

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

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

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

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

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

**на тему: «Автоматизована система моніторингу та керування
енергоспоживанням мережі на основі технологій Інтернету речей»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-21

Ліщина Богдан Валентинович _____

Керівник:

асистент, д.ф.,

Повшенко Олександр Анатолійович _____

Рецензент:

проф., д.т.н., доцент кафедри ІВТ

Барилко Сергій Віталійович _____

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

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПМ-21.06.1760.01.000 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПМ-21.06.1760.01.001 ПЗ	Пояснювальна записка	100	
3	A1	ДП ПМ-21.06.1760.01.002 СхС	Схема структурна	1	
4	A1	ДП ПМ-21.06.1760.01.003 СхС	Схема структурна автоматизації	1	
5	A1	ДП ПМ-21.06.1760.01.004 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
6	A4	ДП ПМ-21.06.1760.01.005 ПЕЗ	Перелік елементів	1	
7	A1	ДП ПМ-21.06.1760.01.006 СК	Складальний кресленик друкованих плат	1	
8	A1	ДП ПМ-21.06.1760.01.007 СК	Складальний кресленик корпусу	1	
9	A1	ДП ПМ-21.06.1760.01.008 СхА	Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення	1	

				ПМ 2106.00.000.00		
	ПБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Ліщина Б.В				1	
Керівн.	Повшенко О.А.				КП ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ–21	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система моніторингу та керування
енергоспоживанням мережі на основі технологій Інтернету
речей»

Київ – 2026 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

_____ Ліщина Богдан Валентинович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту «Автоматизована система моніторингу та керування енергоспоживанням мережі на основі технологій Інтернету речей», керівник проєкту Повшенко Олександр Анатолійович, доктор філософії, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом проєкту _____ « 24 » травня 2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту : Система призначена для моніторингу та керування енергоспоживання мережі квартири у будинку; номінальна напруга мережі 230 В; максимальна потужність споживання квартири житлового будинку 5 кВт; похибка вимірювання потужності споживання $\pm 5\%$; система має передбачати віддалене керування реле для відключення енергоспоживання та відображення даних споживання квартири від мережі за останній день/тиждень/місяць.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Аналітичний огляд літературних джерел та постановка завдання. 2. Розробка автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням мережі. 3. Висновки.

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

6. Консультанти розділів проєкту* (читаємо примітку внизу сторінки)

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

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

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формування завдання на дипломне проєктування	20.04.2026	
2	Огляд сучасного стану електромереж у світі та Україні	25.04.2026	
3	Аналіз технологій для вирішення задач дипломного проєкту	02.05.2026	
4	Розробка структурної схеми системи та вибір елементної бази для її реалізації	07.05.2026	
5	Розробка електричної принципової схеми	14.05.2026	
6	Проектування 3D моделі корпусу та підготовка технічної документації	18.05.2026	
7	Розробка алгоритму роботи системи	21.05.2026	
8	Оформлення текстової та графічної частини дипломного проєкту	24.05.2026	

Студент

(підпис)

Богдан ЛІЩИНА

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ПОВШЕНКО

(ім'я, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

Анотація

Дипломний проєкт присвячено проєктуванню автоматизованої системи моніторингу й керування енергоспоживанням мережі. Актуальність роботи зумовлена необхідністю керування енергоспоживання житлових об'єктів в умовах постійного зростання тарифів на електроенергію в Україні, а також обмеженим функціоналом традиційних лічильників.

У межах проєкту сформовано технічні вимоги та розроблено структурну й електричну принципову схеми пристрою на базі концепції Інтернету речей для роботи під навантаженням до 21 А. Апаратна архітектура об'єднує вимірювальну частину схеми з керуючим ядром та автономного живлення, і силового захисту. Описані рішення, спрямовані на стабільну роботу вимірювальних ланцюгів та зниження теплового навантаження на друковану плату при проходженні великих струмів.

Також розроблено модульний алгоритм роботи, який описує процеси ініціалізації системи, вимірювання параметрів та взаємодію з хмарним сервісом. Алгоритм забезпечує автоматизований розрахунок параметрів мережі та вартості спожитої енергії, а також реалізує автономну логіку аварійного захисту, який миттєво знеструмлює об'єкт у разі перевантаження незалежно від наявності Інтернет-з'єднання.

Практичне значення проєкту полягає у створенні доступного й енергоефективного інструменту для керування енергоспоживанням, який мінімізує вплив людського фактору при зборі статистичних даних. Запропоноване інженерне рішення може бути інтегрованим в сучасні системи розумного дому.

Ключові слова: Інтернет речей, моніторинг енергоспоживання, мікроконтролер, вимірювальна мікросхема, силове реле, електрично принципова схема, алгоритм роботи, автоматизований захист, хмарний сервіс.

Anotation

The diploma project is focused on the design of an automated system for grid energy consumption monitoring and control. The relevance of the work is driven by the necessity of managing the energy consumption of residential properties with constantly rising electricity costs in Ukraine, as well as the limited functionality of traditional meters.

Within the scope of the project, technical requirements were formulated, and structural and electrical schematic diagrams of the device were developed based on the Internet of Things concept for operation under loads up to 21 A. The hardware architecture integrates the measurement circuit with the control core, autonomous power supply, and power protection. The described solutions are aimed at ensuring the stable operation of measurement circuits and reducing the thermal load on the printed circuit board during high current flow.

A modular operating algorithm has also been developed, describing the processes of system initialization, parameter measurement, and interaction with a cloud service. The algorithm provides automated calculation of grid parameters and the cost of consumed energy, and implements autonomous emergency protection logic that instantly blocks electricity flow to the facility in case of an overload, regardless of Internet connectivity.

The practical significance of the project lies in the creation of an affordable and energy-efficient tool for energy management that minimizes the human factor in statistical data collection. The proposed engineering solution can be integrated into modern smart home systems.

Keywords: Internet of Things, energy consumption monitoring, microcontroller, measurement IC, power relay, electrical schematic diagram, operating algorithm, autonomous protection, cloud service.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. Аналітичний огляд літературних джерел та постановка завдання	7
1.1 Сучасний стан електромережі у світі та Україні	7
1.2 Аналіз засобів моніторингу та обліку енергоспоживання. Лічильники.....	8
1.3 Інтернет Речей	9
1.4 Методи бездротового зв'язку.....	10
1.4.1 Bluetooth	10
1.4.2 WiFi.....	12
1.4.3 Zigbee.....	14
1.4.4 Порівняння Bluetooth, WiFi та Zigbee	15
1.5 Аналіз хмарних сервісів.....	16
1.5.1 Azure IoT Central.....	17
1.5.2 Blynk	18
1.5.3 ThingsBoard	19
1.5.4 Порівняння хмарних сервісів.....	19
1.6 Апаратні платформи розробки в IoT	21
1.6.1 STMicroelectronics	22
1.6.2 Espressif Systems	23
1.6.3 Raspberry PI.....	23
1.6.4 Порівняння апаратних платформ	24
1.7 Розумні лічильники	26
1.8 Огляд сучасних лічильників.....	27
1.8.1 Енергомонітор smart-MAIC D101.....	27
1.8.2 Eastron SDM120-M	29
1.9 Огляд методів вимірювання струму	31
1.9.1 Використання шунту.....	31
1.9.2 Використання трансформатору струму	32
1.9.3 Використання ефекту Холла	33
1.10 Аналіз методів вимірювання напруги	34
1.10.1 Використання подільника напруги	34

1.10.2 Використання трансформатору напруги	35
1.11 Методи розрахунку параметрів мережі	36
1.12 Технічне завдання на розробку	38
Висновки до розділу 1	39
2. РОЗРОБКА автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням мережі.....	41
2.1 Структурна схема	41
2.2 Структурна схема автоматизації.....	43
2.2.1 Опис об'єкта керування.....	43
2.2.2 Опис структурної схеми автоматизації.....	44
2.3 Формування вимог до елементів системи	45
2.3.1 Вимоги до датчиків	45
2.3.2 Вимоги до мікроконтролера	46
2.3.3 Вимоги до реле	46
2.3.4 Вимоги до хмарної платформи	47
2.3.5 Вимоги до блоку живлення	47
2.4 Підбір елементів згідно вимог	48
2.4.1 Вибір датчиків струму та напруги.....	49
2.4.2 Вибір мікроконтролера	50
2.4.3 Вибір силового реле	52
2.4.4 Вибір блоку живлення	54
2.4.5 Вибір хмарної платформи	55
2.5 Розробка електричної принципової схеми	56
2.5.1 Схема живлення	57
2.5.2 Вимірювальна схема системи	60
2.5.3 Включення системи в силову мережу та її комутація.....	63
2.5.4 Включення мікроконтролера	64
2.6 Розробка корпусу пристрою.....	66
2.7 Проектування друкованої плати	68
2.8 Зовнішній вигляд системи.....	70
2.9 Розробка алгоритму роботи системи.....	71
2.9.1 Алгоритм попереднього налагодження системи	73

2.9.2 Алгоритм вимірювання параметрів мережі.....	74
2.9.3 Алгоритм керування реле.....	76
2.9.4 Алгоритм зв'язку с хмарою.....	77
Висновки до розділу 2.....	78
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ.....	3

ВСТУП

У сучасних умовах однією з важливих проблем енергетичної галузі є раціональне використання електричної енергії. Постійне зростання тарифів на електроенергію потребує ретельного контролю її споживання як у промисловості, так і в побуті. У зв'язку з цим виникає потреба не лише у точному вимірюванні електричних параметрів мережі, але й у їх постійному моніторингу з метою аналізу, оптимізації витрат та підвищення енергоефективності.

Традиційні засоби обліку електроенергії забезпечують лише фіксацію загальної кількості спожитої енергії, не надаючи детальної інформації про стан електричної мережі в режимі реального часу. Це не дає повної інформації щодо ефективності використання електроенергії та якості енергії в мережі.

З розвитком мікропроцесорної техніки та технологій Інтернету речей з'явилась ідея створення автоматизованих систем, які будуть безперервно вимірювати параметри електричної мережі, обробляти отримані дані та надавати дистанційний доступ для користувача у реальному часі.

Метою даної дипломного проєкту є розробка автоматизованої системи для вимірювання та моніторингу енергоспоживання електричної мережі на основі технологій Інтернету речей. Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити методи вимірювання електричних параметрів, проаналізувати існуючі системи моніторингу за енергоспоживання та розробити структурну схему і принцип роботи запропонованого пристрою.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1 Сучасний стан електромережі у світі та Україні

Наші оселі сьогодні важко уявити без електроприладів. Вони роблять наше життя більш ефективним, безпечним та зручним. Наразі світ знаходиться у часі, що можна назвати “Епохою електрики”. Згідно з останнім аналізом, очікується, що світовий попит на електроенергію зростатиме в середньому на 3,6% на рік у період з 2026 по 2030 рік, що є на 50% вище, ніж середній показник за останні роки. Такий стрімкий ріст показників, демонструє наскільки швидко зростає потреба у збільшенні генерованої електроенергії [1].

Що стосується України, то до 2022 року середнє споживання та генерація електроенергії в країні трималось на рівні 140-150 ТВт-год, однак після початку воєнного конфлікту між Україною та Росією у лютому 2022 року, відбувся серйозний спад у генерації електроенергії, який був викликаний системними та навмисними ударами Росії по українській енергетичній інфраструктурі [2].

Збільшення попиту на електрику та вичерпність корисних копалин, приводять до збільшення вартості на електроенергію. Так у світі з 2024 до 2025 року можна побачити зріст вартості на майже 10 % для побутових користувачів та на 7 % для бізнесів. В Європі даний відсоток становить майже 9% та 11% для побутових користувачів та бізнесів [3].

В Україні за останні 10 років, вартість електроенергії зазнала значних змін. У 2017 році тариф становив 1.68 грн за 1 кіловат при споживанні понад 100кВт-год. Цей тариф залишався стабільним поки у 2023 році не виріс майже у два рази та становив 2.64грн/кВт-год [4].

Станом на 2026 рік в Україні згідно з постановою № 632 від 31.05.2024 було встановлено для всіх жителів України єдину фіксовану ціну на електроенергію -4,32 грн/кВт-год незалежно від обсягу споживання. Та при наявності двозонного лічильнику споживання з 23:00 до 7 ранку становить 2.16 грн/кВт-год.

Такий швидкий зріст був обумовлений потребою у відновлення пошкодженої ворожими обстрілами енергетичної системи й підготовкою її до нового опалювального сезону [5].

Постійне зростання тарифів, збільшує потребу у постійному управлінні споживанням. Для ефективного вирішення цього питання необхідні точні та актуальні вимірювання, тому наступний підрозділ присвячено огляду технічних засобів моніторингу та комерційного обліку енергоспоживання.

1.2 Аналіз засобів моніторингу та обліку енергоспоживання. Лічильники

Лічильник електроенергії це прилад, який вимірює, фіксує та відображає кількість електроенергії, яка перетікає через точку вимірювання, за кожен з періодів інтеграції і за розрахунковий період у цілому [6].

Індукційні лічильники довгий час були популярні через низьку вартість, та тривалий термін служби. Однак з часом була створена концепція багатотарифного обліку, яка дозволила диференціювати тариф за періодами часу, перше згадування якої було у *Постанові НКРЕ № 309 від 10 березня 1999 року* «Про порядок застосування тарифів на електричну енергію, що відпускається населенню і населеним пунктам». Це дозволило встановлювати вартість електроенергії в залежності від часу, що в свою чергу створювало залежність вартості від навантаження на мережу [7].

В сучасні часи багатозонна тарифікація відбувається згідно з тарифами які були затвердженні у *Постанові НКРЕ № 498 від 23 квітня 2012 року*, згідно з якою тарифікація відбувається за двозонним або тризонним тарифом.

За двозонними тарифами, диференційованими за періодами часу:

- 0,5 тарифу в години нічного мінімального навантаження енергосистеми (з 23-ї години до 7-ї години);
- повний тариф у інші години доби.

За тризонними тарифами, диференційованими за періодами часу:

- 1,5 тарифу в години максимального навантаження енергосистеми (з 8-ї години до 11-ї години і з 20-ї години до 22-ї години);

- повний тариф у напівпіковий період (з 7-ї години до 8-ї години, з 11-ї години до 20-ї години, з 22-ї години до 23-ї години);
- 0,4 тарифу в години нічного мінімального навантаження енергосистеми (з 23-ї години до 7-ї години) [8].

Для реалізацію багатотарифного обліку були створені електронні лічильники. Вони мають вбудований цифровий інтерфейс і вбудований тарифікатор. Електронні лічильники забезпечують вищий клас точності вимірювань згідно з міжнародними (ІЕС) та міждержавними (ГОСТ) стандартів і виконують ряд додаткових функцій [9].

Однак звичайні лічильники лише дають нам розуміння про загальне споживання та потребують від користувача прямий доступ для отримання даних. Для того щоб реалізувати дистанційний доступ до вимірюваних даних у реальному часі, можна скористатись концепцією Інтернету речей, що дозволить створити автоматизовану систему моніторингу енергоспоживання у квартирі.

1.3 Інтернет Речей

Інтернет речей це відносно нова концепція яка стрімко розвивається на основі сучасних технологій бездротового зв'язку. Головною ідеєю цієї концепції є використання присутніх навколо нас різноманітних речей або об'єктів, таких як мітки радіочастотної ідентифікації, датчики, виконавчі механізми, мобільні телефони тощо, для досягнення спільних цілей завдяки унікальним схемам адресації здатних взаємодіяти один з одним та співпрацювати зі своїми сусідами [10].

В основі цієї концепції лежать такі технології як:

- Засоби ідентифікації - кожен об'єкт фізичного світу, який є частиною Інтернету речей, повинен мати унікальний ідентифікатор;
- Засоби вимірювання, їх завдання полягає у перетворенні інформації про зовнішнє середовище в дані, придатні для передачі їх засобам обробки;
- Засоби передачі даних створені для реалізації зв'язку пристроїв Інтернету речей між собою та для доступу у мережу. Зазвичай використовуються будь які з існуючих технологій бездротового зв'язку, але можлива і реалізація через дротовий зв'язок;

- Засоби обробки даних - вважається, що головна частина Інтернету речей - це не датчики і засоби передачі даних, а хмарні системи, що забезпечують високу пропускну здатність і здатні швидко реагувати на певні ситуації. Саме вони допоможуть впоратися з величезними потоками інформації;
- Виконуючі пристрої. Це пристрої, які виконують дії в залежності від отриманих сигналів [11].

Отже, принципом роботи IoT систем є збір даних з датчиків та сенсорів, передача зібраної інформації у хмарні середовища для обробки, завдяки бездротовим засобам зв'язку. Потім в автоматичному або ручному режимі до пристроїв надходить зворотний сигнал від системи.

Використання цієї концепції для моніторингу енергоспоживання дає змогу автоматизувати вимір, що дозволяє вилучити людський фактор при зборі даних, та дає змогу моніторингу у реальному часі. Автономні виміри та можливість аналізувати накопичені дані дають змогу прогнозувати майбутнє споживання та виявляти пікові навантаження [12].

Однак якість роботи будь-якої IoT системи залежить від якості обміну даними, від вибору надійного методу зв'язку, залежить зручність та вартість монтажу. Найбільш актуальними для таких рішень є використання бездротових технологій. Однак універсального методу зв'язку не існує тому важливо підібрати його в залежності від потреб мережі.

1.4 Методи бездротового зв'язку

У цьому розділі ми розглянемо різні методи бездротового зв'язку, та проаналізуємо їх та порівняємо за дальністю та швидкості передачі даних, енергоспоживанням, та вартістю впровадження, щоб виявити сфери їх застосування в сучасних інтелектуальних рішеннях.

1.4.1 Bluetooth

Одним із поширених методів бездротового зв'язку є Bluetooth, який популярний завдяки величезній гнучкості, яку він надає розробникам. Технологія

Bluetooth надає розробникам універсальний набір повноцінних, адаптованих до потреб рішень для задоволення постійно зростаючих потреб у бездротовому з'єднанні. Технологія Bluetooth пропонує два варіанти радіозв'язку Bluetooth LE та Bluetooth Classic [13].

Bluetooth Classic

Радіоприймач Bluetooth Classic, також відомий як Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR), — це радіоприймач низької потужності, який передає дані через 79 каналів у неліцензованому промисловому, науковому та медичному (ISM) діапазоні частот 2,4 ГГц. Підтримуючи зв'язок між пристроями типу «точка-точка», Bluetooth Classic в основному використовується для бездротової потокової передачі аудіо та став стандартним радіопротоколом для бездротових колонок, навушників та автомобільних розважальних систем [13].

Bluetooth Low Energy

Через кілька версій був створений Bluetooth LE (Low Energy), який розроблений для роботи з дуже низьким енергоспоживанням. Для зменшення споживання була зменшена кількість каналів зв'язку до 40 каналів та зменшена швидкість передачі даних.

З іншого боку перевагою над класичною версією є збільшена дальність зв'язку та можливість використання для позиціонування пристроїв. Так як Bluetooth LE тепер включає функції, які дозволяють одному пристрою визначати присутність, відстань та напрямок до іншого пристрою [13].

Більш детальну різницю між Bluetooth Low Energy та Bluetooth наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристика Bluetooth та Bluetooth LE [13]

Параметр	Класичний Bluetooth	Bluetooth LE
Смуга частот	Діапазон ISM 2,4 ГГц (використовується 2,402 – 2,480 ГГц)	Діапазон ISM 2,4 ГГц (використовується 2,402 – 2,480 ГГц)

Продовження таблиці 1.1 – Характеристика Bluetooth та Bluetooth LE [13]

Параметр	Класичний Bluetooth	Bluetooth LE
Канали	79 каналів з інтервалом 1 МГц	40 каналів з інтервалом 2 МГц (3 рекламних канали/37 каналів даних)
Швидкість передачі даних	EDR PHY (8DPSK): 3 Мбіт/с EDR PHY ($\pi/4$ DQPSK): 2 Мбіт/с BR PHY (GFSK): 1 Мбіт/с	LE 2M PHY: 2 Мбіт/с LE 1M PHY: 1 Мбіт/с LE Coded PHY (S=2): 500 Кбіт/с LE Coded PHY (S=8): 125 Кбіт/с
Енергоспоживання	Високе	Низьке
Діапазон зв'язку	До 10 м	До 100 м

1.4.2 WiFi

Іншим методом бездротового зв'язку є WiFi (Wireless Fidelity), що означає бездротова точність та є назвою для стандартів IEEE 802.11, перший з яких був створений ще у 1997 році. Цей стандарт по факту і став першою версією WiFi та зробив його відомим у всьому світі. З розвитком технологій впроваджуються новіші стандарти з покращеною швидкістю передачі даних, надійністю та підвищеною ефективністю [14].

Найбільш сучасною версією є WiFi 7 або 802.11be Extremely High Throughput. Його мета полягає в тому, щоб забезпечити вражаючу швидкість для кожного пристрою з більшою ефективністю та покращити продуктивність Wi-Fi у діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц, а його основними особливостями є:

- Канали 320 МГц, доступні в діапазоні 6 ГГц, що забезпечує двічі більшу пропускну здатність, ніж Wi-Fi 6;

- Режим квадратурної амплітудної модуляції 4K (4K QAM) досягає на 20% вищої швидкості передачі, ніж 1024 QAM Wi-Fi 6;
- Швидкість до 46 Гбіт/с;
- Багатоканальна робота підтримує ефективніше балансування навантаження трафіку між каналами, що призводить до збільшення пропускної здатності та підвищення надійності [15].

Більш детальне порівняння новітнього стандарту з його попередніми версіями наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика сучасних версій Wi-Fi [16]

Версія Wi-Fi	Wi-Fi 7	Wi-Fi 6	Wi-Fi 5
Стандарт	802.11be	802.11ax	802.11ac
Частота	2.4 ГГц, 5 ГГц, 6 ГГц	2.4 ГГц, 5 ГГц 6 ГГц	5 ГГц
Максимальна швидкість	46 Гбіт/с	9.6 Гбіт/с	3.5 Гбіт/с
Ширина каналу	До 320 МГц	До 160 МГц	До 160 МГц

Головними недоліками використання WiFi є його погіршення сигналу зв'язку яке може бути викликане перешкодами, такими як стіни будинку, та його споживання енергії, яке викликано великою частотою роботи. Навіть енергозберігаючі пристрої можуть споживати 2,4 Вт на годину, тоді як потужні моделі можуть досягати 24,5 Вт на годину. В середнє споживання роутера становить від 5 до 15 Вт на годину [17].

Для звичайного користувача енергоспоживання пристроїв зі стандартом WiFi не буде перешкодою однак якщо енергоспоживання є критичною характеристикою, та не має потреби у швидкій передачі великої кількості даних то можна розглянути використання Zigbee.

1.4.3 Zigbee

Альянс ZigBee розробив дуже недорогий, енергоємний двосторонній стандарт бездротового зв'язку IEEE 802.15.4. Рішення, що використовують стандарт ZigBee, будуть вбудовані в побутову електроніку, автоматизацію будинків та будівель, промислове керування, периферійні пристрої для ПК, медичні датчики, іграшки та ігри [18].

Він працює у двох окремих діапазонах частот: 868/915 МГц та 2,4 ГГц. Низькочастотний охоплює як європейський діапазон 868 МГц, так і діапазон 915 МГц, який використовується в таких країнах, як Сполучені Штати та Австралія [18].

Головними особливостями використання Zigbee є:

- Низьке енергоспоживання – Пристрої зазвичай можуть працювати кілька років від батарейок типу АА, використовуючи відповідні робочі цикли;
- Низька швидкість передачі даних – Діапазон 2,4 ГГц підтримує швидкість радіопередач 250 кбіт/с. Фактичний сталий трафік через мережу нижчий, ніж ця теоретична радіоємність;
- Малі та великі мережі – Мережі Zigbee варіюються від кількох пристроїв до тисяч пристроїв, які безперебійно взаємодіють;
- Діапазон – Типові пристрої забезпечують достатній діапазон для покриття звичайного будинку [19].

У травні 2021 року Zigbee Alliance оголосив о проведенні ребрендингу у Connectivity Standards Alliance (CSA), та поставив перед собою завдання спростити та гармонізувати Інтернет речей. CSA був створений за об'єднанням Zigbee Alliance та Project Connected Home over IP (Matter), з метою спільного підвищення відомості бренду, щоб разом формувати майбутнє Інтернету речей, створюючи світові стандарти, що впливають на ринок, включаючи спеціалізовані протоколи, такі як Smart Energy та Green Power [20].

1.4.4 Порівняння Bluetooth, WiFi та Zigbee

Коли ми ознайомились з характеристиками типів бездротової передачі, ми можемо порівняти їх за різними характеристиками. Результати цього порівняння наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика Bluetooth, WiFi та Zigbee [21]

Характеристика	Bluetooth	WiFi	Zigbee
Стандарт	802.15.1	802.11x	802.15.4
Частота	2,4 ГГц	2,4 ГГц, 5 ГГц та 6 ГГц	2,4 ГГц
Швидкість передачі даних	1-3 Мбіт/с	10-100+ Мбіт/с	20-250 Кбіт/с
Діапазон передачі	До 100 м		
Споживання енергії	Низьке	Високе	Дуже низьке
Кількість пристроїв	Невелика	Середня	Дуже висока
Вартість	Середня	Низька	Висока

Як ми можемо побачити одного універсального типу передачі поки не придумали і доводиться обирати за потребою, дивлячись на переваги та недоліки кожного з них, наприклад:

Для бездротового зв'язку на короткій відстані Bluetooth є найбільш підходящим бездротовим протоколом. Завдяки Bluetooth Low Energy невеликі обсяги даних можуть обмінюватися бездротовим способом між розумними пристроями, такими як портативні пристрої та смартфони, з низьким енергоспоживанням.

Однак якщо треба об'єднати велику кількість пристроїв, для яких критично важливим є енергоспоживання, таким як пристроям розумного дому(датчики, розумне освітлення, термостати та інші), мережа Zigbee та низьке енергоспоживання

роблять його оптимальним вибором. Радіус дії Zigbee до 100 м достатній для середньостатистичного будинку.

А якщо існує потреба у передачі великих обсягів даних через локальну бездротову мережу, WiFi стане чудовим вибором для пристроїв інтернету речей, які потребують стабільну передачу великої кількості даних у мережу, таких як системи відеоспостереження, голосових помічників. Однак він підтримує невелику кількість підключень та наявність перешкод на шляху може погіршити якість зв'язку [21].

Розглянувши методи бездротового зв'язку ми можемо розглянути структури обміну даними в мережі. Можливості обміну та обробки даних в мережі без використання апаратних потужностей приладу для обрахунків забезпечив стрімкий розвиток хмарних технологій протягом минулого десятиліття. Наразі хмарні провайдери та хостинги надають усе необхідне для стрімкого збору, передачі, обробки, візуалізації та збереження величезних обсягів даних, що генеруються мільярдами пристроїв IoT.

1.5 Аналіз хмарних сервісів

Розвиток Інтернету речей та хмарних сервісів нерозривно пов'язані. Завдяки реалізації хмарних обрахунків технології Інтернету Речей змогли впоратись зі збільшеною кількістю вимірюваних даних. Завдяки хмарним технологіям системи Інтернету речей можуть бути компактними та вартість їх реалізації доступною для звичайного користувача. Нині для реалізації розумного будинку не треба створювати домашній сервер, усі обчислення можна реалізувати у форматі хмарних платформ [22].

Їх роль у розвитку IoT є одною з головних так як вони реалізують такі рішення для розумних систем як:

- Збір та передача даних. Усі дані від розумних пристроїв надходять на віддалений сервер використовуючи бездротові протоколи передачі даних;

- Аналіз та обробка даних. Хмарні платформи надають засоби для аналізу та обробки даних, що дозволяє зменшити навантаження на контролер розумного пристрою;
- Віддалений моніторинг та управління. Хмарні платформи дозволяють дистанційно надсилати команди розумним пристроям та отримувати від них дані в реальному часі для аналізу в реальному часі [22].

Таким чином, функціонал хмарної платформи є центральним елементом для будь-якого масштабного IoT-проєкту. На практиці ці можливості реалізуються через готові комерційні рішення, що дозволяють розробникам не створювати інфраструктуру з нуля, а використовувати перевірені та масштабовані сервіси, такі як: Azure IoT Central, ThingsBoard, та Blynk.

1.5.1 Azure IoT Central

Azure IoT Central - це готовий інтерфейс та середовище API для підключення пристроїв у великому масштабі та для керування ними. Використання цієї платформи дозволяє отримувати дані для аналітики. Вона пропонує пропозиції згідно моделі "платформа як послуга", та поєднує всі служби у зручну в налаштуванні, та повнофункціональну пропозицію Інтернету речей [23].

Головними перевагами використання Azure IoT Central є:

- **Легке розгортання**, завдяки вбудованим шаблонам можна швидко розгорнути високоналаштовані та галузеві рішення IoT, та налаштувати під специфічні завдання;
- **Централізоване управління**. Azure IoT Central дозволяє керувати вашими пристроями за допомогою масштабованих можливостей. Та надає можливості легко змінювати налаштування або оновлювати підключене до Інтернету речей обладнання;
- **Масштабована взаємодія пристроїв**. Azure IoT Central дозволяє створювати, надійну та масштабовану мережу керування вашими IoT-пристроями використовуючи хмару Azure [24].

Отже, як хмарна платформа, Azure IoT Central допомагає розгортати безпечні, надійні та масштабовані додатки Інтернету речей, які можна налаштувати та інтегрувати з іншими сервісами Azure. Однак те що вона є частиною екосистеми Microsoft, може бути корисним тільки для розробників, які знайомі з можливостями їх екосистеми [24].

Саме тому Azure IoT Central більше підходить для професійних розробок, оскільки звичайному користувачу не будуть потрібні величезні обчислювальні можливості. Тому існують менш потужні рішення, які є більш дешевими та не потребують розуміння спеціалізованої екосистеми як у Azure IoT Central.

1.5.2 Blynk

Blynk це low-code-платформа Інтернету речей: повноцінна інфраструктура для підключення пристроїв, розробки інтуїтивно зрозумілих додатків та управління глобальними автопарками без головного болю з боку серверної частини [25].

Головними особливостями використання Blynk є використання набору простих у використанні віджетів та можливість прямого керування пінами без написання коду, що полегшує налаштування для початківців. А історія моніторингу даних через віджет History Graph, де данні зберігаються від тижня до року та можливість надсилання повідомлень через листи, або push-сповіщення на телефоні, допоможуть реалізувати детальний аналіз даних та моніторинг у реально часі. Та завдяки подібному API & UI для всього підтримуваного обладнання та пристроїв та можливості використання будь якого бездротового стандарту зв'язку для під'єднання, можна поєднувати між собою будь-які пристрої, та організовувати між ними зв'язок використовуючи Bridge widget [26].

Отже Blynk завдяки своїм вбудованим системам стане чудовим вибором для створення власних проєктів, та малопотужних пристроїв інтернету речей. А його велика кількість готових віджетів, дозволить людям, які не знайомі з написанням коду створити свої автоматизовані системи, та облегшити свої щоденні задачі.

1.5.3 ThingsBoard

Іншим вибором для самостійного розгортання є ThingsBoard - це платформа Інтернету речей з відкритим кодом для збору, обробки, візуалізації та управління пристроями даних. Вона забезпечує підключення пристроїв через стандартні протоколи зв'язку – MQTT, CoAP та HTTP, а також підтримує як хмарне, так і локальне розгортання [27].

За допомогою ThingsBoard ви можете:

- Створювати пристрої, а також визначати зв'язки між ними.
- Збирати та візуалізувати дані з пристроїв та ресурсів.
- Аналізувати вхідну телеметрію та запускати тривоги за допомогою складної обробки подій.
- Керувати своїми пристроями завдяки дистанційному зворотньому зв'язку;
- Створювати автоматизовані процеси на основі подій пристрою;
- Створювати динамічні та адаптивні інформаційні панелі [28].

Отже ThingsBoard як і Blynk, надає велику кількість засобів для розробки власної автоматизованої системи Інтернету речей, однак завдяки відкритому коду ThingsBoard надає можливість повністю безкоштовно розгорнути власну хмару, та виконувати всі операції на ній, без потреби у використанні хмар, які надає ThingsBoard. Це надає можливість користувачам створити, локальну та приватну мережу для розумних пристроїв розумного дому, з можливістю повної кастомізації під потреби користувача.

1.5.4 Порівняння хмарних сервісів

Коли ми ознайомились з платформами які надаються компаніями Blynk, Thingsboard та Azure IoT Central , які надають послуги з хмарної обробки даних, ми можемо провести їх порівняння за вартістю покупки, легкістю налагоджування, кількістю допустимих пристроїв, масштабованість системи. Результати порівняння наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняльна характеристика хмарних платформ [29, 30, 31]

Платформа	Ціна	Кількість пристроїв	Легкість налаштування	Масштабованість
Azure IoT Central	2 безкоштовних пристрої 800 безкоштовних повідомлень	Максимальна кількість не вказана	Висока; PaaS-платформа, Багато шаблонів	Частина великої екосистеми Azure, отже зможе витримати досить великі потреби
ThingsBoard	9 Євро/місяць (Maker) або безкоштовна версія з власним розгортанням	До 30 пристроїв в плані (Maker). За власного розгортання обмеження по пристроям не встановлене	Середня; Багато готових рішень та шаблонів однак знадобиться налагодження.	За власного розгортання масштабованість не обмежена. При використанні рішень від компанії кількість пристроїв може бути збільшене однак ціна також зростає.
Blynk	Безкоштовно; 99\$/місяць за професійну та комерційну версії	5 пристроїв з 100000 повідомленнями на місяць.	Дуже проста; орієнтована на швидкий старт, мобільні/веб панелі.	Не дуже велика. В платній версії є можливість розширення

Як ми можемо побачити у з порівняння для власного та швидкого проєкту найкраще підійде Blynk. Для невеликого проєкту 5 пристроїв та 100 000 повідомлень більш ніж вистачить для нових користувачів.

Якщо цікавить більш приватна система то використання відкритого коду ThingsBoard для власного розгортання системи буде чудовим варіантом.

А якщо потрібно створити масштабний проєкт то використання технологій Azure стане чудовим рішенням оскільки ви отримаєте не тільки хмарне середовище а і доступ до інших технологій Azure, які можна буде використовувати для вашого проєкту.

Більшість пристроїв Інтернету речей повинні бути невеликими та працювати на основі відносно низького споживання енергії. Це особливо стосується пристроїв з обмеженими ресурсами, які можуть працювати далеко від центральної системи та використовувати для функціонування малопотужні батареї.

1.6 Апаратні платформи розробки в IoT

Якщо хмарне середовище дає IoT пристрою можливість обробляти та зберігати дані то мікроконтролери слугують мозком незліченних розумних пристроїв, безперешкодно обробляючи дані, керуючи зв'язком та контролюючи операції в режимі реального часу.

Використання мікроконтролерів під час створення IoT пристроїв зумовлене декількома факторами:

- Енергоспоживання. Вони споживають настільки мало енергії, що можуть спокійно працювати без підзарядки від тижня до пари місяців;
- Ціна. Вартість одного мікроконтролеру становити кілька доларів;
- Розмір. Сучасні мікроконтролери займають не багато місця. Їх можна заховати будь-куди [32].

На даний момент самими поширеними серед платформ розробки з використанням мікроконтролерів є- Raspberry Pi, STMicroelectronics, та Espressif Systems.

1.6.1 STMicroelectronics

STMicroelectronics - одна з відомих компаній яка спеціалізується на виробництві мікроелектроніки. На їх підприємстві пристрій проходить весь шлях від розробки, та виготовлення до тестування та продажу.

Головними цілями для STMicroelectronics наразі є:

- Розумний транспорт - ST підтримує широкий спектр автомобільних застосувань;
- Розумна енергія - ST спеціалізується на продуктах для розподілу та управління живленням;
- Хмарні технології автоматизації - Їх хмарний штучний інтелект передбачає обмін даними між пристроєм та потужними централізованими серверами для аналізу [33].

Що стосується мікропроцесорних засобів, ST пропонує широкий вибір мікроконтролерів Cortex-M на базі ARM 32-біт з повним вибором периферійних пристроїв. Широта асортименту гарантує, що інженери-конструктори знайдуть поєднання продуктивності, енергоефективності та безпеки, необхідне для їхнього застосування.

Для користувачів які хочуть використовувати продукцію ST для створення систем інтернету речей, існує серія мікроконтролерів STM32Wx, які забезпечують бездротове з'єднання. Вони підтримують діапазон частот нижче GHz та 2,4 GHz, та випускаються у моделях для великих відстаней(STM32WL) з використанням стандарту LoRaWAN, або для коротких відстаней(STM32WBA) який працює з використанням Bluetooth LE або за стандартом IEEE 802.15.4(Zigbee) [34].

Окрім бездротового зв'язку мікроконтролери цієї серії можуть запропонувати до 64 МГц тактової частоти з 512Кб флеш пам'яті та 96Кб операційної пам'яті. Функції FlexPowerControl допоможуть зменшити енергоспоживання під час використання бездротового зв'язку.

1.6.2 Espressif Systems

Компанія Espressif Systems є піонером у розробці повноцінних платформ, що забезпечують роботу наступного покоління інтелектуальних, енергоефективних пристроїв Інтернету речей (IoT) та периферійного штучного інтелекту (ШІ). Їх технології з відкритим кодом трансформують галузі, забезпечуючи масштабовані, безпечні та економічно ефективні інновації - від споживчих товарів до промислового Інтернету речей. Проривна інтеграція обчислень та зв'язку в їх системи, зробила масові інтелектуальні пристрої доступними для всіх [35].

Для розробки Espressif Systems пропонують різні серії ESP32, які відомі завдяки вбудованим Wi-Fi та Bluetooth, та своїй низькій вартості. Зараз компанія виготовляє багато варіантів контролерів ESP32 які є оптимізованими для різних випадків використання- від енергоефективних рішень до надпотужних які підтримують обчислення зі штучним інтелектом.

Для реалізації енергоефективних пристроїв Інтернету Речей, була розроблена плата *ESP32-S2* яка в режимі глибокого сну витрачає приблизно 20мкА, таке наднизьке енергоспоживання було досягнуто завдяки дрібнозернистому керуванню тактовою частотою, та динамічним масштабуванням напруги та частоти. Навіть з таким низьким енергоспоживанням контролер має вбудований одноядерний 32-бітний мікропроцесор Xtensa® LX7, до 240 МГц, 320 КБ SRAM, 128 КБ ПЗУ та підтримує до 4 МБ флеш-пам'яті. Головною особливістю цієї серії є відсутність Bluetooth підключення та наявність порту USB-OTG для прямого USB-зв'язку [36].

Таким чином, мікроконтролери компанії Espressif Systems завдяки наявності Wi-Fi та підтримці сучасних стандартів зв'язку, є ефективним рішенням для створення систем Інтернету речей. Крім того, низька вартість та енергоефективність роблять їх особливо привабливими для розробки пристроїв моніторингу енергоспоживання.

1.6.3 Raspberry PI

Raspberry PI це компанія що з 2012 року розробляє одноплатні та модульні комп'ютери, побудовані на архітектурі Arm. Вони надають високопродуктивні,

недорогі, універсальні обчислювальні платформи ентузіастам та інженерам у всьому світі [37].

Компанія Raspberry Pi виробляє потужні, гнучкі та доступні плати мікроконтролерів в серії Raspberry Pi Pico. Сучасною моделлю є плата мікроконтролера, побудована з використанням RP2350. Він має менш потужний двоканальний процесор Cortex-M33 з частотою 150 МГц та 520 КБ вбудованої SRAM. Програмування плати відбувається на мові MicroPython за допомогою масової пам'яті через USB, а наявність детальної документації, робить Raspberry Pi Pico 2 ідеальною платою мікроконтролера як для ентузіастів, так і для професійних розробників. А варіант плати Raspberry Pi Pico 2 W оснащений бездротовою локальною мережею 2,4 ГГц 802.11n та Bluetooth 5.2, що надає вам ще більше гнучкості в розробці продуктів Інтернету речей або інтелектуальних продуктів [38].

Таким чином, Raspberry Pi надає користувачам засоби для створення вбудованих систем з вбудованим бездротовим зв'язком, що робить можливим їх використання для створення систем Інтернету речей.

1.6.4 Порівняння апаратних платформ

Оглянувши апаратні платформи, які надають компанії Raspberry Pi, STMicroelectronics, та Espressif Systems, ми можемо зробити порівняльну характеристику згаданих контролерів за такими параметрами як: вбудований процесор, енергоспоживання, наявність бездротового зв'язку, вартість, вбудована пам'ять та кількість GPIO пінів. Результати порівняння наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняння апаратних платформ [39, 40, 41]

Платформа	Процесор	Енергоспоживання	Бездротовий зв'язок	Пам'ять	Вартість
STM32Wx	ArmCortex-M33 64 МГц	до 21 мкА	Bluetooth LE, LoRaWAN	96 Kb RAM; 512 Kb flash	до 5 \$

Продовження таблиці 1.5 – Порівняння апаратних платформ [39, 40, 41]

Платформа	Процесор	Енергоспоживання	Бездротовий зв'язок	Пам'ять	Вартість
ESP32-S2	32-бітний Xtensa LX6 240 МГц	В режимі сну до 20 мкА	WiFi 3	320 KB SRAM; 4 MB flash	до 3 \$
Raspberry Pi Pico 2 W	Arm Cortex-M33 150 МГц	до 42 мА	802.11n та Bluetooth 5.2	520 KB SRAM; 4 MB flash	до 7 \$

На основі порівняння в таблиці 1.5 можна зробити висновки, що компанія Raspberry Pi спрямована на створення потужних одно-платних комп'ютерів, а використання їх мікроконтролерів не знайде ефективного застосування у вбудованих системах, через своє більше енергоспоживання та наявність великої кількості специфічних функцій.

З іншого боку продукція STM32 пропонує ефективне рішення для створення систем Інтернету речей, яке підтримує зв'язок як на довгих дистанціях використовуючи протокол LoRaWAN або для коротких дистанцій з використанням Bluetooth LE.

Однак для систем інтернету речей, найбільш ефективним вибором буде продукція Espressif Systems. Достатня потужність, низьке енергоспоживання та вбудовані модулі WiFi та Bluetooth за низьку вартість робить їх використання найбільш доцільним для створення систем Інтернету речей серед порівняних компаній.

1.7 Розумні лічильники

Так об'єднавши мікроелектроніку з хмарними технологіями завдяки технологіям Інтернету Речей, були створені нові та більш досконалі електронні лічильники.

Розумний лічильник – це високотехнологічний пристрій, який веде облік спожитої вами електроенергії. Він робить це часто і надсилає дані прямо вам. Завдяки цій технології вам не потрібно самотійно звітувати про свої показання. Це дає точніші рахунки та дозволяє чітко бачити, як ви використовуєте енергію [42].

Розумні лічильники виготовляються з сучасних електронних компонентів і не мають механічних деталей. Розумні лічильники використовують мікропроцесорні технології та цифрові датчики, що дозволяє їм здійснювати більш точний і багатофункціональний облік електроенергії. На відміну від традиційних електронних приладів, вони не лише вимірюють кількість спожитої електроенергії, але також виконують додаткові корисні функції, такі як:

- Моніторинг параметрів мережі: Смарт-лічильники вимірюють не тільки споживання а і інші параметри мережі(Активну та повну потужність, напругу та силу струму) в реальному часі;
- Сповіщення про аварії: Ці лічильники можуть автоматично сповіщати вас про аварійні ситуації в електромережі;
- Зберігання даних: Вони також можуть зберігати дані вимірів за часом для подальшого аналізу [43].

Зазвичай розумний лічильник складається з: вимірювального блоку; обчислювального блоку; комунікаційного блоку та інтерфейсу користувача.

Отже, принцип роботи розумного лічильника полягає у вимірюванні характеристик мережі в реальному часі, цифровій обробці їх у мікроконтролері та передачі даних користувачу для аналізу. Це дозволяє користувачу отримати точний облік даних, та створює умови для дистанційного керування, та слідкування за станом енергомережі.

Головною перевагою використання розумних лічильників є можливість отримання даних про споживання енергії за часом, та пікові значення навантажень.

Це дозволить вам визначити, де ви можете бути більш енергоефективними. Знання того, як ви використовуєте енергію, може допомогти вам зробити вибір, щоб використовувати її краще. І краще його використання може скоротити ваші витрати [42].

Отже використання розумних лічильників не тільки збільшує точність вимірів та дає змогу користувачам дистанційного обліку та аналізу споживання за часом. А і дає змогу керувати своїми витратами, що допоможе зберегти кошти.

1.8 Огляд сучасних лічильників

Ознайомившись з загальним принципом роботи розумних лічильників, ми можемо на прикладі сучасних пристроїв, якими вже користуються тисячі користувачів у світі, розглянути методи зв'язку та методи вимірювання параметрів мережі в квартирах.

1.8.1 Енергомонітор smart-MAIC D101

Одним з таких прикладів є Енергомонітор D101. Він є розумним лічильником електроспоживання з повним моніторингом параметрів мережі. Прилад призначений для безперервного вимірювання параметрів електричної мережі та споживання електроенергії [44].

Вимірювання параметрів відбувається завдяки використанню зовнішнього трансформатору струму, що дозволяє проводити монтаж системи без розриву мережі. Це буде перевагою для тих хто не хоче або не може дозволити собі порушувати цілісність щитка.

Даний прилад дозволяє відстежувати повний стан мережі та дає поточну інформацію за такими параметрами:

- Напруга, U (В);
- Струм, I (А);
- Активна та Зворотна активна потужність, P (Вт);
- Активна та Зворотна активна енергія, W (Вт * год);
- Коефіцієнт потужності, $\cos \varphi$.

Дивлячись у технічні характеристики приладу які наведено в таблиці 1.6 ми можемо виявити що передача даних користувачу відбувається через протокол бездротового зв'язку IEEE 802.11 Wi-Fi 2.4 GHz. Це дає можливість користувачу переглянути отримані дані на вбудованому WEB-сайті пристрою або у хмарному додатку компанії де користувачу надається можливість моніторити будь-які ресурси, контролювати поточні дані та візуалізувати дані за часом, для чого доступні різноманітні віджети індикатори, та графіки. А якщо у користувача зникне зв'язок з мережею то прилад може зберігати дані тривалістю до 30 днів [45].

Таблиця 1.6 – Технічні характеристики smart-MAIC D101 [44]

Параметр	Значення
Похибка вимірювання активної енергії	<0,5%
Похибка вимірювання, напруга та струм	<1,0%
Вимірювання напруги	від 0 до 270 В
Вимірювання струму	від 50 мА до 100 А
Навантаження на кероване реле	до 50 Вт
Споживання енергії	до 1,2 Вт
Протокол бездротового зв'язку	2,4 ГГц / IEEE 802.11
Інтервал оновлення даних	5 сек
Інтервал збору даних	1 хвилина
Накопичення даних за відсутності Wi-Fi	30 днів
Робочий діапазон температур	від -40 °C до 70 °C
Розміри ДхВхШ	90 x 67 x 52 мм (3 шт. DIN)

Також можна виділити наявність сигнального реле у приладі, яке можна використовувати для подачі сигналу на зовнішній силовий пристрій для

автоматичного перемикавання подачі напруги при перевищенні заданого максимального значення, або за командою від користувача з застосунку.

Однак незважаючи на всі переваги використання енергомонітор D101, його головним недоліком є похибка при вимірюванні струму, яка викликана використанням зовнішнього трансформатору струму. Оскільки хоч і зазначено, що прилад може вимірювати від 50 мА до 100 А силу струму, однак у трансформаторів при малому навантаженні зростає похибка, тому якщо ваша мережа не знаходить під постійним навантаженням, похибка вимірювання буде зростати, що зробить аналіз не достовірним.

Загалом, енергомонітор Smart-MAIC D101 є високофункціональним рішенням, яке можна швидко та без втручання в мережу розгорнути систему енергомоніторингу у квартирі. Однак не можна ігнорувати проблеми з похибкою трансформатору струму та залежність від сигналу Wi-Fi для передачі даних. Через це його не суцільно використовувати там де точність та цілодобовий моніторинг є важливими факторами.

1.8.2 Eastron SDM120-M

Іншим прикладом розумного лічильника є SDM120-M, який представляє собою сучасний прилад призначений для виміру та обліку електроенергії в однофазних мережах змінного струму та дозволяє користувачам ефективно збирати та аналізувати дані про стан енергомережі [46].

Даний прилад дозволяє вимірювати такі параметри мережі:

- напруга;
- сила струму;
- частота;
- коефіцієнт потужності;
- активна, реактивна та повна потужність;
- активна та реактивна енергія [47].

Однак на відміну від Smart-MAIC D101 даний прилад вимірює струм використовуючи вбудований прецизійний шунт. Через це для встановлення потребує безпосереднього ввімкнення у мережу, однак як можна побачити у технічних

характеристиках, наведених в таблиці 1.7, похибка вимірювання є меншою ніж при використанні трансформатору струму.

Таблиця 1.7 – Технічні характеристики SDM120-M [48]

Параметр	Значення
Похибка вимірювання активної енергії	1 %
Похибка вимірювання, напруга та струм	0.5%
Робоча напруга	від 85 до 276 В
Вимірювання струму	від 15 мА до 45 А
Споживання енергії	до 2 Вт
Протокол зв'язку	RS485 Modbus
Швидкість передачі даних	2400 біт/с ~ 38400 біт/с
Робочий діапазон температур	від -25 °С до 55 °С
Розміри ДхВхШ	18 x 119 x 62 мм (DIN 43880)

Також, для зв'язку з користувачем використовується дисплей на корпусі приладу, на якому можна переглянути кожен параметр мережі, або ж використовувати протокол RS-485 Modbus для швидкої передачі без зовнішнього впливу на велику відстань. Також використання протоколу дозволяє легко інтегрувати прилад у системи автоматизованого керування, та робить можливим підключення до програмованих логічних контролерів.

Однак незважаючи на швидку передачу даних та високу стійкість до електромагнітних завад які реалізуються завдяки дротовому зв'язку з використанням протоколу Modbus, для користувача ускладнюється впровадження системи оскільки потребує прокладання ліній зв'язку через відсутність вбудованих бездротових методів передачі даних. А використання шунта для виміру струму збільшує точність виміру, однак потребує втручання в мережу та супроводжується виділенням тепла, що при високому навантаженні на мережу може бути критичним.

1.9 Огляд методів вимірювання струму

Розглянувши пристрої моніторингу енергоспоживання, були виявлені два основні методи вимірювання сили струму – шунт та трансформатор струму. У цьому розділі ми розширимо знання та розберемо їх переваги та недоліки.

1.9.1 Використання шунту

Першим використанням прецизійного шунту для вимірювання сили струму, даний метод ми могли помітити у Eastron SDM120-M. Шунт додається до системи для вимірювання потоку струму. Шунт є простим вимірювальним перетворювачем струму в напругу. Схему підключення шунта для вимірювання сили струму зображено на рис 1.1 [49].

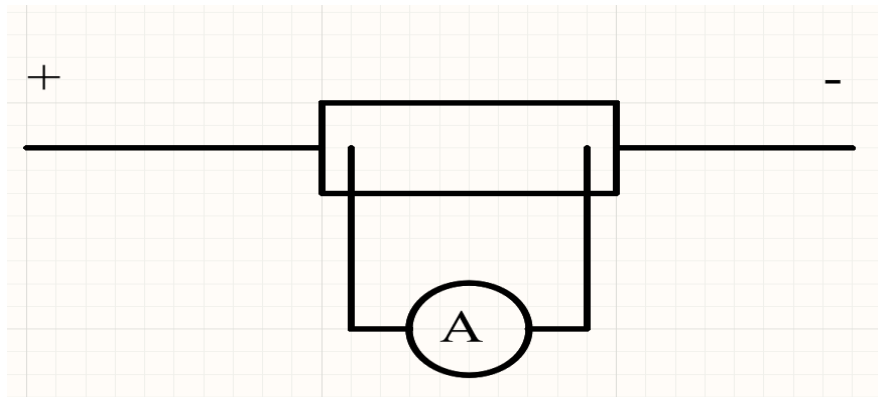


Рисунок 1.1 – Схема підключення шунта для виміру сили струму

Розрахунок відбувається за формулою закону Ома:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

де,

I - вимірюваний струм, А;

U - падіння напруги на шунті, В;

R - опір шунту, Ом.

Головними перевагами використання шунту є висока точність виміру, універсальність та низька вартість. Однак недоліки також присутні і їх не можна ігнорувати. Його використання потребує безпосереднього ввімкнення у мережу, а це створює прямий зв'язок вимірювальної частини пристрою з мережею. Та оскільки ми

для виміру використовуємо резистор то потрібно враховувати виділення тепла, яке відбувається під час роботи, яке на великих струмах може бути критичним фактором, як для цілісності плати так і для точності виміру [49].

1.9.2 Використання трансформатору струму

Інший метод вимірювання струму ми могли побачити у smart-MAIC D101, який використовує зовнішній трансформатор струму. Трансформатор струму – це вимірювальний прилад, який перетворює великі значення змінного струму до менших, зручних для вимірювання. Він складається з магнітопроводу та двох обмоток – первинної та вторинної [50].

Трансформатори струму широко застосовуються в системах обліку електроенергії. На рис 1.2 зображено схему підключення трансформатору струму в колі. Первинна обмотка трансформатора струму включається послідовно у коло зі змінним струмом, що вимірюється. А у вторинну вмикаються вимірювальні прилади. [49].

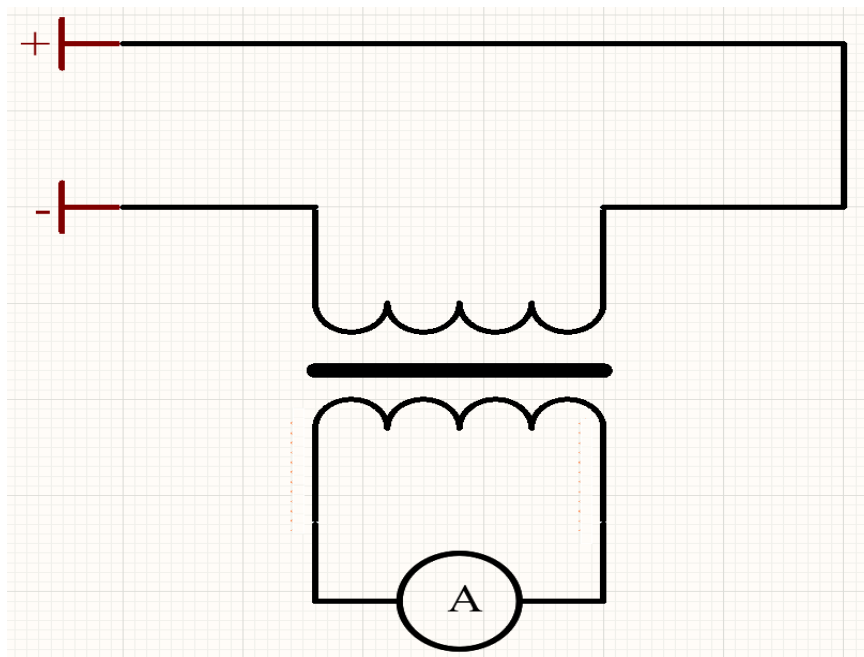


Рисунок 1.2 – Схема підключення трансформатору струму

Фізична основа роботи трансформатора – це явище електромагнітної індукції. Змінний первинний струм створює у магнітопроводі змінний магнітний потік, який індукуює електрорушійну силу у вторинній обмотці. Під її дією у вторинному колі

протікає струм, пропорційний первинному та зменшений у стільки разів, у скільки у вторинній обмотці більше витків, ніж у первинній [50].

Щоб перевести отриманий струм до напруги яку можна буде зчитувати в портах мікроконтролера можна використовувати навантажувальний резистор щоб створити напругу залежну від вторинного струму який в свою чергу пропорційний первинному.

Головною перевагою використання трансформатору є відсутність прямого включення в мережу, що полегшує встановлення та ізолює вимірювальну схему від силової мережі. Однак цей метод є менш універсальним оскільки не працює з постійним струмом, та при вимірюванні малих струмів похибка зростає.

1.9.3 Використання ефекту Холла

Окрім запропонованих методів в професійних приладах для виміру сили струму є метод з використанням датчиків на ефекті Холла. Даний метод є дуже популярним серед ентузіастів при розробці саморобних приладів. Ефектом Холла називається явище, яке виникає при пропусканні струму уподовж провідної пластинки, поміщеної перпендикулярно до ліній зовнішнього магнітного поля, виникає поперечна різниця потенціалів внаслідок взаємодії носіїв заряду з магнітним полем [51].

Цей ефект дозволяє застосовувати датчики Холла для вимірювання магнітних полів, для визначення сили струму за величиною створеного ним магнітного поля. Датчик Холла розташований поруч з провідником, фіксує це поле та перетворює його у електричний сигнал – напругу, пропорційну величині струму. Отриманий сигнал може бути поданий на аналоговий вхід мікроконтролера для подальшої обробки [51].

Використання даного методу для виміру струму також не потребує прямого включення в мережу, як і трансформатор струму, однак на відміну від нього, датчики Холла можуть вимірювати не тільки змінний струм а і постійний, що робить його використання більш універсальним.

З іншого боку чутливість датчику до магнітних впливів може призвести до появи шумів у вимірюваннях, та необхідність у корегуванні вихідних даних може вплинути на точність вимірюваних даних.

Загалом використання датчиків струму на основі ефекту Холла є сучасним рішенням для систем моніторингу енергоспоживання, оскільки поєднує достатню точність вимірювання, електричну ізоляцію та можливість інтеграції з мікроконтролерами.

1.10 Аналіз методів вимірювання напруги

Розглянувши сучасні пристрої ми побачили, що зазвичай для виміру напруги її понижують до допустимого рівня і визначають початкове значення яке є пропорційне до отриманого. Для пониження напруги є два методи: Використання резистивного подільника напруги або використання трансформатору струму. У даному розділі ми розглянемо їх детальніше та розберемо їх недоліки та переваги.

1.10.1 Використання подільника напруги

Найпростішим методом вимірювання напруги є використання застосовують різних масштабних перетворювачів. Вони застосовуються для розширення границь вимірюваної напруги, до граничних значень вимірювальних портів. [52].

Найпростіший дільник напруги складається з двох чи більше послідовно з'єднаних резисторів, що дозволяють пропорційно понизити рівень напруги до безпечного рівня для вимірювання. Зовнішній вигляд найпростішої схеми зображено на рисунку 1.3.

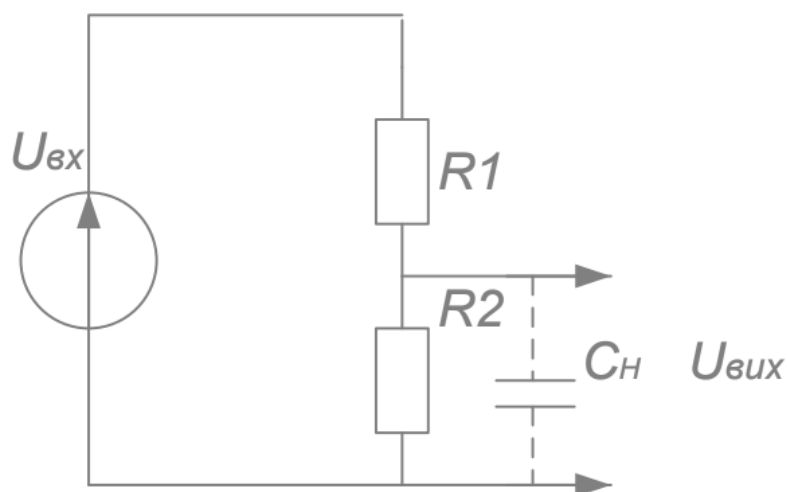


Рисунок 1.3 – Схема найпростішого дільника напруги на двох резисторах [52]

Робота подільника зумовлена Законом Ома, який пояснює зв'язок між вхідною напругою з вихідною напругою.

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{in} \quad (1.2)$$

де,

V_{out} – Вихідна напруга;

V_{in} – Вхідна напруга;

R_1, R_2 – Опір резисторів.

Як ми можемо побачити вихідна напруга буде пропорційна залежна від значення вхідної напруги та опорів резисторів.

При виборі резисторів для зниження напруги до допустимих значень портів мікроконтролера, можна буде використовуючи виміряні значення обрахувати початкові значення напруги мережі, та використати їх для обрахунку інших параметрів мережі.

Такий метод є дуже поширеним як серед ентузіастів так і у професійних приладах, завдяки його простій реалізації, високій швидкодії та низькій вартості.

Однак у цього методу є дуже важливі недоліки які варто враховувати при використанні. Головним недоліком є прямий зв'язок між мережею та вимірювальною схемою, що потребує додаткових засобів захисту для приладу. Також використання резисторів при великому навантаженні може викликати сильний нагрів, що може вплинути на результати виміру.

1.10.2 Використання трансформатору напруги

Іншим методом зменшення напруги є використання вимірювального трансформатору, у якому вторинна напруга за нормальних умов використання суттєво пропорційна первинній напрузі [53].

Трансформатор напруги використовується для перетворення високої напруги на низьку, та безпечну для контрольно-вимірювальних приладів.

Принцип його роботи базується на явищі магнітної індукції. Найпростіший трансформатор складається з двох котушок з таким розташуванням, що одна перебуває у магнітному полі іншої. На першу обмотку подається вхідна напруга від джерела живлення. Ця обмотка називається первинною. Створений нею змінний магнітний потік, завдяки електромагнітній індукції, призводить до появи ЕРС в другій обмотці, яку називають вторинною [54].

Відношення напруг між обмотками дорівнює відношенню кількості витків в обмотках.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.3)$$

де,

U_1 -вхідна напруга;

U_2 -вихідна напруга;

N_1, N_2 - кількість витків первинної та вторинної обмотки.

Після зниження напруги її можна аналогічно виміряти на вході у мікроконтролері та за відношенням обрахувати первинне значення.

Головною перевагою використання трансформатору напруги замість подільнику, є електрична ізоляція для вимірювальної схеми від мережі, що підвищує безпеку роботи приладу. Однак його більші габарити, вартість та можливість вимірювати тільки змінну напруги робить цей метод менш поширеним ніж резистивні подільники.

1.11 Методи розрахунку параметрів мережі

Розглянуті методи дали нам розуміння як виміряти основні параметри мережі: силу струму та напругу. Саме ці величини є головними для подальшого обрахунку параметрів мережі. У цьому розділі ми розглянемо, як на основі вимірених значень сили струму та напруги можна обрахувати: активну, реактивну та повну потужність, коефіцієнт потужності та спожиту електричну енергію.

Перед тим як ми зможемо розраховувати параметри мережі нам потрібно знайти середньоквадратичне значення струму та напруги, оскільки ми плануємо

вимірювати параметри мережі змінного струму де напруга та струм змінюються з часом за синусоїдою.

Для цього нам потрібно за певний проміжок часу проводити N кількість вимірів струму та напруги та обраховувати середньоквадратичне за формулами:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u_i^2}{N}} \quad (1.4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N i_i^2}{N}} \quad (1.5)$$

де,

U_{rms}, I_{rms} -Середньоквадратичне значення напруги та струму;

N -кількість обрахунків;

i_i, u_i - Миттєві значення струму та напруги.

Активна потужність в однофазному електричному колі змінного струму визначається як середнє значення потужності за період T [49]:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p^* dt = \frac{1}{T} \int_0^T u^* i^* dt \quad (1.6)$$

де,

p - Активна потужність, Вт;

u -миттєве значення напруги, В;

i - миттєве значення сили струму, А;

Повна потужність може буде знайдена завдяки добутку середньоквадратичних значень струму на напругу.

$$S = U_{rms} * I_{rms} \quad (1.7)$$

де,

S -Повна потужність мережі змінного струму

U_{rms}, I_{rms} -Середньоквадратичне значення напруги та струму;

Знаючи значення реактивної та повної потужності можна обрахувати значення реактивної потужності.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (1.8)$$

де,

Q- Реактивна потужність;

S- Повна потужність мережі змінного струму;

P- Активна потужність.

Коефіцієнт потужності визначається як відношення активної потужності до повної [49]:

$$k_{\varphi} = \frac{P}{S} \quad (1.9)$$

де,

k_{φ} – коефіцієнт потужності;

S- Повна потужність мережі змінного струму;

P- Активна потужність.

Для обрахунку енергоспоживання ми скористаємось формулою для кількості затраченої електроенергії [49].

$$W = P \cdot t \quad (1.10)$$

де,

W-Кількість споживаної електроенергії, КВт/год;

P-Активна потужність мережі, Вт;

t-Час роботи, год;

1.12 Технічне завдання на розробку

У цьому підрозділі визначаються технічні та функціональні вимоги до проєктування, технічної реалізації та алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням побутової мережі на основі концепції Інтернету речей. Об'єктом розробки є мікропроцесорний пристрій, призначений для інтеграції безпосередньо в силовий ланцюг квартири.

Головною метою створення зазначеної системи є автоматизація моніторингу споживання електричної енергії, забезпечення безперервного віддаленого контролю

параметрів мережі в режимі реального часу та мінімізація людського фактора при зборі статистичних даних.

Пристрій має забезпечувати вимірювання діючого значення напруги в однофазній мережі (230 В; 50 Гц), та сили споживаного струму, на основі яких система повинна обчислювати: активну, реактивну та повну потужність, а також виконувати підрахунок кількості витраченої електричної енергії у кіловат-годинах та її поточної вартості. Максимальна відносна похибка вимірювання потужності не повинна перевищувати $\pm 5\%$ у всьому робочому діапазоні навантажень. Окрім пасивного моніторингу, обов'язковою функцією є захисне й дистанційне відключення об'єкта за допомогою вбудованого силового реле.

Конструкція друкованої плати має бути стійкою до теплових навантажень при проходженні великих струмів. Логіка аварійного захисту повинна забезпечувати мінімальний час спрацювання й залишатися автономною навіть за відсутності зв'язку з Інтернетом. Для зовнішнього двостороннього зв'язку з хмарним сервісом використовується інтегрований модуль Wi-Fi. Графічний інтерфейс користувача має відображати поточні характеристики, надавати інструменти віддаленого керування реле та забезпечувати аналіз накопиченої статистики споживання за день, тиждень і місяць.

Конструктивне виконання корпусу системи має передбачати стандартизований монтаж на DIN-рейку, що забезпечить інтеграцію розробленої системи в будь-яку стандартну побутову електричну шафу. Також корпус має забезпечувати надійний захист внутрішніх електронних компонентів та друкованої плати від механічних пошкоджень, пилу та випадкових дотиків користувача до струмопровідних частин відповідно до вимог електробезпеки.

Висновки до розділу 1

У першому розділі був проведений детальний аналіз сучасного стану енергомережі та виявлена гостра потреба у впровадженні засобів дистанційного моніторингу у реальному часі, для детального аналізу енергоспоживання для планування ефективного використання електроенергії, та було виявлено що

традиційні лічильники не можуть забезпечити виконання сучасних потреб до систем обліку.

Було запропоновано використання концепції Інтернету речей для створення автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживання мережі, та проаналізовані методи бездротового зв'язку, хмарні середовища для обробки даних, та апаратні платформи розробки, де були виявлені сильні та слабкі сторони кожного з них.

Після аналізу концепції розумних лічильників та двох сучасних рішень, були визначені основні функціональні можливості та досліджено методи вимірювання електричних параметрів, зокрема струму та напруги, а також підходи до розрахунку похідних величин, таких як потужність та енергоспоживання, що є необхідними для реалізації повноцінного моніторингу електричної мережі.

Завершальним підсумком аналітичного етапу стало формування технічного завдання на розробку системи. У ньому чітко зафіксовано вихідні експлуатаційні параметри пристрою, включаючи роботу під номінальною напругою 230 В, та обмеження відносної похибки вимірювань граничною межею у $\pm 5\%$.

Таким чином проведений аналіз, підтвердив потребу у розробці автоматизованої системи моніторингу за енергоспоживання, та створив інформаційну базу на основі якої можна провести проєктування пристрою.

2. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ МЕРЕЖІ

2.1 Структурна схема

Для обрахунку даних та реалізації дистанційного доступу до вимірних даних доцільним буде використання хмарного сервісу, це дозволить зменшити навантаження на контролері та дозволить зберігати дані на сервері, де їх можна буде аналізувати за часом, та виявляти пікові значення енергоспоживання.

Для роботи контролеру системи, силового реле, та модулю бездротового зв'язку, системі потрібне джерело живлення, яке буде перетворювати електроенергію з вимірюваної мережі 220В змінного струму в безпечну для живлення елементів системи постійний струм.

А для реалізації бездротового зв'язку між контролером системи та хмарою доцільним буде використання модулю WiFi, що дозволить зробити прямий вихід в мережу Інтернет. А високе енергоспоживання не буде проблемою для системи оскільки вона буде житись на пряму з мережі, тому енергоспоживання модуля не завадить реалізувати цілодобовий моніторинг.

Для реалізації керування системою виконуючим пристроєм системи пропонується зробити реле, яке буде автоматично вимикати подачу живлення на квартиру, при досягненні граничних значень, або за потребою користувача завдяки дистанційній команді.

На рис. 2.1 зображено запропоновану структурну схему автоматизованої системи вимірювання та моніторингу енергоспоживання мережі на основі концепції Інтернету речей, яка була розроблена мною під час написання тези на всеукраїнську науково-практичну конференцію студентів, аспірантів та молодих вчених. Вона відображає основні компоненти пристрою та їх взаємозв'язки для реалізації дистанційного моніторингу та контролю енергопостачання в мережі [55].

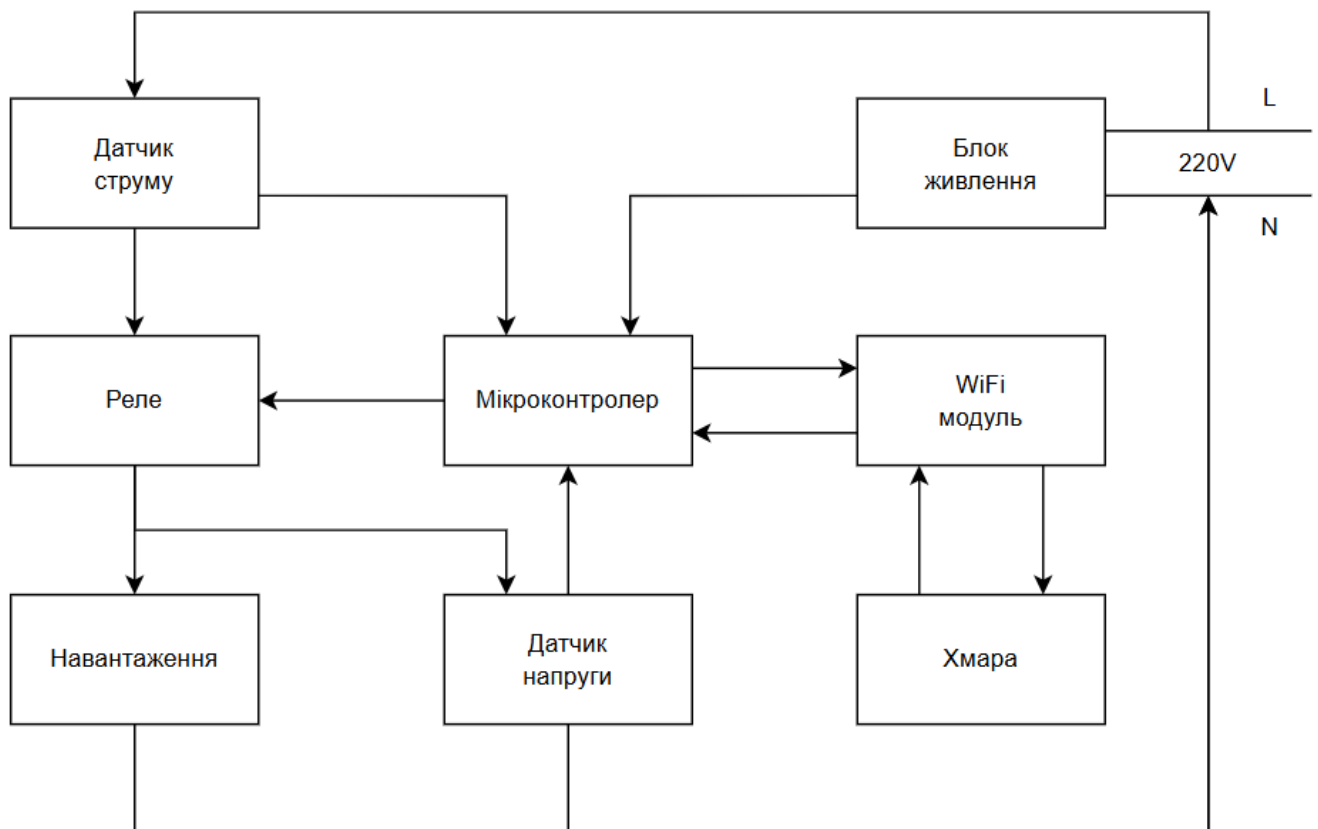


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизованої системи вимірювання та моніторингу енергоспоживання мережі на основі концепції Інтернету речей

Як видно з рис 2.1 запропонована схема демонструє, що система вмикається в розрив мережі квартири, звідки датчик струму та напруги вимірюють параметри мережі та відправляють дані на обрахунок до мікроконтролеру. Після обрахунку контролер відправляє дані у хмару завдяки реалізованому зв'язку через WiFi модуль. За потреби з хмари може прийти зворотній сигнал до мікроконтролеру, завдяки якому можна керувати реле, яке вбудоване в мережу, що дозволить керувати енергопостачанням мережі дистанційно. Та для живлення всіх компонентів в системі присутній блок живлення, який дозволяє живити систему напряму з мережі.

Таким чином, запропонована логіка забезпечує ефективну реалізацію концепції Інтернету речей, що дозволяє автоматизувати процес обліку параметрів мережі. Це дозволяє вилучити людський фактор при зборі даних та надає користувачу інструменти для дистанційного аналізу та керування енергоспоживанням у реальному часі.

2.2 Структурна схема автоматизації

Важливим етапом при розробці автоматизованої системи є побудова структурної схеми автоматизації. Вона визначає функціонально-алгоритмічну архітектуру системи, відображаючи взаємозв'язки між технологічним об'єктом, вимірювальними пристроями, контролером та виконуючим механізмом. Створення такої схеми дозволяє визначити контури керування, та закласти технічний фундамент для аналізу роботи всієї системи в цілому. В цьому розділі буде проведений детальний аналіз фізичної природи об'єкта керування та опис функціонування структури автоматичного контуру

2.2.1 Опис об'єкта керування

Технологічним об'єктом керування є електрична мережа квартири 220 В, а процесом який протікає в ньому електричне навантаження, яке зумовлено роботою сукупністю побутових електроприладів підключених до мережі.

За аналізом природи та внутрішніх процесів, об'єкт керування володіє такими характеристиками:

- За кількістю вхідних/вихідних величин-Одновимірний;
- За типом параметрів: із розподіленими параметрами;
- За фізичною природою зовнішніх зв'язків- Енергетичні та інформаційні;
- За типом диференціальних рівнянь- Нелінійний;
- За характером перебігу перехідних процесів- Стійкий;
- За наявністю апріорної інформації- Детермінований.

Для складання параметричної схеми об'єкта керування зображеного на рисунку

2.2 було визначено та описано такі регульовані параметри, збурення і дії керування:

- Регульований параметр в системі - активна потужність мережі $P(t)$, [Вт];
- Збурюючий вплив - зміна навантаження мережі $P_0(t)$ [Вт];
- Керуючий сигнал в системі - вихідний сигнал з реле $u(t)$.

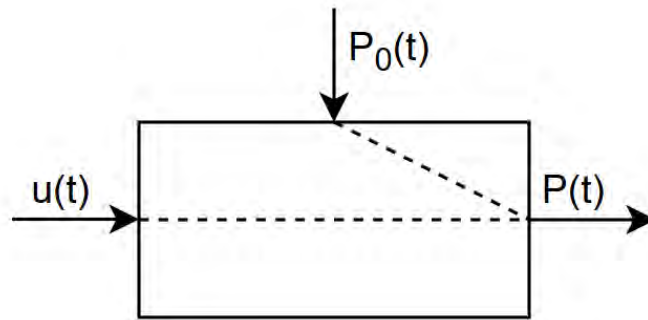


Рисунок 2.2 – Параметрична схема об'єкту керування(квартири)

Взаємодія цих параметрів утворює параметричну схему об'єкта керування (квартири), де під дією вхідного збурення $P_0(t)$ та керуючого входу $u(t)$ з виконавчого механізму формується вихідний сигнал активної потужності $P(t)$.

2.2.2 Опис структурної схеми автоматизації

Система керування реалізована за принципом замкненого контуру з від'ємним зворотним зв'язком. Її головна мета полягає в тому, що вона постійно порівнює поточний стан об'єкта із заданим значенням та розриває ланцюг живлення, якщо параметр виходить за рамки. Розроблена структурна схема автоматизації для автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням мережі на основі технологій Інтернету Речей зображена на рисунку 2.3.

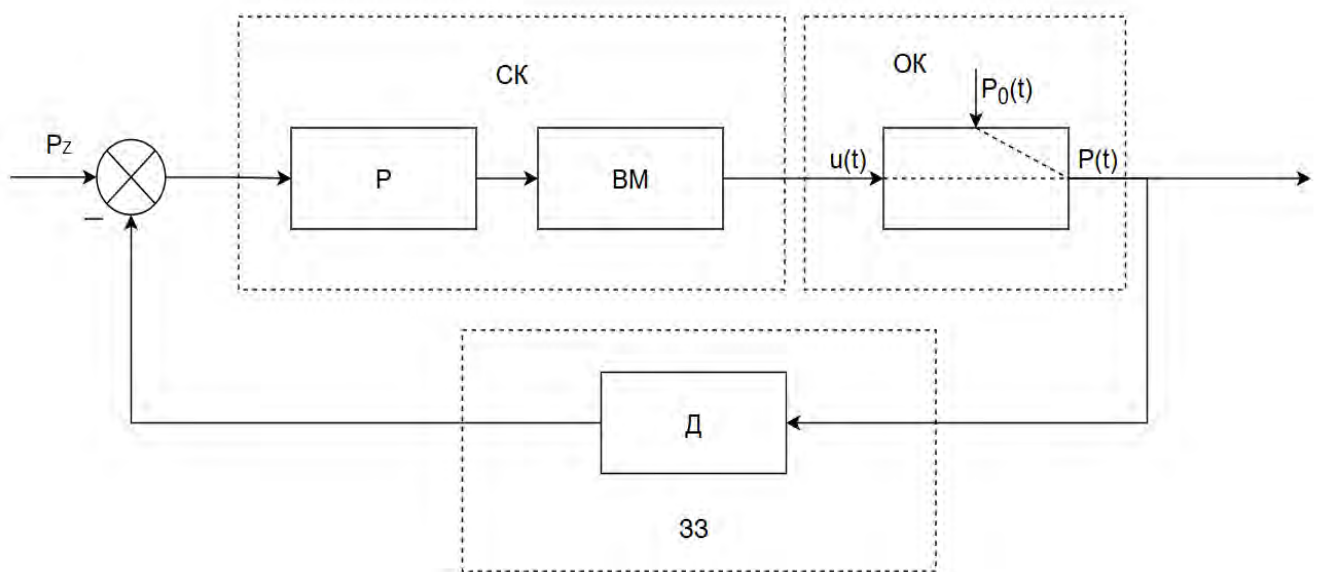


Рисунок 2.3 – Структурна схема автоматизації

Розроблена система складається з:

- P_z - Вхідний сигнал - Задана потужність, [Вт];
- P - регулятор(мікроконтролер) - базуючись на вхідних даних відправляє сигнал на виконуючий механізм.
- BM - Виконуючий механізм(Реле) – В залежності від сигналу на вході подає або відключає живлення квартири від мережі;
- OK - Об'єкт керування - електрична мережа квартири;
- D - датчики для вимірювання потужності мережі.

Функціонування розробленої схеми полягає у вимірюванні поточної потужності мережі в реальному часі з датчиків(D). Отриманий сигнал порівнюється із заданою потужністю P_z , регулятор (мікроконтролер) обробляє цю інформацію. У випадку, якщо через увімкнення нових приладів поточне навантаження перевищує задане значення, регулятор миттєво відправляє сигнал на виконуючий механізм (реле), яке розриває подачу енергопостачання, захищаючи об'єкт керування. Таким чином розроблена схема забезпечує автономний захист мережі від перенавантаження.

2.3 Формування вимог до елементів системи

Після розробки структурної схеми системи автоматизованої системи вимірювання та моніторингу енергоспоживання мережі, необхідно сформулювати технічні вимоги до її ключових елементів, які дозволять створити не лише функціональну, а і надійну та ефективну систему.

2.3.1 Вимоги до датчиків

Згідно з дійсною постановою 17 березня 2021 р. № 475 Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП, в Україні на квартиру допустима потужність тримається на рівні 5 кВт на кожного індивідуального побутового споживача, з напругою 240В. Отже ми можемо розрахувати максимальну силу струму, яку нам необхідно буде вимірювати, за формулою [56]:

$$I_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{U} \quad (2.1)$$

де,

I_{MAX} -Максимальний вимірюваний струм;

P_{MAX} -Максимальна допустима потужність;

U -Напруга мережі

$$I_{MAX} = \frac{5000}{240} = 20.8(A)$$

Отже система має вміти проводити вимірювання в мережі з змінним струмом не менше 21 А та 240 В змінної напруги.

2.3.2 Вимоги до мікроконтролеру

Для реалізації системи, до мікроконтролера ставляться суворі критерії, оскільки він повинен буде постійно обробляти велику кількість вхідних даних, контролер повинен мати високочастотне ядро в своїй будові. При частоті від 160МГц процесор контролера зможе обробляти дані від датчиків в реальному часі.

Для збереження поточних значень параметрів, перед відправкою до хмари, та для розміщення програмного коду та бібліотек програми, вбудована Flash та RAM пам'ять повинні бути не менше 2Мб та 300кБ відповідно.

А при наявності вбудованого бездротового інтерфейсу Wi-Fi, можна буде значно зменшити габарити системи та затрати на її побудову.

Також для об'єднання контролера з іншими елементами системи він повинен мати виходи, які підтримують різні протоколи зв'язку, щоб керувати реле, та отримувати значення від датчиків струму та напруги.

Та оскільки система живиться від вимірюваної мережі енергоспоживання є критичною характеристикою для контролера, яка буде на пряму впливати на вимірянні данні.

2.3.3 Вимоги до реле

Головними вимогами до реле є його електричні параметри навантаження, для нашої системи воно повинно витримувати на менше ніж 21А струму при 240В напруги змінного струму.

Керування повинно відбуватись при живленні від блока живлення, щоб було можливо реалізувати керування з мікроконтролеру. Та в цьому випадку лінія керування та силова лінія повинні бути ізольовані, щоб струм мережі не пройшов на вхід мікроконтролера.

Щоб система встигала розімкнути реле при надзвичайній ситуації час спрацювання повинен бути дуже низьким, та запас міцності достатній для мінімум 100000 спрацювань реле.

2.3.4 Вимоги до хмарної платформи

Хмарна платформа виконує роль інтерфейсу користувача, та надає можливість зберігання даних та дистанційного аналізу і обрахунку вимірюваних параметрів.

Перш за все обрана платформа повинна бути сумісна з обраним контролером та мати можливість не тільки на отримання даних, а і на зворотний зв'язок з контролером. Можливість доступу до хмари з телефону стане великою перевагою, тому що тоді користувач, зможе отримати доступ з будь якого місця а не тільки з комп'ютеру. Також використання телефону дасть змогу відправляти повідомлення користувачу, при виникненні надзвичайних ситуацій.

Хмарна платформа повинна бути інтуїтивною та читабельною для будь якого користувача, тому наявність готових віджетів для відображення поточних значень та графіків з зміною за часом є одною із важливих вимог до платформи.

Оскільки система буде цілодобово відправляти дані до хмари, платформа повинна мати можливість регулярно отримувати данні та зберігати їх протягом тривалого часу, від пари місяців до року, для можливості детального аналізу за часом.

Та головним критерієм є вартість використання платформи, оскільки від цього фактору на пряму залежить наскільки вигідним є використання даної системи.

2.3.5 Вимоги до блоку живлення

Оскільки система буде цілодобово працювати, та буде підключена до мережі, найбільш доцільним буде житись використовуючи енергію вимірюваної мережі. Це

можна досягти використовуючи AC\DC перетворювач, який буде понижувати напругу мережі до безпечного для живлення компонентів системи.

Головними вимогами до такого перетворювача будуть параметри вхідних та вихідних характеристик. Перетворювач повинен стабільно працювати в мережі змінного струму до 240В та підтримувати частоту 50Гц.

А вихідні характеристики повинні бути стабільними та рівень шуму вихідної напруги не повинен перевищувати 150мВ, що забезпечить стабільну роботу датчиків та контролеру під час передачі даних через бездротовий зв'язок.

Вихідна напруга повинна бути достатньою для живлення всіх компонентів системи та вихідний струм повинен покривати пікові навантаження під час роботи модуля WiFi та одночасному ввімкненні силового реле.

Оскільки вся система буде житись від цього блоку, важливим є наявність захистів від короткого замикання та перевантаження, що захистить компоненти під час виникнення несправності в системі.

Також оскільки блок живлення буде працювати від мережі він не повинен споживати велику кількість електроенергії, оскільки це буде впливати на виміряні дані. Для розміщення на друкованій платі разом з іншими компонентами системи, габарити блоку повинні бути не великими, та енергоефективність блоку повинна бути не менше 80%, щоб мінімізувати нагрів.

2.4 Підбір елементів згідно вимог

На основі технічних вимог сформованих у минулому підрозділі до компонентів системи вимірювання та моніторингу енергоспоживання, у даному розділі буде проводитись аналіз та вибір конкретних електронних компонентів для реалізації системи. Вибір компонентів базується на сформованих вимогах та на пошуку оптимального балансу між точністю вимірювань, габаритами готової системи та вартістю її реалізації.

Враховуючи що система буде працювати в умовах побутової електромережі квартири, додатковою вимогою до всіх компонентів має бути робоча температура середовища від -20 до +60 С та вологість не більше 80%.

Далі буде проведений детальний аналіз характеристик компонентів та обрані найбільш доцільні до використання в системі вимірювання та моніторингу енергоспоживання.

2.4.1 Вибір датчиків струму та напруги

Враховуючи виведені вимоги до датчиків, найбільш раціональним рішенням для реалізації вимірювальної частини системи буде використання спеціалізованої високоточної мікросхеми HLW8032.

HLW8032 це прецизійна мікросхема для моніторингу енергії, вона вимірює значення параметрів напругу з мережі, використовуючи шунт для вимірювання сили струму та резистивний подільник напруги, дані методи згідно з аналізу в першому розділі виділяються простотою реалізації та високою точністю вихідних значень.

Завдяки вбудованому процесору, який апаратно розраховує активну потужність та середньоквадратичні значення струму, напруги, можна буде зменшити навантаження на мікроконтролер.

Обраховані дані від HLW8032 можна отримувати використовуючи протокол UART, напругу через порти мікроконтролера.

Оскільки для виміру сили струму та напруги мікросхема використовує шунт та резистивний подільник напруги її граничні значення вимірів залежать від них, однак в своїй рекомендованій комплектації мікросхема з запасом, може вимірювати струм понад 30А та напругу 240В, що буде більш ніж достатньо для поставлених умов. Технічні характеристики мікросхеми наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики HLW8032 [57]

Параметр	Значення
Напруга живлення	5 В
Робоча температура	від -40 до 85 °С
Похибка вимірювання активної потужності	0.2%
Похибка вимірювання сили струму	0.5%

Продовження таблиці 2.1– Технічні характеристики HLW8032 [57]

Параметр	Значення
Похибка вимірювання напруги	0.5%
Споживання потужності для живлення	25 мВт

Як ми можемо побачити з характеристики та аналізу мікросхеми HLW8032, її вибір для реалізації вимірювальної частини є раціональним рішенням оскільки, вона повністю задовольняє поставлені вимоги, та надає можливість зменшити навантаження процесор контролеру завдяки, апаратним розрахункам параметрів у мікросхемі. А його власна похибка вимірювання для струму та напруги становить усього 0.5%, що дозволяє повністю задовольнити вимогу у технічному завданні щодо забезпечення похибки вимірювання менше 5%.

2.4.2 Вибір мікроконтролера

Для реалізації системи, базуючись на поставлених вимогах та проведеному аналізу платформ розробки у розділі 2.6 було обрано мікроконтролер ESP32-S2-mini від компанії Espressif Systems.

В основі контролеру знаходиться 32-бітний мікропроцесор Xtensa LX7, який працює на тактовій частоті до 240МГц, більш ніж задовільняє поставлену вимогу, що гарантує швидку обробку даних від мікросхеми HLW8032.

Контролери серії ESP, відомі своїми вбудованими модулями бездротового зв'язку, аналогічно обраний контролер має вбудований модуль WiFi, що дозволить реалізувати доступ до хмари напряду з контролеру, без використання додаткових модулів. А особливістю серії ESP32-S2 є відсутність модуля Bluetooth, що дозволило виділити більше ресурсів на WiFi з'єднання та оптимізувати енергоспоживання.

Для зберігання програмного коду та поточних параметрів вимірюваної мережі контролер має 320Кб SRAM, 128Кб ROM та 4Мб Flash-пам'яті. Що повністю задовольняє поставлені вимоги до контролера системи.

Головною перевагою використання серії ESP32-S2 понад інших моделей компанії Espressif Systems, є його енергоефективність. При використанні режиму

глибокого сну, контролер споживає не більше 20мкА, та досягає пікового споживання у 200мА під час передачі даних по бездротовому протоколу WiFi 802.11b.

А використання компактної версії ESP32-S2-Mini дозволить значно зменшити розмір друкованої плати, що є важливою перевагою при проєктуванні пристрою для моніторингу та керування енергоспоживання мережі.

Для керування реле та для обробки даних з мікросхеми HLW8032 мікросхема повинна мати достатню кількість GPIO портів. Положення та призначення входів\виходів контролеру ESP32-S2-Mini зображено на рисунку 2.4.

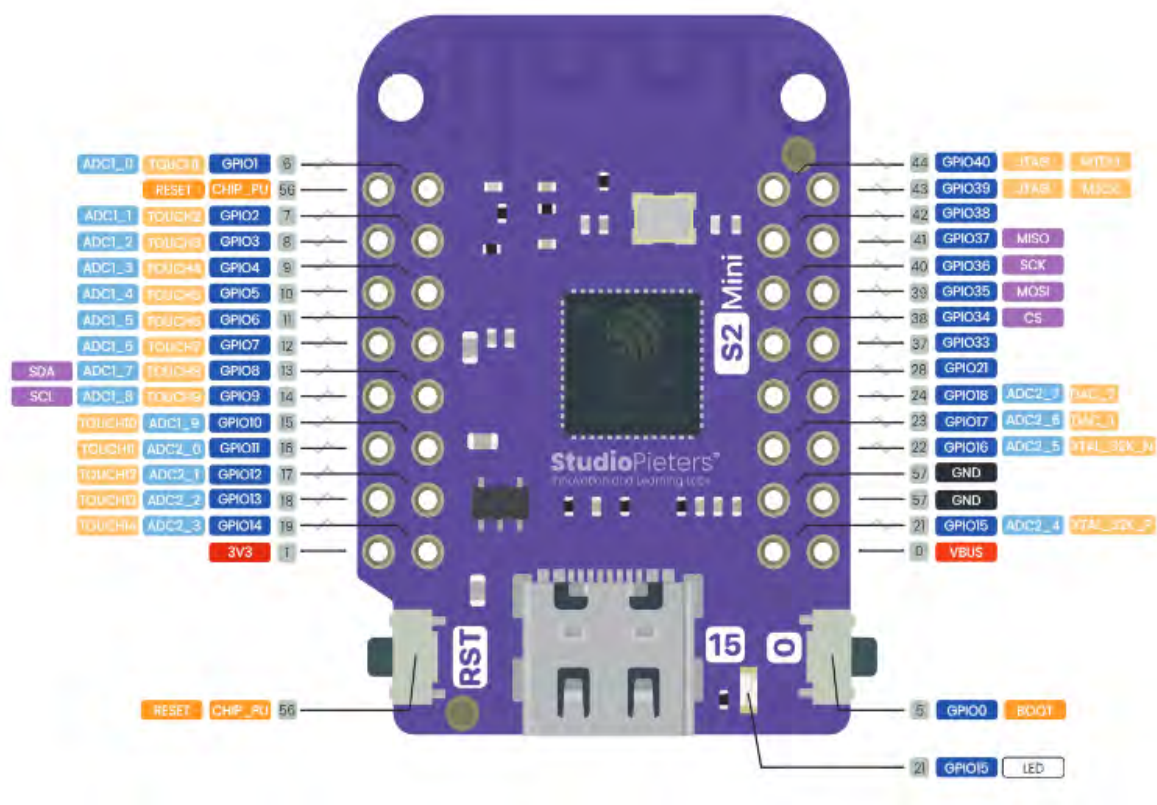


Рисунок 2.4 – Призначення виводів ESP32-S2 MINI [58]

Як ми можемо побачити контролер має велику кількість портів, які підтримують протокол UART для реалізацію зв'язку з мікросхемою HLW8032 та робить можливим керування реле з порту контролера. Загальні технічні характеристики платформи ESP32-S2 MINI наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики платформи ESP32-S2 MINI [39]

Параметр	Значення
Робоча напруга	3.3 В (5В через Vbus)
Цифрові піни	27
Тактова частота	240МГц
Флеш-пам'ять	4Мб
Оперативна пам'ять	320Кб
Бездротовий зв'язок	802.11b
Робочий струм	Від 20мкА до 200мА
Габарити	34.3*25.4мм

Таким чином, аналіз підтвердив, доцільність використання платформи ESP32-S2 MINI як центрального контролера, для керування системою. Завдяки продуктивному ядру, вбудованому бездротовому зв'язку та розвиненій периферії, даний мікроконтролер є ідеальним варіантом для реалізації системи з концепцією Інтернету речей в основі. Обрана платформа забезпечує необхідну потужність для обробки даних від HLW8032 та стабільну бездротову передачу даних. А його компактні габарити та енергоспоживання роблять його найбільш ефективним рішенням для реалізації системи моніторингу енергоспоживання.

2.4.3 Вибір силового реле

Для реалізації дистанційного керування енергопостачанням мережі, та автоматичного захисного відключення навантаження мережі було обрано електромеханічне реле серії SLA-05VDC-SL-C. Дане реле було обране за вимогою комутації великих струмів в мережі квартири, яке може досягати 21А. Оскільки воно може витримувати струм до 30А при напрузі до 250В змінного струму, що забезпечить необхідний запас для надійної роботи при автоматичному захисному відключенні, під час перенавантажень мережі.

Напруга керування обраного реле становить 5В, що дозволяє нам жити всі компоненти системи від одного блоку живлення.

Конструкція реле забезпечує повну ізоляцію між керуючим колом та силовим, що дозволяє керувати ним з мікроконтролеру, а низький перехідний опір дозволяє досягти запасу міцності на 100000 циклів при повному навантаженні та зменшити нагрів при проходженні струму.

Також важливим фактором при виборі реле був тип комутації, а саме наявність звичайно замкненого виходу, щоб реле розмикалось тільки за потреби. А при нормальних умовах нічого не заважало проходженню струму. Обране реле має в своїй будові два типу контактів, що дозволяє нам реалізувати бажаний функціонал. А низький час спрацювання, який не перевищує 15 мс дозволить майже миттєво реагувати на перевантаження мережі та розривати мережу.

Загальні технічні характеристики електромеханічного реле SLA-05VDC-SL-C наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики реле SLA-05VDC-SL-C [59]

Параметр	Значення
Максимальний комутований струм	30А
Максимальна комутована напруга	250В змінного струму/ 30В постійного струму
Напруга котушки керування	5В постійного струму
Час спрацювання	<15мс
Робоча температура	від -25 до 70 °С
Тип контактів	NC та NO
Габарити	31.8*27.4*19.8 мм

Таким чином, використання реле SLA-05VDC-SL-C є найбільш доцільним для реалізації системи моніторингу та керування енергопостачанням мережі. А його невеликий розмір, та невеликий нагрів під час роботи, робить можливим розміщення реле на друкованій платі, разом з іншими компонентами системи.

2.4.4 Вибір блока живлення

Головними вимогами до джерела живлення були – можливість живлення з мережі 240В змінної напруги та забезпечення живлення всіх компонентів системи. Коли ми обрали всі компоненти, які треба живити ми можемо з'ясувати загальний піковий струм, який джерело живлення повинно надавати.

Отже обрана модель повинна покривати:

- Esp32-S2-mini до 250мА;
- Реле SLA-05VDC-SL-C до 200мА;
- Мікросхема HLW8032 та допоміжні компоненти до 50мА.

Отже блок живлення повинен покривати не менше 500мА, а краще щоб був запас від 1А для стабільної роботи вимірювальної схеми та передачі даних у хмару.

Враховуючи вимоги було обрано імпульсний блок живлення Mean Well IRM-10-5, даний блок поєднує у себе в корпусі всі обв'язки для реалізації захисту системи від перевантаження та короткого замикання. Також оскільки все вже знаходиться у корпусі, цей блок живлення можна вмикати в мережу, та отримувати на виході стабільні 5В постійної напруги, що дозволяє живити реле, контролер та вимірювальну мікросхему з однієї лінії живлення. Для цього модуль IRM-10-5 забезпечує вихідний струм до 2А, чого буде більш ніж достатньо для живлення всіх компонентів системи.

А його ККД який становить 80%, мінімізує нагрів пристрою, що робить можливим його розміщення на друкованій платі.

Загальні характеристики імпульсного блоку живлення IRM-10-5 наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики блоку живлення IRM-10-5 [60]

Параметр	Значення
Діапазон вхідної напруги	Від 85 до 264 В змінного струму
Вихідна напруга	5В постійного струму
Вихідний струм	2 А

Продовження таблиці 2.4 Технічні характеристики блоку живлення IRM-10-5 [60]

Параметр	Значення
Рівень шуму	200 мВ
ККД	80%
Робоча температура	від -30 до 70 °С
Габарити	45.7*25.4*21.5мм

Таким чином обраний модуль є оптимальним рішенням, яке забезпечить стабільне живлення компонентів системи, напряду від вимірюваної мережі 220В. А невеликі габарити та низький нагрів, дозволяє розмістити його на друкованій платі разом з іншими компонентами.

2.4.5 Вибір хмарної платформи

Для реалізації дистанційного збору, та візуалізації вимірних даних за часом, було обрано хмарну платформу Blynk. Даний вибір зумовлений простотою розробки інтерфейсу користувача та підключенню мікроконтролеру до платформи завдяки використанню готових бібліотек та віджетів.

Використання віджету “History Graph” дозволить не тільки бачити поточні значення параметрів, а і аналізувати їх за часом протягом дня, тижня або навіть місяців. Це дозволить визначити пікові значення навантаження та в який час вони відбуваються, що допоможе оптимізувати витрати.

Іншою перевагою використання Blynk є його мобільність, використовуючи готовий мобільний додаток можна відстежувати дані з будь якого місця в світі. Також доступ с телефона дає змогу отримувати повідомлення, про надзвичайні ситуації в мережі, такі як перевантаження, або відсутність енергопостачання.

А наявність зворотного зв'язку допоможе реалізувати керування енергопостачанням через мікроконтролер, який буде отримувати сигнал з хмари та вимикати реле.

Головною перевагою використання сервісу Blynk, є вартість його послуг, які були визначені в розділі 2.5. Безкоштовна підписка надає можливість відправки

100000 повідомлень на місяць та налаштування 5 пристроїв. Якщо ми будемо оновлювати значення кожну хвилину в місяць ми будемо використовувати не більше 50000 повідомлень, що залишає половину ліміту повідомлень для керування реле, або для отримання повідомлень через мобільний застосунок.

Таким чином, використання платформи Blynk дозволяє створити інтуїтивно зрозумілий та надійний інтерфейс моніторингу, який повністю задовільнить вимоги системи до дистанційного доступу та тривалого зберігання даних. Та дозволить реалізувати керування енергопостачанням, забезпечуючи економічно ефективну реалізацію системи.

2.5 Розробка електричної принципової схеми

Створення електричної принципової схеми є одним з головних етапів проектування автоматизованої системи вимірювання та моніторингу енергоспоживання. Вона визначає точний характер взаємодії між усіма обраними в минулому розділі компонентами, забезпечує їх живлення, та гарантує загальне функціонування системи в реальних побутових умовах електромережі.

Попередньо проведений аналіз та сформовані технічні вимоги дозволили чітко визначити оптимальну елементну базу. Розробка схеми базується на інтеграції обраного енергоефективного мікроконтролера ESP32-S2-Mini з прецизійною вимірювальною мікросхемою HLW8032, силовим комутаційним електромеханічним реле SLA-05VDC-SL-C та імпульсним джерелом живлення Mean Well IRM-10-5. Ключовим завданням на цьому етапі є проектування правильної обв'язки зазначених компонентів для досягнення максимальної точності зняття первинних сигналів струму та напруги безпосередньо з мережі, а також для забезпечення безперебійної координації між обчислювальним центром і периферією при передачі даних у хмарний сервіс Blynk.

Під час формування схемотехнічних з'єднань потрібно зробити акцент на безпосередньому включенні пристрою в силову мережу об'єкта управління. Побудова зв'язків розробляється з розрахунком того, щоб гарячий силовий шлях проходження високого струму навантаження був якомога коротшим, що дозволить зменшити

тепловиділення на платі. А суворий підбір номіналів дискретних компонентів обов'язки, гарантуватиме здатність усіх елементів системи безвідмовно витримувати пікові значення напруги мережі та забезпечить високу живучість приладу під час цілодобової експлуатації.

2.5.1 Схема живлення

Обраний на попередньому етапі проектування інтегральний модуль живлення Mean Well IRM-10-5, зовнішній вигляд якого зображено на рисунку 2.5, характеризується високою надійністю та збалансованими технічними параметрами, які оптимально задовольняють вимоги розроблюваної автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням.



Рисунок 2.5 – Блок живлення що вбудовується на плату IRM-10-5 MeanWell [61]

Пристрій розрахований на роботу в широкому діапазоні вхідної змінної напруги від 85 до 264 В при частоті мережі від 47 до 440 Гц, що забезпечує стабільність функціонування навіть при значних коливаннях вимірюваної енергомережі. Номінальна вихідна потужність модуля становить 10 Вт, що при стабілізованій напрузі 5 В постійного струму дозволяє видавати тривалий вихідний струм до 2 А. Це значення потужності повністю перекриває потреби системи для живлення мікроконтролера в режимах активної бездротової передачі даних та струм активації котушки силового реле. А коефіцієнт корисної дії 82% підтверджує мінімальний рівень виділення тепла всередині закритого корпусу модуля. Рівень

шумів на виході не перевищує 200 мВ, що гарантує стабільність вихідної напруги живлення для цифрової периферії. Та завдяки компактним габаритам 45,7 на 25,4 на 21,5 мм пристрій займає мінімальну площу на друкованій платі.

Внутрішню архітектуру перетворювача можна побачити на блок-діаграмі, зображеній на рисунку 2.6, яка детально відображає замкнену систему імпульсного перетворення, вхідної силової змінної напруги у стабільну вихідну постійну напругу живлення.



Рисунок 2.6 – Блок діаграма внутрішньої архітектури IRM-10-5 MeanWell [60]

Як зображено на діаграмі первинна зміна напруга мережі спочатку проходить через ЕМІ-фільтр який зменшує високочастотні мережеві шуми, перед випрямленням сигналу, завдяки інтегрованим фільтрам. Отримана на виході висока постійна напруга понижується через силовий трансформатор та випрямляється та фільтрується на виході у стабільну постійну напругу живлення в 5 В.

Висока точність утримання вихідної напруги забезпечується ланцюгом зворотного зв'язку, що складається зі схеми детектування відхилень та оптопари, яка здійснює передачу коригуючого сигналу назад на ШІМ-контролер для динамічного регулювання імпульсів залежно від зміни підключеного навантаження.

Також важливою перевагою модуля є наявність вбудованих вузлів апаратного захисту від короткого замикання, та захисту від перенапруги на виході з обмеженням за допомогою стабілітрона.

Завдяки наявності, як захисних так і фільтруючих компонентів у складі перетворювача, використання додаткової зовнішньої обв'язки для підключення його

на електричній принциповій схемі, не є доцільним, а схему його включення зображено на рисунку 2.7.

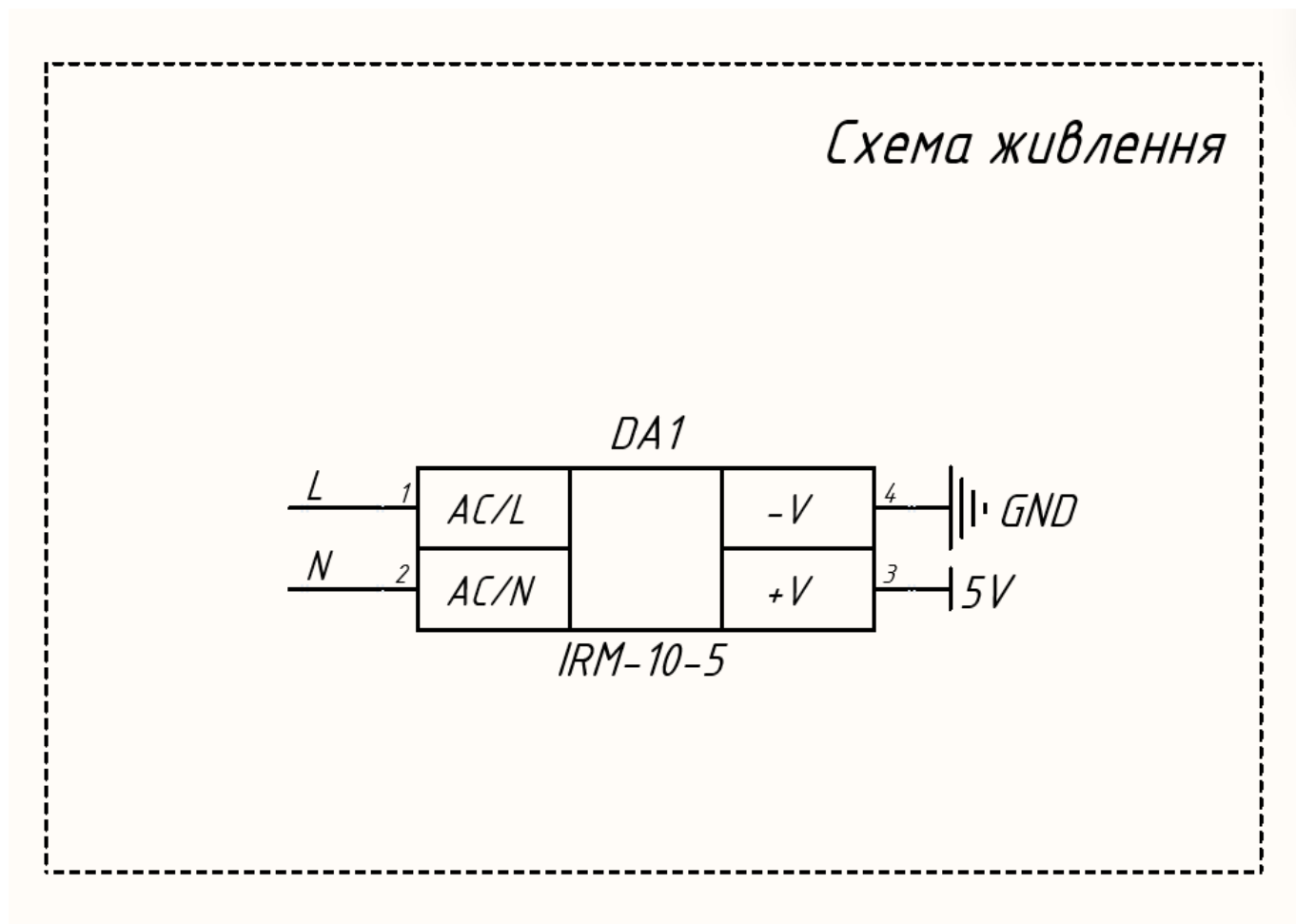


Рисунок 2.7 – Схема електрично принципова включення IRM-10-5

На схемі зображено, що високовольтна вхідна частина модуля DA1 підключається безпосередньо до первинної мережі через виводи змінного струму, де контакт AC/L з'єднується з фазним провідником силової лінії L, а контакт AC/N підключається до нейтрального провідника N. Вихідна низьковольтна частина забезпечує формування стабільної напруги живлення внутрішніх електронних компонентів системи. 5 В постійної напруги живлення знімається з виводу +V і далі буде використаний для забезпечення енергією реле, вимірювальної мікросхеми та мікроконтролеру системи. Негативний вихідний вивід -V підключається до загального заземлення системи, яке в свою чергу під'єднане до нейтрального провіднику мережі.

2.5.2 Вимірювальна схема системи

Мікросхема HLW8032, яка була обрана для реалізації вимірювальної частини системи, є спеціалізованою інтегральною схемою для моніторингу енергоспоживання. Вона здійснює зчитування електричних параметрів безпосередньо з мережі змінного струму через два канали для вимірювання струму та напруги використовуючи шунт низького опору та резистивного дільника напруги.

Головною перевагою цієї мікросхеми серед аналогів є наявність інтегрованого цифрового обчислювального ядра, яке апаратно розраховує такі параметри мережі як: середньоквадратичні значення напруги та струму, та активну потужність. Це дозволяє зменшити навантаження на процесор мікроконтролера системи. А всі обраховані значення, схема виводить у вигляді пакетів цифрових даних через інтерфейс зв'язку UART.

В технічній документації до схеми наведено типову схему включення схеми до мережі, вона зображена на рисунку 2.8.

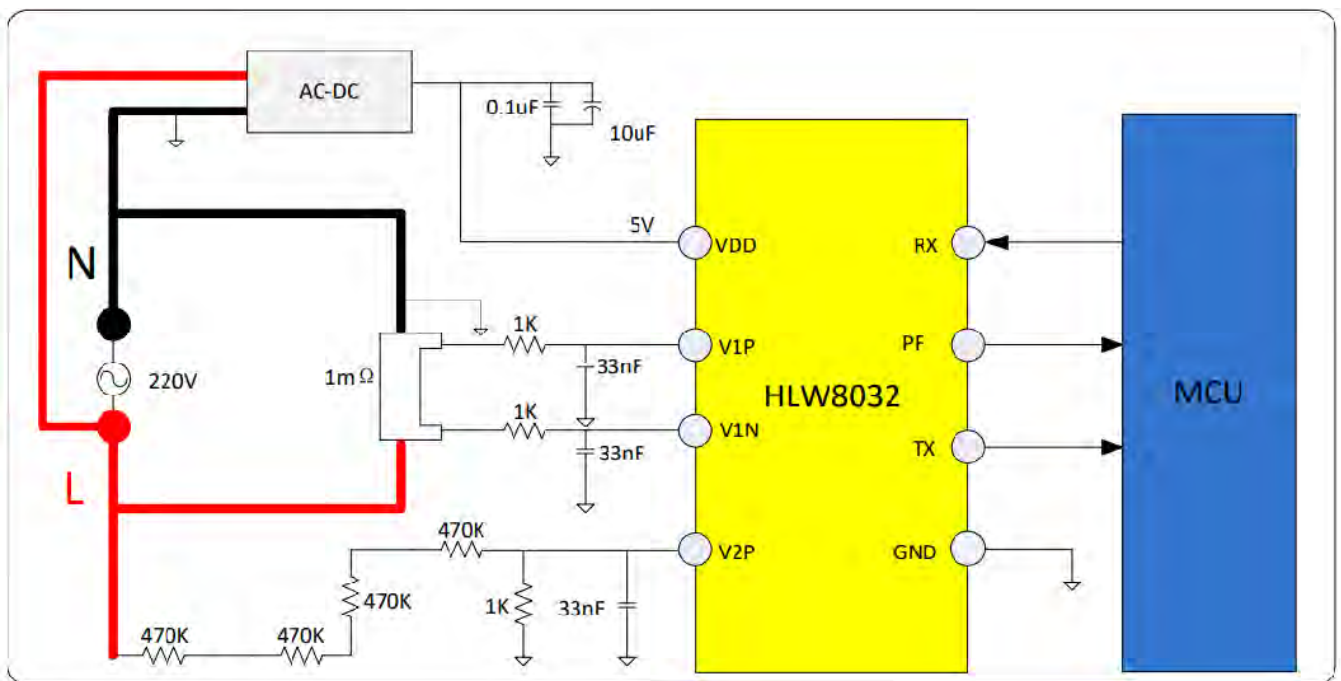


Рисунок 2.8 – Типова схема включення інтегральної схеми HLW8032 в мережу [57].

Наведена схема використовує прецизійний шунт на 1мОм для вимірювання сили струму, який встановлюється в розрив лінії змінного струму. Знятий з такого

шунта сигнал подається на входи мікросхеми через прості захисні RC-фільтри. А для виміру напруги, сигнал з силової лінії мережі, понижується до безпечного рівня за допомогою резистивного подільника напруги.

Оскільки запропонована схема використовує шунт для вимірювання сили струму, розрахуємо потужність тепла яка буде виділятися при проходженні максимально допустимого струму(21А) за формулою:

$$P = I^2 R \quad (2.2)$$

де,

P=потужність тепла, що виділяється за 1 секунду;

I=сила струму, що проходить скрізь провідник;

R=опір провідник.

Отже запропонований шунт під час вимірювання 21А змінного струму буде виділяти:

$$P = 21^2 \times 0.001$$

$$P = 0.441(Bm)$$

Це значення не є критичним, однак виділене тепло може створити похибку вимірювання, тому для реалізації вимірюваної схеми для системи автоматизованого моніторингу та керування енергоспоживанням мережі, пропонується використання 4 паралельного з'єднаних резисторів опором 4мОм замість одного опором 1мОм, тоді загальний опір шунта не змінить однак через кожен з них вже буде проходить $21/4=5.25$ А струму, тому кожен з них буде виділяти:

$$P = 5.25^2 \times 0.004$$

$$P = 0.11(Bm)$$

Таким чином розподілення струму на чотири паралельні канали дозволяє значно знизити локальне виділення тепла на друкованій платі, та запобігає перегріву сусідніх напівпровідникових елементів. Розроблену вимірювальну схему системи зображено на рисунку 2.9.

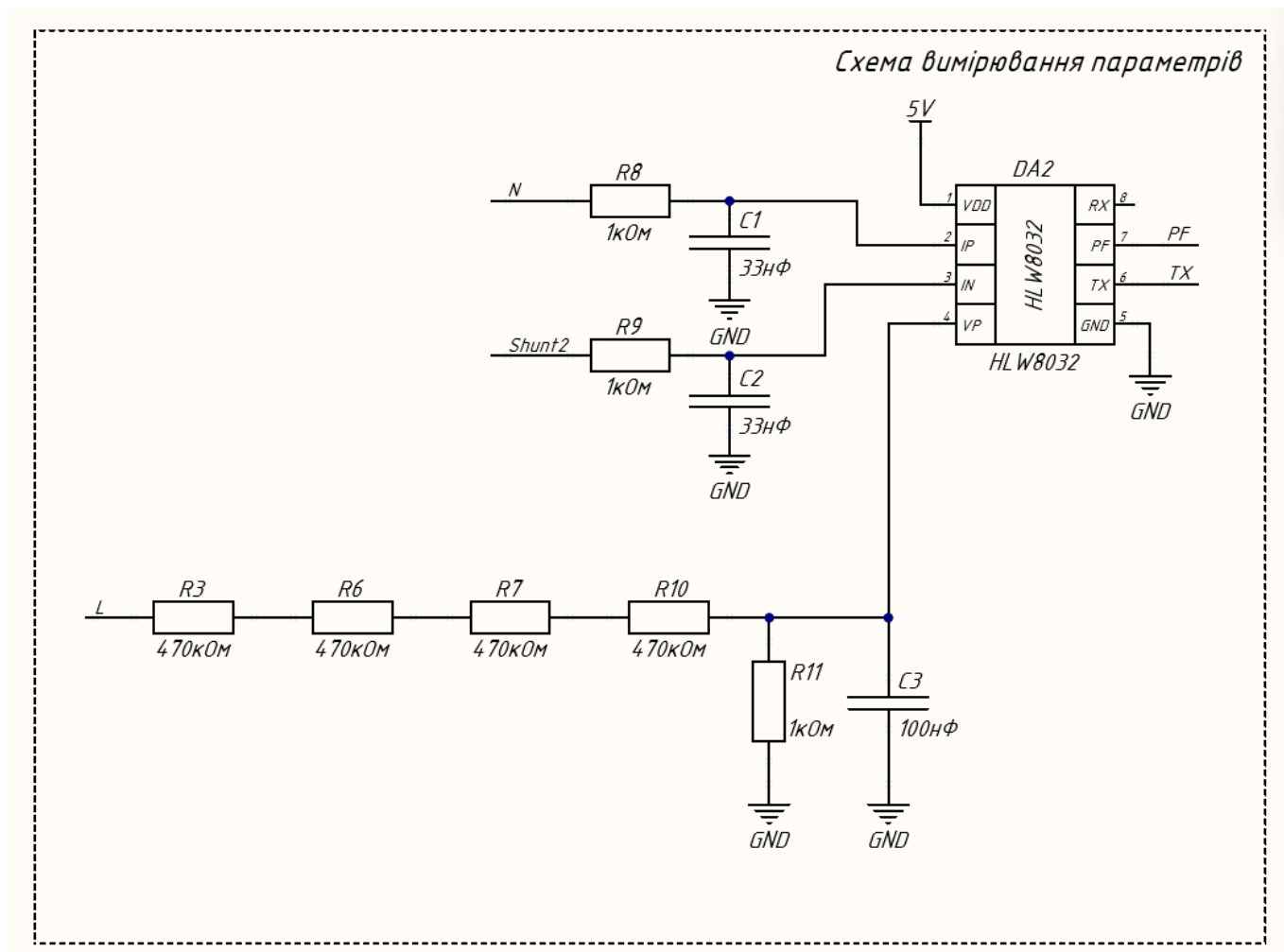


Рисунок 2.9 – Вимірювальна схема системи

Аналогічно типовій схемі канал вимірювання напруги підключений до фазного провідника L через високовольтне плече резистивного дільника, яке сформоване з чотирьох послідовно з'єднаних резисторів $R3$, $R6$, $R7$, $R10$ номіналом $470\text{ k}\Omega$ кожний, що сумарно утворює опір $1.88\text{ M}\Omega$ і гарантує безпечне падіння напруги. Нижнє плече дільника реалізовано на резисторі $R11$ номіналом $1\text{ k}\Omega$, увімкненому між входом схеми VP pin 4 та землею системи, при цьому паралельно.

Стабільне живлення схеми відбувається завдяки постійній напрузі $5V$ з $IRM-10-5$ на вхід VDD , а вихід GND для забезпечення якості вимірюваних значень повинен бути на одному опорному потенціалі з вимірюваною мережею, тому цифрова та силова частини повинні функціонувати на одному опорному потенціалі з нейтрального провідника мережі.

Передача виміряних та обрахованих значень до мікроконтролера відбувається прямим з'єднанням цифрового виходу TX до порту $GPIO7$ мікроконтролера. Для

додаткової передачі частоти активної енергії поєднані вихід RF схеми та порт мікроконтролеру GPIO 5. Оскільки система не передбачає зворотний зв'язок з мікросхемою вихідний порт RX, залишається вільним.

2.5.3 Включення системи в силову мережу та її комутація

Цей підрозділ присвячений опису, зображеного на рисунку 2.10, технічного рішення для інтеграції розроблюваної системи в силову електромережу об'єкта управління та реалізації вузла захисного та дистанційного відключення навантаження.

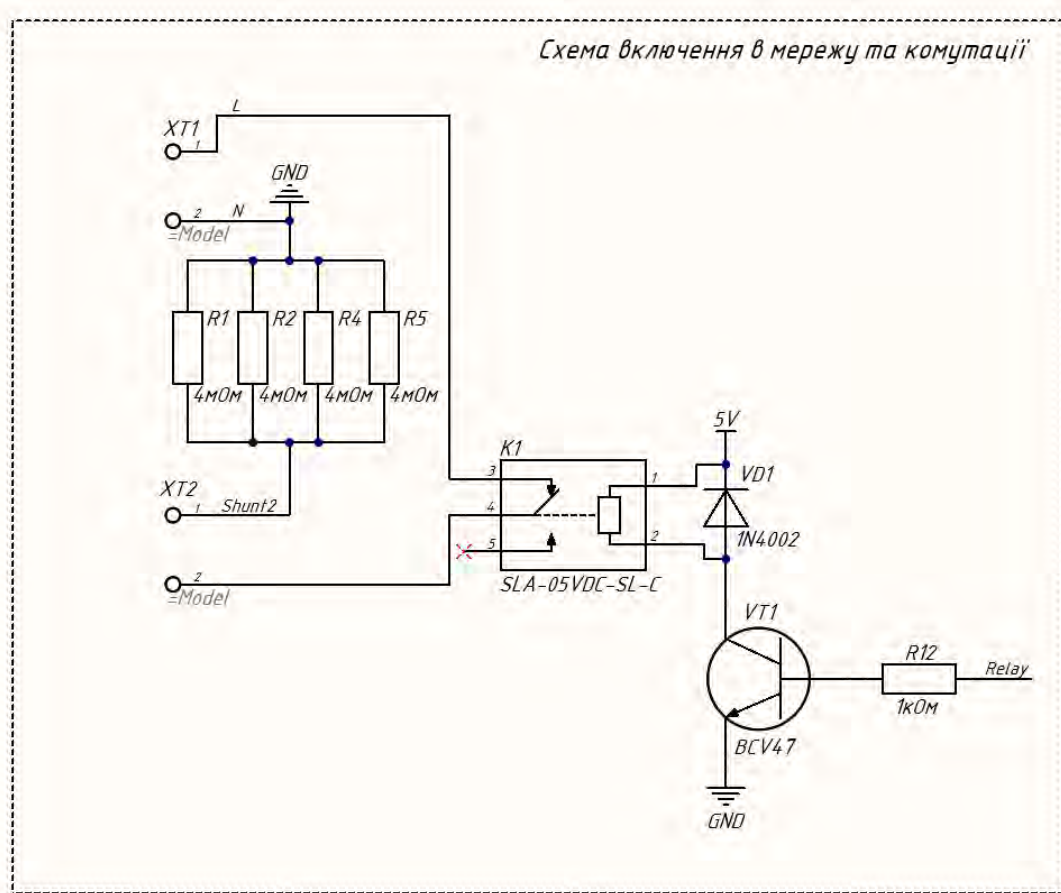


Рисунок 2.10 – Схема включення системи в силову мережу та її комутація

Підключення системи до однофазної мережі змінного струму здійснюється за допомогою гвинтових клемників XT1 та XT2, які забезпечують надійний механічний та електричний контакт. Вхідна лінія нейтралі від контакту XT1 проходить через паралельно з'єднані вимірювальні шунти і виходить до споживача через контакт XT2. Головний силовий шлях фазного провідника організовано через розрив, у який

увімкнено потужне електро механічне реле K1 завдяки якому реалізована комутація системи, оскільки через його контактну групу безперервно протікає весь струм, що споживається підключеним навантаженням мережі.

Для забезпечення надійної роботи в режимі тривалого проходження високих струмів, які згідно з обрахованими вимогами можуть досягати 21А сили струму, у схемі використовується потужне реле серії SLA-05VDC-SL-C. Його силова частина розрахована на комутацію змінної напруги до 250 В та пікового струму навантаження до 30 А, що гарантує високий запас міцності та задовольняє вимоги до надійності силового вузла.

Фаза мережі проходить через нормально замкнутий контакт реле. А вихід силової фази виходить із загального рухомого контакту реле. Така топологія забезпечує проходження струму мережі через нормально замкнуту групу контактів у звичайному режимі роботи пристрою без завад, а при виникненні критичної ситуації на реле приходить сигнал з мікроконтролера та рухомий контакт перекидається на нормально розімкнений контакт реле який на схемі залишається не задіяним, і силова лінія гарантовано розривається, повністю знеструмлюючи мережу.

Керування обмоткою реле з мікроконтролером, реалізовано через транзисторний ключ, оскільки вихідний струм портів мікроконтролера обмежений міліамперними значеннями струму, а реле потребує 5 В постійної напруги та споживає близько 185 мА. Ключ побудований на базі NPN-транзистора VT1 моделі BCV47 за схемою із спільним емітером, де емітер з'єднаний із шиною GND, а колектор підключений до керуючого виводу котушки реле K1. Для захисту контролеру від пробоя в момент знеструмлення котушки, паралельно котушці у зворотному напрямку встановлено діод VD1 типу 1N4002.

2.5.4 Включення мікроконтролера

Останньою функціональною складовою електричної принципової схеми є мікроконтролер ESP32-S2-Mini, який виступає головним обчислювальним, аналітичним та комунікаційним центром розроблюваної автоматизованої системи.

Схема поєднання мікроконтролера з іншими функціональними елементами системи зображено на рисунку 2.11.

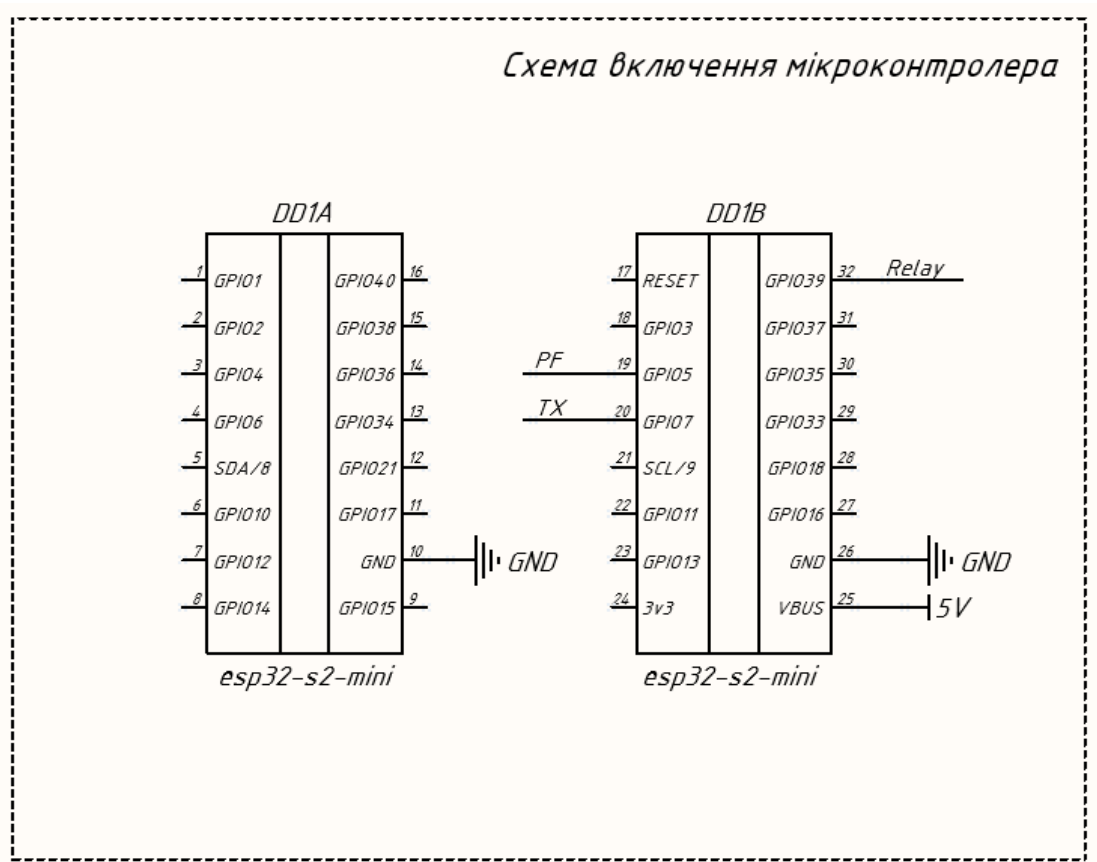


Рисунок 2.11 – Схема включення ESP32-S2-Mini у систему

Важливою інженерною перевагою внутрішньої архітектури цього мікроконтролера є наявність гнучкої матриці вводу-виводу, завдяки якій практично кожен загальнодоступний цифровий порт чіпа може бути програмно конфігурований під будь-яку необхідну периферійну функцію. Це дозволяє без обмежень призначити лінії апаратного послідовного інтерфейсу UART на ті що забезпечують найбільш зручне та коротке трасування доріжок на друкованій платі. У поточній реалізації схеми для зв'язку з вимірювальним чіпом HLW8032 порти були розподілені таким чином: цифровий вхід послідовних даних підключено до виводу GPIO7, а лінія високочастотних імпульсів до виводу GPIO5. Вихід для сигналу керування силовим реле виведена на порт GPIO39.

Завдяки інтегрованому лінійному стабілізатору на 3.3В живлення мікроконтролера, та його бездротового модулю WiFi реалізовано безпосередньо від

сформованого імпульсним блоком живлення постійним струмом 5В, який подається на вход живлення VBUS.

Вивід землі було вирішено під'єднати до загального заземлення мережі, що дозволяє з'єднувати порти з виходами HLW8032 без використання додаткових узгоджувальних обв'язок. Однак таке рішення приводить до обмежень у процесі розробки та обслуговуванні системи.

У зв'язку з тим що контролер об'єднаний з нейтральним провідником мережі 220В, будь-яке підключення пристрою до персонального комп'ютера через вбудований інтерфейсний порт USB-C для налагодження чи оновлення прошивки мікроконтролера дозволяється виконувати виключно за умови повного відключення системи від первинної силової мережі. Оскільки це неминуче призведе до повного вигорання як самого мікроконтролера, так і портів чи материнської плати ПК, а також створить критичну загрозу важкого ураження електричним струмом для розробника. Однак запланована система передбачає, що після первинного безпечного запису коду в умовах повного відключення від первинної мережі уся подальша взаємодія, моніторинг параметрів мережі виконуватимуться повністю дистанційно через бездротовий Wi-Fi зв'язок із сервером Blynk.

2.6 Розробка корпусу пристрою

Після завершення етапу розробки принципової електричної схеми важливим етапом є перехід від теоретичної моделі системи до його фізичного втілення. Початковим етапом для фізичної реалізації розроблюваної системи є визначення параметрів корпусу системи. Оскільки в технічному завданні вказана вимога на відповідність стандартам для монтажу на DIN-рейку всередині побутових щитків, необхідно визначити габарити корпусу, які будуть відповідати стандартам, що сформує вихідні технічні обмеження та граничні габаритні розміри для проектування й трасування друкованої плати.

Зовнішній вигляд запропонованої реалізації корпусу зображено в ізометричній проекції на рисунку 2.12. Обрана конструкція за своїми габаритними розмірами відповідає 4 стандартизованим модулям, що забезпечує монтажну ширину 70 мм.

Таке інженерне рішення дозволяє досягти оптимального зв'язку між компактим розміщенням елементів системи та достатнього корисного об'єму для їх функціонування, при його розміщенні на монтажній рейці в розподільному щитку.

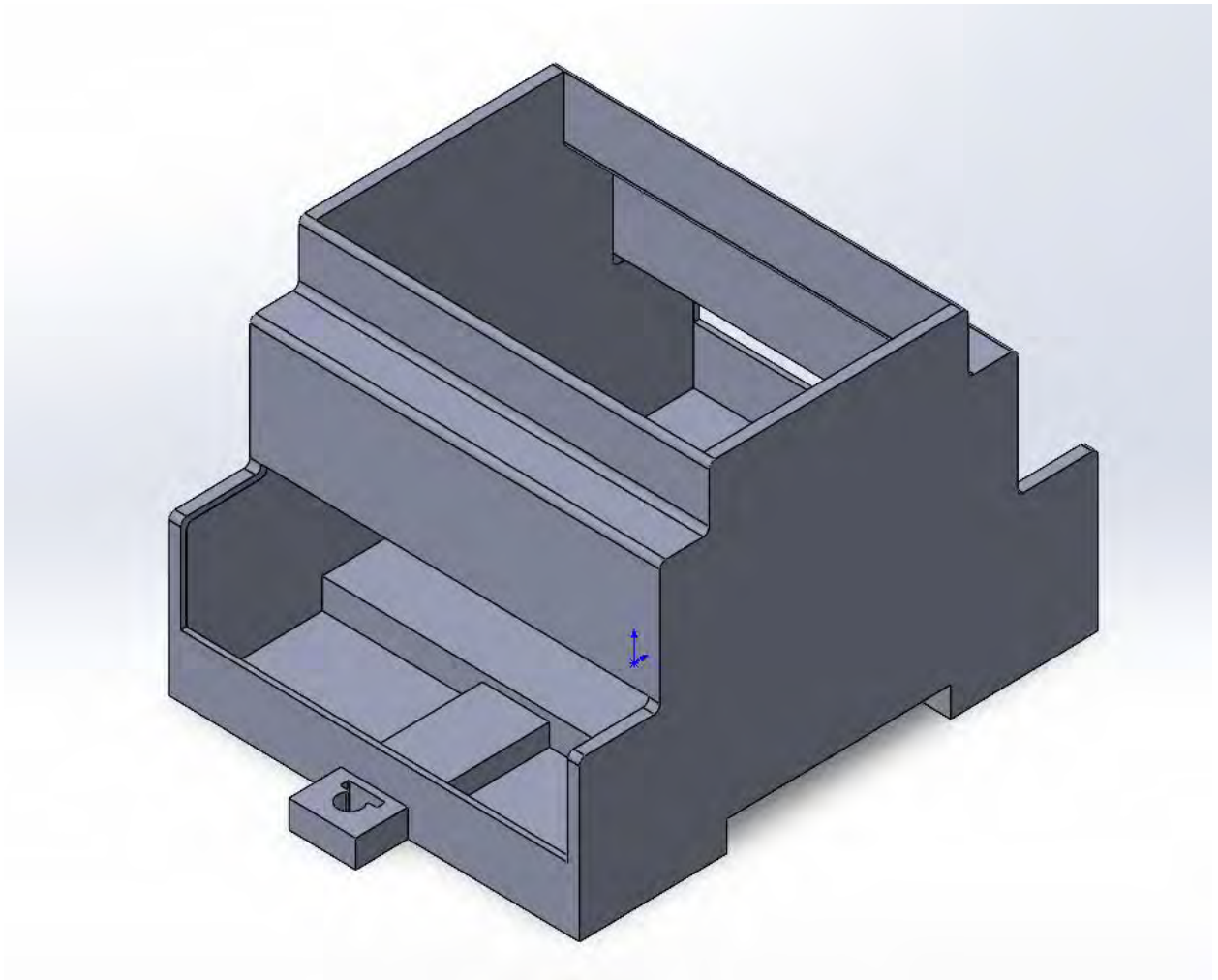


Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд корпусу пристрою

Відповідність стандартизованим габаритам конструкції, накладає чіткі обмеження на внутрішній простір корпусу, що також визначає граничні розміри для друкованої плати. Для відповідності 4 стандартизованим модулям, розмір плати повинен не перевищувати 86.5x68 мм. А для надійної фіксації плати всередині конструкції передбачені два гвинтових отвори, що повністю виключають зміншення плати під час експлуатації та транспортуванні.

Крім того корпус має спеціальні вирізи з двох протилежних боків, які дозволяють реалізувати виведення гвинтових терміналів, що забезпечить зручний та безпечний доступ для підключення силових провідників мережі.

2.7 Проєктування друкованої плати

Наступним етапом після формування принципової електричної схеми та визначення параметрів корпусу є проєктування друкованої плати. Цей процес є ключовим кроком для перенесення теоретичних рішень у реальну фізичну реалізацію системи.

Головним завданням на цьому етапі є розробка оптимальної топології доріжок і розміщення елементів. Під час проєктування треба враховувати задані корпусом граничні габарити друкованої плати (86,5×68 мм) та положення механічного кріплення. Окрім суто габаритних рамкових умов, розробка плати вимагає ретельного врахування специфіки сумісного функціонування низьковольтних цифрових мікропроцесорних модулів та високовольтних силових ланцюгів комутації.

На рисунку 2.13 представлено тривимірну модель розробленої друкованої плати системи, яка демонструє взаємне просторове розташування ключових елементів та роз'ємів. Розміщення елементів виконано з урахуванням обмеженого внутрішнього простору корпусу та компактного розміщення найбільш габаритних елементів системи, а саме: силового комутаційного реле, імпульсного блока живлення та керуючого мікроконтролера.

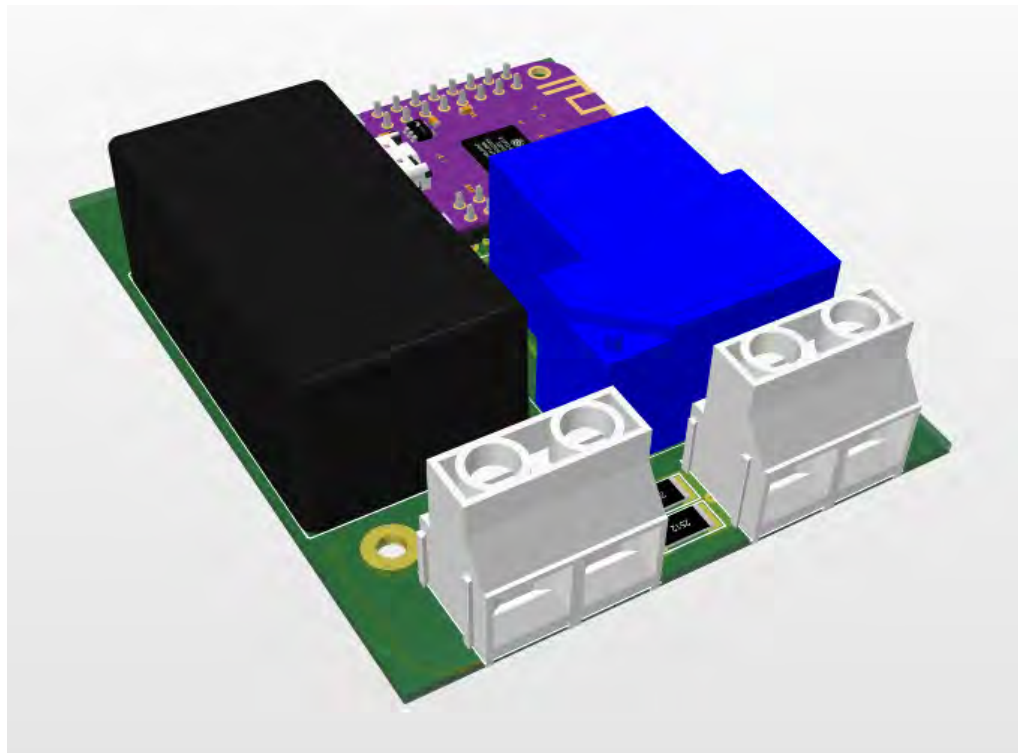


Рисунок 2.13 – 3Д модель друкованої плати системи

Фізичні габарити розробленої друкованої плати становлять 64,4×82,8 мм, що повністю задовольняє раніше визначені граничні розміри корпусу і забезпечує необхідні зазори для зручного монтажу. Для надійної механічної фіксації плати всередині оболонки на платі інтегровано два монтажних отвори під гвинтове кріплення, що збігаються зі кріпленнями в нижній частині корпусу.

Топологію двошарової друкованої плати, яка відображає зв'язки між електронними елементами системи відповідно до розробленої принципової електричної схеми, зображено на рисунку 2.15.

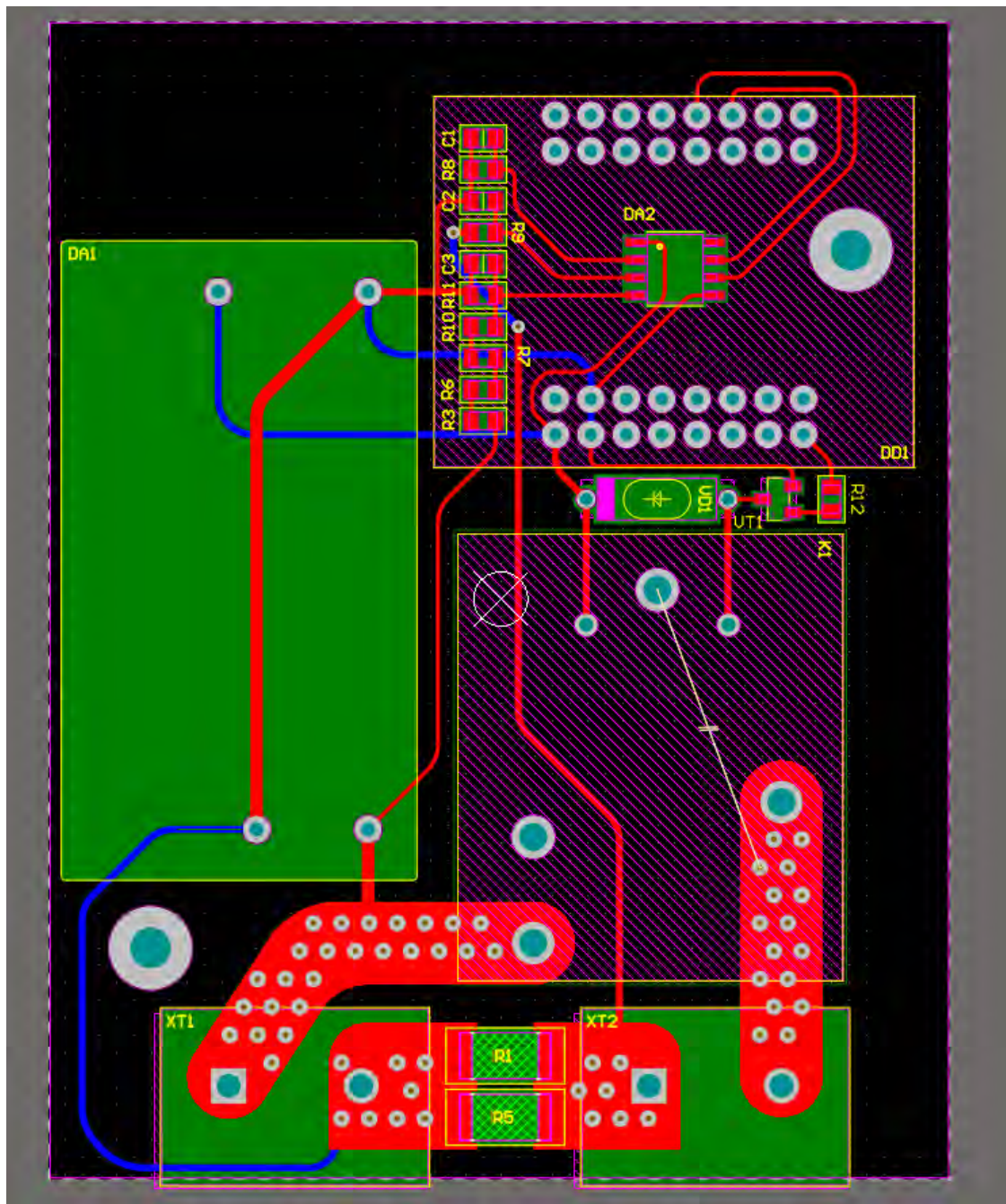


Рисунок 2.14 – Топологія друкованої плати системи

Важливим рішенням при проектуванні топології стало чітке функціональне розділення плати. Силова частина (вхідні та вихідні клемні колодки, шунти та силові контакти реле) зосереджені у нижній частині, а вимірювальна частина у верхню зону. Таке розміщення дозволило зменшити довжину силових провідників мережі, та підвищити загальну безпеку пристрою.

Оскільки через силові провідники системи можуть протікати значні струми навантаження, а граничні габарити плати не дозволяють збільшувати ширину доріжок, було запропоновано дублювання провідників на верхньому та нижньому шарах металізації, та з'єднання їх між собою за допомогою прошивки масивом перехідних отворів. Це технічне рішення дозволило покращити тепловиділення та гарантувати стабільну роботу плати під час тривалого проходження пікових струмів без ризику перегріву мідних провідників.

Додатковим ефективним рішенням для оптимізації площі друкованої плати стало використання простору в межах плати мікроконтролера ESP32-S2 Mini. Оскільки модуль монтується на плату за допомогою двох рядів штирових роз'ємів, площа між ними була використана для розміщення вимірювальної мікросхеми та її пасивних компонентів обв'язки. Такий підхід дозволив не лише зберегти простір плати в умовах габаритних обмежень корпусу, а й мінімізувати довжину провідників між вимірювальною мікросхемою та аналого-цифровими входами контролера, що знизило рівень впливу системи від зовнішніх електромагнітних завад.

2.8 Зовнішній вигляд системи

Для перевірки відповідності конструкторським вимогам було виконано фізичне збирання та інтеграцію елементів пристрою в єдиний модуль. Зовнішній вигляд готової автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживання, у збірці плати з корпусом із знятою верхньою захисною кришкою корпусу для демонстрації внутрішньої архітектури, наведено на рисунку 2.15.

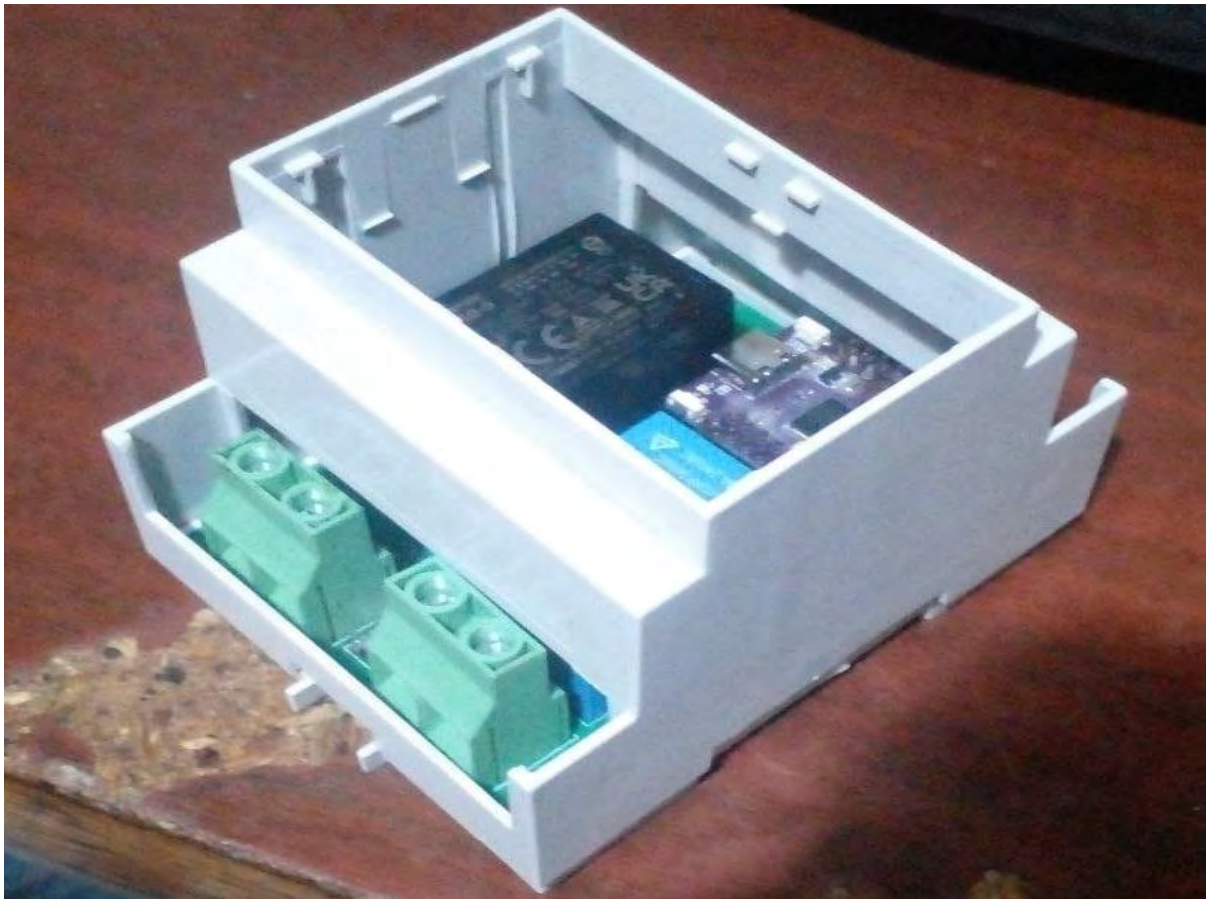


Рисунок 2.15 Зовнішній вигляд фізичного макету системи

Фізична реалізація пристрою повністю затвердила точність виконаних розрахунків та просторове компонування елементів. Виготовлена друкована плата безперешкодно вбудувалась у модульний корпус, забезпечивши надійну фіксацію на монтажних отворах основи та збіг гвинтових клемних виходів із зовнішніми вирізами корпусу. Наявність повністю зібраного та працездатного апаратного макета дозволила перейти від етапу конструювання до розробки алгоритму роботи системи.

2.9 Розробка алгоритму роботи системи

Розробка алгоритму роботи системи є завершальним етапом проєктування, який безпосередньо визначає, яким чином функціонуватиме та керуватиметься розроблена апаратна частина всієї системи. Саме на цьому етапі формується чітка послідовність дій, необхідних для досягнення поставленої задачі. Правильно побудований алгоритм роботи забезпечує ефективну та надійну роботу програмного забезпечення в режимі реального часу, а також суттєво полегшує його подальшу безпосередню реалізацію в коді.

Узагальнену блок-схему, яка відображає цей спрощений та найпростіший алгоритм роботи системи, зображено на рис.2.15.

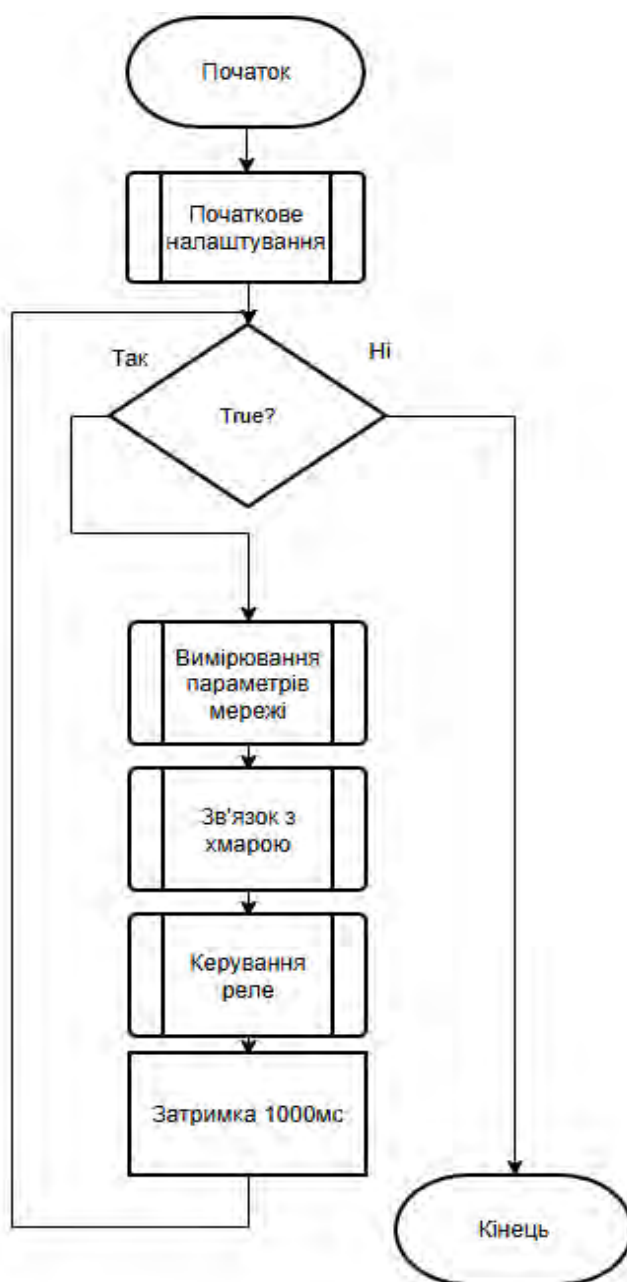


Рисунок 2.16 – Спрощений алгоритм роботи системи

Повноцінна реалізація функцій автоматизованої системи моніторингу енергоспоживання залежить від послідовної роботи її програмного забезпечення, алгоритм якого керує всіма внутрішніми процесами системи. На початковому етапі, система проводить попереднє налагодження.

Після успішного налаштування керуюча програма переходить до виконання нескінченного циклу, у якому реалізовано алгоритм контролю параметрів

електромережі. У середині цього циклу система цілодобово здійснює вимірювання поточних параметрів мережі, після чого обчислені значення напруги, струму та потужності передаються у хмару для віддаленого відображення користувачу. Завершальним кроком у циклі є аналіз дистанційних команд та вимірних значень сили струму, на основі яких система здійснює безпосереднє керування реле, забезпечуючи комутацію навантаження або захисне відключення об'єкта.

Така логіка роботи дозволяє забезпечити загальне розуміння алгоритму роботи системи. Однак для глибокого розуміння внутрішньої архітектури кожен із зазначених кроків і функціональних блоків детально розписується окремо у наступних підрозділах.

2.9.1 Алгоритм попереднього налагодження системи

Підпрограма початкового налагодження є критично важливою частиною алгоритму роботи системи. Ця підпрограма реалізує забезпечує переведення всіх елементів системи, після подачі живлення із початкового стану, що виникає в момент подачі напруги живлення, у робочі стани. Блок-схема роботи алгоритму початкового налагодження зображено на рисунку 2.16.



Рисунок 2.17 – Алгоритм початкового налагодження системи

Після активації системи та подачі живлення на всі апаратні компоненти, першочергово запускається етап попереднього налагодження пристрою перед його виходом у робочий режим. На цьому етапі алгоритм виконує первинну конфігурацію цифрових каналів введення-виведення мікроконтролера. Встановлюється режим роботи виводу керування силовим реле, що дозволяє утримувати його контакти у замкненому стані та забезпечувати безперешкодне проходження струму вимірюваної силової мережі змінного струму до споживача побутового об'єкта відразу після ввімкнення приладу в мережу.

Одразу після цього логіка роботи передбачає активацію вбудованого в контролер бездротового інтерфейсу зв'язку, під час якої мікроконтролер здійснює сканування ефіру та встановлює з'єднання з локальною мережею Wi-Fi за завчасно прописаними параметрами доступу.

Завершальним етапом у підпрограмі початкового налагодження системи є встановлення зв'язку з хмарною платформою Blynk. Алгоритм забезпечує віддалену авторизацію пристрою на платформі та проводить повну синхронізацію параметрів управління, що дозволяє системі реалізувати бездротовий зв'язок з хмарою для передачі вимірних параметрів та реалізації дистанційного керування енергоспоживанням. Після успішного виконання початкового налаштування, система переходить до робочого циклу для виконання безперервного моніторингу.

2.9.2 Алгоритм вимірювання параметрів мережі

У цьому підрозділі розглядається запропонована послідовність дій системи для реалізації вимірювання первинних параметрів мережі, передачу їх у контролер для подальшого обрахунку параметрів електричної мережі. Описаний алгоритм базується на принципі циклічного опитування датчиків із фіксацією миттєвих значень струму й напруги та їх подальшим використанням для обрахунку параметрів мережі. Графічне позначення запропонованого алгоритму підпрограми вимірювання параметрів мережі зображено на рисунку 2.17.

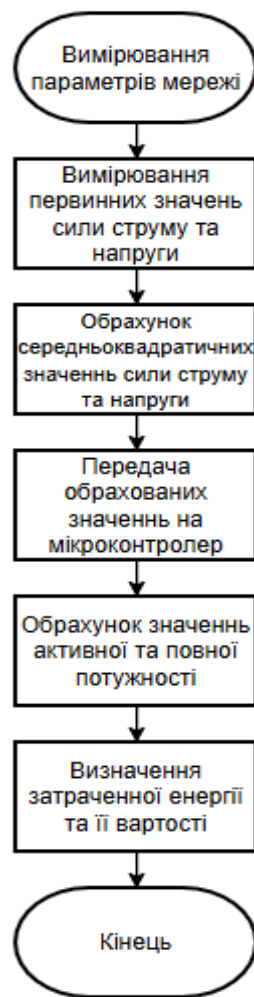


Рисунок 2.18 – Алгоритм вимірювання параметрів мережі

Функціональність цього блока полягає у регулярному знятті показників з вимірювального чипа, який безпосередньо вимірює поточні характеристики електромережі. Система самостійно перераховує отримані параметри у реальні фізичні одиниці: діюче значення напруги, силу споживаного струму та поточну активну потужність навантаження. Згідно з виміряними параметрами контролер, обраховує такі параметри мережі як: повна потужність, затрачена енергія та її вартість. Отриманні значення система зберігає для подальшої передачі у хмару, для аналізу користувачем.

Таким чином, подібна логіка функціонування дозволяє безперервно вимірювати первинні характеристики мережі та в реальному часі автоматично обраховувати всі необхідні параметри енергоспоживання, роблячи пристрій автоматизованою системою моніторингу енергоспоживання мережі.

2.9.3 Алгоритм керування реле

У цьому підрозділі розглядається логіка системи щодо безпечного керування навантаженням та забезпечення аварійного захисту мережі. Функціональність цього блока полягає в об'єднанні захисних засобів та зовнішніх команд керування від користувача для безпосереднього впливу на енергопостачання мережі. Система безперервно аналізує виміряні значення напруги та сили струму, порівнюючи їх із граничними значеннями, які були закладені при ініціалізації.

Головним інженерним рішенням під час розробки алгоритму керування реле стало, визначення пріоритету керуючих сигналів. Для реалізації автоматизованого захисту від перенавантаження система у першу чергу повинна перевіряти стан мережі, та вже потім при відсутності аварійних ситуацій обробляти керуючий сигнал з хмарного середовища. Графічне зображення підпрограми керування реле зображено на рисунку 2.18.

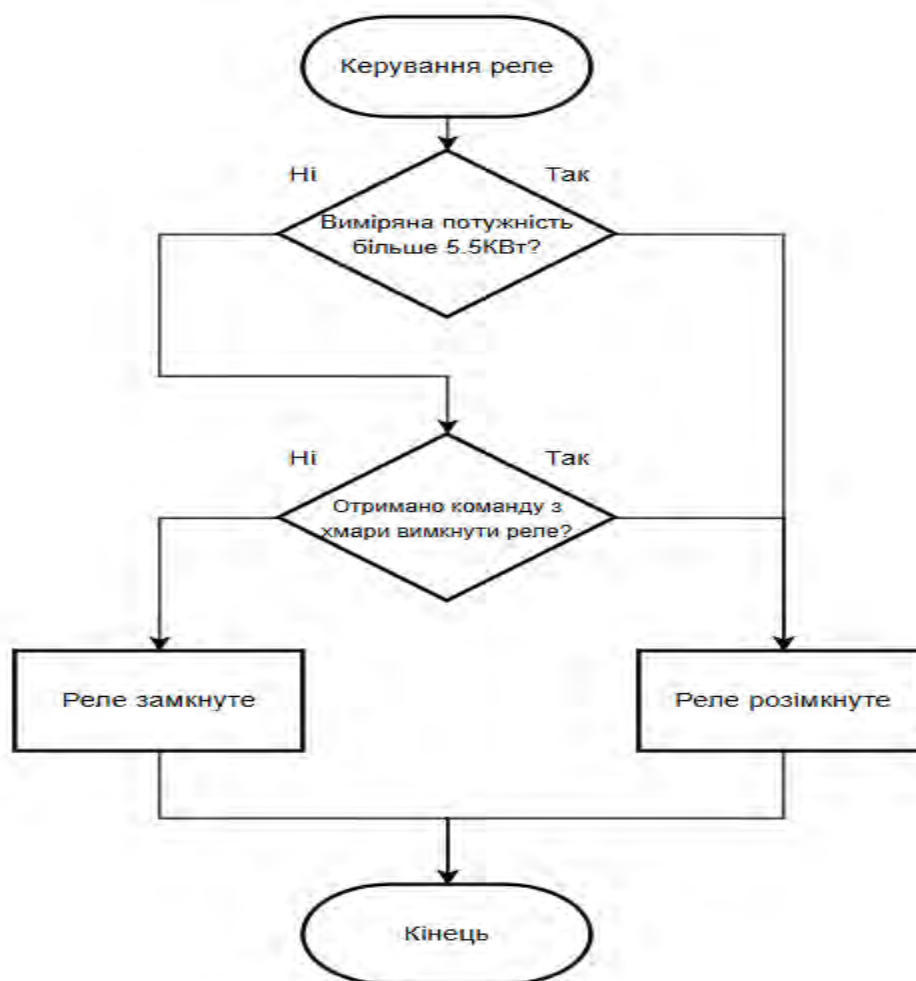


Рисунок 2.19 – Алгоритм керування реле

Якщо один з вимірних параметрів виходить за допустимі межі, алгоритм захисту спрацьовує й миттєво видає керуючий сигнал на транзисторний ключ. Це призводить до розмикання ланцюга силового реле, та знеструмлює мережу. Паралельно з цим блок аналізує вхідні команди з хмарної платформи.

За умови, що всі параметри мережі перебувають у нормі і з додатка не надходило команди на вимкнення, реле знаходиться у замкненому стані, дозволяючи струму вільно проходити через його контакти. Така логіка забезпечує автономність захисних функцій приладу навіть у разі тимчасової відсутності зв'язку з Інтернетом.

2.9.4 Алгоритм зв'язку с хмарою

У цьому підрозділі розглядається послідовність дій системи під час обміну даними з хмарним сервісом для забезпечення дистанційного контролю. Графічне зображення підпрограми взаємодії з хмарною платформою Blynk зображено на рисунку 2.19.



Рисунок 2.20 – Алгоритм зв'язку з хмарною платформою

Функціональність цього блока полягає в організації двостороннього зв'язку між мікроконтролером та мобільним додатком користувача. Алгоритм забезпечує регулярне відправлення всіх раніше обрахованих параметрів мережі(напруги, струму, потужності, витраченої енергії та її вартості) на хмарний сервер. Завдяки цьому користувач отримує можливість у реальному часі відстежувати актуальну значення та динаміку споживання на екрані свого смартфона.

Окрім отримання вимірів, цей блок алгоритму перевіряє наявність зворотних команд, для керування реле, що надсилаються користувачем через інтерфейс додатка. Коли з мобільного телефону надходить сигнал, алгоритм фіксує це повідомлення та передає його на контролер для подальшої обробки. Таким чином, подібна логіка взаємодії дозволяє успішно поєднати функції безперервного віддаленого моніторингу та оперативного дистанційного керування.

Висновки до розділу 2

У другому розділі дипломного проєкту було повноцінно реалізовано всі етапи технічного проєктування та теоретичного обґрунтування автоматизованої системи моніторингу й керування енергоспоживанням. На початковому етапі розроблено структурну схему пристрою, яка об'єднала схеми вимірювання, обрахунку, автономного живлення та силового захисту в єдину систему. Її загальний вигляд зображений у додатку А.

А детальний аналіз мережі як об'єкта керування дозволив розробити структурну схеми автоматизації системи, яка демонструє взаємодію регулятора, датчиків та виконавчого механізму для реалізації автономного захисту мережі від перенавантажень. Загальний вигляд розробленої структурної схеми автоматизації, зображено у додатку Б.

Відповідно до сформованих технічних вимог щодо роботи під навантаженням із піковим струмом до 30 А, було виконано обґрунтований підбір сучасної елементної бази, головними елементами якої визначено мікроконтролер із вбудованим модулем Wi-Fi, вимірювальну мікросхему, блок живлення та силове електромеханічне реле.

На основі розробленої структурної схеми було спроектовано електрично-принципову схему системи, яка забезпечує взаємодію між обраними елементами системи. Важливим етапом проєктування стало використання чотирьох паралельно увімкнених резисторів замість одного. Це дозволило розподілити струми, що знизить тепловиділення на друкованій платі під час тривалої експлуатації. Загальний вигляд електрично-принципової схеми зображено у додатку В.

На етапі проєктування корпусу системи, який був розроблений як модульний корпус, призначений для кріплення на стандартизовану DIN-рейку. Визначена ширина корпусу в 4 стандартні модулі (70 мм) забезпечує баланс між компактністю системи та достатнім внутрішнім простором для безпечного функціонування елементів. Складальний кресленик корпусу зображено у додатку Г.

З урахуванням внутрішніх обмежень корпусу в середовищі Altium Designer було розроблено топологію двошарової друкованої плати. Фізичні габарити плати становлять 64,4×82,8 мм, а в її структурі передбачено два монтажних отвори для надійної гвинтової фіксації. При трасуванні плати було реалізоване функціональне ділення плати на силову та вимірювальну частини, та для максимальної економії простору вимірювальна частина була інтегровано під мікроконтролером. Для забезпечення роботи системи при максимальному струмі навантаження було запропоноване дублювання силових провідників на обох шарах металізації та їхнє з'єднання масивом перехідних отворів, що мінімізує опір та тепловиділення. Складальний кресленик друкованої плати зображено у додатку І.

Завершальним етапом практичної частини стало проєктування повного алгоритму роботи системи, побудованого у вигляді функціональних підпрограм попереднього налагодження, вимірювання характеристик, взаємодії з хмарою та безпосереднього керування реле. Його загальний вигляд зображено у додатку Д.

Створена логіка забезпечує стабільний автоматичний перерахунок первинних параметрів мережі у реальні фізичні одиниці, обчислення вартості спожитої енергії, та автономну роботу аварійного захисту, який миттєво знеструмлює об'єкт у разі перевантаження. Усі запропоновані технічні, рішення повністю узгоджені між собою і представляють собою завершений інженерний проєкт автоматизованого пристрою.

ВИСНОВКИ

Під час дипломного проєктування було вирішено актуальне завдання з проєктування, теоретичного аналізу та реалізації алгоритму роботи автоматизованої системи моніторингу та керування енергоспоживанням побутової мережі на базі сучасних технологій Інтернету речей. Під час роботи було проведено детальний аналіз сучасного стану електричних мереж, проаналізовано стрімку динаміку зростання тарифів на електроенергію в Україні та виявлено технічні обмеження традиційних засобів обліку, які не здатні забезпечити збір інформації у реальному часі. На основі дослідження засобів бездротового зв'язку, хмарних сервісів та існуючих розумних лічильників було доведено актуальність потреби у розробці автоматизованого пристрою, який зможе самостійно вимірювати первинні параметри мережі, обробляти їх та передавати значення використовуючи технології Інтернету речей.

Для практичної реалізації цієї концепції було розроблено структурну схему системи, яка об'єднує вимірювальну частину схеми з обчислювальним центром, та модулем бездротової передачі даних в єдину систему. Відповідно до сформованих технічних вимог для надійної роботи в межах мережі квартири із піковим струмом навантаження до 21 А, було виконано підбір сучасних електронних компонентів для реалізації системи. Основним обчислювальним центром було обрано мікроконтролер ESP32-S2-Mini із вбудованим модулем Wi-Fi, вимірювальну частину реалізовано на базі вимірювальної мікросхеми HLW8032, автономне джерело живлення побудовано на модулі IRM-10-5, а як виконуючий пристрій захисного відключення було обрано електромеханічне реле серії SLA-05VDC-SL-C.

На основі розробленої структурної схеми було спроєктовано електричну принципову схему пристрою, яка забезпечує взаємодію між цифровою та силовою лініями системи. Під час проєктування було запропоновано замінити один вимірювальний шунт на чотири паралельно включені резистори, що дозволило ефективно розподілити струми та значно знизити локальне тепловиділення на друкованій платі.

На етапі проектування корпусу системи, який був розроблений як модульний корпус, призначений для кріплення на стандартизовану DIN-рейку. Визначена ширина корпусу в 4 стандартні модулі (70 мм) забезпечує баланс між компактністю системи та достатнім внутрішнім простором для безпечного функціонування елементів.

З урахуванням внутрішніх обмежень корпусу в середовищі Altium Designer було розроблено друкована плата. Фізичні габарити якої становлять 64,4×82,8 мм, із чітким функціональним розділенням на цифрову та силову частини. Для економії простору вимірювальна частина була інтегрована під мікроконтролером. А для забезпечення стійкості провідників до 21 А струму навантаження було запропоноване дублювання силових провідників на обох шарах та їхнє з'єднання масивом перехідних отворів.

Завершальним етапом дипломного проекту була розробка повного алгоритму роботи системи, який розділений на функціональні підпрограми попереднього налагодження, вимірювання параметрів, хмарного зв'язку та керування реле. Створені алгоритми забезпечують безперервний автоматичний перерахунок первинних параметрів мережі у реальні значення характеристик енергоспоживання, обчислення витраченої енергії та її вартості, регулярну синхронізацію з хмарою Blynk, та автономну роботу ланцюга аварійного захисту, який миттєво знеструмлює навантаження у разі перевантаження незалежно від наявності Інтернет-з'єднання.

Запропонована реалізація автоматизованої системи пропонує технічне рішення, яке забезпечує надійний захист електромережі квартири, мінімізує людський фактор при зборі даних, та надає можливість аналізу споживання за часом.

Перспективи подальшого розвитку проекту полягають у покращенні програмної та апаратної реалізації розробленого прототипу для створення на його базі рішення для промислового застосування відповідно до галузевих стандартів промислових приладів обліку. Це дозволить розвинути систему до рівня Промислового Інтернету речей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] М. Гупта, «Глобальний попит на електроенергію зростатиме на 3,6 відсотка щорічно- звіт МЕА,» Лютий 2026. [Онлайновий]. Available: <https://solarquarter.com/2026/02/11/global-electricity-demand-set-to-grow-3-6-percent-annually-as-solar-drives-energy-transition-iea-report/>.
- [2] countryeconomy, «Ukraine - Electricity consumption,» 2025. [Онлайновий]. Available: <https://countryeconomy.com/energy-and-environment/electricity-consumption/ukraine>.
- [3] globalpetrolprices, «Electricity prices,» 2025. [Онлайновий]. Available: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/.
- [4] slovoidilo, «Як змінювалася вартість електроенергії за час незалежності України,» 2020. [Онлайновий]. Available: <https://www.slovoidilo.ua/2020/07/21/infografika/suspilstvo/yak-zminyuvalasya-vartist-elektroenerhiyi-chas-nezalezhnosti-ukrayiny>.
- [5] МЕУ, «Тарифи та ціни,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.mev.gov.ua/storinka/taryfy-ta-tsiny>.
- [6] ПРАВИЛА УЛАШТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК, Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, 2017 Available: <https://sies.gov.ua/storage/app/sites/4/uploaded-files/Законодавство.%20Накази%20Міненерго/Nakaz%20476%20vid%2021.07.2017/stranitsy-iz-pue-skan1.pdf>.
- [7] «Порядок застосування тарифів на електроенергію, що відпускається населенню і населеним пунктам,» 1999. [Онлайновий]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0152-99#Text>.
- [8] «Про затвердження Порядку застосування тарифів на електроенергію,» 2012. [Онлайновий]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0599-12#Text>.
- [9] «Основні технічні параметри електролічильників, які потрібно знати сучасному споживачеві.,» 15 листопад 2014. [Онлайновий]. Available: <https://elmisto.com.ua/ua/a181875-osnovnye-tehnicheskie-parametry.html>.
- [10] L. Atzori, A. Iera та G. Morabito, «The Internet of Things: a survey,» *Computer Networks*, т. 54, № 15, pp. 2787-2805, 2010 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010> Available:

https://www.researchgate.net/publication/222571757_The_Internet_of_Things_A_Survey.

- [11] It Enterprise, «Internet of Things, IoT,» 2025. [Онлайновий]. Available: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/internet-veschej-internet-of-things-iot>.
- [12] ibm, «Що таке Інтернет речей (IoT)?,» 2025. [Онлайновий]. Available: <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>.
- [13] bluetooth, «Bluetooth technology overview,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>.
- [14] IEEE, «IEEE Standard for Information technology Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,» 2016 DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7786995. [Онлайновий]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7786995>.
- [15] Wifi-Alliance, «Сертифіковано Wi-Fi 7™,» [Онлайновий]. Available: <https://www.wi-fi.org/wi-fi-macphy>.
- [16] tp-link, «Що таке Wi-Fi 7?,» [Онлайновий]. Available: <https://www.tp-link.com/uk-ua/wifi7/>.
- [17] ipnet, «Скільки споживає роутер: розбір енергоспоживання та витрат,» 2025. [Онлайновий]. Available: <https://ipnet.ua/ru/blog/skilky-spozhyvaye-router-rozbir-energospozhyvannya-ta-vytrat>.
- [18] alliance zigbee, «Revision 22 1.0,» *zigbee Specification*, p. 1, 2017 Available: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2024/01/docs-05-3474-22-0csg-zigbee-specification.pdf>.
- [19] Silicon Labs, «Zigbee Fundamentals,» *Silicon Labs' Fundamentals*, p. 3, 2025 Available: <https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-02-fundamentals-zigbee.pdf>.
- [20] CSA, «Zigbee Alliance Ребрендинг як Connectivity Standards Alliance,» 2021. [Онлайновий]. Available: <https://csa-iot.org/ru/newsroom/connectivity-standards-alliance/>.
- [21] N. Huang, «Bluetooth VS WiFi VS Zigbee: Which Wireless Technology is Better,» 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.mokosmart.com/bluetooth-vs-wifi-vs-zigbee-which-is-better/>.

- [22] «Розбираємо роль хмарних технологій в IoT пристроях: в чому їх переваги?,» gigacloud, 2024. [Онлайновий]. Available: <https://gigacloud.ua/articles/rozbyrayemo-rol-hmarnyh-tehnologij-v-iot-prystroyah-v-chomu-yih-perevagy>.
- [23] microsoft, «Azure IoT Central,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/products/iot-central>.
- [24] К. Джангид, «Що таке Azure IoT Central?,» dynamicssquare, 08 06 2023. [Онлайновий]. Available: <https://www.dynamicssquare.co.uk/blog/what-is-azure-iot-central/>.
- [25] blynk, «Low-code IoT platform,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.blynk.io/>.
- [26] «What is Blynk and How does it work?,» 2021. [Онлайновий]. Available: <https://osoyoo.com/2021/10/24/what-is-blynk-and-how-does-it-work/>.
- [27] ThingsBoard, «ThingsBoard Open-source IoT Platform,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://thingsboard.io/#:~:text=ThingsBoard>.
- [28] ThingsBoard, «Що таке ThingsBoard,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://docs.sensef.ru/docs/getting-started-guides/what-is-thingsboard/>.
- [29] microsoft, «Azure IoT Central pricing,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/pricing/details/iot-central/>.
- [30] thingsboard, «ThingsBoard Products Pricing,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://thingsboard.io/pricing/?§ion=thingsboard-pe-options&product=thingsboard-cloud..>
- [31] blynk, «Pricing Two ways to build with Blynk,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.blynk.io/pricing>.
- [32] «Роль мікроконтролерів у розвитку інтернету речей (IoT),» 2025. [Онлайновий]. Available: <https://mgauto.com.ua/ua/rol-mikrokontroleriv-u-rozvytku-internetu-rechej-iot/>.
- [33] ST, «Who we are,» 2026. [Онлайновий]. Available: https://www.st.com/content/st_com/en/about/who-we-are.html.
- [34] STMicroelectronics, «Бездротові мікроконтролери STM32,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-wireless-mcus.html>.
- [35] Espressif Systems, «Espressif Systems. Хто ми?,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.espressif.com/en/company/about-espressif>.

- [36] espressif, «Модулі ESP,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/modules>.
- [37] Raspberry Pi, «Ми — Raspberry Pi. Ми створюємо комп'ютери,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.raspberrypi.com/about/>.
- [38] raspberry, «raspberry pi pico 2,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico-2/>.
- [39] Espressif, «ESP32-S2-WROOM,» 2025. [Онлайновий]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-s2-wroom_esp32-s2-wroom-i_datasheet_en.pdf.
- [40] STM, «STM32WBA2,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32wba25ce.pdf>.
- [41] Raspberry, «Raspberry Pi Pico 2 series,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://pip-assets.raspberrypi.com/categories/1005-raspberry-pi-pico-2/documents/RP-008302-DS-2-pico-2-product-brief.pdf?disposition=inline>.
- [42] «Як працюють розумні лічильники енергії – простий посібник,» 2024. [Онлайновий]. Available: <https://ua.jianxintechical.com/info/how-smart-energy-meters-work-a-simple-guide-102011165.html>.
- [43] «Розумний лічильник: переваги та поради від фахівців обленерго,» watt, 2023. [Онлайновий]. Available: <https://watt.ua/shcho-take-smart-lichylnyk.html/>.
- [44] smart-maic, «ПОСІБНИК КОРИСТУВАЧА smart-MAIC D101,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://smart-maic.com/manual/d101.html#>.
- [45] smart-maic, «smart-maic головна сторінка,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://smart-maic.com/uk/>.
- [46] E. Control, «Лічильник модульний SDM120M Modbus 1x230V AC RS485 45A,» 2026. [Онлайновий]. Available: https://ecshop.com.ua/ua/p139745-sdm120modbus_schetchik_modulniy_1x230v_ac_s_rs485_vh-45a_kl-1.
- [47] Eastron, «SDM120-M,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://www.eastrongroup.com/product/single-phase-multifunction-energy-meter/rs485-modbus-dlt645-din-rail-single-phase-multifunction-energy-meter.html>.
- [48] eastron, «SDM120 Series Multifunction Manual,» 2026. [Онлайновий]. Available: https://www.eastroneurope.com/images/uploads/products/manuals/SDM120_Series_Manual_.pdf.

- [49] П. Ф. Баховський, «Електронний посібник з дисципліни: Монтаж та вимірювання пристроїв зв'язку,» 2020. [Онлайновий]. Available: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/готовий%20Баховський/.
- [50] М. Медоїд, «Трансформатори струму: принцип роботи та особливості застосування,» [Онлайновий]. Available: <https://tribun.com.ua/uk/109490-transformatori-strumu-printsip-roboti-ta-osoblivosti-zastosuvannja>.
- [51] С. М. Павлов, «Основи мікроелектроніки. Ефект Холла,» 2026. [Онлайновий]. Available: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/3pavlov_osnovy_mikroelektroniky/73.htm.
- [52] «Інформаційно-методичне забезпечення навчального процесу студентів спеціальності "Автоматизація експериментальних досліджень" НТУУ "КПІ" Лекція 3 Вольтметри, перетворювачі постійного струму та їх вузли,» 2020. [Онлайновий]. Available: https://itcj.sethost.net/pdf/svp_1_1_3.pdf.
- [53] ІЕС, «Трансформатор напруги,» 1986. [Онлайновий]. Available: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=321-03-01>.
- [54] «Принцип дії трансформатора,» edpro, 2026. [Онлайновий]. Available: <https://edpro.ua/amperia/btr>.
- [55] Б. В. Ліщина та О. А. Повшенко, «Автоматизована система вимірювання та моніторингу енергоспоживання мережі на основі технологій Інтернету речей,» в *Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні : збірник праць XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 10–11 грудня 2025 р. — 2025. — С. 170–172., Київ, 2025 р.*
- [56] НКРЕКП, «Постанова про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП,» 17 03 2021. [Онлайновий]. Available: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-zatverdzhennya-zmin-do-deyakikh-postanov-nkrekp-8>.
- [57] hiliwi, «HLW8032 User manual,» 2026. [Онлайновий]. Available: <https://w2.electrodragon.com/Chip-cn-dat/HLW-dat/HLW8032-dat/HLW8032.pdf>.
- [58] studiopieters, «The ultimate guide to the s2 mini pinout,» 2025. [Онлайновий]. Available: <https://www.studiopieters.nl/s2-mini-pinout/>.
- [59] SONGLE RELAY, «SLA Relay datasheet,» 2026. [Онлайновий]. Available: https://files.seeedstudio.com/wiki/Grove-SPDT_Relay_30A/res/SLA-05VDC-SL-C_Datasheet.pdf.

- [60] MeanWell, «IRM-10 series power supply datasheet,» 2013. [Онлайновий]. Available: https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/irm-10_series-datasheet.pdf.
- [61] rcscomponents, «Блок живлення що вбудовується на плату 10W 5V IRM-10-5 MeanWell,» [Онлайновий]. Available: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/blok-zhyvlennia-shcho-vbudovuietsia-na-platu-10w-5v-irm-10-5_106697.html.
- [62] Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.
- [63] Муравйов О. В. Передача даних та сучасні методи обробки сигналів. Практикум: навчальний посібник / О. В. Муравйов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 55 с.
- [64] Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
- [65] Комп'ютерне проєктування електронних схем. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / Р. М. Галаган ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,33 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 419 с.
- [66] Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
- [67] Галаган Р. М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 263 с.
- [68] Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
- [69] Петрик В.Ф., Протасов А.Г., Галаган Р.М., Муравйов О.В., Момот А.С. Бездротові технології в автоматизації неруйнівного контролю. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71), № 5. с. 25-29.

ДОДАТКИ

надаються за запитом до розробників