [4, 11].

Більшість класичних побутових лічильників електроенергії, що використовуються населенням, фіксують тільки кількісні показники споживання у вигляді наростаючого підсумку кіловат-годин. Їхня головна функція зводиться до забезпечення фінансових розрахунків між споживачем та компанією-постачальником послуг. Однак такі прилади обліку є неінформативними з точки зору оцінки якісних параметрів електроенергії, оскільки вони не надають користувачеві доступу до даних про миттєве значення напруги, силу споживаного струму, коефіцієнт потужності або частоту мережі. Відсутність засобів оперативного контролю цих базових характеристик створює низку суттєвих експлуатаційних та економічних проблем.

Серйозною проблемою є нестабільність напруги в мережі, яка виникає через зношеність інфраструктури, нерівномірний розподіл навантаження або аварійні ситуації на лініях електропередач. Раптові перепади, глибокі просідання або короточасні стрибки напруги є основною причиною передчасного зносу та раптового виходу з ладу дороговартісної побутової електроніки, зокрема

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

холодильного обладнання, комп'ютерної техніки та автоматики систем опалення [21]. Без системи постійного автоматизованого моніторингу користувач не має можливості своєчасно виявити аварійні режими роботи мережі та вжити захисних заходів, що часто призводить до значних фінансових збитків на ремонт або повну заміну пошкодженої техніки [16].

Відсутність деталізованої статистики споживання енергії ускладнює процес енергозбереження та оптимізації витрат. Користувачеві вкрай важко об'єктивно визначити, який саме прилад споживає надмірну кількість енергії, працює неефективно через технічну несправність або створює значне приховане навантаження у режимі очікування. Відсутність прозорості у структурі енергоспоживання унеможливує проведення повноцінного побутового енергоаудиту. Типовий графік коливання навантаження та просідання напруги в побутовій електромережі наведено на рисунку 1.1.

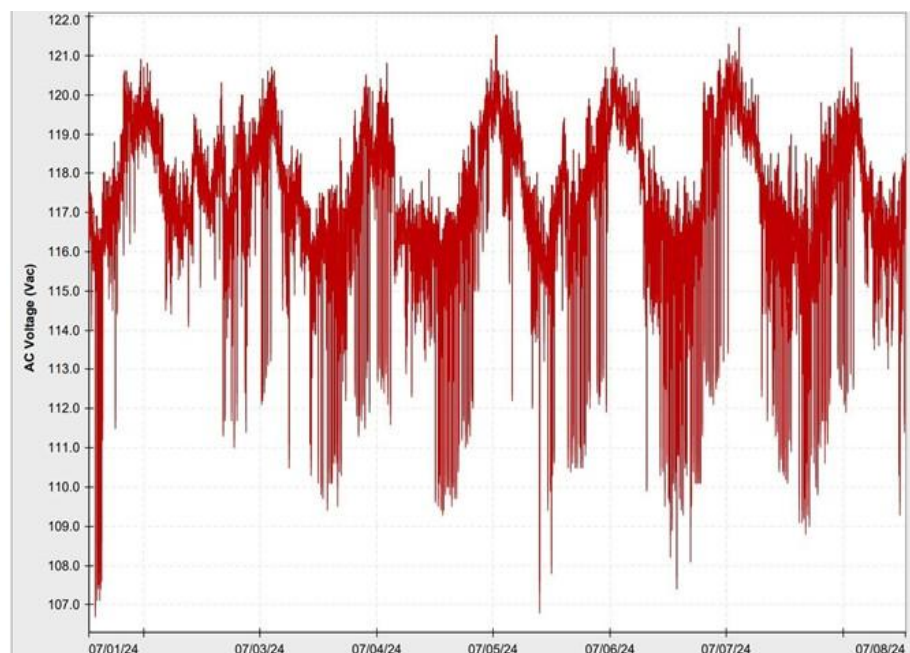


Рисунок 1.1 – Типовий графік коливання навантаження в побутовій електромережі (США) [22]

Розвиток технологій Інтернету речей та поява на ринку високопродуктивних, але доступних мікроконтролерів, таких як сімейство ESP32, відкривають нові шляхи для ефективного вирішення окресленого комплексу проблем [3, 25 ,9]. Цей мікроконтролер володіє достатніми обчислювальними потужностями для швидкої цифрової обробки сигналів та має вбудовані модулі бездротового зв'язку, роблячи його хорошою апаратною платформою для побудови сучасних систем телеметрії. Використання високоточних датчиків струму та напруги у поєднанні з комунікаційними можливостями ESP32 дозволяє створити надійну систему превентивного моніторингу.

Програмно-апаратний комплекс на базі такої архітектури здатний безперервно здійснювати апаратні вимірювання та програмний розрахунок середньоквадратичних значень напруги і струму з високою точністю. Крім того, мікроконтролер забезпечує математичне обчислення не лише активної потужності, але й реактивної та повної потужності, що дозволяє комплексно оцінити характер підключеного навантаження.

Зібрані та первинно оброблені пристроєм дані накопичуються у вбудованій енергонезалежній пам'яті мікроконтролера за допомогою файлової системи LittleFS. Замість використання зовнішніх серверів та важких реляційних баз даних, мікроконтролер виконує роль периферійного обчислювача. Завдяки застосуванню веб-технологій, система забезпечує візуалізацію динаміки виміряних параметрів у реальному часі. Мікроконтролер самостійно роздає стиснений клієнтський веб-дашборд безпосередньо зі своєї пам'яті, а потокова передача телеметрії для оновлення графіків здійснюється через протокол WebSockets, надаючи користувачеві вичерпну аналітику без залежності від хмарних платформ. Узагальнена структурна схема взаємодії елементів у системі IoT-моніторингу представлена на рисунку 1.2.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

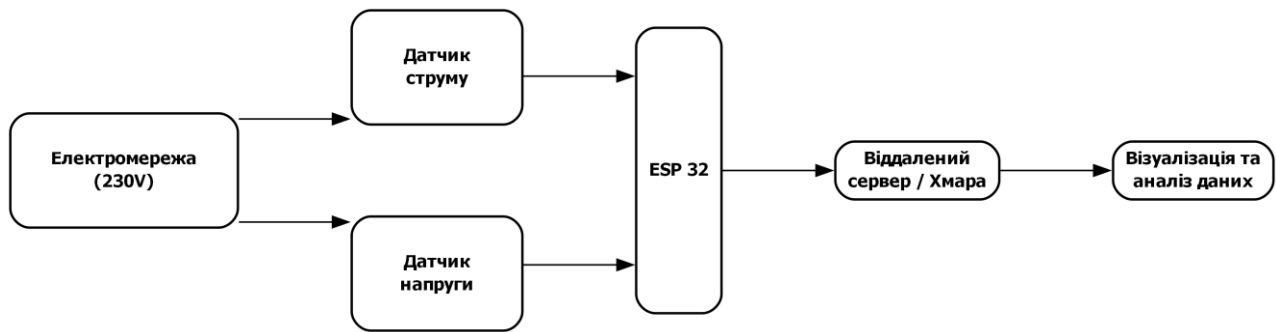


Рисунок 1.2 – Узагальнена структурна схема системи IoT-моніторингу

1.2 Теоретичні основи та фізичний зміст основних параметрів електромережі

Для проектування прецизійної системи моніторингу необхідно визначити фізичну природу величин, що підлягають вимірюванню, та їхній взаємозв'язок у колах змінного струму. В електротехніці загальна потужність, що споживається навантаженням, розподіляється на три складові, які описуються за допомогою «трикутника потужностей».

Повна потужність S характеризує загальний потік енергії, який джерело передає споживачеві. Вона вимірюється у вольт-амперах (ВА) і розраховується як добуток діючих значень напруги та струму в колі:

$$S = U_{RMS} \times I_{RMS} \quad (1.1)$$

Активна потужність P є найбільш важливою складовою, оскільки вона відображає частину енергії, яка безпосередньо перетворюється на корисну роботу: теплову, механічну або світлову. Саме цю потужність споживають побутові прилади для виконання своїх функцій. Одиницею вимірювання активної потужності є ват (Вт):

$$P = U_{RMS} \times I_{RMS} \times \cos \varphi \quad (1.2)$$

де $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності, що визначає зсув фаз між синусоїдами напруги та струму.

Реактивна потужність Q виникає при підключенні навантажень з індуктивним або ємнісним характером. Вона не виконує корисної роботи, а лише циклічно перетікає між джерелом та споживачем, створюючи додаткове навантаження на дроти та викликаючи втрати на їхнє нагрівання. Вимірюється у вольт-амперах реактивних (вар):

$$Q = U_{RMS} \times I_{RMS} \times \sin \varphi \quad (1.3)$$

Зв'язок між усіма видами потужностей описується геометричною сумою векторів:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.4)$$

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ – це безрозмірна величина, що демонструє ефективність використання електроенергії. Він визначається як відношення корисної активної потужності до повної споживаної потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.5)$$

Для систем моніторингу в межах домашньої мережі вимірювання активної потужності є головним завданням, що обґрунтовано сукупністю економічних та безпекових чинників. Оскільки комерційний облік для побутових споживачів базується на показниках активної енергії, контроль цього параметра є важливим для точного прогнозування фінансових витрат. Разом із тим, активна потужність безпосередньо відображає реальне теплове навантаження на елементи внутрішньої електромережі. Систематичний моніторинг даного показника дає

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зможу не лише ідентифікувати енергоємні прилади, а й вчасно виявити ризики перегрівання контактних вузлів, що є важливим для забезпечення пожежної безпеки житлового приміщення.

1.3 Огляд та порівняльна характеристика існуючих засобів енергомоніторингу

На ринку існує велика кількість засобів контролю параметрів електромережі, ринок характеризується значною різноманітністю технічних рішень, які можна класифікувати за функціональним призначенням, точністю вимірювань, масштабованістю та вартістю впровадження. Для об'єктивного визначення місця проектованої системи серед існуючих аналогів доцільно розглянути три основні категорії пристроїв, що найчастіше застосовуються на практиці: професійні аналізатори якості електроенергії, побутові IoT-пристрої у вигляді смарт-розеток та захисні модульні реле напруги [18]. Аналіз цих категорій дозволяє чітко окреслити функціональні межі наявних продуктів та обґрунтувати необхідність розробки власного програмно-апаратного комплексу.

Верхній ціновий та технологічний сегмент ринку займають професійні аналізатори якості електроенергії від провідних виробників вимірювальної техніки, таких як Fluke, Chauvin Arnoux або Sonel. Ці спеціалізовані прилади забезпечують еталонну, метрологічно підтверджену точність вимірювань, дозволяючи реєструвати не лише базові параметри споживання, а й здійснювати глибокий аналіз спектра, виявляти вищі гармоніки, вимірювати дозу флікера та фіксувати мікросекундні перехідні процеси. Водночас основним стримуючим фактором їх масового використання є надзвичайно висока вартість апаратної частини, яка робить такі комплекси недоступними для пересічного побутового споживача або малого бізнесу. Окрім того, подібне потужне обладнання орієнтоване на проведення періодичного енергоаудиту промислових об'єктів кваліфікованим персоналом, а не на стаціонарний безперервний моніторинг

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

більшості бюджетних моделей від пропрієтарних хмарних сервісів виробника, що створює серйозні ризики повної втрати накопичених історичних даних або неможливості керування пристроєм при відсутності стабільного інтернет-з'єднання. Приклад реалізації побутового пристрою енергомоніторингу у формі факторі смарт-розетки зображено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Побутова смарт-розетка з функцією енергомоніторингу [25]

Третьою поширеною категорією пристроїв є модульні реле напруги з цифровою індикацією, які встановлюються на стандартну DIN-рейку безпосередньо у ввідних розподільчих щитах. Ці мікропроцесорні прилади високоефективно виконують свою головну захисну функцію, забезпечуючи миттєве аварійне відключення всього підключеного навантаження при виході напруги живлення за встановлені користувачем допустимі межі. Однак головним недоліком таких апаратних рішень є повна відсутність функції довгострокового логування даних та розширеної аналітики. Користувач має змогу спостерігати параметри мережі виключно в режимі реального часу і лише тоді, коли знаходиться безпосередньо біля електричного щитка.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Розглядаючи обмеження кожної з розглянутих категорій, розробка власного кастомного пристрою на базі продуктивного мікроконтролера ESP32 вбачається найбільш розумним інженерним рішенням. Даний підхід дозволяє ефективно поєднати можливість апаратного вимірювання великих струмів на глобальній ввідній лінії, притаманну модульним реле, з функціями гнучкої, незалежної серверної аналітики та віддаленого доступу, залишаючись при цьому в максимально доступному ціновому сегменті порівняно з професійним діагностичним обладнанням.

1.4 Обґрунтування вибору апаратної платформи та вимірювальної бази датчиків

Реалізація сучасного програмно-технічного засобу моніторингу електромережі базується на ідеї периферійних обчислень у рамках розширеної архітектури Інтернету речей. Цей підхід передбачає, що найбільш ресурсоємні процеси, такі як високочастотний збір даних, первинна цифрова фільтрація апаратних шумів та складна математична обробка масивів аналогових сигналів, відбуваються локально, безпосередньо на обчислювальних потужностях кінцевого пристрою [6, 26, 29]. Зважаючи на те, що дискретизація мережевої напруги та струму вимагає отримання тисяч вибірок щосекунди, пряма передача такого обсягу «сирих» даних на сервер є вкрай неефективною. Це може призвести до перевантаження каналу зв'язку, збільшення затримок та ризику втрати інформації при нестабільному з'єднанні. Натомість, завдяки периферійним обчисленням, на віддалений хмарний сервер передаються лише повністю готові, усереднені за певний проміжок часу параметри споживання. Дана архітектурна стратегія дозволяє зменшити вимоги до пропускної здатності мережі та забезпечити автономність прийняття рішень самою системою навіть за умов повної відсутності з'єднання з глобальною мережею Інтернет.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основним апаратним елементом системи, який повною мірою відповідає вимогам технічного завдання, виступає високопродуктивна система на кристалі ESP32 від компанії Espressif Systems. Вибір саме цього мікроконтролера базується на його технічних характеристиках, які значно перевершують конкурентні рішення, такі як 8-бітні платформи сімейства Arduino або класичний одноядерний чип ESP8266. Задачі безперервної цифрової обробки сигналів, інтегрування та розрахунку потужності вимагають значних ресурсів для роботи з числами з плаваючою комою, що робить ESP32 хорошим варіантом у своєму ціновому діапазоні [7, 14, 23]. Основні параметри платформи, що мають безпосередній вплив на якість та надійність процесу енергомоніторингу, деталізовано наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики платформи ESP32 для задачі енергомоніторингу

Параметр	Значення	Вплив на проєкт
Архітектура	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6	Окреме ядро для Wi-Fi стеку та окреме для опитування датчиків
Тактова частота	До 240 МГц	Забезпечує швидке виконання перетворень Фур'є та RMS розрахунків
АЦП	12-біт, 18 каналів	Дозволяє отримати 4096 рівнів квантування сигналу, що підвищує точність
Бездротові інтерфейси	Wi-Fi 802.11 b/g/n + Bluetooth	Гнучкість у передачі даних на сервер або пряме підключення до смартфона

Використання даної апаратної платформи є найбільш оптимальним та науково обґрунтованим підходом для задач глибокого аналізу мережі змінного

струму саме завдяки її двоядерній архітектурі, яка працює під управлінням операційної системи реального часу FreeRTOS. На відміну від класичних мікроконтролерів, де мережеві переривання можуть блокувати роботу основного циклу програми, ESP32 дозволяє жорстко розпаралелити обчислювальні процеси. Прив'язка задачі безперервного опитування АЦП до окремого ядра гарантує, що система працюватиме у режимі строгого реального часу, виключаючи будь-яку втрату масивів вибірок або зміщення фази під час інтенсивних сеансів передачі телеметрії на сервер. Розташування та функціональне призначення виводів плати розробника ESP32 наведено на рисунку 1.5.

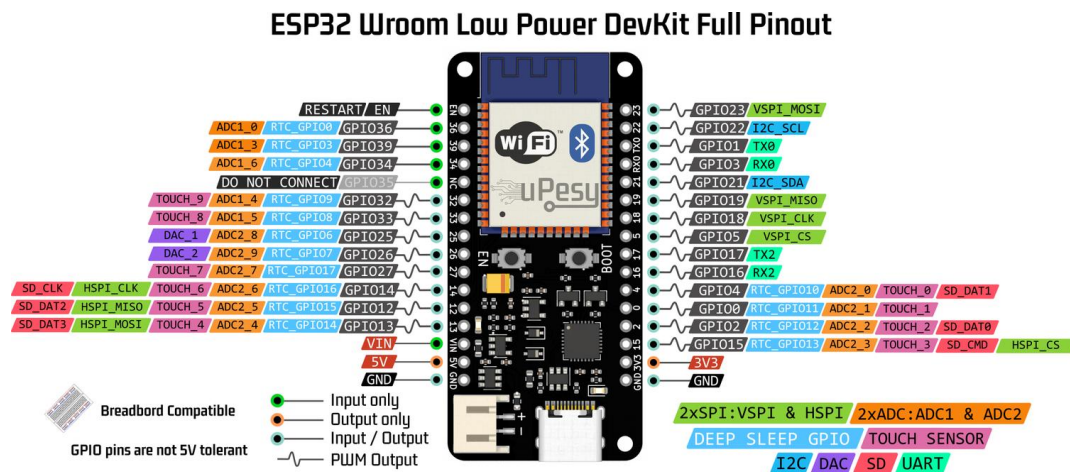


Рисунок 1.5 – Зображення плати ESP32 із pinouts [22]

Схемотехнічний підхід до проектування вхідних вимірювальних кіл пристрою базується на принципі повної гальванічної розв'язки, що є обов'язковою вимогою техніки електробезпеки при роботі з небезпечною для життя напругою 230 В. Для безпечного вимірювання напруги застосовується прецизійний метод масштабування сигналу за допомогою мініатюрного активного трансформатора напруги типу ZMPT101B.

Оскільки вимірювальний трансформатор струму серії SCT-013-030 генерує двополярний аналоговий сигнал змінного струму, його пряме

електричне підключення до виводів мікроконтролера ESP32 є неприпустимим. Внутрішній АЦП мікроконтролера є однополярним і здатен вимірювати лише позитивну напругу в діапазоні від 0 до 3.3 В, тому подача від'ємної півхвилі струму неминуче призведе до апаратного пошкодження портів вводу-виводу.

Для вирішення цієї проблеми схмотехнічне рішення передбачає обов'язкове використання спеціального кола зміщення постійної напруги. За допомогою прецизійного резистивного дільника напруги, що складається з двох однакових резисторів номіналом 4.7 кОм, та згладжуючого електролітичного конденсатора ємністю 100 мкФ, нульова точка змінного сигналу штучно і стабільно зміщується у безпечну позитивну область на рівень 1.65 В. Зовнішній вигляд модуля трансформатора напруги ZMPT101B зображено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Модуль трансформатора напруги ZMPT101B [26]

Вимірювання струму в системі реалізується виключно безконтактним методом, що дозволяє легко інтегрувати датчик у розподільчий щит без порушення цілісності заводської ізоляції силових кабелів. Для цієї мети найбільш доцільно використовувати датчики серії SCT-013-030. Вони являють собою трансформатори струму рознімного типу на основі феритового осердя, конструкція яких нагадує кліщі. Це дозволяє швидко та безпечно монтувати їх на ввідний фазний провідник без необхідності знеструмлення об'єкта або розриву ланцюга. На відміну від популярних напівпровідникових модулів, заснованих на ефекті Холла, рознімні трансформатори струму є повністю

пасивними електромагнітними елементами. Вони не потребують зовнішнього джерела живлення, значно менш чутливі до впливу зовнішніх паразитних магнітних полів, практично не мають температурного дрейфу нуля та забезпечують набагато кращу лінійність характеристик при вимірюванні великих струмів змінного типу. Конструктивне виконання безконтактного рознімного трансформатора струму SCT-013 наведено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Безконтактний трансформатор струму SCT-013 [27]

Програмний аспект вирішення поставленої задачі полягає у застосуванні математичних алгоритмів цифрової обробки сигналів для коректного обчислення середньоквадратичних значень напруги та струму [8]. Оскільки миттєві значення змінного струму безперервно змінюються за синусоїдальним законом із частотою 50 Гц, просте одноразове зчитування даних з АЦП не дає об'єктивної картини енергоспоживання. Тому мікроконтролер програмно здійснює високочастотну дискретну вибірку великого масиву даних за один повний період колювання мережі з подальшим їх математичним усередненням.

Отримані результати в подальшому використовуються мікроконтролером для векторного розрахунку повної, активної та реактивної потужності споживача. Після завершення локального циклу обчислень та нормалізації, підготовлені пакети даних транслюються підключеним клієнтам по протоколу WebSockets та паралельно архівуються у внутрішню файлову систему мікроконтролера у форматі текстового журналу [19].

Важливою вимогою до розроблюваного монітора є його повна автономність та здатність функціонувати безпосередньо від вимірюваної мережі змінного струму. Для вирішення задачі внутрішнього електроживлення було обрано малогабаритний імпульсний AC-DC перетворювач Hi-Link HLK-PM01. Вибір даного модуля зумовлений його високою надійністю, наявністю захисту від короткого замикання та перевантаження, а також здатністю стабільно видавати вихідну напругу 5 В при потужності до 3 Вт. Зовнішній вигляд імпульсного AC-DC перетворювача Hi-Link HLK-PM01 представлено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – AC-DC перетворювач Hi-Link HLK-PM01 [28]

1.5 Обґрунтування вибору технологій передачі даних та середовища IoT

Важливою складовою сучасної системи автоматизованого енергомоніторингу, окрім високоточного вимірювального обладнання, є надійна інформаційна інфраструктура, яка забезпечує безперебійну маршрутизацію зібраних телеметричних даних від мікроконтролера до кінцевого користувача. Оскільки пристрій розрахований на використання переважно у житлових, офісних або дрібних комерційних приміщеннях, найбільш раціональним стандартом бездротового зв'язку є технологія Wi-Fi. На відміну від спеціалізованих енергоефективних мереж великого радіусу дії, технологія Wi-Fi

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

не потребує розгортання додаткових базових станцій чи придбання специфічних шлюзів, оскільки відповідні маршрутизатори є стандартом у будь-якому сучасному будинку. Вбудований радіомодуль мікроконтролера ESP32 забезпечує високу швидкість з'єднання та підтримує сучасні протоколи шифрування, що гарантує достатній рівень інформаційної безпеки при передачі даних про споживання електроенергії в глобальну мережу.

Для забезпечення ефективного обміну даними між периферійним вузлом та системою моніторингу на прикладному рівні моделі OSI важливо обрати оптимальний протокол передачі. Традиційне використання протоколу HTTP у середовищі Інтернету речей часто є недоцільним через значні витрати, зумовлені великим обсягом службових заголовків, підвищеними вимогами до обчислювальних ресурсів мікроконтролера та циклічним встановленням TCP-з'єднань. Альтернативою є протокол MQTT, що реалізує асинхронну модель взаємодії «публікація-підписка» [1, 5, 20]. Основними перевагами цього протоколу є мінімальна розмірність заголовків пакетів, яка оптимізує споживання трафіку.

Інтегрована система підтримки різних рівнів якості обслуговування дозволяє забезпечити безумовну та гарантовану доставку найбільш пріоритетних пакетів даних. У першу чергу це стосується екстрених сповіщень про виникнення аварійних чи позаштатних відхилень поточних параметрів електричної мережі. Важливо, щоб такі тривожні повідомлення оперативно надходили безпосередньо до терміналів кінцевих споживачів або ж до централізованого сервера обробки інформації. Вбудований механізм контролю додатково захищає критичні дані від втрати під час нестабільного підключення. Загальну концептуальну схему побудови базової архітектури, а також фундаментальний принцип диспетчеризації та маршрутизації відповідних інформаційних потоків за протоколом MQTT, детально представлено на рисунку 1.9.

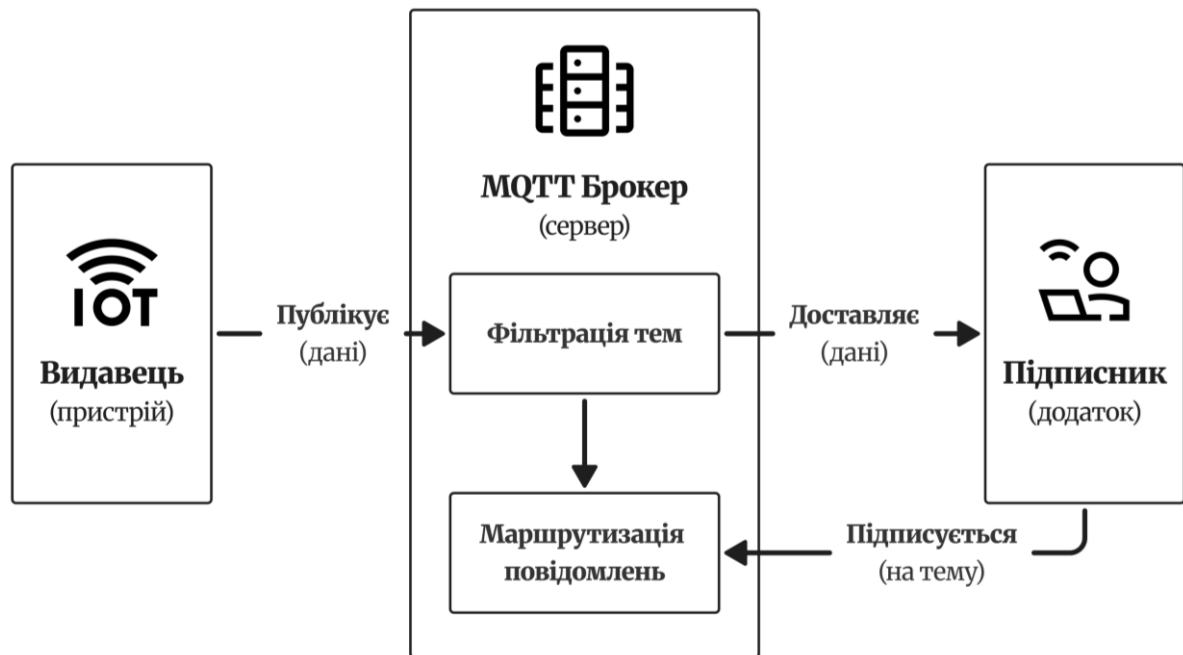


Рисунок 1.9 – Схема архітектури протоколу MQTT

Організація віддаленого моніторингу передбачає використання серверної інфраструктури, баз даних та брокерів повідомлень. Ринок пропонує широкий спектр готових хмарних IoT-платформ. Проте їх використання вимагає фінансових витрат, обмежує частоту відправлення даних та створює ризики витоку телеметрії.

У розробленій системі всі серверні функції будуть розгорнуті на мікроконтролері ESP32. Клієнтська частина оптимізується, стискається алгоритмом GZIP та розміщується у флеш-пам'яті мікроконтролера.

Для забезпечення максимальної сумісності та гнучкості, на базі ESP32 розгортається локальний MQTT-брокер. Це дозволить пристрою публікувати потокові виміри телеметрії у відповідні топіки для сторонніх споживачів або контролерів у межах локальної мережі Wi-Fi. Паралельно, для прямої передачі миттєвих значень на розроблений веб-дашборд з мінімальними витратами, обрано технологію WebSockets [30]. Вона забезпечує постійний двосторонній канал зв'язку, що дозволяє оновлювати графіки в реальному часі. Для

збереження історичних показників застосовано внутрішню файловою систему LittleFS, куди дані записуються у легкому текстовому форматі CSV.

1.6 Постановка задачі на розробку системи моніторингу електромережі

Головною метою кваліфікаційної роботи є проектування та практична реалізація сучасного програмно-технічного засобу для автоматизованого безперервного моніторингу параметрів електромережі змінного струму. Розроблюваний комплекс має забезпечувати високоточний збір первинних даних, їх глибоку цифрову обробку на стороні кінцевого пристрою та віддалену візуалізацію результатів у режимі реального часу. Дана система покликана вирішити поширену проблему відсутності оперативного контролю за якісними параметрами електроенергії, такими як миттєве значення напруги, фактична сила споживаного струму, а також коефіцієнт потужності. Відсутність доступу до цих важливих показників є характерним і суттєвим недоліком стандартних побутових лічильників, які орієнтовані виключно на фіксацію кількісних показників споживання для комерційного обліку. Для досягнення мети необхідно послідовно та систематично вирішити низку взаємопов'язаних науково-практичних завдань [22].

На початковому етапі виконання дослідження передбачається проведення глибокого теоретичного аналізу існуючих математичних методів цифрової обробки аналогових сигналів. Особливу увагу необхідно приділити алгоритмам дискретного обчислення середньоквадратичних значень напруги та струму, враховуючи синусоїдальний характер змінного струму в побутовій мережі із номінальною частотою 50 Гц. На основі отриманих результатів математичного моделювання буде здійснено обґрунтований вибір оптимальної елементної бази. Вибір мікроконтролера та вимірювальних трансформаторів базуватиметься на жорстких критеріях вимірювальної точності, швидкодії обчислювального ядра та загальної економічної доцільності розробки. Для виконання інтенсивних

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

математичних обчислень у якості апаратного ядра обрано високопродуктивний двоядерний мікроконтролер ESP32. Його багатопроцесорна архітектура дозволяє ефективно розпаралелити системні процеси: одне ядро буде виділено виключно для жорсткого в часі безперервного опитування аналого-цифрового перетворювача, тоді як інше ядро візьме на себе асинхронне обслуговування протоколів бездротового зв'язку.

Наступним кроком стане розробка електрично принципової схеми пристрою. Головною вимогою до апаратної частини є забезпечення надійної гальванічної розв'язки низьковольтних вимірювальних кіл мікроконтролера від небезпечної силової мережі змінного струму задля гарантування безпеки експлуатації та захисту мікроелектроніки від пробоїв. Схемотехнічне рішення базуватиметься на спільній інтеграції прецизійного активного трансформатора напруги типу ZMPT101B та безконтактного трансформатора струму рознімного типу серії SCT-013-030, що дозволяє проводити вимірювання без розриву силового кабелю.

Паралельно з апаратною розробкою необхідно сформулювати чіткі функціональні вимоги до вбудованого програмного забезпечення. Необхідно алгоритмічно реалізувати цифрову фільтрацію шумів та розрахувати оптимальну частоту опитування датчиків, яка передбачає високочастотну вибірку великого масиву даних за один повний період коливання мережі, що становить 20 мілісекунд. Це стане хорошим початком для створення спеціалізованої прошивки мікроконтролера ESP32, яка локально реалізуватиме первинну нормалізацію даних, квадратичне усереднення, векторний розрахунок активної, реактивної та повної потужності, а також підготовку пакетів телеметрії для їх подальшої передачі через мережеві протоколи.

Важливою складовою практичної реалізації є розгортання власної незалежної серверної інфраструктури та налаштування надійної мережевої взаємодії мікроконтролера з локальним MQTT-брокером. Цей етап включає розробку бази даних для збереження показників та проектування кастомного

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

веб-дашборду на базі технології WebSockets. Це забезпечить віддалене відображення всієї зібраної телеметрії на екрані смартфона або комп'ютера в режимі реального часу без залежності від сторонніх хмарних сервісів. Фінальним етапом стане створення методики калібрування вимірювальних каналів за допомогою еталонних приладів для мінімізації систематичних похибок вимірювання. Після цього буде проведено комплексне тестування зібраного дослідного зразка на реальному динамічному навантаженні з подальшою оцінкою відповідності отриманих метрологічних характеристик початковому технічному завданню. Результатом виконання усіх перелічених етапів має стати повністю працездатний прототип розумної системи енергомоніторингу, який дозволить користувачеві отримувати об'єктивну інформацію про стан електромережі, своєчасно виявляти аварійні режими для захисту дороговартісної техніки та свідомо підвищувати ефективність енергоспоживання.

1.7 Висновки до першого розділу

У першому розділі кваліфікаційної роботи було проведено дослідження предметної області автоматизованого моніторингу параметрів електромережі. За результатами аналізу виявлено, що стандартні прилади комерційного обліку не забезпечують користувача необхідною аналітикою щодо якості електроенергії, а стрибки напруги залишаються головною причиною виходу з ладу чутливої побутової та комп'ютерної техніки.

Проведений порівняльний аналіз показав, що професійні аналізатори є економічно недоцільними, тоді як побутові смарт-розетки мають обмеження щодо комутованого струму та прив'язані до хмарних екосистем. З огляду на це, обґрунтовано необхідність розробки власного незалежного програмно-технічного комплексу на базі технологій Інтернету речей.

Апаратною базою проєкту обґрунтовано обрано двоядерний мікроконтролер ESP32, який забезпечує достатню обчислювальну потужність

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для виконання паралельних потоків обробки даних та підтримки бездротових інтерфейсів зв'язку. Для реалізації схемотехнічної вимірjuвальної частини обрано модуль трансформатора напруги ZMPT101B та неінвазивний трансформатор струму SCT-013-030, вони дозволять здійснювати безпечно гальванічне розв'язування з високовольтною лінією та проводити складну математичну обробку масивів аналогових сигналів безпосередньо на кінцевому периферійному пристрої. Для забезпечення швидкої та енергоефективної передачі телеметричних даних визначено доцільність використання мережевого протоколу MQTT та технології WebSockets. З метою гарантування максимальної конфіденційності користувацьких профілів споживання та повної автономності системи прийнято рішення відмовитися від зовнішніх серверів та хмарних платформ, розгорнувши асинхронний веб-сервер та всі функції накопичення даних безпосередньо у вбудованій пам'яті мікроконтролера за допомогою локальної файлової системи LittleFS. Такий підхід забезпечує безперебійну роботу системи в межах локальної Wi-Fi мережі, захист від зовнішніх кібератак та незалежність від стабільності підключення до глобальної мережі Інтернет.

На основі проведених аналітичних досліджень та огляду існуючих аналогів було сформовано детальну постановку задачі на подальше проектування та розробку. Визначено, що наступний етап роботи має включати синтез загальної структурної схеми інформаційних потоків та розробку електрично принципової схеми з інтеграцією каскадів зміщення робочої точки для однополярного аналого-цифрового перетворювача. Також задача передбачає алгоритмізацію програмного забезпечення мікроконтролера для дискретного розрахунку середньоквадратичних значень струму, напруги та повної потужності в реальному часі, створення автономного модуля програмної симуляції для безпечного верифікування фільтрів на етапі відладки, та розробку адаптивного, інтерактивного клієнтського для наочної візуалізації графіків і ведення локальних логів.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ ТА ПРОГРАМНОЇ ПІДСИСТЕМ ЗАСОБУ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

2.1 Розробка загальної структурної схеми пристрою

Узагальнена структурна схема пристрою ілюструє зв'язок між вимогами предметної області та технічною реалізацією. Дана схема визначає склад основних функціональних вузлів програмно-технічного засобу та ілюструє логіку інформаційної взаємодії між ними, охоплюючи шлях від первинного вимірювання фізичних величин до фінальної візуалізації оброблених даних у браузері користувача. Архітектурно систему розділено на чотири взаємопов'язані ієрархічні рівні: вимірювальний, обчислювальний, комунікаційний та клієнтський. Структурна схема засобу представлена на рисунку 2.1.

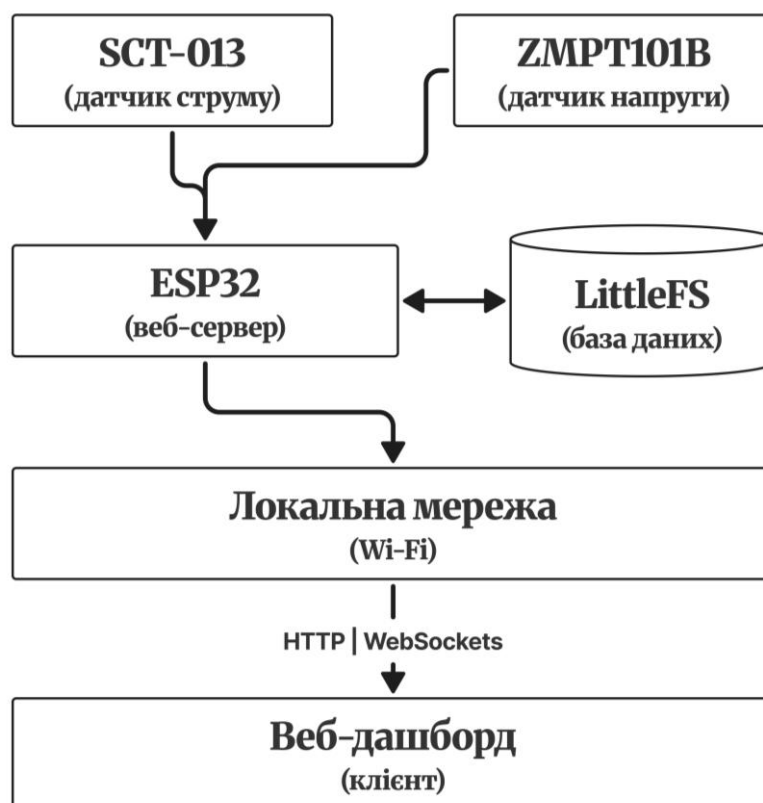


Рисунок 2.1 – Структурна схема програмно-технічного засобу

Вимірювальний рівень призначений для отримання аналогових сигналів, параметри яких прямо пропорційні миттєвим значенням напруги та струму в досліджуваній електромережі. До складу даного рівня входять прецизійний активний трансформатор напруги ZMPT101B та безконтактний рознімний трансформатор струму SCT-013-030. Головним завданням вимірювальних компонентів є точна фіксація фізичних показників та забезпечення обов'язкової повної гальванічної розв'язки пристрою від силової мережі змінного струму, що є базовою вимогою безпеки експлуатації.

Обчислювальний рівень проєктується на базі мікроконтролера ESP32. Цей вузол виконує роль інтелектуального центру периферійних обчислень, здійснюючи високочастотне опитування аналого-цифрових перетворювачів та математичну обробку отриманих масивів даних. Завдяки двоядерній архітектурі ESP32, процеси розрахунку середньоквадратичних значень та формування інформаційних пакетів відбуваються паралельно з обслуговуванням мережевих інтерфейсів, що гарантує роботу системи в режимі реального часу без втрати вимірювальних вибірок. ESP32 містить у собі 4Мб флеш-пам'яті, тому дана плата створюватиме свою локальну мережу, та міститиме в собі веб-дашборд, клієнту залишиться тільки підключитись та зайти за IP. Сервер виконуватиме запис поточної телеметрії у вбудовану файлову систему LittleFS, та здійснюватиме зворотне зчитування для вибірки даних на запит клієнта

Комунікаційний рівень забезпечує надійну бездротову передачу структурованої телеметрії від пристрою до сервера. Використовуючи інтегрований модуль Wi-Fi та легковаговий протокол прикладного рівня MQTT, система досягає високої швидкості обміну повідомленнями при мінімальному споживанні ресурсів мікроконтролера. Протокол MQTT дозволяє організувати ефективну маршрутизацію даних за принципом публікації повідомлень у відповідні теми, що забезпечує стабільність зв'язку навіть за умов низької якості мережевого покриття.

Клієнтський рівень формує аналітичне ядро системи та інтерфейс взаємодії з користувачем. Візуалізація даних реалізована через кастомний веб-дашборд, який за допомогою технології WebSockets забезпечує миттєве відображення графіків та індикаторів у режимі реального часу, надаючи користувачеві інформацію про стан електромережі.

Також конструкція передбачає можливість заміщення апаратного рівня програмним імітаційним модулем, що дозволяє проводити налагодження серверних алгоритмів та інтерфейсів незалежно від наявності фізичного з'єднання з датчиками.

2.2 Розробка електрично принципової схеми пристрою

Проектування апаратної частини програмно-технічного засобу моніторингу вимагає узгодження вихідних рівнів аналогових сигналів, що надходять від вимірювальних трансформаторів, із вхідними параметрами аналого-цифрових перетворювачів мікроконтролера ESP32. Оскільки внутрішня логіка та інтегровані периферійні модулі обраної обчислювальної платформи функціонують з номінальною напругою 3.3В, важливим інженерним завданням є забезпечення такого режиму роботи вхідних кіл, при якому амплітуда вимірюваних сигналів за будь-яких умов не виходитиме за межі допустимого діапазону [24]. Нехтування цими обмеженнями може призвести до апаратного пошкодження кристала мікроконтролера або виникнення суттєвих нелінійних спотворень при оцифруванні інформації.

Вихідні сигнали від датчиків струму та напруги мають синусоїдальну форму з наявністю від'ємної півхвилі. Враховуючи, що вбудований АЦП мікроконтролера є однополярним, від'ємні півхвилі змінного струму повинні бути коректно зміщені у позитивну область значень. Електрична принципова схема підключення периферійних вимірювальних модулів та допоміжних пасивних компонентів до плати ESP32 DevKit наведена на рисунку 2.2.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

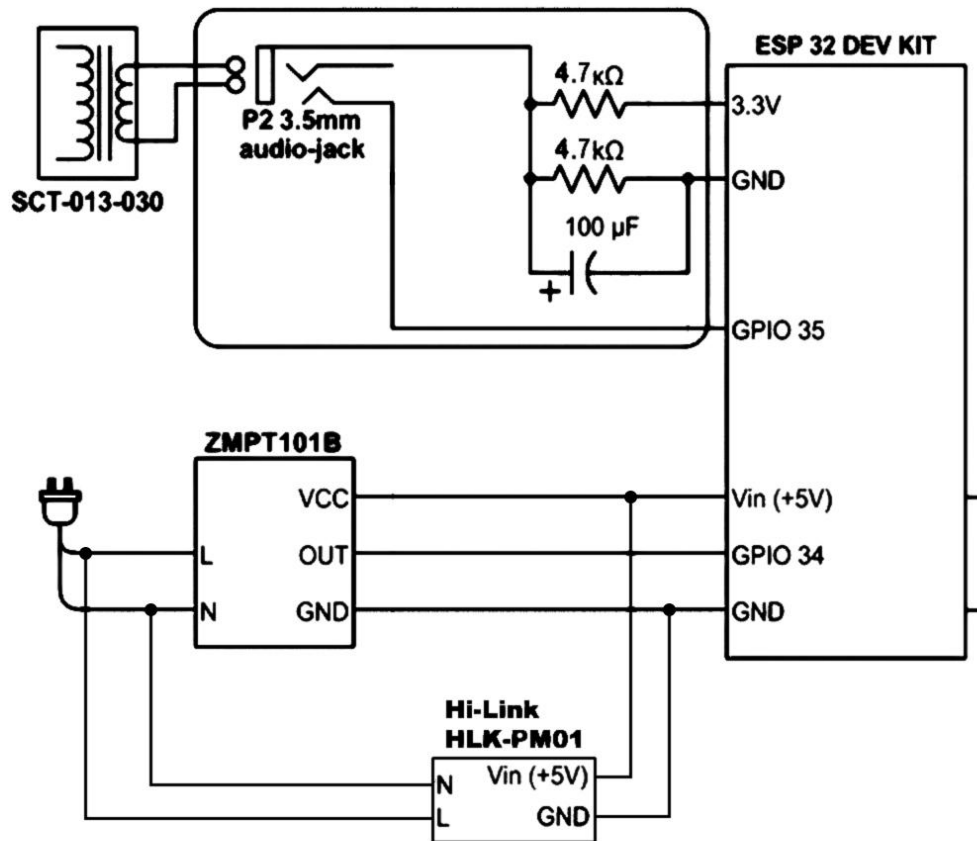


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова підключення датчиків до мікроконтролера

Для безперервного моніторингу напруги в мережі застосовується модуль на базі активного трансформатора ZMPT101B. Даний компонент забезпечує надійну гальванічну розв'язку між силовим ланцюгом 230 В та низьковольтною частиною пристрою. Завдяки вбудованому операційному підсилювачу, модуль дозволяє лінійно масштабувати високу напругу мережі у безпечний для мікроконтролера сигнал. Живлення активної частини датчика здійснюється від лінії 5 В, що забезпечує стабільність динамічного діапазону підсилення. Вихідний аналоговий сигнал знімається з піна OUT та подається на порт GPIO 34, де відбувається його дискретизація за допомогою 12-бітного перетворювача.

Вимірювання сили струму в системі буде реалізовано за допомогою трансформатора струму серії SCT-013-030. Дана модифікація датчика є найбільш

вигідною для домашнього використання, оскільки вона містить інтегрований навантажувальний резистор, що перетворює вторинний струм у напругу в діапазоні 0-1 В. Для узгодження цього двополярного сигналу з АЦП мікроконтролера передбачається застосування спеціалізованого кола зміщення постійної напруги. Воно спроектоване на базі резистивного ділника напруги, який складається з двох прецизійних резисторів номіналом 4.7 кОм. Дільник підключатиметься до шини живлення 3.3В, що дозволить сформувати стабільну середню точку з потенціалом 1.65 В.

Для ефективного подавлення високочастотних шумів та стабілізації потенціалу зміщення паралельно нижньому плечу ділника буде інтегровано електролітичний конденсатор ємністю 100 мкФ. Він створює шлях з низьким імпедансом для змінної складової сигналу, запобігаючи впливу завад на точність вимірювання. Один вивід датчика струму планується фіксувати на цій опорній точці, а інший – безпосередньо на вимірювальному вході GPIO 35. Корисний сигнал змінного струму накладається на постійну напругу зміщення, тому система може безперешкодно та з високою точністю фіксувати обидві півхвилі мережевого струму, забезпечуючи коректність подальших програмно-математичних розрахунків активної та повної потужності споживання.

Для наочної демонстрації процесу апаратного узгодження рівнів сигналів на рисунку 2.3 зображено графік перетворення вихідної напруги датчика струму. Червоною лінією позначено оригінальний двополярний сигнал від трансформатора SCT-013-030, який коливається відносно нульового потенціалу. Синьою лінією відображено результуючий сигнал після проходження через резистивний ділник напруги. Як видно з графіка, завдяки зміщенню постійної складової на 1.65 В, уся синусоїда успішно переноситься у позитивну область, що гарантує її безпечно та безперешкодне оцифрування аналого-цифровим перетворювачем мікроконтролера ESP32 без ризику апаратного пошкодження від'ємних півхвиль.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

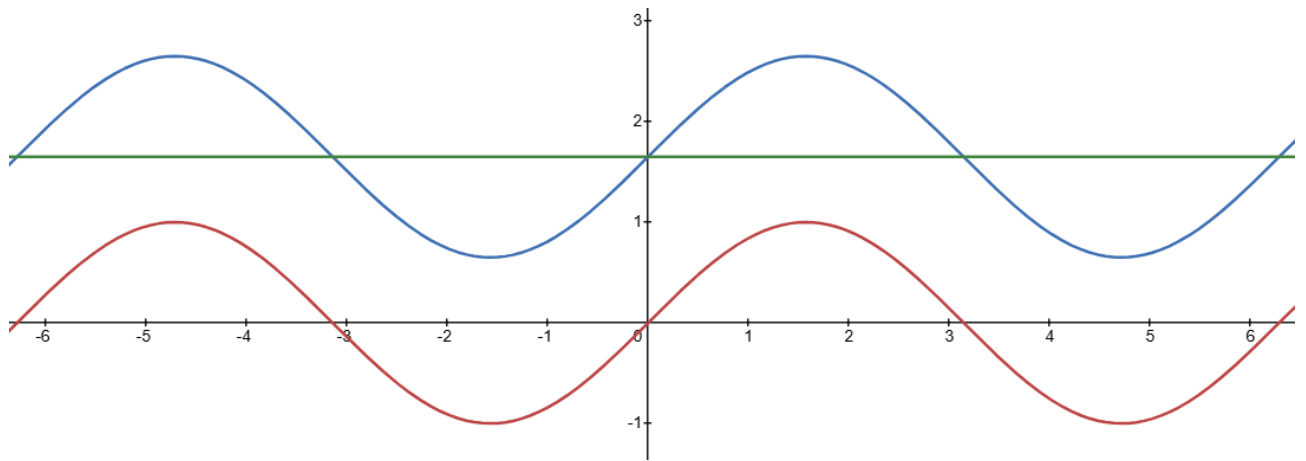


Рисунок 2.3 – Графік зміщення двополярного сигналу датчика струму в позитивну область

Живлення всієї системи буде організовано за паралельною схемою підключення до вхідної лінії 220 В. Модуль Hi-Link HLK-PM01 перетворює мережеву напругу у стабільний постійний струм з напругою 5 В, який подається на пін V_{in} мікроконтролера та живлення активної частини датчика напруги.

2.3 Розробка архітектури програмного забезпечення та логічної моделі бази даних

Головним завданням мікроконтролера на обчислювальному рівні є збір аналогових даних та їх первинна математична обробка. Для забезпечення точності вимірювань мікроконтролер програмно здійснює дискретну вибірку масиву даних за один повний період коливання мережі з подальшим розрахунком значення за алгоритмом дискретного інтегрування.

Програмна архітектура побудована за модульним принципом із використанням концепції кінцевих автоматів та асинхронної обробки подій, що дозволяє суміщати виконання важливих за часом обчислень із мережевими операціями [27].

Аналого-цифрове перетворення координується за допомогою апаратного таймера мікроконтролера. Зчитані значення накопичуються у кільцевому буфері

Кінець таблиці 2.1

power	float	Усереднене значення активної потужності навантаження за 10-хвилинний інтервал
kwh	float	Поточне інтегральне значення спожитої енергії на момент запису

Логічна модель сховища даних буде оптимізована під умови обмеженого об'єму енергонезалежної пам'яті LittleFS. Для запобігання передчасного зносу та переповнення флеш-носія об'ємом 4 Мб планується реалізувати алгоритм кільцевої ротації файлів логів. При досягненні цього ліміту система автоматично видаляє найстаріший інформаційний блок, звільняючи простір для поточних записів. Дані в пам'ять записуються не посторінково для кожного відліку, а через проміжний буфер в оперативній пам'яті об'ємом 256 байт.

Для забезпечення взаємодії в режимі реального часу серверна архітектура передбачає використання технології WebSockets. Це дозволить організувати постійний двосторонній канал зв'язку, через який сервер миттєво ретранслює отримані по MQTT дані на сторону клієнтського інтерфейсу, також це гарантує актуальність інформації, що відображається користувачеві, без необхідності періодичного оновлення веб-сторінки.

Мережева взаємодія на базі WebSockets проєктується через подієво-орієнтовану бібліотеку, яку планується інтегрувати в загальний асинхронний цикл веб-сервера. При підключенні нового клієнта сервер виконує процедуру рукоштовкування, виділяє ідентифікатор сесії та додає дескриптор з'єднання до активного списку розсилки. Для формату повідомлень буде передбачено оптимізацію шляхом застосування компактних текстових рядків із розділювачами замість масивних конструкцій JSON, що зменшує накладні витрати на передачу мережеских пакетів через бездротовий стек протоколів та

знижує затримку відображення графіків у веб-інтерфейсі до рівня менше 50 мілісекунд.

2.4 Техніко-економічний аналіз співвідношення вартості та конфіденційності даних

При проектуванні архітектури систем енергетичного менеджменту вирішальним є вибір моделі обробки та зберігання інформації. Класичний підхід, що базується на використанні комерційних хмарних платформ, передбачає низькі початкові витрати на розгортання, проте створює тривалі операційні витрати та ризики у сфері інформаційної безпеки. Застосування концепції периферійних обчислень на базі мікроконтролера ESP32 дозволяє змінити баланс витрат і забезпечити автономність володіння даними.

Для точної оцінки капітальних витрат на створення локальної периферійної системи проведено розрахунок вартості апаратних компонентів вимірювального макета. Специфікація необхідного обладнання та поточна ринкова вартість елементів наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Кошторис апаратних компонентів системи моніторингу

Найменування компонента	Кількість, шт.	Орієнтовна вартість, грн
Мікроконтролер ESP32	1	220
Датчик напруги ZMPT101B	1	150
Датчик струму SCT-013-030	1	350
Перетворювач живлення HLK-PM01 (5V)	1	140
Дискретні елементи кола зміщення (резистори, конденсатори)	1 комплект	40
Разом		900

Проведений розрахунок кошторису свідчить, що сумарні капітальні витрати на придбання елементної бази та розгортання апаратного макета становлять 900 гривень, що не перевищує встановлений ліміт у тисячу гривень. Низька вартість зумовлена використанням доступних на ринку напівпровідникових компонентів і датчиків, що дозволяє мінімізувати фінансові вкладення на етапі прототипування. На відміну від комерційних систем моніторингу, розроблене периферійне рішення повністю виключить подальші операційні витрати, оскільки функціонує без залучення сторонніх хмарних платформ. Користувач звільняється від необхідності внесення щомісячних абонентських платежів за оренду серверних потужностей, зберігання ретроспективних масивів телеметрії та використання комерційних інтерфейсів програмування.

Такі фінансові витрати забезпечують короткий термін окупності проєкту. Первинні інвестиції у створення локального засобу вимірювання повністю компенсуються вже за кілька місяців безперервної експлуатації пристрою, що демонструє високу економічну ефективність порівняно з пропрієтарними хмарними екосистемами. Економічний ефект посилюється автономністю локального накопичення даних у файловій системі LittleFS, безкоштовною маршрутизацією повідомлень усередині приватної мережі Wi-Fi та стійкістю до зміни тарифної політики сторонніх провайдерів. Систематизований порівняльний аналіз обох архітектурних рішень за фіксованими критеріями вартості розгортання, операційних витрат, масштабованості, конфіденційності та інфраструктурної незалежності деталізовано наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз хмарної та периферійної архітектур IoT-систем

Критерій порівняння	Хмарна архітектура	Локальна архітектура
Капітальні витрати	Мінімальні, лише датчики	Вищі, купівля мікроконтролера

Кінець таблиці 2.3

Операційні витрати	Постійні, оплата трафіку	Відсутні, локальна мережа
Конфіденційність даних	Низька, доступна провайдеру	Абсолютна, внутрішня пам'ять
Залежність від інфраструктури	Сильна, потрібен інтернет	Відсутня, повна автономність

Зіставлення наведених архітектурних рішень свідчить про те, що вибір локальної периферійної структури є оптимальним для побудови індивідуальних систем енергоменеджменту. Попри збільшення початкових апаратних витрат, такий підхід повністю нівелює ризик неконтрольованого зростання вартості експлуатації системи у разі зміни тарифних планів або лімітів використання хмарних інтерфейсів програмування додатків сторонніми провайдерами [31].

Окрім фінансової доцільності, локальне збереження інформації утворює закритий контур безпеки. Профілі енергоспоживання об'єкта, які містять непрямі відомості про розпорядок дня користувачів та склад побутової техніки, не виходять за межі приватної фізичної мережі. Відсутність потреби у постійній трансляції первинної телеметрії на зовнішні сервери знижує завантаженість каналів зв'язку та робить комплекс стійким до інфраструктурних збоїв чи кібератак на глобальні хмарні сервіси.

2.5 Проектування модуля програмної симуляції телеметричних даних

Теоретичне проектування та налагодження обчислювальних алгоритмів вбудованого програмного забезпечення на початкових етапах супроводжується ризиками, що пов'язані з необхідністю підключення макетної плати до високовольтних силових ліній. Безпосередня комутація незахищеного апаратного прототипу з мережею змінного струму під час відладки програмного

коду створює небезпеку електротравматизму та підвищує ймовірність виходу з ладу мікропроцесорної периферії через випадкові короткі замикання або комутаційні сплески напруги. З метою забезпечення безпечних умов розробки, верифікації цифрових фільтрів True RMS та ізоляції процесу проектування від нестабільних чинників зовнішнього середовища передбачається розробка автономного програмного модуля імітаційного моделювання вхідних сигналів. Головним інженерним завданням цього модуля є формування масивів синтетичних даних, які за своїми амплітудно-часовими параметрами та фазовими співвідношеннями мають бути еквівалентними показникам реальної промислової мережі електропостачання.

Для забезпечення попереднього тестування розроблюваних алгоритмів обробки даних необхідно створити адекватну математичну модель сигналів. Тоді може оцінити стійкість системи до зовнішніх чинників ще на етапі проектування, мінімізуючи потребу в залученні дорогого фізичного обладнання. Завданням створеного інструменту є точне відтворення фізичних процесів, що відбуваються у вимірювальних колах під час моніторингу параметрів електричної мережі.

Процес симуляції планується реалізувати шляхом покрокової генерації дискретних значень напруги та струму, прив'язаних до фіксованих часових інтервалів дискретизації. Проектований програмний скрипт має формувати базову синусоїдальну хвилю з номінальною частотою 50 Гц, амплітудні межі якої відповідатимуть масштабованим рівням сигналів із виходів аналогових датчиків. Для наближення імітаційної моделі до реальних умов експлуатації передбачено програмне накладання псевдовипадкового шуму із заданою дисперсією на чисту синусоїду. Це рішення дозволить відтворити теплові завади аналогового фронтенду, апаратні похибки квантування інтегрованого перетворювача та високочастотні наведення в лініях зв'язку. Візуалізований результат роботи алгоритму генерації та імітаційного накладання спотворень представлено на рисунку 2.4.

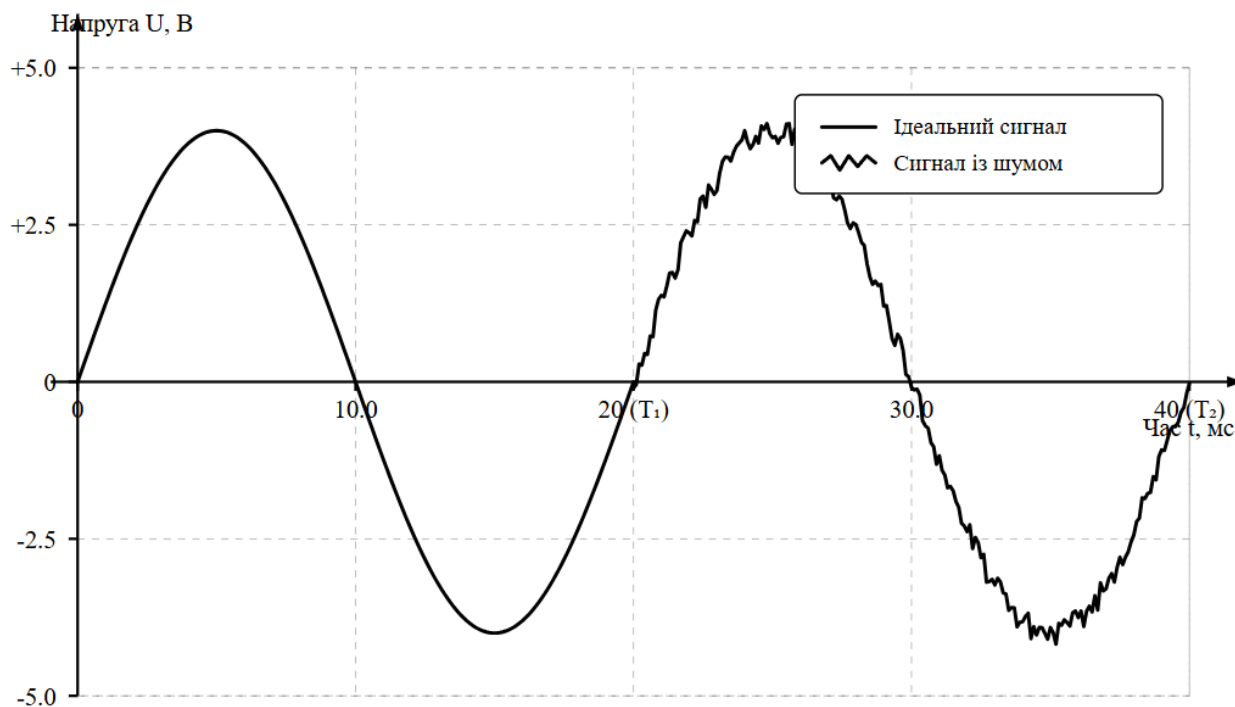


Рисунок 2.4 – Часова діаграма синтезованого вимірювального сигналу

Порівняльний аналіз цих станів дозволить оцінити здатність алгоритмів прошивки мікроконтролера ефективно відфільтровувати паразитні сигнали аналого-цифрового перетворювача та підтвердити математичну стійкість обчислювального ядра до переповнення змінних під час дискретного інтегрування. Математичне зіставлення масивів ідеального та зашумленого сигналів у режимі реального часу уможливило точне визначення коефіцієнта придушення завад для розроблених цифрових фільтрів True RMS. Обчислення інтегральних значень на основі синтезованої вибірки дозволяє верифікувати коректність роботи накопичувальних регістрів і таймерів апаратних переривань без ризику апаратного збою. Запланована послідовність виконання операцій, логіка роботи кінцевого автомата та загальна блок-схема алгоритму функціонування модуля програмної симуляції наведені на рисунку 2.5.

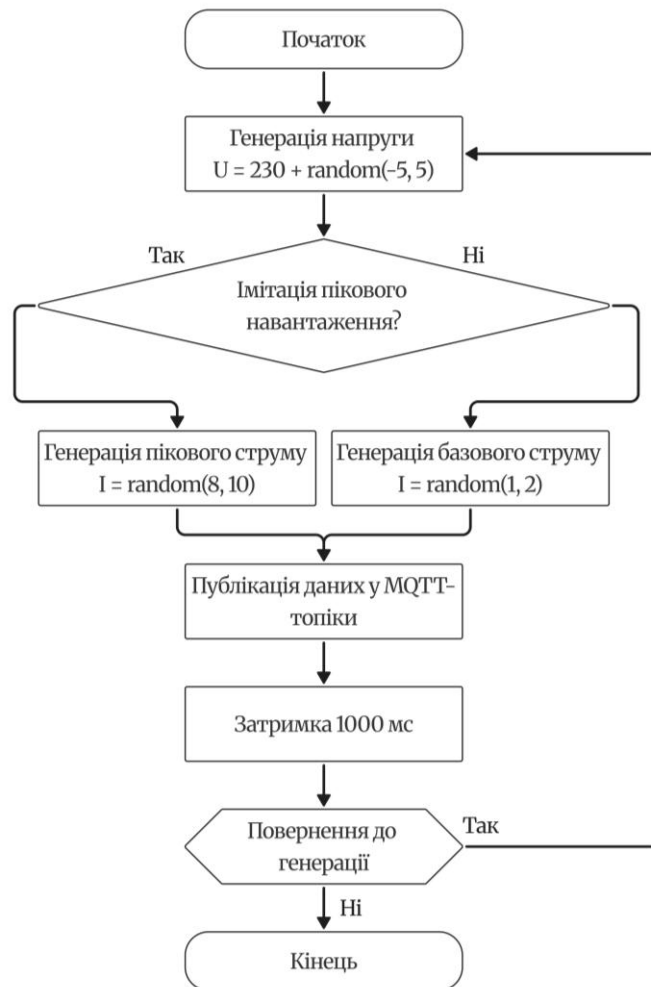


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритму функціонування модуля програмної симуляції

Алгоритм передбачає постійну генерацію значень напруги з урахуванням мережних коливань, тоді як динаміка зміни сили струму визначається логічним блоком імітації пікового навантаження, що дозволяє моделювати реальні сценарії енергоспоживання. Програмно забезпечується відтворення нестационарних процесів, таких як короткочасні просідання амплітуди, імпульсні викиди та гармонічні спотворення, зумовлені роботою пристроїв із безтрансформаторними блоками живлення. Зміна споживаного струму керується через кінцевий автомат, який перемикає стани очікування, базового споживання та перехідного режиму. Пусковий струм імітується у вигляді згасаючого

експоненціального імпульсу із чотирикратним перевищенням номінальних значень, що необхідно для перевірки стійкості обчислювального ядра до переповнення змінних під час інтегрування.

Програма буде функціонувати у двох режимах, розділених відповідно до етапів розробки та безпосередньої експлуатації системи. На стадії проектування та калібрування веб-інтерфейс і логічні модулі розгортаються на локальній робочій станції під керуванням серверної платформи Node.js. Запуск ініціює фоновий процес генерації синтетичних часових рядів, що дає змогу проводити навантажувальне тестування програмного забезпечення без застосування фізичних датчиків [33].

При переході до цільового режиму експлуатації, коли скомпільований бінарний код і статичні файли інтерфейсу завантажуються у флеш-пам'ять мікроконтролера ESP32, веб-сервер пристрою починає працювати автономно. Через обмеження обчислювальної потужності апаратної платформи та відсутність операційної системи виконання серверних скриптів симуляції безпосередньо на мікроконтролері не реалізується. У цьому стані обробка запитів до інтерфейсів програмування додатків, відповідальних за генерацію штучних сигналів, примусово блокується. Веб-інтерфейс переходить у стан відображення телеметрії в реальному часі, отримуючи дані виключно через канали аналого-цифрового перетворювача, підключеного до датчиків струму та напруги, а елементи керування симулятором деактивуються на рівні фронтенд-архітектури.

2.6 Проектування графічного інтерфейсу користувача та візуалізації телеметрії

Проектування графічного інтерфейсу користувача (GUI) та системи візуалізації телеметрії виступає завершальним етапом теоретичного розроблення архітектури пристрою. Оскільки розроблюваний програмно-технічний засіб

орієнтований на безперервний моніторинг параметрів електромережі в режимі реального часу, до інтерфейсу висуваються вимоги щодо його адаптивності під різні типи клієнтських пристроїв, мінімальної затримки відображення та стабільності роботи без необхідності примусового оновлення сторінки браузера.

Архітектурна побудова дашборду базується на принципах модульності, що дозволяє організувати простір із фокусуванням уваги на важливих параметрах. Фронтенд-частина планується за структурою односторінкового веб-досунку, де взаємодія з користувачем відбувається в межах єдиного екранного простору без перезавантаження сторінок [34, 35]. Адаптивність під різні типи мобільних та стаціонарних пристроїв закладається на рівні сітки елементів, яка передбачає динамічну зміну масштабу та розташування віджетів залежно від роздільної здатності дисплея [32].

Схематичний каркас інтерфейсу головного вікна дашборду представлений на рисунку 2.5.



Рисунок 2.6 – Проектний макет інтерфейсу системи моніторингу

Функціональне ядро інтерфейсу на рівні каркасу зосереджене у верхньому блоці миттєвих показників. Тут зарезервовано місця під три незалежні віджети для відображення основних електричних величин: активної потужності, напруги та сили струму. Планується, що кожен віджет міститиме не лише поточне цифрове значення, але й додаткові текстові індикатори для виведення математично розрахованих середніх та максимальних зафіксованих показників за поточну сесію. Також у структурі віджетів передбачено зони для колірної індикації виходу параметрів за межі номінальних значень мережі.

Центральна зона динамічної візуалізації відведена під інтерактивні часові графіки. Згідно з макетом, верхнє графічне поле призначене для одночасного виведення кривих активної потужності та сили струму. Використання двох незалежних вертикальних осей ординат на одному полі дозволяє наочно фіксувати кореляцію між споживаним струмом та загальною потужністю під час комутації навантаження. Нижнє графічне поле зарезервоване під лінійний графік коливань напруги для моніторингу стабільності мережі. Оновлення графічних полів планується реалізувати на базі подій, що виникають при надходженні нових пакетів даних із частотою від 1 до 5 Гц залежно від режиму роботи системи.

Нижня частина каркасу містить блоки аналітики та інженерного керування. Аналітичний блок інтегрується з логічною моделлю сховища даних і містить селектори вибору дат, часових інтервалів та елементи ініціалізації запитів для ретроспективного аналізу збережених CSV-файлів логів. Поруч розташований вузол керування програмною симуляцією, призначений для тестування серверної частини та перевірки алгоритмів фільтрації у процесі розроблення. Логіка проєктування передбачає, що цей вузол є тимчасовим елементом верифікації, який відобразатиметься лише під час запуску інтерфейсу в середовищі розробника на базі платформи Node.js і буде автоматично приховуватися у фінальній версії інтерфейсу при автономній роботі пристрою від мікроконтролера ESP32.

2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено теоретичне проектування апаратно-програмних складових системи моніторингу стану електромережі та сформовано логічну модель її функціонування.

За результатами аналізу та розрахунків сформовано чотирирівневу архітектуру системи. Запропонована ієрархічна структура визначає послідовність обробки телеметрії від моменту фіксації аналогового сигналу давачами до його фінального відображення в інтерфейсі користувача.

Розроблено схему принципову електричну вимірювального модуля на базі системи на кристалі ESP32. Обґрунтовано вибір датчиків напруги ZMPT101B та струму SCT-013-030, а також розраховано параметри схем інструментального зміщення сигналу, що забезпечує узгодження рівнів із діапазоном роботи 12-бітного аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера.

Обґрунтовано застосування концепції периферійних обчислень для забезпечення автономності пристрою. Запропоновано логічну модель довгострокового зберігання телеметрії у файловій системі LittleFS із фіксацією параметрів у форматі CSV через проміжний буфер оперативної пам'яті. Визначено структуру інформаційного обміну, в якій протокол MQTT призначений для інтеграції пристрою із зовнішніми інфраструктурними вузлами автоматизації, а технологія WebSockets – для потокової ретрансляції даних на сторону клієнта без перезавантаження сторінок.

Розроблено алгоритмічну модель модуля програмної симуляції вхідних сигналів на базі кінцевого автомата, яка дозволяє виконувати верифікацію обчислювального ядра на етапі розробки за допомогою генерації штучних збурень, просідань та пускових струмів. Сформовано модульний каркас графічного інтерфейсу користувача та визначено геометрію розміщення інформаційних віджетів і динамічних графіків з урахуванням вимог до адаптивності відображення на різних типах клієнтських пристроїв.

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ

3.1 Апаратна реалізація та монтаж пристрою

Практичне втілення розробленої системи моніторингу електромережі передбачало послідовний перехід від теоретичних електричних схем і структурних моделей до створення працездатного фізичного прототипу пристрою. Цей етап є необхідним для комплексної верифікації схемотехнічних рішень, закладених на стадії проектування, та оцінки їхньої стійкості в реальних умовах експлуатації. Процес компонування та монтажу вимірювального комплексу було організовано поступово, починаючи від підготовки несучих конструкцій захисного корпусу і закінчуючи фінальним підключенням комунікаційних і сигнальних ліній до виводів мікроконтролера. У створеній апаратній архітектурі в якості головного обчислювального ядра виступає мікроконтролер ESP32, який здійснює периферійну обробку даних, а для прецизійного вимірювання фізичних величин використовуються модуль трансформатора напруги ZMPT101B та неінвазивний трансформатор струму SCT-013-030.

3.1.1 Розробка корпусу для виробу

Першим етапом апаратної реалізації вимірювального комплексу стала інженерна підготовка захисного корпусу. Необхідність проектування ізоляційної оболонки зумовлена суворими нормативними вимогами техніки безпеки, бо всередині пристрою здійснюється пряме розведення та комутація ліній змінного струму з небезпечною для життя мережевою напругою 220 В. Для створення тривимірної моделі було обрано середовище параметричного програмування OpenSCAD, яке дозволяє чітко задавати геометричні розміри та товщину стінок за допомогою математичних скриптів. Спроектований кастомний корпус має фіксовані габаритні розміри 100x65x45 мм, що є оптимальним для компактного

					КвРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміщення всієї електронної та силової компонентної бази. Процес візуалізації розробленої цифрової моделі, її внутрішніх пазів та загальних геометричних параметрів наведено на рисунку 3.1.

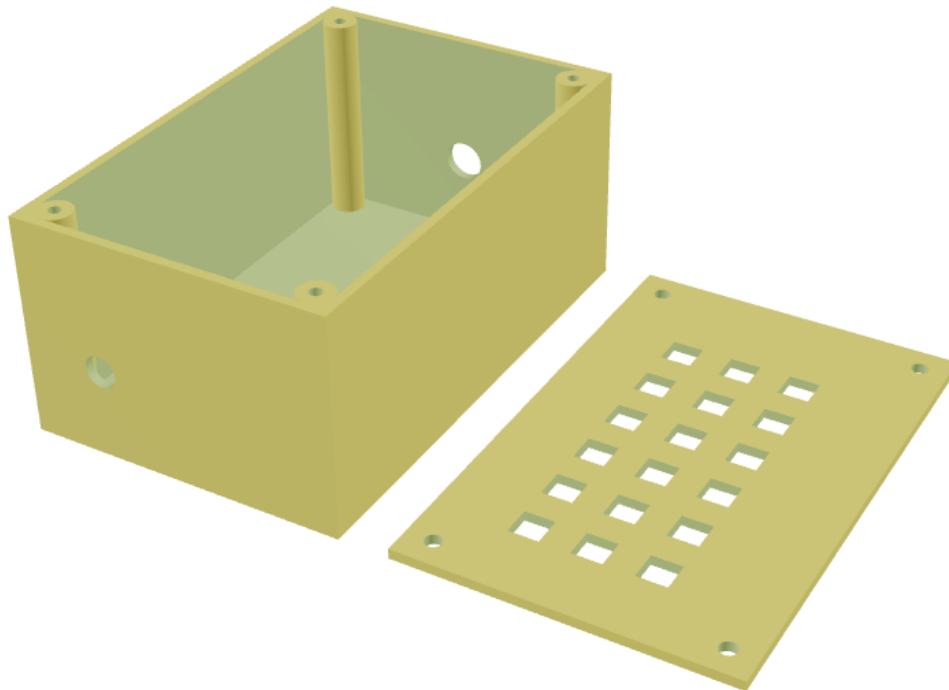


Рисунок 3.1 – Візуалізація параметричної 3D-моделі корпусу в середовищі проектування OpenSCAD

У корпусі передбачено спеціальні отвори для безпечного введення та виведення силових кабелів. Зважаючи на тепловиділення перетворювача живлення Hi-Link під час тривалого навантаження, у стінках виробу сформовано вентиляційні решітки. Вони створюють умови для природної циркуляції повітря та охолодження електронних плат.

Фізичне втілення елементів корпусу реалізовано за допомогою технології 3D-друку. Матеріалом обрано зносостійкий пластик, що має високу міцність, діелектричні властивості та стійкість до температурних впливів. Модульна структура оболонки дозволяє зручно проводити монтаж та обслуговування внутрішньої електроніки. Загальний вигляд окремих конструктивних елементів

корпусу, отриманих після завершення процесу друку, представлено на рисунку 3.2 у розібраному стані.

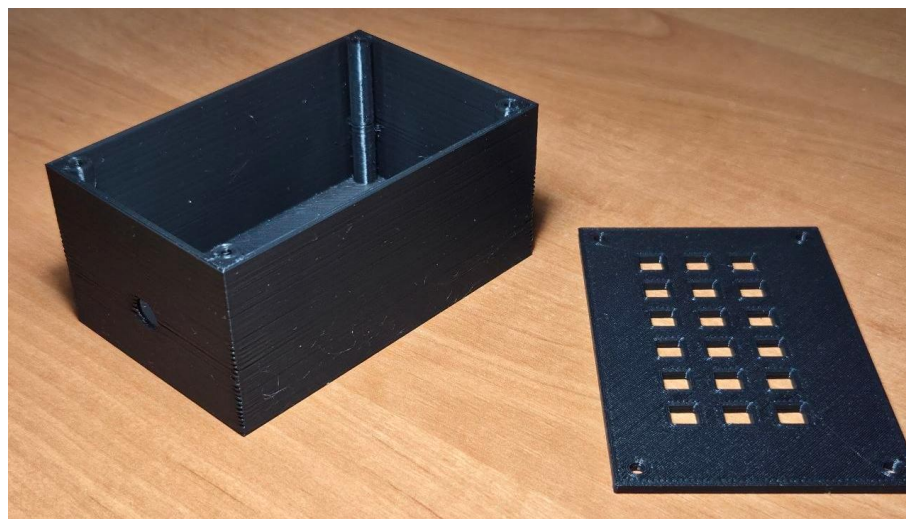


Рисунок 3.2 – Основні деталі корпусу після етапу 3D-друку

Після фінішної обробки поверхонь було проведено перевірку точності стикування всіх вузлів. Результат фінальної збірки корпусу, що готовий до монтажу електронних компонентів, зображено на рисунку 3.3.

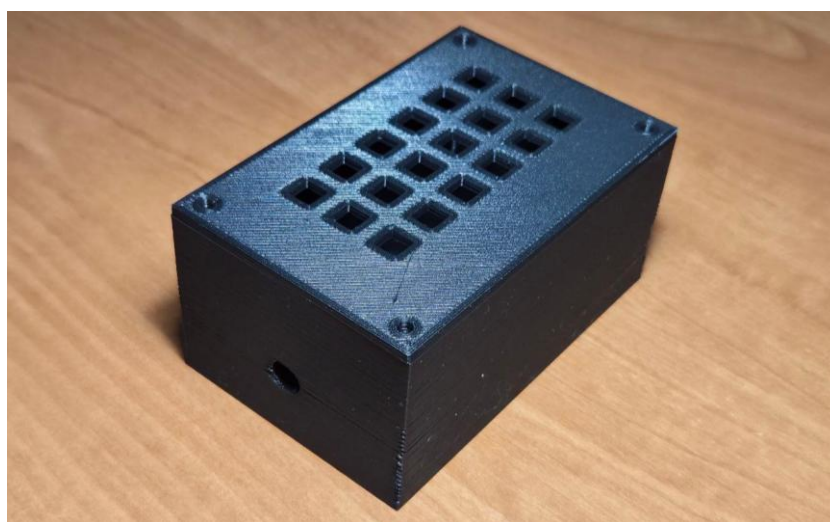


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд корпусу у зібраному стані

3.1.2 Монтаж силової підсистеми та вузла живлення

Розгортання силової підсистеми та інтеграція вузла внутрішнього живлення є початковою стадією апаратної реалізації, визначаючи стабільність функціонування обчислювальних елементів та загальну безпеку експлуатації вимірювального пристрою. Головне завдання цього етапу полягає у створенні надійного електричного контуру, здатного забезпечувати безперервне енергопостачання всіх активних компонентів системи та одночасно подавати вхідний високовольтний сигнал на вимірювальні вузли.

Комутація вхідних ліній здійснюється шляхом паралельного підключення провідників магістральної мережі змінного струму до вимірювальних контактів модуля трансформатора напруги ZMPT101B та до вхідних пінів імпульсного перетворювача Hi-Link HLK-PM01. Для виконання з'єднань застосовуються ізольовані мідні провідники відповідного перерізу, а місця електричних стиків додатково захищаються діелектричним матеріалом для унеможливлення виникнення коротких замикань або пробойів усередині корпусу. Паралельна топологія подачі напруги дозволяє суміщати безперервний моніторинг параметрів мережі змінного струму з генерацією постійного потенціалу для внутрішніх потреб апаратної частини.

Інтегрований модуль живлення Hi-Link HLK-PM01 виконує функцію понижувального AC-DC перетворювача, який трансформує вхідну напругу 220 В у стабільну постійну напругу номіналом 5 В при максимальній потужності 3 Вт. Зазначений рівень потужності задовольняє енергетичні вимоги двоядерного мікроконтролера в режимах інтенсивного використання бездротових інтерфейсів зв'язку та запобігає тепловому перевантаженню силових елементів.

Вихідна лінія 5 В від перетворювача Hi-Link підключається до вхідного піна Vin мікроконтролера ESP32, де подається на вбудований лінійний регулятор напруги обчислювального чипа. Паралельно від цієї ж лінії організовано живлення активної схеми операційного підсилювача, що входить до складу

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

модуля датчика напруги ZMPT101B. Стабільне низьковольтне живлення аналогових каскадів є необхідним для збереження лінійності коефіцієнта підсилення та мінімізації похибок при масштабуванні синусоїдального сигналу. Загальне просторове розташування силових елементів, трасування провідників та компонування модулів усередині захисного корпусу наведено на рисунку 3.4.

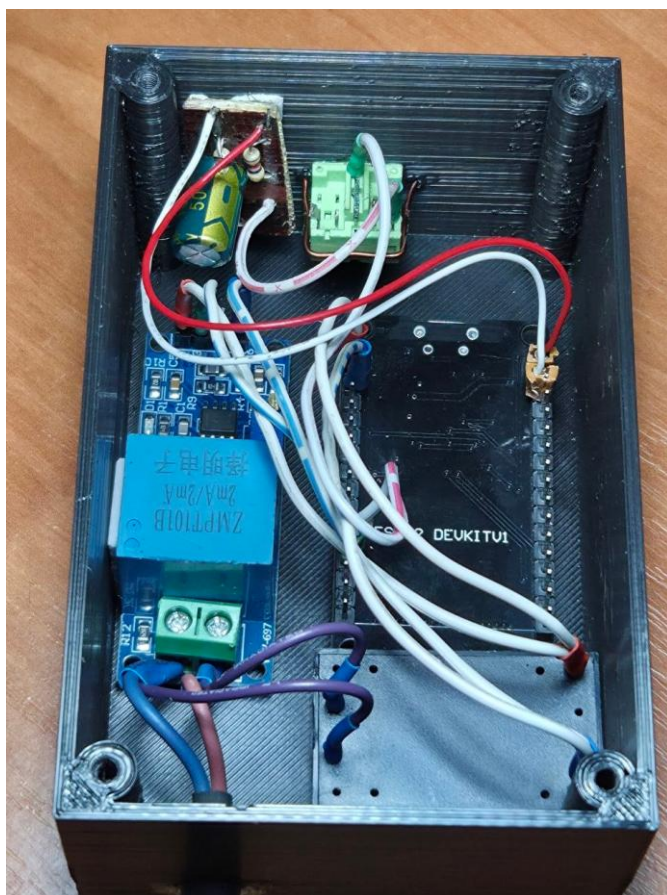


Рисунок 3.4 – Внутрішнє компонування силових ліній та модулів живлення системи

3.1.3 Реалізація вимірювальних кіл та вузла зміщення

Було реалізовано монтаж вимірювальних кіл для зняття показників напруги та струму. Основним завданням цього рівня є перетворення фізичних

					КвРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

величин електромережі у пропорційні аналогові сигнали, придатні для подальшої обробки мікроконтролером.

Для безпечного вимірювання напруги в системі застосовано активний трансформатор ZMPT101B. Даний модуль забезпечує необхідну гальванічну розв'язку між високовольтною мережею та низьковольтною логічною частиною пристрою. Вихідний аналоговий сигнал із піна OUT датчика напруги подається безпосередньо на вхід GPIO 34 мікроконтролера ESP32.

Вимірювання сили струму реалізовано за допомогою неінвазивного трансформатора SCT-013-030. Оскільки цей датчик генерує двополярний сигнал змінного струму, а вбудований АЦП мікроконтролера ESP32 є однополярним і працює в діапазоні 0-3,3 В, пряме підключення сенсора є неправильним. Подача від'ємної півхвилі на вхід мікроконтролера може призвести до апаратного пошкодження порту або виникнення спотворень у вимірах.

Тому було спроектовано та змонтовано спеціалізоване коло зміщення постійної напруги, яке формує «віртуальний нуль». Вузол реалізовано на основі прецизійного резистивного дільника, який складається з двох резисторів номіналом 4,7 кОм кожен. Дільник підключено до шини живлення 3,3 В, що дозволяє отримати стабільну середню точку з потенціалом 1,65 В. Для придушення високочастотних шумів та стабілізації потенціалу зміщення паралельно нижньому плечу дільника встановлено конденсатор ємністю 100 мкФ.

Підключення рознімного трансформатора струму здійснюється через спеціалізоване гніздо роз'єму Audio Jack діаметром 3,5 мм. Використання такого комутаційного елемента дозволяє швидко від'єднувати датчик під час транспортування або проведення регламентних сервісних робіт без необхідності демонтажу всього моноблока. Сигнальний провідник від цього гнізда через узгоджувальний резистивний дільник напруги схеми зміщення потенціалу підключено до вхідного аналогового порту GPIO 35 мікроконтролера.

Конструктивне виконання вузла підключення периферійного сенсора разом із виведеним назовні роз'ємом на бічній грані захисного корпусу наведено на рисунку 3.5.

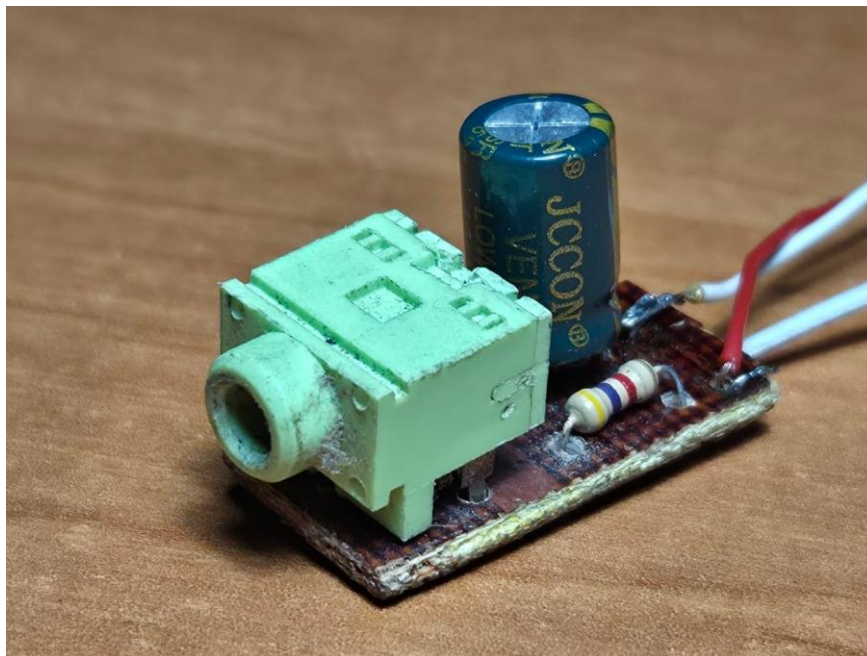


Рисунок 3.5 – Реалізація кола зміщення напруги та роз'ємів підключення

3.1.4 Фінальна комутація та інтеграція мікроконтролера

Процес апаратного монтажу розробленого пристрою охоплює комплекс заходів із просторового компонування, електричного об'єднання функціональних вузлів та їхнього надійного закріплення всередині захисної оболонки. При розміщенні елементів особлива увага приділялася мінімізації довжини з'єднувальних провідників та фізичному розділенню силових кіл змінного струму від низьковольтних сигнальних ліній з метою запобігання виникненню взаємних наведень.

Центральний обчислювальний модуль на базі мікроконтролера ESP32 встановлено на стійках, які інтегровані в нижню основу оболонки. Гвинтове кріплення плати забезпечує її стабільну нерухомість та унеможливорює

випадковий контакт струмопровідних доріжок із дном корпусу. Для підвищення стійкості до вібраційних та механічних навантажень, що виникають під час транспортування або тривалої експлуатації комплексу, точки сполучення монтажних стінок і друкованих плат додатково посилено за допомогою полімерного термоклейового складу, який виконує роль фіксуючого демпфера.

Після завершення стадії механічного позиціонування модулів виконано монтаж та комутацію слабострумів міжплатних з'єднань. Комутація вимірювальних каналів здійснена тонкими ізольованими мідними провідниками з мінімальним радіусом вигину. Аналоговий інтерфейс модуля вимірювання напруги ZMPT101B, який видає масштабований і відцентрований сигнал, з'єднано з портом вводу-виводу GPIO 34, закріпленим за входом вбудованого аналого-цифрового перетворювача мікроконтролера. Провідник від друкованої плати вузла зміщення датчика струму підведено до виводу GPIO 35. Такий розподіл портів дозволяє задіяти виділені апаратні канали внутрішнього перетворювача, які забезпечують необхідну швидкість обробки сигналів.

Подачу електричного живлення на систему організовано від виходу джерела Hi-Link, яке забезпечує необхідну гальванічну розв'язку та генерує стабільну постійну напругу номіналом 5 В. Цю лінію живлення підключено безпосередньо до вхідного виводу V_{in} на платі розробника. Далі вбудований лінійний регулятор понижує та додатково згладжує напругу до цільового робочого рівня, необхідного для безперебійного функціонування мікроконтролерного чіпа та підключеної периферії. Загальне просторове розташування компонентів, ергономічне укладання провідників, точність виконаних паяних з'єднань для усунення паразитних наведень, а також фінальний вигляд зібраного вимірювального блока у захисній діелектричній оболонці детально представлено на рисунку 3.6.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.6 – Фінальне компонування та загальний вигляд пристрою

3.2 Розробка вбудованого програмного забезпечення мікроконтролера ESP32

Розробка та налагодження вихідного коду здійснювалися в інтегрованому середовищі Arduino IDE. Математичне обчислення діючих показників змінного струму базується на функціях спеціалізованої бібліотеки EmonLib. Для підвищення швидкості опитування вхідних аналогових каналів розрядність вбудованого аналого-цифрового перетворювача програмно обмежена десятьма бітами за допомогою відповідної функції встановлення роздільної здатності. Це

дозволяє отримати необхідну кількість дискретних точок протягом одного періоду коливання напруги мережі.

Обробка інформаційних масивів виконується у фоновому робочому циклі прошивки. Програма здійснює послідовне сканування двадцяти напівхвиль силового сигналу, виконуючи до двох тисяч аналогових вибірок, що забезпечує точність визначення середньоквадратичних значень струму та напруги. На основі цих даних мікроконтролер розраховує активну потужність навантаження. Для зменшення впливу фонових наведень в умовах відсутності споживання впроваджено логічний фільтр відсікання. Якщо обчислений рівень напруги падає нижче 50 В, поточні показники примусово прирівнюються до нуля.

Мікроконтролер також функціонує як автономний обчислювальний вузол для інтегрального обліку енергоспоживання. Спираючись на дані про активну потужність та часові інтервали між замірами, система розраховує кількість спожитої енергії в кіловат-годинах за принципом кумулятивного сумування. Оброблені параметри щосекунди транслюються в локальну мережу через протоколи бездротового зв'язку та потокових веб-сокетів. Паралельно показники додаються до сумувальних реєстрів для подальшого математичного усереднення та циклічного логування у текстовий файл локальної файлової системи пристрою.

Таблиця 3.1 – Конфігураційні параметри та калібрувальні коефіцієнти системи

Назва параметра	Значення	Призначення та фізичний зміст
V_CAL	297.0	Коефіцієнт масштабування для трансформатора напруги ZMPT101B
I_CAL	30.0	Коефіцієнт калібрування для датчика струму SCT-013-030

Кінець Таблиці 3.1

ADC Resolution	12 біт	Програмно встановлена роздільна здатність аналого-цифрового перетворювача
Phase Shift	1.7	Параметр корекції фазового зсуву для вимірювального кола
TARIFF	4.32	Вартість одиниці електроенергії для розрахунку витрат

Мережева взаємодія пристрою реалізована за допомогою вбудованого брокера повідомлень протоколу MQTT, що дозволяє організувати децентралізований обмін даними в межах локальної мережі Wi-Fi. Ініціалізація мережевих сервісів та відкриття відповідних портів для підключення зовнішніх клієнтів відбуваються автоматично після переведення мікроконтролера в режим власної точки доступу. Сформовані пакети телеметрії, які містять показники напруги, сили струму, активної потужності, часу безперервної роботи та накопиченого енергоспоживання, структуруються у текстовий формат JSON. Потім цей інформаційний масив публікується у визначений робочий топик для доступу сторонніх споживачів або систем автоматизації.

Паралельно з публікацією у топіки, мікроконтролер дублює згаданий пакет даних через сервер поточкових веб-сокетів. Таке рішення розподіляє мережеве навантаження, оскільки веб-сокет забезпечує пряму ретрансляцію вимірів у браузер користувача з мінімальною затримкою, тоді як локальний брокер MQTT відповідає за сумісність пристрою із зовнішніми вузлами керування.

3.3 Реалізація вбудованих мережевих сервісів та локального сховища даних

Програмна архітектура пристрою розроблена за принципом обчислень, що передбачає повну інтеграцію серверних функцій всередину мікроконтролера

ESP32. Для забезпечення мережевої взаємодії та передачі даних у локальну мережу в прошивці розгорнуто три взаємопов'язані сервіси: веб-сервер, сервер поточкових веб-сокетів та брокер повідомлень.

Робота HTTP-сервера організована на базі стандартної бібліотеки WebServer на порту 80. Головною функцією сервера є віддача статичних файлів інтерфейсу користувача. Для оптимізації використання флеш-пам'яті мікроконтролера, всі компоненти клієнтського застосунку попередньо стискаються алгоритмом GZIP і конвертуються в масиви байтів. При отриманні запиту веб-сервер передає ці дані з відповідним заголовком кодування, дозволяючи браузеру клієнта самостійно розпакувати та відобразити інтерфейс.

Потокова ретрансляція телеметрії в реальному часі реалізована через WebSocket-сервер на порту 81 за допомогою бібліотеки WebSocketsServer. Щосекунди у фоновому циклі прошивки формується текстовий пакет у форматі JSON, який містить виміряні показники напруги, струму, активної потужності, часу роботи та інтегрального споживання.

Для забезпечення сумісності із зовнішніми системами автоматизації в пристрої функціонує локальний MQTT-брокер на базі бібліотеки PicoMQTT. Локальний брокер повідомлень приймає з'єднання від сторонніх клієнтів, які пройшли автентифікацію у створеній мікроконтролером точці доступу Wi-Fi.

Локальне накопичення показників організовано за допомогою файлової системи LittleFS, яка використовує виділену область енергонезалежної пам'яті мікроконтролера. У процесі роботи програма щосекунди накопичує обчислені значення у своїх регістрах. Через визначений часовий інтервал, який становить 10 хвилин, система обчислює середні математичні показники напруги, струму і потужності, після чого дозаписує їх окремим рядком у текстовий файл формату CSV. При переході користувача на вкладку історії клієнтський застосунок виконує пряме зчитування цього файлу та здійснює його парсинг в оперативну пам'ять браузера для подальшої візуалізації у вигляді таблиць. Короткий опис всіх сервісів та портів зображено у таблиці 3.2.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 – Розподіл мережевих сервісів та портів мікроконтролера

Назва сервісу	Програмний компонент	Порт	Тип та формат даних	Функціональне призначення
Веб-сервер (HTTP)	WebServer	80	Бінарні масиви (GZIP)	Роздача статичних файлів інтерфейсу React
Потоковий сервер	WebSocketsServer	81	Текстові пакети JSON	Ретрансляція миттєвої телеметрії в реальному часі
Локальний брокер	PicoMQTT	1883	Повідомлення	Інтеграція пристрою із зовнішніми системами автоматизації

3.4 Калібрування вимірювальних каналів

Процес калібрування розробленого програмно-технічного комплексу є обов'язковим етапом для забезпечення нормативної точності вимірювань. На підсумкові характеристики системи впливає сукупність факторів, серед яких технологічні допуски номіналів резисторів у схемах зміщення рівня, похибки вимірювальних трансформаторів, а також конструктивна нелінійність інтегрованого АЦП мікроконтролера. Мінімізація цих апаратних викривлень досягається шляхом розрахунку та внесення програмних корегувальних коефіцієнтів.

Визначення констант виконувалося методом порівняльного аналізу поточних показань пристрою з даними сертифікованого мультиметра та ватметра. Для цього на вхід системи по черзі подавали стабільні тестові сигнали з різним рівнем навантаження. Зафіксовані відхилення дали змогу сформувавши точний масив поправок для подальшої роботи приладу. Схема електричних з'єднань під час проведення метрологічної верифікації наведена на рисунку 3.7.

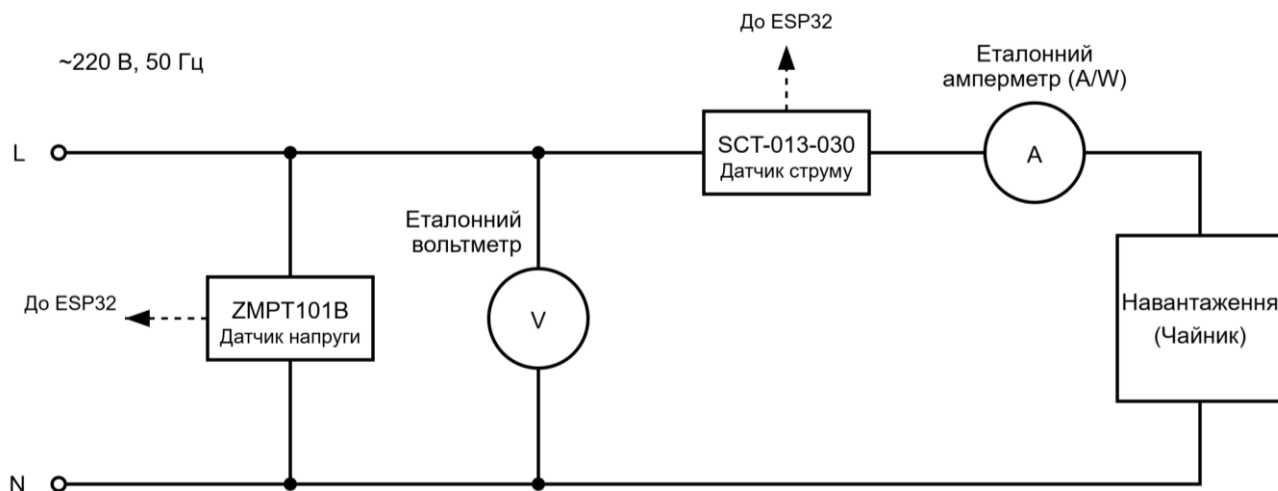


Рисунок 3.7 – Блок-схема підключення вимірювальних пристроїв до мережі

При налаштуванні каналу вимірювання напруги на базі модуля із трансформатором напруги спочатку проводилося грубе апаратне узгодження амплітуди вихідного сигналу за допомогою інтегрованого резистора. Це дозволило встановити розмах синусоїди в межах робочого діапазону вхідного аналогового порту мікроконтролера для запобігання зрізання піків хвиль при максимальних відхиленнях напруги в мережі. Після фіксації стабільного сигналу було проведено математичний розрахунок цифрового коефіцієнта масштабування напруги, фінальне значення якого склало 297,0. Впровадження цієї константи дозволило лінійно перетворювати безрозмірні дискретні відліки перетворювача у фізичні одиниці напруги. Зазначене значення внесено до загального переліку конфігураційних параметрів, що наведені у таблиці 3.1.

Калібрування каналу вимірювання сили струму із використанням різноманітного трансформатора вимагало врахування параметрів вбудованого навантажувального резистора та математичних моделей обробки сигналів. Для забезпечення лінійності вихідних даних у всьому діапазоні вимірювань було визначено програмний множник струму із величиною 30,0, що відповідає специфікації та коефіцієнту трансформації обраного датчика.

Додатковим етапом налаштування стала компенсація фазового зсуву, який виникає внаслідок індуктивної природи вимірювальних трансформаторів і створює часову затримку між реєстрацією відліків напруги та струму. Цей зсув безпосередньо впливає на точність інтегрального обчислення активної потужності, оскільки розрахунок базується на множенні миттєвих значень сигналів. Для усунення цієї похибки в програмне забезпечення внесено параметр фазової корекції із числовим значенням 1.7. Цей крок дозволив програмно синхронізувати вектори струму та напруги у часі, мінімізуючи похибку визначення коефіцієнта потужності при роботі з реактивними або імпульсними навантаженнями побутової мережі. Динаміка відстеження сили струму при підключенні різних типів споживачів відображена на графіку лінійності вимірювального каналу на рисунку 3.8.

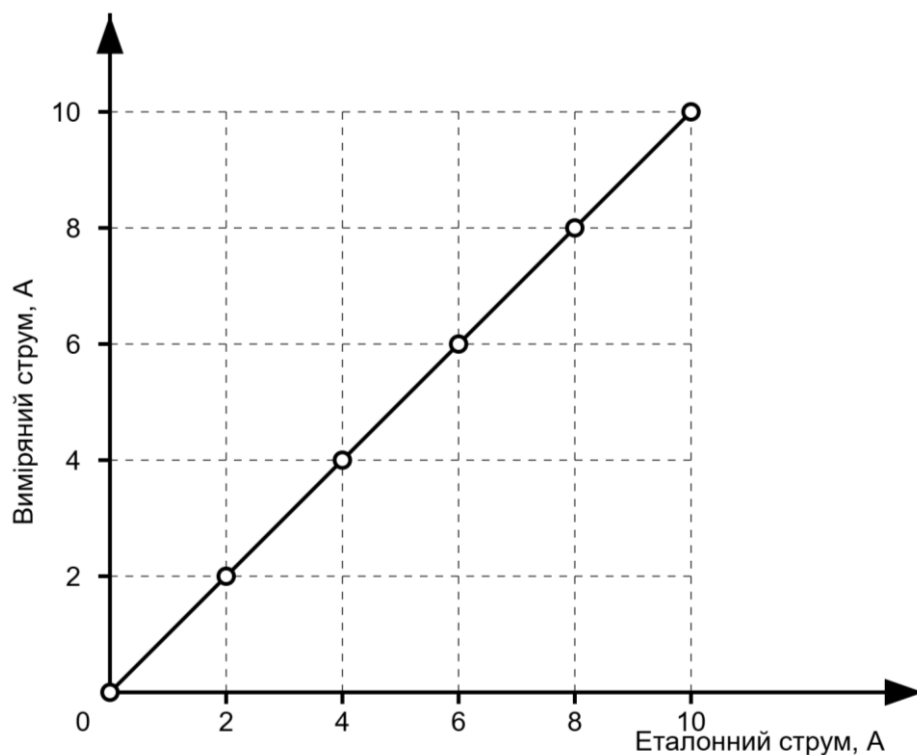


Рисунок 3.8 – Графік лінійності вимірювального каналу

3.5 Розробка клієнтського інтерфейсу користувача та візуалізація даних

Клієнтська частина програми створена як веб-застосунок, що складається лише з однієї сторінки. Для її розробки було використано бібліотеку React. Під час планування цього інтерфейсу головною вимогою було зробити кінцевий розмір готових файлів якомога меншим. Це треба через те, що мікроконтролер не має великого накопичувача, як звичайний комп'ютер. Усі файли сайту мають поміститися у його вбудовану флеш-пам'ять, яка є дуже обмеженою.

Для зменшення розміру процес збірки проєкту налаштовано так, щоб увесь код проходив етап мініфікації. Оскільки пристрою для роботи не потрібен зручний для читання текст, під час цього процесу з файлів видаляються всі пояснення та коментарі в коді. Також прибираються зайві пробіли, відступи та переноси рядків, а довгі назви змінних замінюються на одну чи дві літери. Код стає суцільним, але займає набагато менше місця.

На наступному етапі всі отримані файли додатково стискаються за допомогою алгоритму GZIP. Він працює схоже до створення звичайного архіву. У результаті загальний об'єм даних зменшується ще у кілька разів. Коли користувач підключається до пристрою через мережу, мікроконтролер передає йому саме ці стиснуті файли. Отримуючи їх, браузер на комп'ютері чи телефоні сам автоматично розпаковує дані і одразу показує готову сторінку інтерфейсу.

Візуальне розміщення елементів дашборду побудовано на основі гнучкої сіткової структури. Вона розроблена так, щоб інтерфейс міг динамічно підлаштовуватися під розміри екранів різних пристроїв без втрати інформативності. Наприклад, на мобільному телефоні інформаційні блоки автоматично шикуються один під одним, а на широкому моніторі розміщуються поруч. Головне вікно системи у версії для комп'ютера розділене на три основні функціональні блоки для максимально зручного читання показників. Його вигляд представлено на рисунку 3.9.

розрізі, мінімізуючи при цьому використання оперативної пам'яті та графічних ресурсів клієнтського терміналу.

Для підтвердження кросплатформеності та адаптивності розробленого графічного інтерфейсу було проведено тестування його відображення на мобільних терміналах під керуванням операційної системи Android. Віджети миттєвих параметрів мережі та інтегрального обліку зміщуються у верхню частину робочої області, зберігаючи повнорозмірні шрифти індикаторів для зручності сприйняття інформації. Графіки динамічних змін напруги та потужності масштабуються за шириною екрана. Результати адаптивного переформатування елементів інтерфейсу на екрані смартфона наведені на рисунку 3.10.

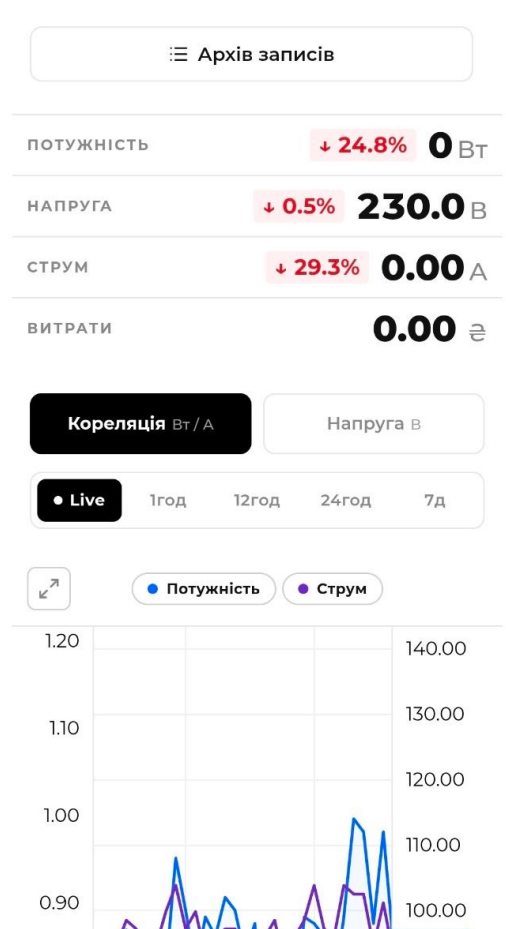


Рисунок 3.10 – Відображення мобільної версії інтерфейсу на екрані смартфона

Перехід користувача до розділу перегляду даних ініціює відправку асинхронного HTTP-запиту методом GET на фіксовану внутрішню адресу вбудованого веб-сервера мікроконтролера. У відповідь на запит програмна служба файлової системи LittleFS зчитує текстовий файл логів, який містить послідовні записи накопиченої телеметрії у форматі CSV. Кожен рядок цього файлу містить часову мітку в секундах, середні математичні значення напруги, сили струму та активної потужності за десятихвилинний інтервал, а також кумулятивний показник спожитої енергії.

Отриманий текстовий масив обробляється безпосередньо на стороні браузера за допомогою вбудованого інтерпретатора клієнтського коду. Програмний алгоритм виконує парсинг вхідних даних. Кожне текстове поле відокремлюється символом коми та швидко перетворюється на масив об'єктів в оперативній пам'яті клієнтського терміналу. Після завершення етапу обробки готові структуровані дані передаються у React-компонент динамічної таблиці. Інтерфейс виводить завантажену інформацію у вигляді хронологічного списку зі стовбцями для кожного вимірюваного фізичного параметра мережі.

Компонент таблиці підтримує функції локального сортування та зручної сторінкової навігації. Всі ці дії виконуються без додаткового звернення до пам'яті мікроконтролера. Це просте рішення суттєво зменшує загальне обчислювальне та мережеве навантаження на чіп ESP32. Необхідні масиви даних завантажуються лише один раз, завдяки чому інтерфейс реагує на дії користувача миттєво і без підвисань.

Візуалізація зібраних табличних даних значно полегшує аналіз погодинних, добових та тижневих трендів зміни електричного навантаження. Інструмент чітко фіксує періоди найбільшого споживання енергії. Разом з тим він дозволяє легко знаходити випадки тривалого відхилення напруги від стандартних параметрів силової мережі. Накопичена статистика дає змогу швидко і наочно оцінити загальний стан підключених ліній. Зовнішній вигляд готової інтерактивної таблиці архівних записів наведено на рисунку 3.11.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

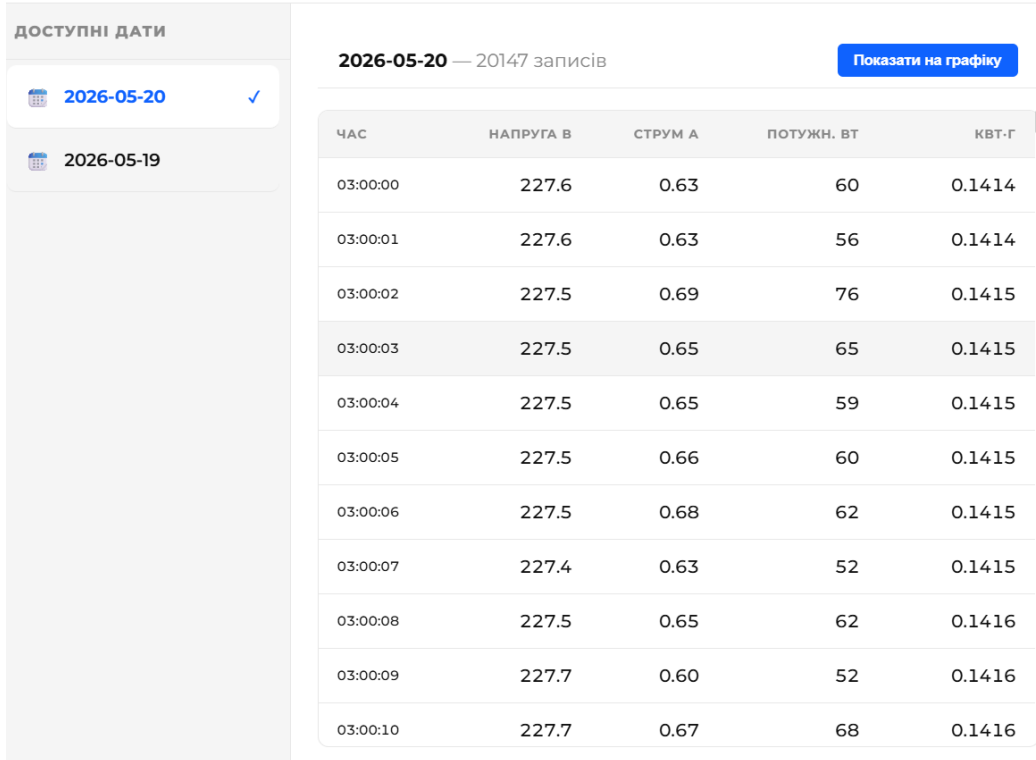


Рисунок 3.11 – Вікно перегляду архіву даних

3.6 Висновки до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано повний цикл практичної реалізації, апаратного налаштування та експериментальної верифікації програмно-технічного засобу моніторингу стану електромережі. На основі проведеного аналізу технічних вимог розроблено та виготовлено дослідний зразок пристрою, апаратна частина якого базується на системі на кристалі ESP32, доповненій модулями ізольованого зчитування напруги ZMPT101B та безконтактного аналізу сили струму SCT-013. Інтеграція компонентів усередині спеціально спроектованого в середовищі OpenSCAD корпусу забезпечила високу компактність моноблока, надійну механічну фіксацію елементів та необхідне фізичне розділення низьковольтних обчислювальних кіл від сирової силової лінії змінного струму.

Розроблене вбудоване програмне забезпечення мікроконтролера в середовищі Arduino IDE забезпечило повну автономність функціонування системи за принципом периферійних обчислень. Через програмне обмеження розрядності аналого-цифрового перетворювача десятьма бітами вийшло досягти високої частоти дискретизації аналогових сигналів. Впроваджений логічний фільтр фоновому шуму успішно розв'язав проблему реєстрації помилкових наведень за умов повної відсутності корисного навантаження, автоматично обнуляючи показники при падінні обчисленої напруги нижче встановленої інженерної межі 50 В.

Організація вбудованих мережевих сервісів забезпечила децентралізовану взаємодію пристрою з користувачем без залучення сторонніх хмарних рішень або додаткових обчислювальних серверів. Поєднання локального MQTT-брокера на базі бібліотеки PicoMQTT та сервера потокових веб-сокетів дозволило одночасно досягти сумісності з системами автоматизації та забезпечити щосекундну ретрансляцію вимірів у браузер клієнта з мінімальною латентністю. Використання файлової системи LittleFS для циклічного накопичення усереднених десятихвилинних логів у форматі CSV вирішило задачу збереження довгострокової історії енергоспоживання безпосередньо в енергонезалежній пам'яті чіпа з можливістю її очищення за запитом користувача.

Створення клієнтського React-застосунку з використанням методів мініфікації вихідного коду та GZIP-стиснення повністю вирішило проблему дефіциту локальної пам'яті мікроконтролера при розміщенні файлів інтерфейсу. Отриманий у результаті тестування графічний веб-дашборд продемонстрував високу швидкість відгуку та повну адаптивність компонентів сітки верстки. Веб-інтерфейс підтвердив свою кросплатформеність та стабільність візуалізації телеметрії у реальному часі як на стаціонарних персональних комп'ютерах, так і при відображенні на екранах мобільних терміналів.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено програмно-технічний засіб моніторингу параметрів однофазної електричної мережі на основі мікроконтролера ESP32. Створений інженерний пристрій забезпечує вимірювання середньоквадратичних значень напруги та струму, обчислення активної потужності, а також бездротову передачу телеметричних даних для візуалізації у реальному часі. Розроблене рішення характеризується автономністю функціонування та можливістю безпосередньої інтеграції в існуючі системи керування енергоспоживанням побутових об'єктів.

У першому розділі проведено аналіз проблематики відхилень параметрів якості електричної енергії в сучасних мережах, виявлено фактори дестабілізації напруги та визначено технічні вимоги до засобів цифрового енергомоніторингу. Обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32, який завдяки наявності процесора Xtensa LX6, інтегрованого модуля Wi-Fi та багатоканального 12-бітного аналого-цифрового перетворювача став основою для побудови пристрою. Визначено апаратну конфігурацію чутливих елементів, яка включає активний трансформатор напруги ZMPT101B та неінвазивний рознімний трансформатор струму SCT-013-030. Доведено перевагу протоколу MQTT над HTTP для задач Інтернету речей завдяки мінімальному обсягу службових заголовків пакетів та підтримці рівнів якості обслуговування QoS.

У другому розділі описано взаємодію всіх апаратних і програмних частин пристрою. Тут представлено загальну архітектуру системи та алгоритми, за якими працює програма вимірювання. Створено алгоритм перетворення аналогового сигналу в цифровий. Програма постійно зчитує миттєві значення струму та напруги протягом одного періоду коливання в мережі. Після цього обчислюється справжнє середньоквадратичне значення. Це дає точні показники енергоспоживання, навіть коли форма сигналу спотворена іншими приладами.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також розроблено алгоритм автоматичного зсуву аналогового потенціалу. Оскільки мікроконтролер працює лише з позитивною напругою, зсув потрібен для правильної обробки сигналу змінного струму. Описано роботу бездротової мережі. Мікроконтролер сам створює точку доступу Wi-Fi, до якої можна підключитися напряму без роутерів. У програму додано функцію автоматичного відновлення зв'язку, якщо він обірветься. Зібрані дані вимірювань пакуються у формат JSON, який зручний для передачі мережею.

Також описано структуру вбудованого веб-сервера, який запускається в пам'яті чипа. Інтерфейс користувача створено на основі бібліотеки React. Оскільки готові файли сайту великі, а пам'ять мікроконтролера обмежена, застосовано оптимізацію. Всі файли інтерфейсу стискаються алгоритмом GZIP. Вони займають мало місця в пам'яті пристрою, швидко передаються в браузер і там автоматично розпаковуються.

У третьому розділі проведено практичне збирання, компонування та експериментальне тестування створеного програмно-технічного засобу в реальних умовах експлуатації з оцінкою точності його роботи. Виконано монтаж елементної бази на друкованій платі з наступним розміщенням вузлів у захисному пластиковому корпусі. Проведено поетапне метрологічне калібрування вимірювальних каналів напруги та струму за допомогою серії послідовних тестів з підключенням активних навантажень різної потужності від 100 Вт до 2000 Вт для корекції нелінійності внутрішнього АЦП. Розраховано показники абсолютної та відносної похибки вимірювань, які підтвердили відповідність пристрою встановленим інженерним нормам точності. Розгорнуто інтерактивний веб-дашборд користувача з адаптивною версткою для відображення графіків часових координат, а також реалізовано автономну систему довгострокового логування історії споживання у форматі CSV за допомогою енергонезалежної файлової системи LittleFS.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Dhanabalan G., Sudhakar P., Ashok R. Energy Efficient Data Transfer in Internet of Things Sensor Network using Message Queuing Telemetry Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1375, No 1. P. 012020.
2. Vera N., Farinango P., Estrada R. Energy consumption monitoring and prediction system for it equipment. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 241. P. 272–279.
3. Serepas F., Papias I., Christakis K., Dimitropoulos N., Marinakis V. Lightweight embedded IoT gateway for smart homes based on an ESP32 microcontroller. *Computers*. 2025. Vol. 14, No 9. P. 391.
4. Gozuoglu A., Ozgonenel O., Gezegin C. Design and implementation of controller boards to monitor and control home appliances for future smart homes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. Vol. 20, No 9. P. 11458–11465.
5. Lubis F., Rahmat R. F., Nainggolan P. I. et al. Water Meter Monitoring System for Residential Using Mesh Network with Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) Protocol. *2025 International Conference on Computing and Applied Informatics (ICCAI)*. 2025. P. 1–6.
6. He W. Design of supervisory controllers and ultra-low power data loggers for hybrid power systems : Doctoral dissertation. Memorial University of Newfoundland, 2024.
7. He W., Baig M. J. A., Iqbal M. T. An open-source supervisory control and data acquisition architecture for photovoltaic system monitoring using ESP32, Banana Pi M4, and Node-RED. *Energies*. 2024. Vol. 17, No 10. P. 2295.
8. He W., Baig M. J. A., Iqbal M. T. An internet of things–supervisory control and data acquisition (IoT-SCADA) architecture for photovoltaic system monitoring, control, and inspection in real time. *Electronics*. 2024. Vol. 14, No 1. P. 42.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Nkinyam C. M., Ujah C. O., Asadu C. O., Anyaka B., Olubambi P. A. Development of a low-cost monitoring device for solar electric (PV) system using internet of things (IoT). *Results in Engineering*. 2025. P. 107324.

10. Rao C. K., Sahoo S. K., Yanine F. F. Development of a smart cloud-based monitoring system for solar photovoltaic energy generation. *Unconventional Resources*. 2025. Vol. 6. P. 100173.

11. De Sousa T. B., Rabelo R. D. A. Smart Metering Enabled by the Internet of Things for Monitoring Residential Energy Consumption and Power Quality. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 186872–186886.

12. Munoz O., Ruelas A., Rosales-Escobedo P. F. et al. Development of an IoT smart energy meter with power quality features for a smart grid architecture. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2024. Vol. 43. P. 100990.

13. Singh S., Singh G., Singh Y., Singh N. IoT-Based Smart Energy Meter with Theft Detection Using ESP32. *2025 13th International Conference on Intelligent Embedded, MicroElectronics, Communication and Optical Networks (IEMECON)*. 2025. P. 1–6.

14. Nizam M. S. M., Abdullah E., Hidayat N. M., Hashim N. M. Z., Hassan M. A. Real-time energy monitoring in renewable EV charging stations: an ESP32-based system integrating Modbus, MQTT, and ESP-NOW protocols. *2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCORED)*. 2024. P. 339–344.

15. De Sousa E. L., de Aquino Marques L. A., De Lima I. D. S. F. et al. Containerized IoT Solution for Smart Energy Metering with Real-Time Visualization. *2025 13th Wireless Days Conference (WD)*. 2025. P. 1–9.

16. Ashok A., Subhashini R. IoT based system for real-time electricity theft detection. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3257, No 1. P. 020159.

17. Pălăcean A. V., Trancă D. C., Rughiniș R. V., Rosner D. Smart Internet of Things power meter for industrial and domestic applications. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No 17. P. 7621.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

18. Noel D., Alex C. A Step-by-Step Guide to Implementing a Smart Energy Meter Using IoT Platforms. *SSRN*. 2025. 5175297.
19. Rusli M. R., Prabowo G., Mahendra L. S. et al. IoT-Based Real-Time Energy Monitoring System for ELVIRO EV. *2024 International Electronics Symposium (IES)*. 2024. P. 95–99.
20. Roy J., Goswami A. D., Chakraborty S., Mandal S., Khatun N. A message queuing telemetry transport (MQTT) protocol based energy-efficient smart, wireless LED street lighting solution. *Journal of Optics*. 2024. P. 1–14.
21. Asri M. A. S. M., Hanifah M. S. A., Gunawan T. S., Zainazlan A. F., Harun H., Mansor H. Prototype of a Low-Cost AC-Side Anomaly Detection and Alert System for Residential Photovoltaic Installations. *2025 IEEE 11th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*. 2025. P. 92–97.
22. Oladele O. J., Ariyo F. K., Ayanlade S. O., Adeagbo A. P., Adeleke I. A. Development of an IOT-based Energy Theft Detection System for a Single-phase Smart Meter. *Al-Bahir Journal for Engineering & Pure Sciences*. 2026. Vol. 8, No 1.
23. Gheorghe A. C., Stan E., Udriou I. Electricity consumption measurement system using ESP32. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*. 2022. Vol. 21, No 2. P. 23–26.
24. Varadharajan R., Lee W., Dong Y. Cost-Effective voltage and current sensing technique for smart agricultural systems. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025. Vol. 239. P. 111045.
25. Litayem N. Scalable smart home management with ESP32-S3: A low-cost solution for accessible home automation. *2024 International Conference on Computer and Applications (ICCA)*. 2024. P. 1–7.
26. Yıldırım F., Yalman Y., Bayındır K. Ç., Terciyanlı E. Comprehensive review of edge computing for power systems: State of the art, architecture, and applications. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No 8. P. 4592.
27. Rana M. An Improved Lightweight Block Cipher Algorithm for Securing Resource-Constrained IoT Devices. 2024.

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

28. Garcia-Velez R., Serpa-Andrade L. Design and Implementation of a Real-Time Audio Spectrum Analyzer. *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2025*. Springer Nature, 2025. Vol. 4. P. 18.

29. Morariu A. R. Systematic Mapping Studies and Prototyping on Edge Computing for Condition Monitoring. 2025.

30. Tsaqief M. F., Sutopo J. Comparative Performance Analysis Between the MQTT and WebSocket Protocols. *bit-Tech*. 2025. Vol. 8, No 2. P. 2227-2237.

31. Gudimetla S. Transitioning to Open-Source Observability: A Cost-Benefit Analysis and Migration Framework. *Journal of Computer Science and Technology Studies*. 2025. Vol. 7, No 12. P. 495–512.

32. Jain A. Scalable Frameworks for Cross-Platform Mobile App Development. 2025.

33. Springer S. Node.js: the comprehensive guide. Packt Publishing Ltd, 2025.

34. Natarajan J. From Wireframes to Interfaces: Developing a Practical Framework for UI/UX Design. 2025.

35. Gabriel A., Acosta L., Labeled M. Comparative Analysis of Interactive and Traditional Personas in UX Design: an Experimental Study on the Design of Wireframes for a Website. *IHM'25-36e Conférence Internationale Francophone sur l'Interaction Humain-Machine*. 2025.

36. Voltage Fluctuation and Drop on Mains. *Reddit*. URL: https://www.reddit.com/r/electrical/comments/1e9gfcv/voltage_fluctuation_and_drop_on_mains/ (дата звернення: 24.02.2026).

37. uPesy ESP32 Wroom Low Power DevKit. *uPesy*. URL: <https://www.upesy.com/products/upesy-esp32-wroom-low-power-devkit?srsId=AfmBOooiz1b0grdzZ1pNvF5vdRCV8hkOuWQtNrtfIffIh7rhV6hsma0M> (дата звернення: 24.02.2026).

38. Аналізатор якості електроенергії та роботи електродвигунів Fluke 438-II. *Metranom*. URL: <https://metranom.com/product/analizator-kachestva->

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

jelektrojenergii-i-raboty-jelektrodvigatelij-fluke-438-ii/ (дата звернення:
18.05.2026).

39. Smart-розетка Atorch S1 Wi-Fi. *Епіцентр*. URL:
<https://epicentrk.ua/shop/mplc-smart-rozetka-atorch-s1-wifi-ac-85-265v-16a-vatmetr-vol-tmetr-licil-nik-energii-1efe952c-2c15-6de6-bfba-7da24cbc072a.html> (дата
звернення: 18.05.2026).

40. Модуль датчика напруги ZMPT101B. *IT Master*. URL:
<https://itmaster.biz.ua/directory/sensors/zmpt101b.html> (дата звернення:
18.05.2026).

41. Трансформатор струму неінвазивний SCT-013-030. *eBay*. URL:
<https://www.ebay.com/itm/176411043015> (дата звернення: 18.05.2026).

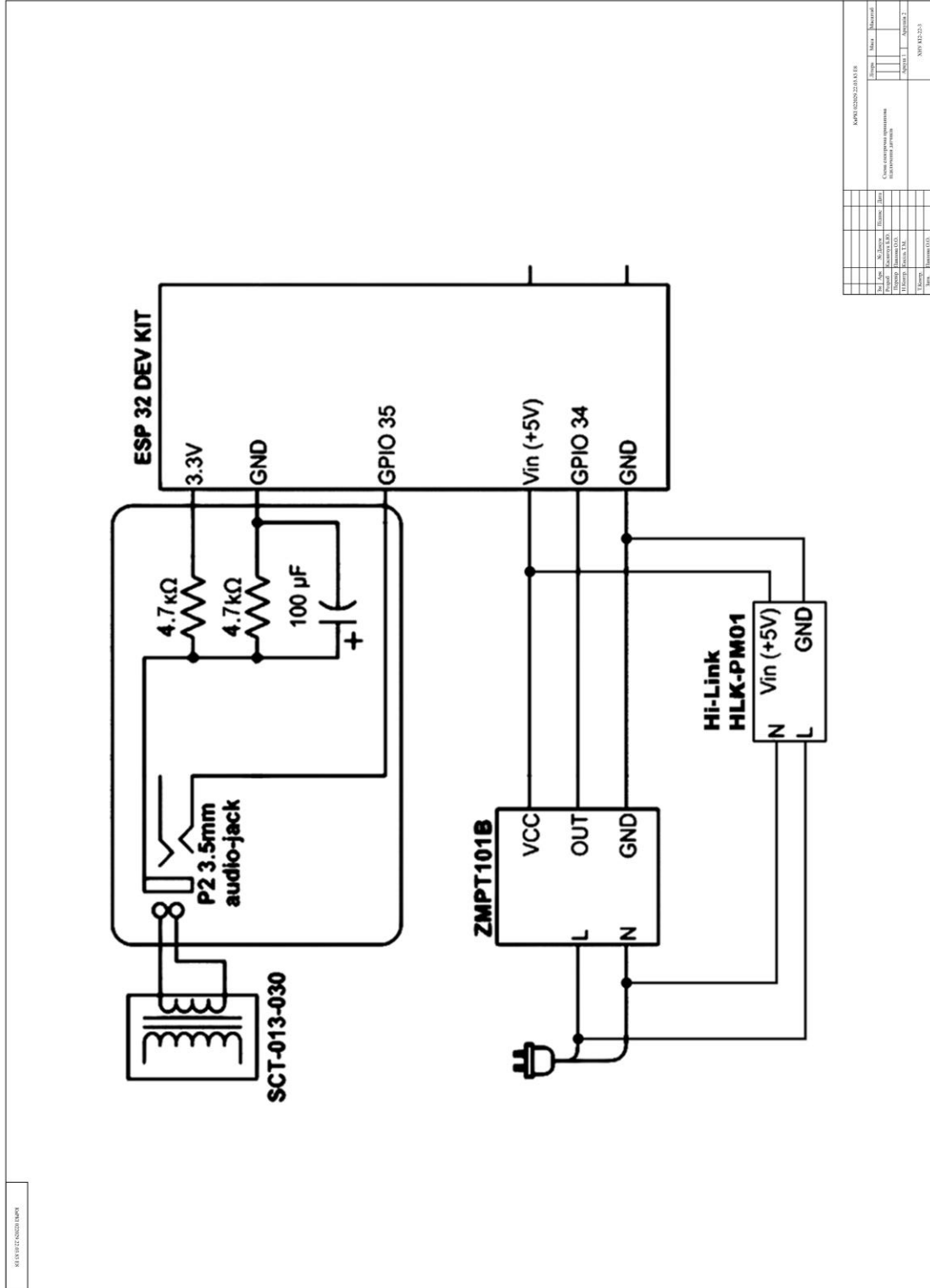
42. Модуль живлення Hi-Link HLK-PM01 (220V-5V, 3W). *Arduino.ua*. URL:
<https://arduino.ua/prod1797-modul-pitaniya-tsp-05-220v-5v-3vt> (дата звернення:
18.05.2026).

					КВРКІ 022029.22.03.83 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Копія креслення «Схема електрична принципова підключення датчиків»



ДОДАТОК В

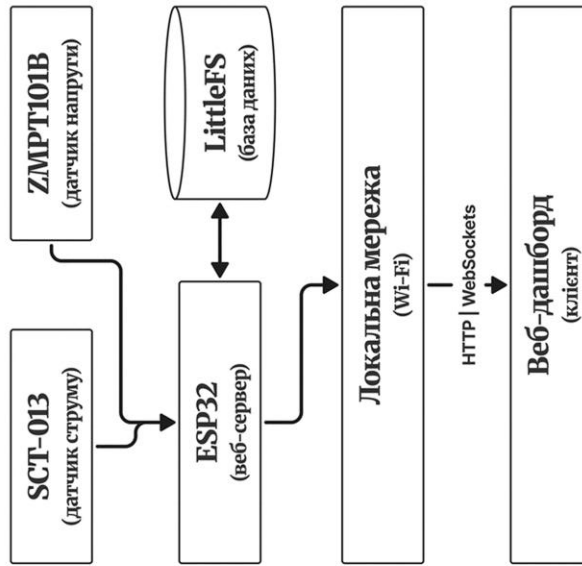
(обов'язковий)

Копія креслення «Структурна схема та специфікація апаратного забезпечення»

Специфікація апаратного забезпечення

№ з/п	Найменування	Кіл.	Примітка
Конденсатори			
1	Конденсатор електролітичний 100 мкФ, 16 В	1	
Мікросхеми та модулі			
2	Модуль розробника ESP32 DevKit v1	1	
3	Модуль активного трансформатора напруги ZMPГ101В	1	
4	Перетворювач живлення Hi-Link HLK-PM01	1	
Резистори			
5	Резистор 4.7 кОм, ±1%	2	
Трансформатори та роз'єми			
6	Трансформатор струму неінвазивний SCT-013-030	1	
7	Вилка мережева із кабелем живлення СЕЕ 7/16	1	
8	Гніздо комутаційне Audio Jack 3.5 мм	1	

Структурна схема



Код документа: 22.04.01.018			
№ документа	Дата	Відомості	Відомості
Структурна схема та специфікація апаратного забезпечення			
Сторінка	З	Кількість сторінок	Всього сторінок
1	1	1	1
МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЦЕНТР			
№01-02-22-3			

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

Максимальне співпадіння з одним документом 10.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 272264 Назва: БКР Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32 Додано в БД: 2026-05-26 Автора: Богдан КАСЯНЧУК Керівники: Ольга ПАВЛОВА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	94562	644	10155 (11%)	79 (12%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

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: Богдан КАСЯНЧУК

Співавтор:

Назва: Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32

Експерт: Ольга ПАВЛОВА

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.22%

Коефіцієнт подібності 2: 1.58%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-26 00:16:24.0

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.

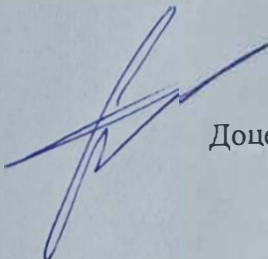
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

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 процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-26

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32

Автор Богдан КАСЯНЧУК

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

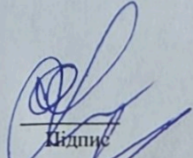
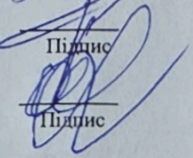
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 3.22%; та системою Anti-Plagiarism складає 10%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


 Підпис

 Підпис

 Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Богдан КАСЯНЧУК

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



РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Касянчук Богдан Юрійович

Тема: Програмно-технічний засіб моніторингу стану електромережі з використанням датчиків струму та напруги на базі ESP32

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 61

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи моніторингу параметрів електромережі на базі мікроконтролера ESP32. Апаратна частина побудована з використанням трансформаторів струму і напруги. Програмна реалізація забезпечує локальну обробку телеметричних даних. Візуалізація результатів здійснюється через веб-дашборд.

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: У першому розділі досліджено предметну область. Було проаналізовано наявні побутові та професійні аналоги, виявлено їхні обмеження та обґрунтовано вибір елементної бази на основі мікроконтролера ESP32. Другий розділ присвячено проектуванню чотирирівневої архітектури системи. Тут наведено розрахунки схеми інструментального зміщення для датчиків ZMPT101B та SCT-013-030, а також розроблено модель збереження інформації у файловій системі LittleFS. Третій розділ відображає практичний етап. Він охоплює збирання фізичного прототипу в корпусі, метрологічне калібрування вимірювальних каналів та створення інтерфейсу користувача на базі React. Було застосовано концепцію периферійних обчислень. Для передачі телеметрії розгорнуто локальний MQTT-брокер PicoMQTT та WebSocket-сервер. Запис усереднених даних у форматі CSV відбувається кожні 10 хвилин. Пам'ять мікроконтролера заощаджено завдяки мініфікації та GZIP-стисненню коду веб-сторінки.

4. Позитивні сторони роботи: конфіденційність, автономність від хмарних екосистем.

5. Негативні сторони роботи: у тексті бракує розрахунку окупності або детального порівняння фінансової доцільності проєкту відносно масових ринкових аналогів.

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.Н., доцент Мороз Ю.В.
доцент кафедри *МІЗ*

"21" травня 2026 р.

[Signature] (підпис)