

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання
житлового приміщення в реальному часі

Виконав: студент 4 курсу, групи СІ-41

спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Дурда В. М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Жаровський Р.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Луцик Н. С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Литвиненко Я.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Осухівська Г.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)
«25» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»
(шифр і назва спеціальності)

студента Дурді Володимир Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі

Керівник роботи кандидат технічних наук, доцент кафедри КС Жаровський Руслан Олегович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » квітня 2026 року № 4/9-188

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16.06.2026

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Аналіз технічного завдання

2. Проектна частина

3. Практична частина

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки

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

1. Архітектура системи вимірювання енергоспоживання

2. Структурна схема системи моніторингу

3. Блок схема роботи

4. Схема електрична принципова

5. Результати роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>			

7. Дата видачі завдання 25.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розробка технічного завдання</i>	<i>26.01 – 02.02</i>	
2.	<i>Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»</i>	<i>03.02 – 15.02</i>	
3.	<i>Робота над другим розділом «Проектна частина»</i>	<i>20.04 – 25.04</i>	
4.	<i>Робота над третім розділом «Практична частина»</i>	<i>26.04 – 05.05</i>	
5.	<i>Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»</i>	<i>07.05 – 25.05</i>	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу</i>	<i>26.05 – 7.06</i>	
7.	<i>Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами</i>	<i>8.06 – 14.06</i>	
8.	<i>Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>15.06 – 21.06</i>	
9.	<i>Захист кваліфікаційної роботи бакалавра</i>	<i>23.06</i>	

Студент

_____ (підпис)

Дурда Володимир Миколайович

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Жаровський Руслан Олегович

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дурда В. М. Комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 – комп'ютерна інженерія. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2026.

Ключові слова: енергоспоживання, моніторинг, ESP32, PZEM-004T, HMI-дисплей, Vlynk Cloud, релейний модуль, житлове приміщення.

У кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютерну систему моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі.

У роботі проаналізовано особливості енергоспоживання житлових приміщень, визначено параметри, які необхідно контролювати, та розглянуто принципи побудови цифрових систем вимірювання електроспоживання. Розроблено структурну схему системи, виконано вибір апаратних засобів, розроблено схему електричну принципову та програмне забезпечення.

Основу системи становить мікроконтролер ESP32. Для вимірювання параметрів мережі використано модуль PZEM-004T V3.0 з трансформатором струму PZCT-02. Локальне відображення параметрів реалізовано на HMI-дисплеї, а віддалений моніторинг — через локальний вебінтерфейс і Vlynk Cloud. Керування навантаженням здійснюється за допомогою релейного модуля.

Розроблена система забезпечує вимірювання напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти та коефіцієнта потужності, а також розрахунок вартості споживання. Передбачено формування повідомлення при перевищенні встановленого порога потужності.

ANNOTATION

Durda V. M. Computer System for Real-Time Monitoring of Residential Energy Consumption: Bachelor's Graduation Thesis: speciality 123 – computer engineering. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2026.

Keywords: energy consumption, monitoring, ESP32, PZEM-004T, HMI display, Blynk Cloud, relay module, residential premises.

In the qualification work, a computer system for monitoring the energy consumption of a residential building in real time was developed.

The work analyzed the features of the energy consumption of residential buildings, determined the parameters that need to be controlled, and considered the principles of building digital electricity consumption measurement systems. A structural diagram of the system was developed, hardware was selected, and an electrical schematic and software diagram was developed.

The system is based on an ESP32 microcontroller. The PZEM-004T V3.0 module with a PZCT-02 current transformer was used to measure network parameters. Local display of parameters was implemented on the HMI display, and remote monitoring was performed via a local web interface and Blynk Cloud. Load control is carried out using a relay module.

The developed system provides measurement of voltage, current, active power, consumed electricity, frequency and power factor, as well as calculation of the cost of consumption. A message is generated when the set power threshold is exceeded.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1	АНАЛІЗ ТЕХІЧНОГО ЗАВДАННЯ	10
1.1	Аналіз енергоспоживання житлового приміщення як об'єкта моніторингу	10
1.2	Параметри електричної мережі	13
1.3	Архітектура систем вимірювання енергоспоживання та аналіз існуючих систем вимірювань	17
1.4	Постановка задачі кваліфікаційної роботи	20
РОЗДІЛ 2	ПРОЄКТНА ЧАСТИНА.....	22
2.1	Розробка узагальненої структури комп'ютерної системи моніторингу...22	22
2.2	Вибір апаратних засобів комп'ютерної системи	26
2.3	Розробка схеми електричної принципової.....	34
2.4	Вибір програмного забезпечення	40
РОЗДІЛ 3	ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА	44
3.1	Розробка програмного забезпечення комп'ютерної системи	44
3.2	Реалізація комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання.....	48
РОЗДІЛ 4	БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ ..57	57
4.1	Забезпечення працездатності оператора під час роботи з комп'ютеризованою системою моніторингу енергоспоживання	57
4.2	Заходи захисту обладнання від статичної електрики.....	59
ВИСНОВКИ	62

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Дурда В. М.			Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірів		Жаровський Р.				6	
Реценз.		Литвиненко Я			ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
Н. Контр.		Луцик Н. С.					
Затверд.		Осухівська Г.М.					
					Комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ63

Додаток А Технічне завдання

Додаток Б Технічні характеристики модуля вимірювання

Додаток В Перелік елементів

Додаток Г Лістинг програмного забезпечення

					<i>КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Електрична енергія є одним із основних ресурсів, що забезпечує функціонування сучасного житлового приміщення. Побутові електроприймачі використовуються для освітлення, приготування їжі, обігріву, охолодження, прання, роботи інформаційно-комунікаційних пристроїв та інших повсякденних потреб. При цьому характер електроспоживання є нерівномірним: у різні періоди доби змінюється кількість увімкнених пристроїв, їхня потужність і тривалість роботи. Через це користувач не завжди має можливість оперативно оцінити фактичне навантаження та витрати електроенергії.

Традиційний побутовий електролічильник переважно відображає накопичене значення спожитої електроенергії, однак не завжди забезпечує зручний контроль поточних параметрів у режимі реального часу. Для практичного аналізу енергоспоживання важливо знати не лише сумарну кількість спожитих кіловат-годин, а й поточні значення напруги, струму, активної потужності, частоти мережі та коефіцієнта потужності. Такі дані дають змогу виявляти пікові режими, оцінювати роботу окремого навантаження, контролювати перевищення заданих порогів і приймати рішення щодо раціонального використання електроенергії.

Актуальність теми зумовлена необхідністю створення доступної комп'ютерної системи, яка забезпечує моніторинг енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі. Використання мікроконтролерних платформ, цифрових вимірювальних модулів, локальних засобів індикації та бездротового передавання даних дає змогу реалізувати компактну систему, придатну для контролю одного навантаження або окремої групи побутових споживачів.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі з

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливістю локального відображення параметрів, віддаленого доступу до даних і керування контрольованим навантаженням.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: проаналізувати особливості енергоспоживання житлових приміщень; визначити електричні параметри, які доцільно контролювати; розглянути існуючі рішення та принципи побудови систем вимірювання електроспоживання; розробити структуру комп'ютерної системи; вибрати апаратні та програмні засоби; розробити схему електричну принципову; реалізувати програмне забезпечення для зчитування, обробки, відображення та передавання даних; забезпечити керування навантаженням і перевірити працездатність системи.

					<i>КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ</i>	Арк.
						9
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Аналіз енергоспоживання житлового приміщення як об'єкта моніторингу

Житлове приміщення є складним об'єктом електроспоживання, у якому одночасно можуть працювати різні за потужністю, тривалістю роботи та характером навантаження електричні прилади. До основних споживачів електроенергії в побутових умовах належать освітлювальні прилади, холодильне обладнання, телевізори, комп'ютерна техніка, зарядні пристрої, кухонна побутова техніка, пральні машини, бойлери, кондиціонери, електрообігрівачі, вентиляційні пристрої та інше обладнання. Кожна з цих груп має власний режим роботи, тому загальне навантаження житлового приміщення постійно змінюється в часі.

Особливістю енергоспоживання житлового приміщення є його нерівномірність протягом доби.

У нічний період навантаження зазвичай формується приладами, які працюють постійно або перебувають у черговому режимі. До них належать холодильник, роутер, охоронні пристрої, зарядні пристрої, блоки живлення та побутова електроніка в режимі очікування.

У ранкові та вечірні години споживання зростає через одночасне використання освітлення, кухонних приладів, пральної машини, бойлера, телевізора, комп'ютера або кліматичного обладнання.

Тому для житлового приміщення характерні як відносно стабільні базові навантаження, так і короткочасні пікові режими (рис.1.1).

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Дурда В. М.			Аналіз технічного завдання	Лім.	Арк.	Аркушіє
Перевірів		Жаровський Р.					10	12
Реценз.		Литвиненко Я				ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
Н. Контр.		Луцик Н. С.						
Затверд.		Осухівська Г.М.						

Традиційний побутовий електролічильник дозволяє визначити загальну кількість спожитої електроенергії за певний період, однак не завжди забезпечує зручне оперативне спостереження за зміною навантаження (рис. 1.2). Користувач може бачити накопичене значення кВт·год, але не завжди має змогу визначити, у який момент виникло пікове споживання, які прилади найбільше вплинули на витрати та як змінюється навантаження протягом доби. Через це виникає потреба у додатковій комп'ютеризованій системі, яка забезпечуватиме поточний моніторинг параметрів енергоспоживання.

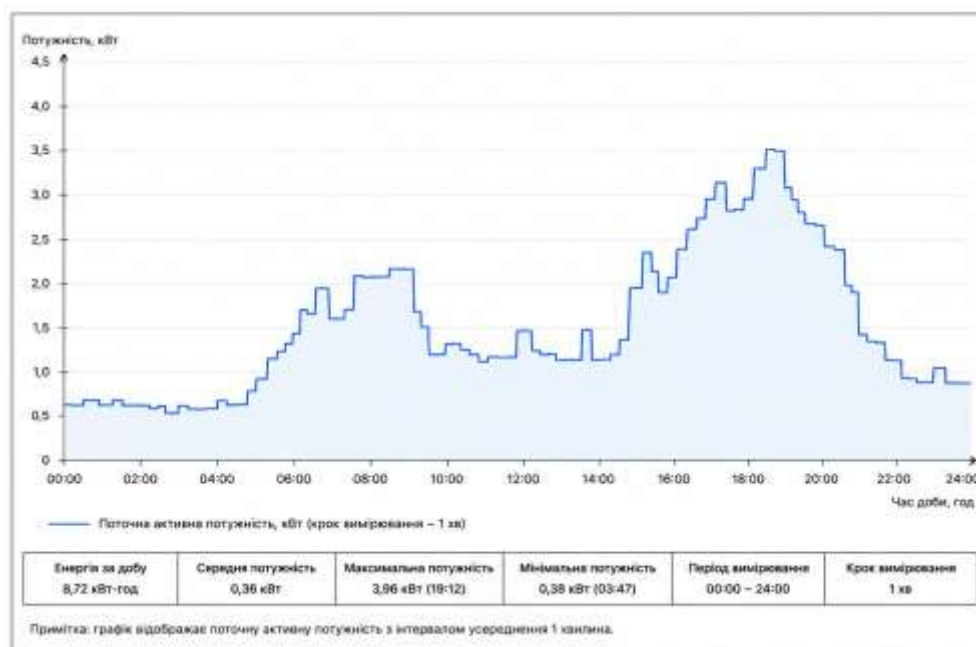


Рисунок 1.2 – Приклад добової зміни енергоспоживання житлового приміщення

Енергоспоживання житлового приміщення доцільно розглядати як процес, що залежить від кількості підключених електроприладів, їх потужності, тривалості роботи, режиму використання та поведінки користувачів.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ

Арк.

12

Важливим аспектом є можливість аналізу енергоспоживання для підвищення енергоефективності. Якщо користувач бачить поточну потужність, накопичене споживання та орієнтовну вартість електроенергії, він може свідомо змінювати режими використання електроприладів. Наприклад, можна уникати одночасного вмикання кількох потужних споживачів, виявляти прилади з надмірним споживанням, контролювати роботу обладнання в режимі очікування та оцінювати ефективність заходів з енергозбереження.

З погляду моніторингу житлове приміщення можна розглядати як однофазний об'єкт електроспоживання, для якого необхідно контролювати поточні параметри електричної мережі та накопичені показники споживання. При цьому система моніторингу не повинна замінювати штатний комерційний електролічильник, а має виконувати інформаційно-аналітичну функцію. Її призначення полягає у наданні користувачу додаткових даних про стан електроспоживання, які недоступні або недостатньо зручно подані у звичайних засобах обліку.

Наочне подання інформації спрощує сприйняття даних користувачем, а збереження результатів дає змогу аналізувати споживання за певний період.

1.2 Параметри електричної мережі

Основними контрольованими параметрами є напруга, струм, активна потужність, спожита електроенергія, частота мережі та коефіцієнт потужності. Додатково можуть визначатися повна потужність, реактивна потужність, максимальні та мінімальні значення параметрів, а також орієнтовна вартість спожитої електроенергії.

Напруга мережі U є базовим параметром, який характеризує рівень електроживлення навантаження. У побутовій однофазній мережі напруга подається між фазним і нульовим провідниками. Для системи моніторингу

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

важливо контролювати діюче значення напруги, оскільки саме воно використовується для оцінювання режиму роботи електроприладів і розрахунку потужності. Зниження напруги може спричинити нестабільну роботу електронних блоків живлення, двигунів і нагрівальних пристроїв, а підвищення напруги може призводити до збільшення теплового навантаження на елементи побутової техніки.

Під час моніторингу напруги доцільно фіксувати поточне значення U , мінімальне та максимальне значення за певний період, а також факт виходу напруги за допустимий діапазон. Для подальшої обробки використовують діюче значення напруги, яке для синусоїдного сигналу відповідає еквівалентному значенню постійної напруги за тепловою дією. У системі моніторингу цей параметр відображається у вольтах.

Струм навантаження I характеризує фактичний рівень електричного навантаження, яке створюють підключені споживачі. Збільшення струму свідчить про вмикання додаткових приладів або роботу потужних споживачів. Контроль струму є важливим для оцінювання навантаження на електропроводку, автоматичні вимикачі, розетки та інші елементи побутової електромережі. Для системи моніторингу необхідно визначати діюче значення струму, оскільки саме воно використовується для розрахунку потужності та оцінювання навантажувальної здатності мережі.

Під час контролю струму доцільно фіксувати поточне значення I , максимальне значення струму за період вимірювання та перевищення заданого порогового значення. Якщо високий струм зберігається тривалий час, це може свідчити про значне навантаження на лінію живлення.

Активна потужність P є одним із головних параметрів системи моніторингу, оскільки вона показує реальну потужність, яку споживає навантаження. Саме активна потужність перетворюється в корисну роботу, тепло, світло або механічну енергію. У побутових умовах активна потужність використовується для оцінювання поточного енергоспоживання та визначення

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

найбільш навантажених режимів роботи електроприладів. Контроль активної потужності дає змогу виявляти пікові режими споживання.

Для однофазної мережі активна потужність визначається за залежністю:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi,$$

де P – активна потужність, Вт; U – діюче значення напруги, В; I – діюче значення струму, А; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

Спожита електроенергія E визначається шляхом накопичення активної потужності в часі. У системах моніторингу цей параметр зазвичай відображається в кВт·год, оскільки саме така одиниця використовується для побутового обліку електроенергії. Якщо потужність є змінною, то енергія визначається як сума значень потужності за окремі інтервали часу.

У дискретній системі моніторингу спожита електроенергія може обчислюватися за залежністю:

$$E = \Sigma(P_i \cdot \Delta t),$$

де E – спожита електроенергія, Вт·год або кВт·год; P_i – активна потужність на i -му інтервалі вимірювання; Δt – тривалість інтервалу вимірювання.

Для практичного використання важливо зберігати накопичене значення енергії після вимкнення або перезапуску системи. Якщо цього не передбачити, після кожного перезапуску система починатиме облік з нуля, що унеможливить коректний аналіз добового або місячного споживання.

Частота мережі f характеризує кількість періодів змінної напруги за одну секунду. У побутових електромережах частота є важливим параметром стабільності електроживлення. Значні відхилення частоти можуть впливати на роботу електродвигунів, годинникових пристроїв, джерел живлення та іншого

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обладнання. У системі моніторингу частота не є основним показником витрат електроенергії, однак її контроль дозволяє оцінювати загальний стан мережі.

Орієнтовна вартість спожитої електроенергії C є похідним параметром, який розраховується на основі накопиченого значення енергії та заданого тарифу:

$$C = E \cdot T, \quad (1.1)$$

де C – вартість електроенергії, грн; E – спожита електроенергія, кВт·год; T – тариф, грн/кВт·год.

Розрахунок вартості не є електричним вимірюванням, однак він підвищує практичну цінність системи для користувача. Відображення вартості дозволяє оцінювати не лише технічний стан навантаження, а й економічний результат споживання електроенергії (табл.1.1).

Таблиця 1.1 – Основні параметри електричної мережі, які необхідно контролювати

Параметр	Позначення	Од. вим.	Призначення контролю
Напруга	U	В	Контроль рівня електроживлення та виявлення відхилень у мережі
Струм	I	А	Оцінювання фактичного навантаження на електромережу
Активна потужність	P	Вт, кВт	Визначення поточного споживання електроприладів
Спожита електроенергія	E	кВт·год	Накопичення обсягу споживання за певний період
Частота мережі	f	Гц	Контроль стабільності параметрів електроживлення
Вартість	C	грн	Розрахунок орієнтовних витрат користувача

Крім основних параметрів, доцільно контролювати граничні та статистичні значення. До них належать максимальна потужність за добу, мінімальна потужність, середня потужність, максимальний струм, час виникнення пікового навантаження та сумарна енергія за вибраний період.

Такі дані дозволяють аналізувати не лише поточний стан мережі, а й характер споживання протягом часу.

1.3 Архітектура систем вимірювання енергоспоживання та аналіз існуючих систем вимірювань

Сучасні системи вимірювання струму та електричної енергії будуються за принципом перетворення електричних параметрів мережі у вимірювальні сигнали, їх подальшої цифрової обробки та відображення результатів користувачу.

Типова система вимірювання енергоспоживання містить канал вимірювання напруги, канал вимірювання струму, блок аналогової обробки сигналів, аналого-цифровий перетворювач, обчислювальний блок, вузол індикації та, за потреби, інтерфейс передавання даних. Канал напруги забезпечує масштабування напруги мережі до безпечного рівня, придатного для вимірювання. Канал струму перетворює струм навантаження у пропорційний електричний сигнал. Після цього сигнали напруги та струму обробляються, оцифровуються і використовуються для розрахунку діючих значень, потужності та спожитої електроенергії (рис.1.3).

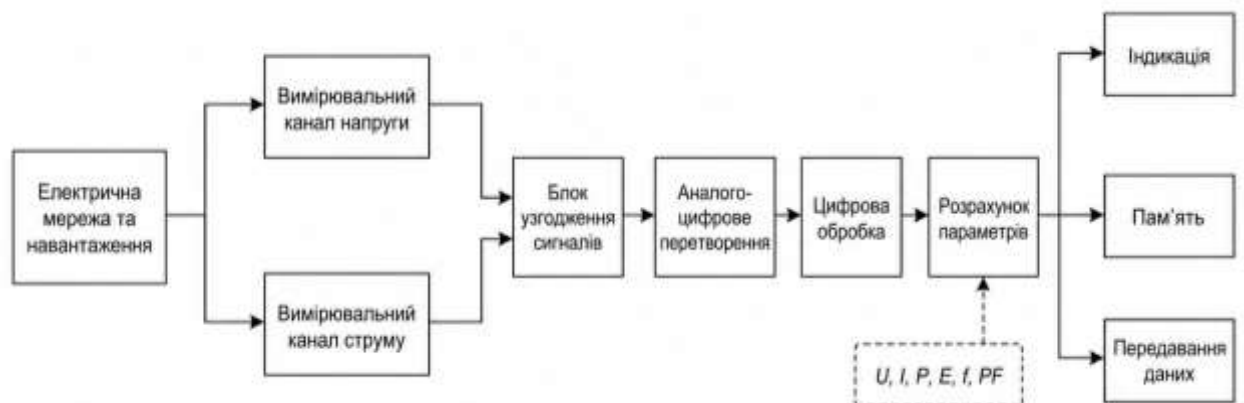


Рисунок 1.3 – Узагальнена структура цифрової системи вимірювання електроспоживання

У цифрових лічильниках електричної енергії основні параметри визначаються шляхом одночасного вимірювання миттєвих значень напруги та струму. Спожита електроенергія у цифрових системах визначається шляхом інтегрування активної потужності в часі. У дискретній формі це реалізується як накопичення енергії за окремі інтервали вимірювання. Чим менший інтервал між вимірюваннями, тим точніше система може відстежувати зміну навантаження та фіксувати короточасні пікові режими.

Ключовим елементом таких систем є спосіб вимірювання струму. У практичних рішеннях застосовуються кілька основних методів: вимірювання за допомогою шунтового резистора, трансформатора струму, датчика Холла, котушки Роговського або спеціалізованого цифрового вимірювального вузла.

Трансформатор струму є одним із найпоширеніших засобів вимірювання змінного струму в системах енергомоніторингу. Його робота ґрунтується на явищі електромагнітної індукції. Провідник, через який протікає вимірюваний струм, виконує роль первинної обмотки (рис 1.4).

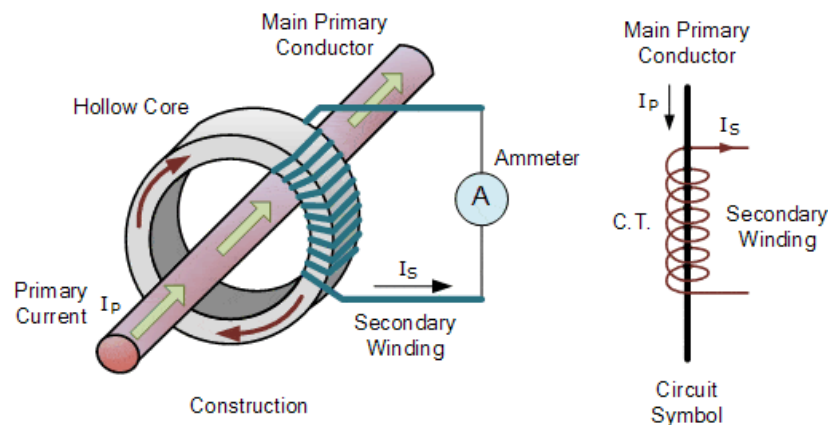


Рисунок 1.4 – Принцип вимірювання струму за допомогою кільцевого трансформатора струму

Навколо нього розташовується магнітне осердя з вторинною обмоткою. Змінний струм у первинному провіднику створює змінне магнітне поле, яке індукуює струм або напругу у вторинній обмотці. Отриманий сигнал є

пропорційним струму навантаження і може бути поданий на схему вимірювання.

Кільцеві трансформатори струму часто виконують у вигляді замкненого або роз'ємного осердя. Роз'ємні трансформатори струму зручні тим, що їх можна встановлювати на провідник без роз'єднання електричного кола. Це особливо важливо для систем моніторингу, які встановлюються в уже наявній електромережі. Через кільце повинен проходити лише один провідник, наприклад фазний. Перевагою кільцевих трансформаторів струму є гальванічна розв'язка між силовою мережею та вимірювальною частиною. Це підвищує безпеку системи, оскільки вимірювальний канал не має прямого електричного з'єднання з провідником мережі. Недоліками є неможливість вимірювання постійного струму, залежність точності від частоти, нелінійність осердя при великих струмах і потреба в правильному підборі навантажувального резистора.

Серед сучасних пристроїв вимірювання електроспоживання поширені цифрові електролічильники, DIN-рейкові енергометри, панельні вимірювачі параметрів мережі та smart-пристрої з функцією моніторингу. DIN-рейкові енергометри часто встановлюються в електрощитах і можуть працювати з виносними трансформаторами струму, що дає змогу вимірювати навантаження без прямого розриву силового кола. Окремі моделі підтримують вимірювання напруги, струму, активної, реактивної та повної потужності, коефіцієнта потужності, частоти й накопиченої електроенергії (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Приклади сучасних пристроїв вимірювання та моніторингу електроспоживання

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Побутові smart-пристрої з функцією вимірювання електроенергії зазвичай призначені для контролю окремого навантаження або лінії живлення. Вони можуть відображати поточну напругу, струм, активну потужність і накопичене споживання, а також передавати ці дані в мобільний застосунок. Такі рішення зручні для побутового використання, однак їх функціональність часто обмежена одним каналом вимірювання.

1.4 Постановка задачі кваліфікаційної роботи

За результатами аналізу енергоспоживання житлового приміщення, параметрів електричної мережі та принципів побудови сучасних систем вимірювання струму сформовано задачу кваліфікаційної роботи. Необхідно розробити комп'ютерну систему моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі, яка забезпечуватиме вимірювання основних електричних параметрів, їх обробку, відображення користувачу та збереження результатів контролю.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка комп'ютерної системи, призначеної для оперативного контролю енергоспоживання житлового приміщення. Система повинна забезпечувати можливість спостереження за зміною параметрів електричної мережі в реальному часі та підвищувати інформативність контролю порівняно зі звичайним зняттям показників електролічильника.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати особливості енергоспоживання житлового приміщення як об'єкта моніторингу;
- визначити основні параметри електричної мережі, які необхідно контролювати в системі моніторингу енергоспоживання;
- проаналізувати принципи роботи сучасних цифрових систем вимірювання електроспоживання;

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- розробити узагальнену структуру комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення;
- виконати вибір апаратних засобів для реалізації вимірювальної, обчислювальної, індикаційної та комунікаційної частин системи;
- розробити електричну схему підключення основних компонентів системи;
- обґрунтувати вибір програмного забезпечення для розробки та налагодження системи;
- розробити програмне забезпечення для зчитування, обробки, відображення та збереження вимірювальних даних;
- виконати тестування роботи системи з різними режимами навантаження;
- проаналізувати отримані результати та оцінити працездатність розробленої системи.

Практичним результатом виконання кваліфікаційної роботи повинна бути комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання житлового приміщення, яка забезпечує вимірювання основних електричних параметрів, обробку даних, відображення результатів користувачу та перевірку працездатності в умовах різних режимів навантаження.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка узагальненої структури комп'ютерної системи моніторингу

На основі аналізу технічного завдання і результатів огляду проведеного в 1 розділі, розроблено узагальнену структуру комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення. Система призначена для вимірювання параметрів однофазної мережі змінного струму, обробки результатів вимірювання, відображення поточних значень, формування даних для віддаленого моніторингу та керування одним контрольованим навантаженням. Структурна схема системи наведена на рис. 2.1.

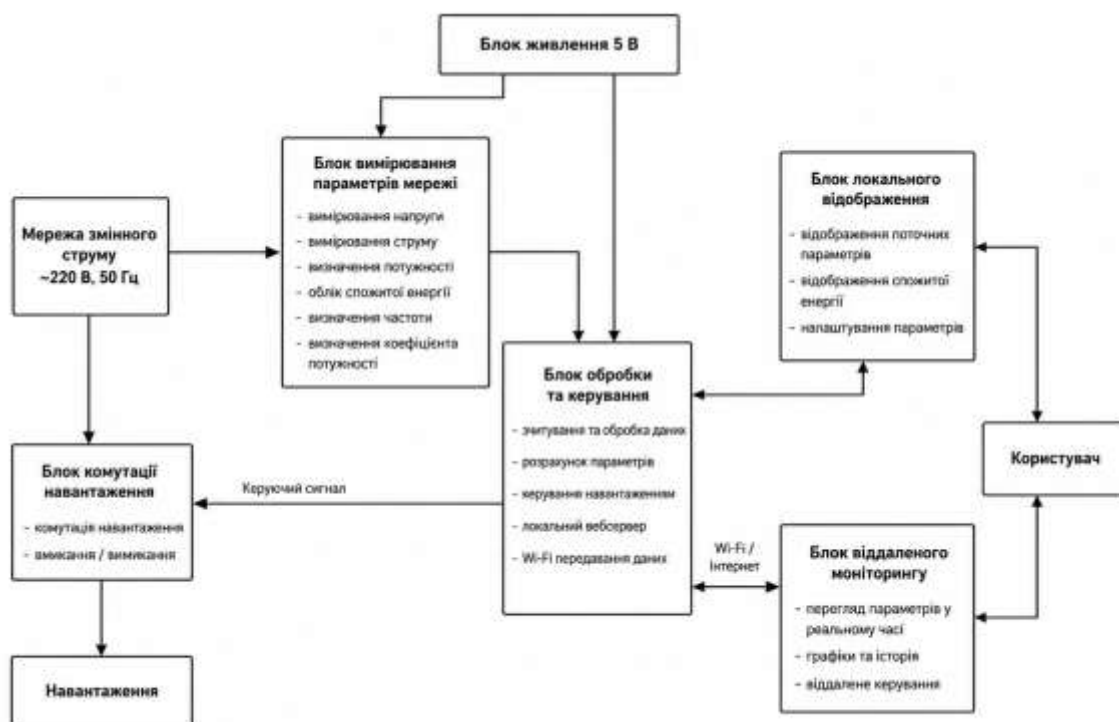


Рисунок 2.1 – Структурна схема комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення

КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Дурда В. М.		
Перевірів		Жаровський Р.		
Реценз.		Литвиненко Я		
Н. Контр.		Луцик Н. С.		
Затверд.		Осухівська Г.М.		
Проектна частина				
		Літ.	Арк.	Аркушів
			22	22
ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41				

До складу системи входять такі основні функціональні блоки: роз'єм мережі змінного струму, блок вимірювання параметрів мережі, блок обробки та керування, блок комутації навантаження, саме навантаження, блок локального відображення, блок віддаленого моніторингу і блок живлення 5 В.

Мережа змінного струму є джерелом живлення контрольованого навантаження та об'єктом вимірювання. У межах роботи розглядається однофазна побутова мережа змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц. Від мережі живиться навантаження, а також формується вхідний сигнал для блока вимірювання параметрів мережі. На структурній схемі силова частина відокремлена від інформаційної, що дозволяє чітко показати різницю між колами живлення навантаження та каналами передавання вимірювальних даних [2].

Блок вимірювання параметрів мережі призначений для отримання основних електричних параметрів, необхідних для оцінювання енергоспоживання. Результати вимірювання передаються до блока обробки та керування у вигляді цифрових даних.

Блок обробки та керування є центральною частиною комп'ютерної системи. Він приймає дані від блока вимірювання параметрів мережі, виконує їх обробку, розраховує додаткові показники, формує інформацію для відображення та передавання користувачу. До функцій цього блока належать зчитування вимірювальних даних, перевірка їх коректності, розрахунок поточних і накопичених параметрів, розрахунок орієнтовної вартості електроенергії, керування реле, формування даних для локального вебсервера та передавання інформації через бездротову мережу.

Окремою функцією блока обробки та керування є контроль стану навантаження. На основі поточної потужності або команди користувача блок формує керуючий сигнал для блока комутації навантаження. Це дозволяє вмикати або вимикати контрольоване навантаження, а також реалізувати елементарний захист від перевантаження за заданим порогом потужності. У

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цій роботі система розрахована на роботу з одним реле та одним контрольованим навантаженням, що спрощує апаратну частину та відповідає поставленому завданню.

Блок комутації навантаження призначений для електричного вмикання та вимикання контрольованого навантаження. Він розміщується в силовому колі між мережею змінного струму та навантаженням і керується сигналом від блока обробки та керування. У нормальному режимі блок комутації забезпечує подавання живлення на навантаження. У разі перевищення заданого порогу потужності або за командою користувача він може розірвати коло живлення навантаження. Таким чином, блок комутації виконує функцію виконавчого елемента системи.

Навантаженням у розроблюваній системі є один контрольований електричний споживач або група споживачів, підключених до контрольованої лінії. Через це система може вимірювати параметри споживання саме цього навантаження та виконувати його комутацію. Використання одного навантаження в базовій реалізації дозволяє зосередитися на перевірці основних функцій системи. У подальшому структура може бути розширена для роботи з кількома каналами навантаження.

Блок локального відображення призначений для виведення основних параметрів безпосередньо на пристрої. Він забезпечує відображення поточних значень напруги, струму, потужності, спожитої енергії, вартості електроенергії та стану навантаження. Також цей блок може використовуватися для налаштування окремих параметрів системи, зокрема тарифу на електроенергію, порогового значення потужності та режимів індикації. У структурі системи локальне відображення забезпечує можливість контролю параметрів без обов'язкового використання смартфона або персонального комп'ютера.

Блок віддаленого моніторингу призначений для передавання даних користувачу через бездротову мережу. Віддалений моніторинг може

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

здійснюватися через локальний вебінтерфейс або хмарний сервіс. Локальний вебінтерфейс забезпечує доступ до даних у межах домашньої мережі, а хмарний сервіс дає змогу переглядати параметри з віддаленого пристрою за наявності доступу до Інтернету.

Користувач взаємодіє з системою двома способами: через локальний блок відображення та через блок віддаленого моніторингу. Через локальний інтерфейс користувач може переглядати основні параметри та стан системи безпосередньо біля пристрою.

Через смартфон або персональний комп'ютер користувач може контролювати параметри в реальному часі, переглядати графіки, отримувати повідомлення про перевищення порогів і, за потреби, керувати навантаженням.

Блок живлення 5 В забезпечує живлення низьковольтної частини системи. У розробленій структурі живлення 5 В подається лише на блок обробки та керування і блок вимірювання параметрів мережі і реле.

Блок локального відображення в межах структурної схеми розглядається як окремий функціональний вузол, що взаємодіє з блоком обробки та керування через інтерфейс обміну даними.

У системі не передбачено окремий модуль реального часу, microSD-карту або окремий зовнішній EEPROM-модуль як обов'язкові елементи базової реалізації. Таке рішення обґрунтовується тим, що система орієнтована на моніторинг параметрів у реальному часі, локальне відображення та передавання даних через мережу. Графіки та історичні дані доцільно формувати через вебінтерфейс або хмарний сервіс. Модуль реального часу та зовнішня пам'ять можуть бути додані в подальшому у випадку потреби автономного журналювання даних без доступу до мережі.

Узагальнена структура системи передбачає таку послідовність роботи. Мережа змінного струму живить контрольоване навантаження через блок комутації. Блок вимірювання параметрів мережі контролює електричні

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

параметри та передає цифрові дані до блока обробки та керування. Блок обробки виконує розрахунки, формує дані для локального відображення, передає інформацію у блок віддаленого моніторингу та за потреби формує керуючий сигнал для блока комутації навантаження. Користувач отримує інформацію через локальний інтерфейс або через віддалений доступ.

На основі цієї структурної схеми в наступному підрозділі буде виконано вибір апаратних засобів комп'ютерної системи.

2.2 Вибір апаратних засобів комп'ютерної системи

Вибір апаратних засобів комп'ютерної системи виконується відповідно до структурної схеми, розробленої в підпункті 2.1. Під час вибору елементної бази враховувались функціональні можливості, простота підключення, підтримка необхідних інтерфейсів, доступність програмних бібліотек, стабільність роботи та можливість подальшого розширення системи [3].

Для реалізації блока обробки та керування розглядалися мікроконтролерні платформи Arduino Uno/Nano, ESP8266 та ESP32 (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняння мікроконтролерних платформ

Платформа	Переваги	Обмеження	Доцільність використання
Arduino Uno/Nano	Простота програмування, доступність, велика кількість прикладів	Немає вбудованого Wi-Fi, обмежена пам'ять, нижча продуктивність	Доцільна для простих автономних пристроїв без віддаленого моніторингу
ESP8266	Вбудований Wi-Fi, невисока вартість, придатність для простих IoT-пристроїв	Менша кількість GPIO та інтерфейсів, менша гнучкість підключення периферії	Може використовуватися для простих систем передавання даних
ESP32	Вбудований Wi-Fi і Bluetooth, висока продуктивність, декілька UART/SPI/I2C, достатня кількість GPIO	Потребує правильного вибору виводів і стабільного живлення	Найбільш доцільна платформа для розроблюваної системи

Плати Arduino Uno і Arduino Nano прості у використанні та мають значну кількість прикладів програмної реалізації, однак не мають вбудованого Wi-Fi. ESP8266 має вбудований Wi-Fi, однак поступається ESP32 за кількістю інтерфейсів, обсягом пам'яті, продуктивністю та можливістю одночасної роботи з кількома периферійними пристроями. ESP32 має вбудований Wi-Fi, Bluetooth, достатню кількість GPIO, кілька UART, SPI та I2C, тому є найбільш доцільним варіантом для системи енергомоніторингу з локальним і віддаленим відображенням даних.

Для розроблюваної системи обрано ESP32, оскільки він забезпечує одночасне виконання функцій обробки даних, керування навантаженням, обміну з дисплеєм, організації вебінтерфейсу та передавання даних у віддалений сервіс. Наявність кількох апаратних UART-інтерфейсів дозволяє розділити обмін з вимірювальним модулем і дисплеєм, а вбудований Wi-Fi усуває потребу у використанні додаткового мережевого модуля (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Основні технічні характеристики ESP32

Параметр	Значення
Тип пристрою	32-бітний мікроконтролерний модуль з Wi-Fi і Bluetooth
Процесор	двоядерний Xtensa LX6
Тактова частота	до 240 МГц
Оперативна пам'ять	520 КБ SRAM
Flash-пам'ять модуля	зазвичай 4 МБ SPI Flash
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth, Bluetooth LE
Периферійні інтерфейси	UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC, DAC, GPIO
Кількість GPIO	до 32 залежно від плати розробника
Робоча напруга модуля	3,0–3,6 В
Живлення плати розробника	5 В через USB або VIN із подальшою стабілізацією до 3,3 В
Робочий температурний діапазон	приблизно –40...+85 °С
Призначення в системі	зчитування даних, обробка параметрів, керування реле, вебсервер, Wi-Fi-передавання, зв'язок із дисплеєм

Для реалізації блока вимірювання параметрів електроспоживання розглядалися два варіанти: використання окремого датчика напруги

ZMPT101B разом із трансформатором струму SCT-013 або застосування багатофункціонального цифрового вимірювача змінного струму PZEM-004T. Обидва підходи дають змогу отримувати параметри електричної мережі, однак відрізняються способом вимірювання, складністю підключення, потребою в калібруванні та обсягом програмної обробки (табл.2.3).

Таблиця 2.3 – Порівняння варіантів вимірювання параметрів електроспоживання

Критерій	ZMPT101B + SCT-013	PZEM-004T
Тип рішення	Окремий датчик напруги та окремих трансформатор струму	Готовий багатофункціональний цифровий вимірювач
Тип вихідного сигналу	Аналогові сигнали з датчиків	Цифрові дані
Інтерфейс із мікроконтролером	Аналогові входи АЦП	UART / Modbus-RTU
Вимірювання напруги	Через датчик ZMPT101B	Реалізовано в модулі
Вимірювання струму	Через трансформатор струму SCT-013	Через вбудований/зовнішній трансформатор струму модуля
Визначення потужності	Розраховується програмно на мікроконтролері	Видається модулем як готовий параметр
Облік енергії	Розраховується програмно	Реалізований у модулі
Частота мережі	Потребує додаткової програмної обробки	Видається модулем
Коефіцієнт потужності	Потребує розрахунку	Видається модулем
Необхідність калібрування	Висока, окремо для напруги та струму	Менша, основні параметри формуються модулем
Складність програмної частини	Вища, оскільки потрібні розрахунки RMS, потужності та енергії	Нижча, оскільки ESP32 зчитує готові значення
Основна перевага	Наочність принципу вимірювання, гнучкість	Точність, стабільність і широкий набір готових параметрів
Основне обмеження	Залежність від АЦП, калібрування та аналогових завод	Потреба в правильному підключенні до мережі змінного струму

Варіант на основі ZMPT101B і SCT-013 передбачає окреме вимірювання напруги та струму. Датчик ZMPT101B формує аналоговий сигнал, пропорційний напрузі мережі, а SCT-013 використовується як роз'ємний трансформатор струму для вимірювання змінного струму в провіднику. У

такій схемі вихідні аналогові сигнали подаються на входи АЦП мікроконтролера, після чого програмно визначаються діючі значення напруги та струму, активна потужність і спожита електроенергія.

У реалізаціях для ESP32 вихід ZMPT101B підключається до GPIO35, а вихід SCT-013 — до GPIO34; також використовуються додаткові резистори і конденсатор для узгодження сигналу. Такий підхід потребує калібрування аналогових каналів і залежить від точності АЦП та стабільності вимірювального тракту [4].

Датчик SCT-013 є безконтактним роз'ємним трансформатором струму, який може встановлюватися на один провідник без розриву силового кола. Це є перевагою з погляду монтажу. Водночас у системі з ZMPT101B і SCT-013 мікроконтролер повинен самостійно виконувати розрахунок електричних параметрів, а похибка може зростати через нелінійність датчика, зміщення аналогового сигналу, неточність калібрування та завади в колах вимірювання.

PZEM-004T є готовим цифровим вимірювальним модулем, який самостійно вимірює напругу, струм, активну потужність, спожиту електроенергію, частоту та коефіцієнт потужності. На відміну від схеми з окремими аналоговими датчиками, він передає до мікроконтролера вже оброблені цифрові значення через UART/Modbus-RTU. Це зменшує обсяг програмної обробки на стороні ESP32 і спрощує реалізацію системи. Детальні технічні характеристики багатофункціонального цифрового вимірювача PZEM-004T V3.0 наведено в додатку Б.

Для вимірювання струму в складі модуля PZEM-004T використовується роз'ємний трансформатор струму PZCT-02. Він призначений для безконтактного вимірювання змінного струму в контрольованому провіднику та працює за принципом електромагнітної індукції. Провідник, через який протікає струм навантаження, проходить крізь кільцеве магнітне осердя трансформатора і виконує роль первинної обмотки. У вторинній обмотці

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трансформатора формується сигнал, пропорційний струму навантаження, який надходить до вимірювального модуля [5].

Особливістю PZCT-02 є роз'ємна конструкція осердя. Завдяки цьому трансформатор можна встановлювати на фазний провідник без розриву силового кола. Це спрощує монтаж і підвищує зручність використання системи в умовах житлового приміщення.

PZCT-02 забезпечує гальванічну розв'язку між силовою мережею та вимірювальним модулем. Вимірювальний блок не вмикається послідовно в силове коло навантаження, а отримує інформацію про струм через магнітний зв'язок. Це зменшує втручання в електричну мережу та підвищує безпечність вимірювання. Основні технічні характеристики PZCT-02 наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні технічні характеристики трансформатора струму PZCT-02

Параметр	Значення
Тип пристрою	роз'ємний трансформатор струму
Призначення	вимірювання змінного струму в провіднику навантаження
Номінальний струм	100 А
Тип конструкції	роз'ємне кільцеве осердя
Внутрішній діаметр отвору	16 мм
Довжина кабелю	приблизно 20 см
Спосіб монтажу	встановлення на один провідник без розриву силового кола
Принцип роботи	електромагнітна індукція
Переваги	гальванічна розв'язка, простий монтаж, відсутність прямого включення в силове коло
Обмеження	призначений для змінного струму, потребує правильного розташування на одному провіднику
Призначення в системі	передавання сигналу про струм навантаження до вимірювального модуля PZEM-004T

У розроблюваній системі PZCT-02 використовується для контролю струму одного навантаження. У подальшому структура системи може бути розширена для вимірювання кількох ліній навантаження, але для цього потрібно використовувати додаткові вимірювальні канали або окремі трансформатори струму.

У системах моніторингу енергоспоживання можуть використовуватися різні засоби індикації: LCD 20×4, OLED/TFT-дисплеї або HMI-дисплеї (табл. 2.5). LCD 20×4 є простим варіантом для виведення текстових даних, однак має обмежену кількість рядків і не забезпечує зручного графічного інтерфейсу. OLED або TFT-дисплей дає змогу виводити графіку, але потребує повної програмної реалізації інтерфейсу на стороні мікроконтролера. HMI-дисплей має власний графічний інтерфейс, підтримує елементи керування та зберігання сторінок інтерфейсу у внутрішній пам'яті.

Таблиця 2.5 – Порівняння засобів локального відображення

Варіант відображення	Переваги	Обмеження
LCD 20×4	Просте підключення, низька вартість, достатній для базових числових даних	Обмежена кількість інформації, відсутність повноцінної графіки
OLED/TFT-дисплей	Компактність, можливість графічного виведення	Потребує розробки інтерфейсу в програмі мікроконтролера
HMI-дисплей	Графічний інтерфейс, елементи керування, збереження сторінок і параметрів, зручна взаємодія з користувачем	Вища вартість, потреба в підготовці інтерфейсу в окремому середовищі

Для розроблюваної системи обрано HMI-дисплей DMG80480C070. Важливою перевагою такого дисплея є наявність вбудованої пам'яті, у якій зберігаються елементи графічного інтерфейсу, сторінки відображення та окремі налаштування. Тому окремий зовнішній EEPROM-модуль у базовій структурі системи не використовується [6].

У цій роботі HMI-дисплей використовується передусім для відображення основних параметрів та локального керування системою. Додаткові елементи дисплейного модуля, зокрема динамік, світлодіодна індикація, фотодатчик або інші вбудовані можливості конкретної моделі, у базовій реалізації не є обов'язковими. Вони можуть бути використані під час подальшого розширення системи, наприклад для звукового оповіщення про перевищення потужності, автоматичного регулювання яскравості екрана,

покращення індикації аварійних станів або реалізації додаткових сторінок користувацького інтерфейсу. Характеристики наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні технічні характеристики DWIN DMG80480C070

Параметр	Значення
Тип пристрою	інтелектуальний НМІ-дисплей
Діагональ	7 дюймів
Тип екрана	TFT LCD
Роздільна здатність	800×480 пікселів
Кількість кольорів	262 тис. або 16,7 млн залежно від моделі
Сенсорне керування	резистивне або ємнісне залежно від модифікації
Інтерфейс зв'язку	UART TTL, RS232 або RS485 залежно від моделі
Середовище розробки інтерфейсу	DGUS / DGUS II
Спосіб завантаження проєкту	SD-карта або послідовний інтерфейс
Вбудована пам'ять	пам'ять дисплейного модуля для зберігання графічного інтерфейсу, зображень, шрифтів та окремих параметрів
Додаткові елементи	динамік, світлодіодна індикація, фотодатчик або інші вузли залежно від моделі
Призначення системи	в локальне відображення параметрів, налаштування тарифу і порогів, індикація стану реле, локальне керування навантаженням

Для розроблюваної системи обрано HiLetgo 5V One Channel Relay Module з електромеханічним реле, оптронною розв'язкою та підтримкою високого або низького рівня спрацювання. Такий модуль найкраще відповідає структурі системи, оскільки в роботі передбачено керування одним навантаженням. Наявність оптронної розв'язки підвищує електричну ізоляцію між керуючим сигналом мікроконтролера та силовим колом, а можливість вибору HIGH/LOW trigger спрощує програмне налаштування логіки керування. Основні технічні характеристики обраного релейного модуля наведено в табл. 2.7.

Для живлення низьковольтної частини системи обрано AC/DC-перетворювач Mean Well IRM-05-5. Він призначений для перетворення напруги мережі змінного струму в стабілізовану напругу 5 В постійного струму. Модуль має вихідну потужність 5 Вт і забезпечує струм до 1 А, чого

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

достатньо для живлення мікроконтролерного блока, вимірювального модуля та релейного модуля. Перевагами IRM-05-5 є широкий діапазон вхідної напруги, компактне виконання для монтажу на плату, наявність захисту від короткого замикання, перевантаження та перенапруги, а також відповідність поширеним вимогам електробезпеки (табл.2.8).

Таблиця 2.7 – Основні технічні характеристики HiLetgo 5V One Channel Relay Module

Параметр	Значення
Тип пристрою	одноканальний релейний модуль
Напруга живлення модуля	5 В DC
Розв'язка	оптронна
Режим спрацювання	високий або низький рівень, вибирається перемичкою
Тип контактів	COM, NO, NC
Максимальне АС-навантаження	до 250 В / 10 А
Максимальне DC-навантаження	до 30 В / 10 А
Керуючий сигнал	цифровий сигнал від мікроконтролера
Додаткові елементи	оптрон, транзисторний ключ, індикатор стану, гвинтові клеми
Призначення в системі	комутація одного контрольованого навантаження

Таблиця 2.8 – Основні технічні характеристики Mean Well IRM-05-5

Параметр	Значення
Модель	Mean Well IRM-05-5
Тип пристрою	АС/DC-перетворювач для монтажу на плату
Вхідна напруга	85–305 В АС
Вихідна напруга	5 В DC
Вихідний струм	1 А
Вихідна потужність	5 Вт
ККД	близько 71 %
Монтаж	на друковану плату, Through Hole
Розміри	близько 46 × 26 × 22 мм
Робоча температура	–30...+70 °С
Захист	від короткого замикання, перевантаження, перенапруги
Сертифікації	UL, CE, TUV, CB
Призначення в системі	живлення ESP32, PZEM-004T і релейного модуля

Таким чином обрана елементна база дозволяє реалізувати вимірювання параметрів мережі, локальну індикацію, віддалений моніторинг, побудову графіків і керування одним контрольованим навантаженням.

2.3 Розробка схеми електричної принципової

Схема електрична принципова комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення розробляється на основі структурної схеми та вибраної елементної бази. Основними елементами схеми є мікроконтролер ESP32, багатофункціональний цифровий вимірювач змінного струму PZEM-004T, трансформатор струму PZCT-02, НМІ-дисплей DWIN DMG80480C070, одноканальний релейний модуль HiLetgo 5V One Channel Relay Module, AC/DC-перетворювач Mean Well IRM-05-5 та додаткові елементи обв'язки.

Під час розробки схеми електричної принципової необхідно не тільки підключити основні модулі системи, а й забезпечити правильне узгодження логічних рівнів, стабілізацію живлення, захист входів мікроконтролера та відокремлення силових кіл від низьковольтної частини. Оскільки система працює з мережею змінного струму 220 В, особливу увагу приділено підключенню вимірювального модуля, релейного модуля та блока живлення.

У схемі використано два незалежні UART-інтерфейси ESP32. Перший UART-канал призначений для обміну даними з вимірювальним модулем PZEM-004T, другий — для зв'язку з НМІ-дисплеєм. Таке розділення необхідне для уникнення конфлікту TX/RX-ліній між різними модулями. Системний UART0 ESP32, який зазвичай використовує GPIO1 і GPIO3, у схемі не застосовується для зовнішніх модулів, оскільки він потрібний для програмування плати та налагодження через Serial Monitor [7].

Для підключення PZEM-004T до ESP32 використовується апаратний UART2. Вихід TX модуля PZEM-004T підключається до входу RX2 ESP32, а вхід RX модуля PZEM-004T — до виходу TX2 ESP32. Оскільки вихідний сигнал TX модуля PZEM-004T може мати логічний рівень 5 В, а входи ESP32 розраховані на рівень 3,3 В, на лінії TX PZEM-004T → RX ESP32 передбачено резистивний подільник напруги.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Резистивний подільник складається з резисторів $R1 = 1 \text{ кОм}$ і $R2 = 1,8 \text{ кОм}$. Резистор $R1$ вмикається послідовно між виходом TX модуля PZEM-004T та входом RX2 ESP32, а резистор $R2$ підключається між входом RX2 ESP32 і спільним проводом GND. Вихідна напруга подільника визначається за формулою:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \cdot \frac{R2}{R1 + R2},$$

де $U_{\text{вих}}$ – напруга на вході RX2 ESP32; $U_{\text{вх}}$ – вихідна напруга TX модуля PZEM-004T; $R1$ – верхній резистор подільника; $R2$ – нижній резистор подільника.

Для $U_{\text{вх}} = 5 \text{ В}$, $R1 = 1 \text{ кОм}$ і $R2 = 1,8 \text{ кОм}$ отримаємо:

$$U_{\text{вих}} = 5 \cdot \frac{1,8}{1 + 1,8} = 5 \cdot \frac{1,8}{2,8} \approx 3,21 \text{ В.}$$

Отримане значення напруги є безпечним для входу ESP32 і достатнім для надійного розпізнавання логічної одиниці. Струм через подільник становить:

$$I = \frac{U_{\text{вх}}}{R1 + R2} = \frac{5}{2800} \approx 0,00179 \text{ А} = 1,79 \text{ мА.}$$

Потужність, яка розсіюється на резисторах, є малою. Для резистора 1 кОм :

$$P1 = I^2 \cdot R1 = 0,00179^2 \cdot 1000 \approx 0,0032 \text{ Вт.}$$

Для резистора $1,8 \text{ кОм}$:

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$P2 = I^2 \cdot R2 = 0,00179^2 \cdot 1800 \approx 0,0058 \text{ Вт.}$$

Отже, для подільника достатньо використовувати стандартні резистори потужністю 0,125 Вт або 0,25 Вт. Лінія TX ESP32 → RX PZEM-004T може підключатися без подільника, оскільки логічний рівень 3,3 В зазвичай коректно сприймається входом зовнішнього модуля як логічна одиниця.

Багатофункціональний вимірювач PZEM-004T підключається до мережі змінного струму через клеми L і N. Через ці клеми модуль отримує інформацію про напругу мережі. Для вимірювання струму використовується роз'ємний трансформатор струму PZCT-02, який підключається до відповідного входу модуля PZEM-004T. Через отвір трансформатора струму пропускається лише фазний провідник контрольованого навантаження. Одночасне пропускання фазного і нульового провідників через трансформатор струму є неправильним, оскільки магнітні поля від струмів протилежного напрямку компенсуються і вимірювання стає некоректним [8].

НМІ-дисплей DWIN DMG80480C070 підключається до ESP32 через окремий UART-інтерфейс. Для цього використовується перехресне підключення ліній: TX дисплея підключається до RX ESP32, а RX дисплея — до TX ESP32. У схемі для зв'язку з дисплеєм використовуються GPIO26 і GPIO27, які не зайняті обміном із PZEM-004T. Завдяки цьому PZEM-004T і НМІ-дисплей працюють на різних UART-каналах і не створюють конфліктів під час обміну даними.

Якщо вихід TX НМІ-дисплея має логічний рівень 5 В, то лінію TX дисплея, яка надходить на RX ESP32, також доцільно узгодити з рівнем 3,3 В за допомогою резистивного подільника або перетворювача логічних рівнів. Лінія TX ESP32 → RX дисплея зазвичай може працювати без додаткового підсилення, якщо вхід дисплея сприймає рівень 3,3 В як логічну одиницю. Остаточне рішення щодо узгодження рівнів залежить від конкретної модифікації дисплейного модуля.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У колі живлення НМІ-дисплея передбачено електролітичний конденсатор С1 ємністю 100 мкФ, підключений між лініями VCC і GND біля роз'єму живлення дисплея. Конденсатор використовується для згладжування пульсацій, компенсації короточасних просідань напруги та стабілізації роботи дисплея під час зміни споживання струму підсвічуванням.

Ємність конденсатора можна оцінити за залежністю:

$$C = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta U},$$

де C – ємність конденсатора, Ф; I – короточасний імпульсний струм навантаження, А; Δt – тривалість імпульсу, с; ΔU – допустиме просідання напруги, В.

Для прикладу, якщо короточасне збільшення струму дисплея становить 0,1 А протягом 1 мс, а допустиме просідання напруги живлення становить 1 В, то:

$$C = 0,1 \cdot \frac{0,001}{1} = 0,0001 \text{ Ф} = 100 \text{ мкФ}.$$

Отже, конденсатор ємністю 100 мкФ є доцільним для локальної стабілізації живлення дисплея. Для придушення високочастотних завад додатково встановлено керамічний конденсатор С2 ємністю 0,1 мкФ, підключений паралельно до С1 між лініями VCC і GND безпосередньо біля виводів живлення дисплейного модуля (рис.2.2).

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

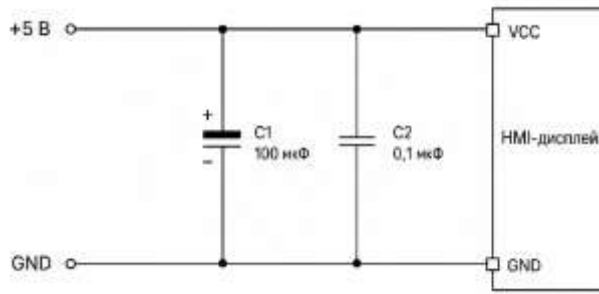


Рисунок 2.2 – Схема підключення НМІ-дисплея

Релейний модуль HiLetgo 5V One Channel Relay Module підключається до цифрового виходу ESP32. Керуючий вхід IN модуля з'єднується з GPIO25 мікроконтролера, а VCC і GND — з лініями живлення 5 В і GND. Контакти COM і NO реле вмикаються в розрив фазного провідника, який подає живлення на навантаження. Такий варіант дозволяє тримати навантаження вимкненим у початковому стані та подавати живлення лише після спрацювання реле [9].

Для керування реле доцільно використовувати GPIO25 що може працювати як звичайний цифровий вихід. Під час програмування необхідно враховувати режим спрацювання релейного модуля. Якщо перемичкою вибрано LOW trigger, логіка керування буде інверсною: низький рівень на вході IN вмикатиме реле, а високий — вимикатиме.

Блок живлення Mean Well IRM-05-5 формує стабілізовану напругу 5 В постійного струму. Вона використовується для живлення низьковольтної частини системи. Вихід +5 В підключається до входу VIN ESP32, живлення інтерфейсної частини PZEM-004T та VCC релейного модуля. Спільний провід GND блока живлення з'єднується з GND ESP32, PZEM-004T, НМІ-дисплея та релейного модуля. Наявність спільного GND є обов'язковою умовою для стабільної роботи UART-інтерфейсів і цифрового керування реле.

Підключення контактів основних модулів до ESP32 наведено в табл. 2.9.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Таблиця 2.9 – Підключення контактів модулів до ESP32

Пристрій	Контакт пристрою	Вивід ESP32 / підключення	Призначення
PZEM-004T	TX	GPIO16 / RX2 через резистивний подільник R1 = 1 кОм, R2 = 1,8 кОм	Приймання даних від вимірювального модуля
PZEM-004T	RX	GPIO17 / TX2	Передавання команд від ESP32 до вимірювального модуля
PZEM-004T	VCC	5V / VIN	Живлення інтерфейсної частини модуля
PZEM-004T	GND	GND	Спільний провід низьковольтної частини
DWIN HMI-дисплей DMG80480C070	TX2	GPIO26 / RX1	Передавання даних або команд від дисплея до ESP32
DWIN HMI-дисплей DMG80480C070	RX2	GPIO27 / TX1	Передавання даних від ESP32 до дисплея
DWIN HMI-дисплей DMG80480C070	VCC	5V / зовнішня лінія +5 В	Живлення дисплейного модуля
DWIN HMI-дисплей DMG80480C070	GND	GND	Спільний провід для UART-зв'язку
HiLetgo 5V One Channel Relay Module	IN	GPIO25	Керуючий сигнал для вмикання або вимикання реле
HiLetgo 5V One Channel Relay Module	VCC	5V / зовнішня лінія +5 В	Живлення релейного модуля
HiLetgo 5V One Channel Relay Module	GND	GND	Спільний провід
Mean Well IRM-05-5	+5 В	5V / VIN ESP32	Живлення плати ESP32 від стабілізованої напруги 5 В
Mean Well IRM-05-5	GND	GND ESP32	Спільний провід низьковольтної частини
Резистор R1	1 кОм	між TX PZEM-004T і GPIO16 / RX2 ESP32	Верхнє плече подільника напруги
Резистор R2	1,8 кОм	між GPIO16 / RX2 ESP32 і GND	Нижнє плече подільника напруги
Конденсатор C1	100 мкФ	між VCC і GND біля HMI-дисплея	Стабілізація живлення дисплея
Конденсатор C2	0,1 мкФ	між VCC і GND біля HMI-дисплея	Придушення високочастотних завад

Для уникнення конфліктів обміну даними модуль PZEM-004T і HMI-дисплей підключаються до різних UART-інтерфейсів ESP32. Вимірювальний модуль PZEM-004T використовує UART2: GPIO16 як RX2 і GPIO17 як TX2.

НМІ-дисплей використовує окремий UART1: GPIO26 як RX1 і GPIO27 як TX1. Системний UART0, який використовує GPIO1 і GPIO3, не застосовується для зовнішніх модулів, оскільки він потрібний для програмування плати та налагодження через Serial Monitor.

Силова частина схеми підключається окремо. Фазний провідник мережі 220 В подається на вимірювальний модуль і через контакти релейного модуля — на навантаження. Нульовий провідник підключається до вимірювального модуля та навантаження без комутації реле. Контакти реле повинні комутувати саме фазний провідник, оскільки це підвищує безпеку вимкнення навантаження [10].

Під час розробки схеми електричної принципової необхідно дотримуватися вимог електробезпеки. Провідники мережі змінного струму повинні бути фізично відокремлені від низьковольтних сигнальних ліній ESP32. Високовольтні з'єднання необхідно виконувати через надійні клемні з'єднання з відповідною ізоляцією. Низьковольтні UART-лінії не повинні проходити поруч із силовими провідниками без потреби, щоб зменшити вплив електромагнітних завад.

Схема електрична принципова наведена в графічній частині роботи та передбачає не лише підключення основних модулів, а й необхідну обв'язку для їх стабільної роботи.

2.4 Вибір програмного забезпечення

Для розробки комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення необхідно використати програмні засоби, які забезпечують створення програмного коду для мікроконтролера, роботу з вимірювальним модулем, обмін даними з НМІ-дисплеєм, організацію локального вебінтерфейсу, передавання даних у хмарний сервіс і розробку схемної документації. Вибір програмного забезпечення виконується з

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

урахуванням обраної елементної бази та функцій, які повинна виконувати система.

Основним середовищем для розробки програмного забезпечення мікроконтролера обрано Arduino IDE. Це середовище підтримує програмування ESP32 і дозволяє використовувати готові бібліотеки для роботи з PZEM-004T, Wi-Fi, локальним вебсервером і Blynk без потреби розробляти низькорівневі драйвери.

Для роботи з ESP32 у середовищі Arduino IDE необхідно встановити пакет підтримки плат ESP32. Завдяки цьому програмна частина системи може бути реалізована мовою C/C++ у стилі Arduino, але з використанням апаратних можливостей ESP32, зокрема кількох UART-інтерфейсів, Wi-Fi та цифрових входів/виходів.

Для зчитування параметрів із багатofункціонального вимірювального модуля використовується бібліотека PZEM004Tv30. Вона забезпечує обмін із модулем через UART/Modbus-RTU і надає програмні функції для отримання напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти та коефіцієнта потужності.

Для організації бездротового зв'язку використовується стандартна бібліотека WiFi, яка входить до пакета підтримки ESP32. Вона забезпечує підключення мікроконтролера до локальної Wi-Fi мережі, отримання IP-адреси та подальшу роботу з мережевими сервісами. У розроблюваній системі Wi-Fi використовується для роботи локального вебсервера та передавання даних до хмарного сервісу.

Для створення локального вебінтерфейсу може використовуватися бібліотека WebServer або ESPAsyncWebServer. У базовій реалізації достатньо застосувати WebServer, оскільки система повинна періодично відображати поточні параметри та передавати їх користувачу через браузер у межах локальної мережі. Якщо в подальшому буде потрібно підвищити швидкодію,

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додати асинхронне оновлення сторінок або складніший вебінтерфейс, доцільно перейти на ESPAsyncWebServer.

Для віддаленого моніторингу використовується платформа Blynk Cloud і бібліотека Blynk. Вона дозволяє передавати вимірювальні параметри у віртуальні канали, відображати їх у мобільному або вебінтерфейсі, будувати графіки та реалізовувати віддалене керування навантаженням. У межах цієї системи Blynk доцільно застосовувати для відображення поточних параметрів, перегляду історії, формування графіків споживання та отримання сповіщень при перевищенні заданих порогів.

Для взаємодії з HMI-дисплеєм використовується послідовний інтерфейс UART і відповідні програмні функції обміну даними. Оскільки HMI-дисплей має власний графічний інтерфейс, основне завдання програми ESP32 полягає у передаванні підготовлених числових значень у відповідні адреси або поля дисплея та прийманні команд користувача. Для цього у програмі доцільно виділити окремий модуль обміну з дисплеєм.

Для розробки графічного інтерфейсу HMI-дисплея використовується середовище DGUS/DWIN Tool. У ньому створюються сторінки інтерфейсу, текстові поля, індикатори, кнопки керування, поля введення тарифу та порогових значень. Після розробки інтерфейсу проєкт завантажується в пам'ять дисплейного модуля, а ESP32 у процесі роботи лише оновлює відповідні змінні та обробляє команди користувача. Такий підхід зменшує навантаження на мікроконтролер і спрощує реалізацію локального відображення.

Для збереження службових налаштувань у ESP32 може використовуватися бібліотека Preferences. Вона дозволяє записувати невеликі обсяги даних у внутрішню енергонезалежну пам'ять мікроконтролера. У цій роботі до таких даних можуть належати тариф, порогове значення потужності, останній стан реле або службові параметри роботи системи. При цьому постійний запис усіх вимірювань у внутрішню пам'ять не передбачається,

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

оскільки для історії та графіків доцільніше використовувати вебінтерфейс або Blynk Cloud.

Таблиця 2.10 – Програмні засоби, використані під час розробки системи

Програмний засіб	Призначення в роботі	Обґрунтування вибору
Arduino IDE	Розробка, компіляція та завантаження програми в ESP32	Підтримка ESP32, доступність бібліотек, простота налагодження
ESP32 Arduino Core	Підтримка плати ESP32 у середовищі Arduino IDE	Забезпечує роботу GPIO, UART, Wi-Fi та інших апаратних ресурсів ESP32
PZEM004Tv30	Зчитування параметрів із PZEM-004T	Надає готові функції для отримання напруги, струму, потужності, енергії, частоти і PF
WiFi	Підключення ESP32 до локальної Wi-Fi мережі	Забезпечує мережевий доступ до системи
WebServer / ESPAsyncWebServer	Реалізація локального вебінтерфейсу	Дозволяє переглядати параметри через браузер
Blynk	Передавання даних у хмарний сервіс і віддалене керування	Підтримує графіки, віртуальні канали, мобільний і вебінтерфейс
DGUS/DWIN Tool	Розробка інтерфейсу НМІ-дисплея	Дає змогу створювати сторінки, поля відображення та елементи керування

Використання наведених програмних засобів дозволяє реалізувати всі необхідні програмні функції системи: зчитування вимірювальних параметрів, локальне відображення, віддалений моніторинг, побудову графіків, керування навантаженням і збереження службових налаштувань. Обраний набір програмного забезпечення відповідає вибраній апаратній платформі та забезпечує можливість подальшого розширення функціональності системи.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розробка програмного забезпечення комп'ютерної системи

Програма реалізована за циклічним принципом. Після подачі живлення виконується початкова ініціалізація апаратних інтерфейсів, мережевих параметрів і службових змінних. Після цього система переходить у основний цикл, у якому постійно обробляє команди користувача, зчитує параметри з вимірювального модуля, оновлює локальний дисплей, вебінтерфейс і хмарний сервіс. Така організація дозволяє забезпечити моніторинг енергоспоживання в режимі реального часу.

У програмі використано декілька апаратних інтерфейсів ESP32. Для зв'язку з вимірювальним модулем PZEM-004T застосовується UART2. Лінія TX модуля PZEM-004T підключена до GPIO16, який використовується як RX2 ESP32, а лінія RX модуля PZEM-004T підключена до GPIO17, який використовується як TX2 ESP32. Для обміну даними з HMI-дисплеєм використовується окремий UART1: лінія TX дисплея підключена до GPIO26, а лінія RX дисплея — до GPIO27. Такий розподіл інтерфейсів дозволяє уникнути конфлікту між вимірювальним модулем і дисплеєм.

Релейний модуль підключений до цифрового виходу GPIO25. Через цей вивід ESP32 формує керуючий сигнал для вмикання або вимикання навантаження. У програмі враховується логіка роботи релейного модуля, зокрема можливість спрацювання за високим або низьким логічним рівнем. Стан реле може змінюватися за командою користувача з локального вебінтерфейсу, з мобільного застосунку Blynk або з HMI-дисплея.

На початку роботи програма виконує ініціалізацію послідовного порту Serial, який використовується для налагодження та контролю службових

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Дурда В. М.</i>			Практична частина	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Жаровський Р.</i>					44	13
<i>Реценз.</i>		<i>Литвиненко Я</i>				ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н. С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

повідомлень. Далі налаштовуються UART-інтерфейси для PZEM-004T і HMI-дисплея, задається режим роботи GPIO25 як цифрового виходу та встановлюється початковий стан реле. Після цього ініціалізуються змінні для зберігання напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти, коефіцієнта потужності, тарифу, вартості електроенергії та порогового значення потужності (рис. 3.1).

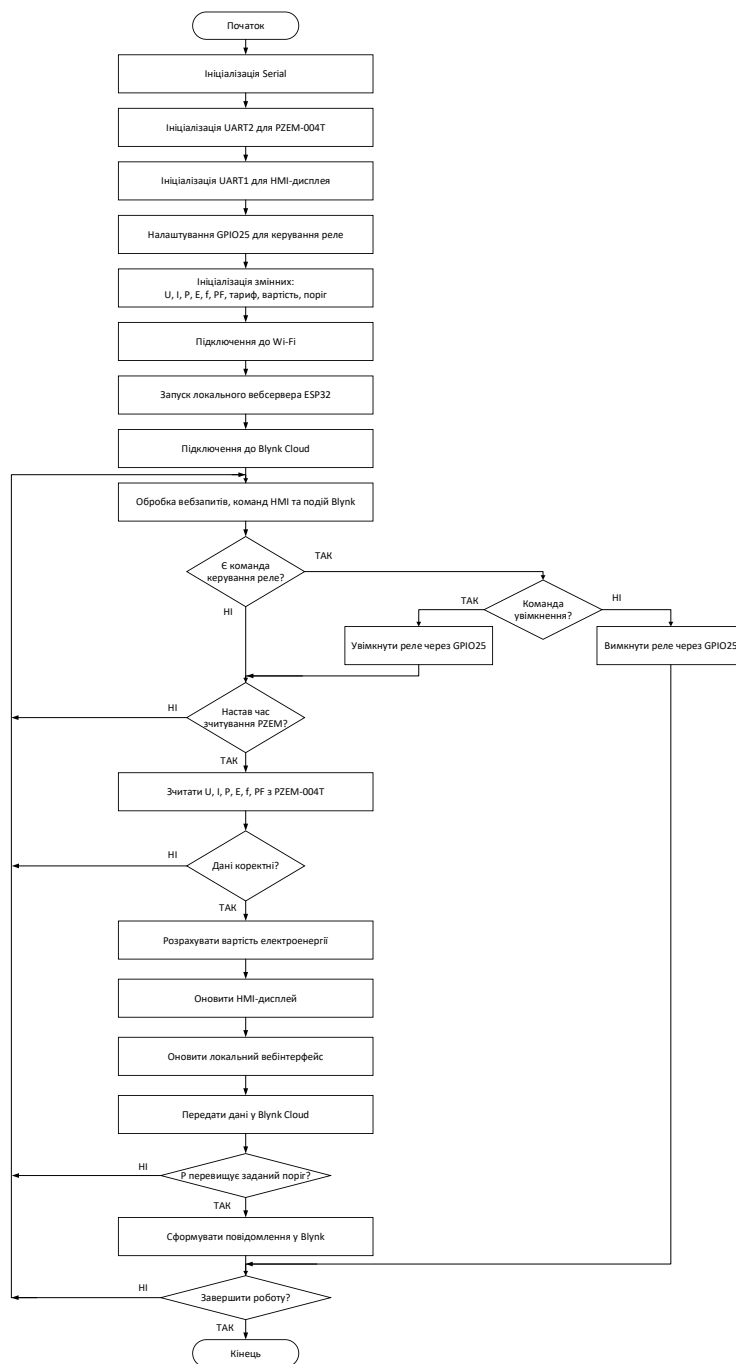


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення системи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ

Арк.

45

Наступним етапом є підключення ESP32 до Wi-Fi мережі. Після встановлення з'єднання мікроконтролер отримує можливість працювати з локальним вебінтерфейсом і хмарним сервісом Blynk. Локальний вебсервер запускається на ESP32 і забезпечує перегляд поточних параметрів через браузер у межах локальної мережі. Через вебінтерфейс користувач може переглядати вимірювальні дані та подавати команду на зміну стану реле.

Після запуску локального вебсервера програма виконує підключення до Blynk Cloud. Цей сервіс використовується для віддаленого моніторингу параметрів, побудови графіків, перегляду історії вимірювань і керування реле через мобільний або вебінтерфейс. Для керування навантаженням через Blynk використовується virtual pin V6. При зміні його стану програма отримує відповідну команду та змінює стан GPIO25.

У головному циклі програми постійно виконуються три групи задач: обробка команд керування, зчитування вимірювальних параметрів і оновлення інтерфейсів відображення. Команди керування можуть надходити з трьох джерел: локального вебінтерфейсу, Blynk Cloud або НМІ-дисплея. Для НМІ-дисплея команда керування реле передається через адресу змінної 0x3700. Незалежно від джерела команди, її обробляє ESP32, після чого встановлює відповідний стан релейного модуля.

Зчитування параметрів із PZEM-004T виконується не безперервно, а через заданий інтервал часу. Це дозволяє зменшити навантаження на програму та забезпечити стабільний обмін даними з іншими модулями. Під час опитування PZEM-004T програма отримує значення напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти та коефіцієнта потужності. Отримані дані перед подальшим використанням перевіряються на коректність.

Перевірка коректності даних є необхідною, оскільки під час обміну з вимірювальним модулем можуть виникати помилки зв'язку або некоректні значення. Якщо зчитане значення не відповідає допустимому формату або не може бути використане для розрахунків, програма не оновлює відповідний параметр і переходить до наступного циклу. Це дозволяє уникнути

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відображення хибних значень на дисплеї, у вебінтерфейсі та в Blynk.

Після успішного зчитування і перевірки параметрів програма розраховує орієнтовну вартість спожитої електроенергії. Для цього використовується накопичене значення енергії та заданий тариф. Розрахунок виконується за формулою (1.1).

Після розрахунку вартості програма оновлює НМІ-дисплей. На нього передаються поточні значення напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти, коефіцієнта потужності, вартості електроенергії та стану реле. НМІ-дисплей використовується як локальний інтерфейс користувача, тому він повинен відображати основні параметри системи без необхідності підключення до смартфона або комп'ютера.

Паралельно з оновленням НМІ-дисплея програма забезпечує оновлення локального вебінтерфейсу. Вебсервер ESP32 обробляє запити користувача та передає актуальні параметри у браузер. Такий підхід дозволяє контролювати систему з будь-якого пристрою, підключеного до тієї самої локальної мережі.

Дані також передаються у Blynk Cloud. У хмарному сервісі вони можуть відображатися у вигляді числових індикаторів, графіків або журналу змін. Передавання даних у Blynk підвищує зручність використання системи, оскільки користувач може контролювати енергоспоживання не лише локально, а й віддалено.

Окремою функцією програми є перевірка перевищення заданого порогу активної потужності. Після кожного успішного зчитування значення потужності програма порівнює його з установленим граничним значенням. Якщо потужність перевищує поріг, система формує повідомлення у Blynk. Це дозволяє користувачу отримати інформацію про перевантаження або надмірне споживання електроенергії [11].

Механізм керування реле реалізований таким чином, що всі команди, незалежно від джерела, обробляються централізовано мікроконтролером ESP32. Якщо команда надходить із вебінтерфейсу, програма обробляє відповідний HTTP-запит. Якщо команда надходить із Blynk, вона приймається

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

через virtual pin V6. Якщо команда надходить із HMI-дисплея, програма зчитує зміну відповідної змінної за адресою 0x3700. Після цього ESP32 змінює логічний стан GPIO25.

При увімкненні навантаження ESP32 встановлює на GPIO25 такий логічний рівень, який активує релейний модуль. У результаті силові контакти реле замикаються, і навантаження підключається до мережі змінного струму. При вимкненні навантаження ESP32 формує протилежний логічний рівень, реле розмикає силове коло, і живлення навантаження припиняється. Поточний стан реле відображається на HMI-дисплеї, у локальному вебінтерфейсі та в Blynk Cloud.

Розроблене програмне забезпечення забезпечує повний цикл роботи комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання: ініціалізацію апаратних модулів, підключення до мережевих сервісів, зчитування параметрів електричної мережі, перевірку їх коректності, розрахунок вартості споживання, оновлення локального та віддаленого інтерфейсів, контроль перевищення потужності та керування одним навантаженням. Циклічна структура алгоритму дозволяє системі працювати в режимі реального часу та оперативно реагувати на зміну параметрів енергоспоживання.

3.2 Реалізація комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання

Реалізація комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення виконана на основі апаратних засобів, вибраних у проєктній частині роботи. Основними елементами системи є мікроконтролер ESP32, багатофункціональний цифровий вимірювач змінного струму PZEM-004T V3.0, роз'ємний трансформатор струму PZCT-02, HMI-дисплей DWIN DMG80480C070, одноканальний релейний модуль HiLetgo 5V One Channel Relay Module, блок живлення Mean Well IRM-05-5 та контрольоване навантаження.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практична реалізація системи передбачає об'єднання вимірювальної, обчислювальної, індикаційної, комунікаційної та виконавчої частин (рис.3.2). Вимірювальна частина забезпечує отримання параметрів мережі та навантаження, обчислювальна частина виконує обробку даних і керування, індикаційна частина забезпечує локальне відображення, комунікаційна частина відповідає за передавання даних у локальний вебінтерфейс і Vynk Cloud, а виконавча частина виконує вмикання або вимикання контрольованого навантаження.

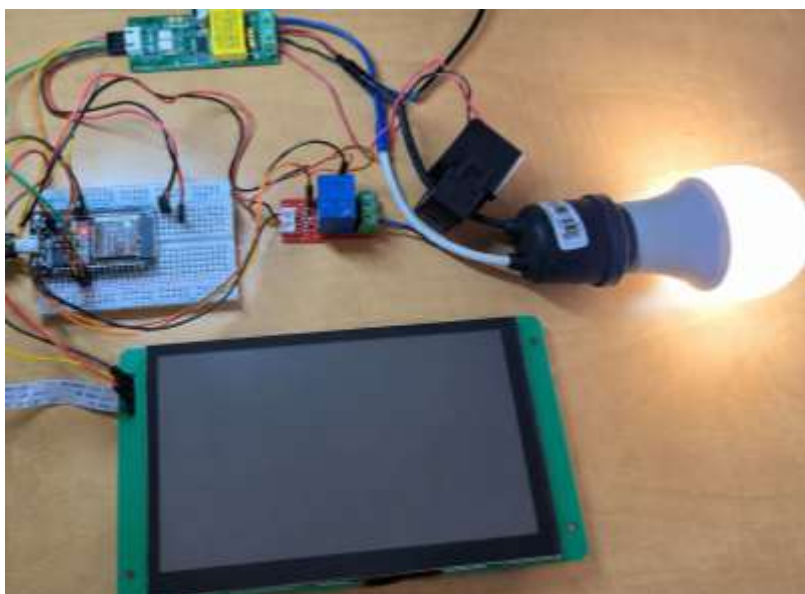


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд реалізованого макета комп'ютерної системи моніторингу енергоспоживання

Апаратна частина системи реалізована за модульним принципом. Центральним елементом є ESP32, до якого підключено всі основні функціональні вузли. Вимірювальний модуль PZEM-004T підключено до ESP32 через апаратний інтерфейс UART2. Для цього вихід TX модуля PZEM-004T з'єднано з входом RX2 ESP32, який відповідає GPIO16, а вхід RX модуля PZEM-004T з'єднано з виходом TX2 ESP32, який відповідає GPIO17 (рис. 3.3). Таке перехресне підключення відповідає принципу роботи UART-інтерфейсу.

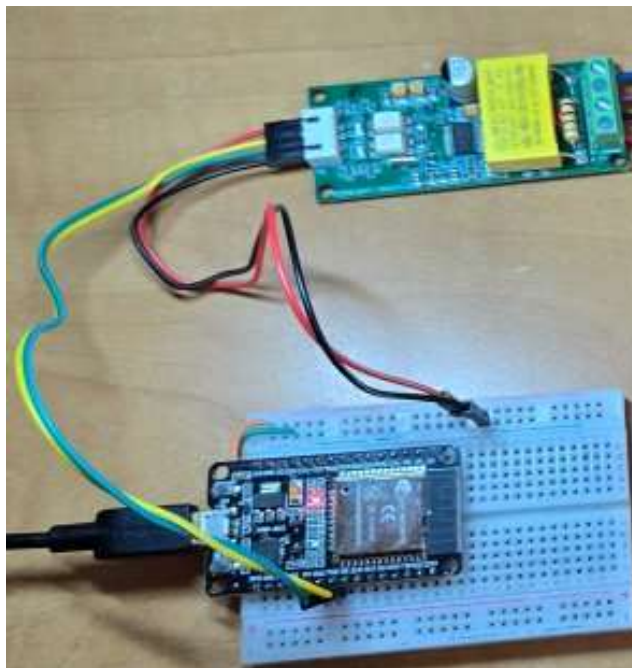


Рисунок 3.3 – Фрагмент макета з підключенням ESP32 та вимірювального модуля PZEM-004T

Вимірювання параметрів змінного струму виконується модулем PZEM-004T. До його силових клем підключено фазний і нульовий провідники мережі змінного струму, що дає змогу визначати напругу мережі. Для вимірювання струму використано роз'ємний трансформатор струму PZCT-02, який встановлюється на фазний провідник контрольованого навантаження. Через кільце трансформатора струму проходить лише один провідник, оскільки одночасне пропускання фазного і нульового провідників призвело б до компенсації магнітних полів і некоректного вимірювання струму.

PZEM-004T передає до ESP32 значення напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти та коефіцієнта потужності. Завдяки використанню готового цифрового вимірювального модуля основні параметри передаються до мікроконтролера вже в обробленому вигляді. Це спрощує програмну реалізацію системи, оскільки ESP32 не виконує складних обчислень діючих значень струму і напруги з аналогових сигналів, а лише приймає готові цифрові дані та виконує їх подальшу обробку.



Рисунок 3.4 – Встановлення трансформатора струму PZCT-02 на фазний провідник навантаження

Для локального відображення параметрів використано НМІ-дисплей DWIN DMG80480C070. Дисплей підключено до ESP32 через окремий інтерфейс UART1. Лінія TX дисплея підключена до GPIO26, який використовується як RX1 ESP32, а лінія RX дисплея підключена до GPIO27, який використовується як TX1 ESP32. Використання окремого UART-інтерфейсу для дисплея дозволяє уникнути конфлікту з UART2, який використовується для зв'язку з PZEM-004T.

На НМІ-дисплей передаються основні параметри роботи системи: напруга мережі, струм навантаження, активна потужність, спожита електроенергія, частота мережі, коефіцієнт потужності, орієнтовна вартість споживання та стан реле (рис. 3.5). Крім відображення параметрів, дисплей може використовуватися для локального керування навантаженням. Команда з дисплея передається до ESP32 через відповідну адресу змінної, після чого мікроконтролер змінює стан релейного модуля [12].

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.5 – Відображення параметрів енергоспоживання на НМІ-дисплеї

Керування навантаженням реалізовано за допомогою одноканального релейного модуля HiLetgo 5V One Channel Relay Module (рис. 3.6). Керуючий вхід IN релейного модуля підключено до GPIO25 ESP32. Контакти COM і NO реле вмикаються в розрив фазного провідника, який подає живлення на навантаження. У початковому стані навантаження вимкнене, а при активації реле контакти COM і NO замикаються, і навантаження отримує живлення від мережі змінного струму.



Рисунок 3.6 – Підключення релейного модуля для керування навантаженням

Реле може керуватися трьома способами. Перший спосіб — через локальний вебінтерфейс ESP32, де користувач може подати команду на

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

увімкнення або вимкнення навантаження. Другий спосіб — через Blynk Cloud, де керування виконується за допомогою відповідного virtual pin. Третій спосіб — через HMI-дисплей, який передає команду на ESP32 через UART. Незалежно від джерела команди, остаточне керування виконує ESP32 шляхом зміни логічного стану GPIO25 [13].

Для віддаленого моніторингу використано вбудований Wi-Fi модуль ESP32. Після запуску програми мікроконтролер підключається до заданої Wi-Fi мережі. Після успішного з'єднання запускається локальний вебсервер, який дозволяє користувачу переглядати поточні параметри системи через браузер у межах локальної мережі. У вебінтерфейсі можуть відображатися значення напруги, струму, потужності, енергії, частоти, коефіцієнта потужності, вартості споживання та стану реле (рис.3.7).



Рисунок 3.7 – Сторінка локального вебінтерфейсу ESP32

Окрім локального вебінтерфейсу, система передає дані у Blynk Cloud (рис. 3.8). Для цього в програмі використовуються віртуальні канали, через які передаються виміряні та розраховані параметри. У Blynk користувач може переглядати поточні значення, аналізувати графіки зміни параметрів у часі та керувати навантаженням. Такий підхід забезпечує можливість контролю

енергоспоживання не лише в межах житлового приміщення, а й віддалено через Інтернет.



Рисунок 3.8 – Відображення параметрів системи у Vlynk Cloud

Під час реалізації програмної частини враховано необхідність періодичного зчитування параметрів із PZEM-004T. Опитування вимірювального модуля виконується через заданий інтервал часу, що дозволяє уникнути надмірного навантаження на UART-інтерфейс і забезпечити стабільну роботу інших функцій програми. Після кожного зчитування програма перевіряє коректність отриманих значень. Якщо дані отримані з помилкою або містять некоректні значення, вони не використовуються для оновлення інтерфейсів [14].

Після успішного зчитування параметрів програма виконує розрахунок орієнтовної вартості спожитої електроенергії. Для цього накопичене значення енергії множиться на заданий тариф. Отримане значення передається на НМІ-дисплей, у локальний вебінтерфейс та у Vlynk Cloud. Це дає змогу користувачу оцінювати не лише технічні параметри навантаження, а й економічну складову енергоспоживання.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

У системі також реалізовано контроль перевищення заданого порогу потужності. Після кожного зчитування активної потужності програма порівнює її з установленим граничним значенням. Якщо потужність перевищує поріг, формується повідомлення у Blynk. Це дозволяє користувачу оперативно отримати інформацію про надмірне споживання або потенційне перевантаження контрольованої лінії (рис.3.9).



Рисунок 3.9 – Повідомлення про перевищення порога потужності у Blynk

Живлення низьковольтної частини системи забезпечується AC/DC-перетворювачем Mean Well IRM-05-5, який формує стабілізовану напругу 5 В постійного струму. Від цієї напруги живляться ESP32, інтерфейсна частина PZEM-004T та релейний модуль. Усі низьковольтні модулі мають спільний провід GND, що є обов'язковою умовою коректної роботи UART-інтерфейсів і цифрового керування. Живлення навантаження здійснюється від мережі змінного струму через контакти релейного модуля.

Таким чином, у межах практичної реалізації проведено відображення основних результатів роботи комп'ютерної системи, яка поєднує

вимірювання параметрів електроспоживання, локальну індикацію, віддалений моніторинг, побудову графіків і керування одним контрольованим навантаженням. Використання ESP32 як центрального блока дозволило об'єднати в одному пристрої функції обробки даних, вебсервера, Wi-Fi-зв'язку та керування реле, а використання PZEM-004T спростило вимірювальну частину і підвищило зручність отримання параметрів мережі.

					<i>КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		56

РОЗДІЛ 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Забезпечення працездатності оператора під час роботи з комп'ютеризованою системою моніторингу енергоспоживання

Під час експлуатації комп'ютеризованої системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення оператор або користувач взаємодіє з локальним дисплеєм, вебінтерфейсом або мобільним застосунком, аналізує поточні значення електричних параметрів та за необхідності приймає рішення щодо подальшої роботи обладнання. Незважаючи на те, що така система не передбачає постійного перебування оператора за робочим місцем протягом усієї зміни, її використання може супроводжуватися зоровим, статичним та інформаційним навантаженням.

Найпоширенішими наслідками тривалої роботи з комп'ютеризованою системою є напруження м'язів шиї та спини, підвищена втома очей, головний біль, зниження концентрації уваги та загальна втомлюваність. Такі прояви виникають унаслідок тривалого спостереження за екраном дисплея, фіксованого положення тіла, недостатньої організації робочого місця та необхідності аналізу числових даних у режимі реального часу [15].

Для зменшення негативного впливу на організм користувача робоче місце повинно відповідати вимогам ергономіки. Зокрема, необхідно забезпечити правильне положення тіла, зручне розташування засобів відображення інформації, достатню площу робочої поверхні та можливість зміни положення тіла під час роботи. Монітор або дисплей системи слід розміщувати так, щоб користувач міг спостерігати за показниками без надмірного нахилу голови, повороту корпусу або напруження зору. Вимоги до

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Дурда В. М.</i>			Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушіє</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Жаровський Р.</i>					57	5
<i>Консульт.</i>		<i>Сенчишин В.</i>				ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Луцик Н. С.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Осухівська Г.М.</i>						

компонування робочого місця з відеотерміналом і робочої пози встановлюються ДСТУ ISO 9241-5:2004 [16].

Важливе значення має взаємне розташування елементів робочого місця. Засоби введення, дисплей, робоча документація та допоміжні пристрої повинні розміщуватися в межах зручної зони досяжності. Це зменшує потребу в зайвих рухах, знижує статичне навантаження та сприяє підтриманню працездатності оператора. Загальні вимоги до взаємного розташування елементів робочого місця оператора наведені в ДСТУ 7299:2013 [17].

Під час роботи з системою моніторингу енергоспоживання важливо враховувати також зорове навантаження. Інтерфейс системи повинен мати достатній розмір шрифту, чітке відображення числових значень, зрозумілі позначення одиниць вимірювання та логічне групування параметрів. Основні показники, такі як напруга, струм, потужність, спожита електроенергія та вартість, доцільно подавати окремими інформаційними блоками. Це дозволяє зменшити час пошуку потрібних даних і знизити ймовірність помилкового трактування інформації.

Психоемоційний стан оператора залежить від інтенсивності інформаційного навантаження та характеру роботи системи. У випадку тривалого контролю показників енергоспоживання або виникнення відхилень від нормальних значень може зростати рівень стресу, що пов'язано з необхідністю оперативного реагування на зміну параметрів. Це може призводити до зниження концентрації уваги, підвищеної втомлюваності та емоційного напруження.

Для зменшення інформаційного перевантаження в інтерфейсі системи доцільно відображати лише основні параметри, необхідні для прийняття рішення. Другорядну інформацію варто виносити на додаткові екрани або вкладки. Аварійні повідомлення повинні бути короткими, зрозумілими та візуально відокремленими від звичайних робочих показників. Наприклад, при перевищенні допустимої потужності система має чітко вказувати сам факт перевищення, поточне значення параметра та рекомендовану дію користувача.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додатковим засобом підтримання працездатності оператора є раціональний режим праці та відпочинку. Під час тривалої роботи з дисплеєм необхідно робити короткі перерви, змінювати положення тіла, виконувати прості вправи для очей та уникати безперервного спостереження за екраном без потреби. Оскільки система моніторингу енергоспоживання працює автоматично, користувач не повинен постійно контролювати кожне оновлення показників. Доцільно передбачити автоматичну індикацію аварійних або граничних режимів, щоб зменшити потребу в безперервному ручному спостереженні.

З технічної точки зору враховується вплив електронних компонентів системи, зокрема мікроконтролера, дисплея, вимірювальних модулів і засобів бездротового зв'язку. За умови правильного монтажу, використання справного блока живлення, розміщення компонентів у корпусі та дотримання правил експлуатації такі елементи не створюють небезпечного впливу на користувача. Важливо, щоб користувач не мав доступу до відкритих струмопровідних частин, а всі елементи, пов'язані з мережею змінного струму, були належним чином ізольовані.

Забезпечення ергономічних умов праці, мінімізація інформаційного навантаження та дотримання вимог безпеки дозволяють підвищити ефективність роботи оператора, зменшити рівень втоми та забезпечити стабільну експлуатацію комп'ютеризованої системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення.

4.2 Заходи захисту обладнання від статичної електрики

Обладнання комп'ютеризованої системи моніторингу енергоспоживання житлового приміщення містить мікроконтролер, вимірювальні модулі, дисплей, елементи комунікації, лінії живлення та інтерфейсні з'єднання. Більшість цих компонентів побудовано на напівпровідникових елементах, які є чутливими до впливу електростатичних

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

розрядів. Електростатичний розряд може виникати під час контакту людини з електронними модулями, переміщення обладнання, роботи з друкованими платами або експлуатації пристрою в умовах низької вологості повітря.

Електростатичні розряди становлять небезпеку для мікросхем, оскільки короткочасний імпульс високої напруги може пошкодити внутрішні структури напівпровідникових компонентів. Найбільш вразливими є входні та вихідні порти мікроконтролера, лінії інтерфейсів обміну даними, входи вимірювальних модулів, контакти дисплея та кола живлення. Вплив ESD може призвести як до миттєвого виходу компонента з ладу, так і до прихованого пошкодження, яке проявляється пізніше у вигляді нестабільної роботи системи.

Особливо небезпечними є операції з монтажу, налагодження та ремонту пристрою, коли електронні компоненти залишаються відкритими й не захищені корпусом. У таких умовах статичний заряд, накопичений на тілі людини, одязі або робочій поверхні, може передатися на електронний компонент через контакт із його виводами. Тому під час роботи з відкритими платами необхідно застосовувати заходи антистатичного захисту. Загальні вимоги щодо захисту електронних пристроїв від електростатичних явищ визначаються ДСТУ EN 61340-5-1:2022 [18].

Для захисту системи від електростатичних розрядів застосовується комплекс технічних та організаційних заходів. До технічних заходів належить правильне проектування електричних з'єднань, використання захисних елементів на сигнальних і живильних лініях, організація спільної точки заземлення та забезпечення надійного електричного контакту між функціональними частинами системи. На входах і виходах, які можуть контактувати із зовнішніми пристроями або користувачем, доцільно передбачати елементи захисту від імпульсних перенапруг.

Одним із засобів технічного захисту є використання TVS-діодів, які обмежують короткочасні імпульсні перенапруги до безпечного рівня. Такі елементи можуть застосовуватися на лініях живлення, сигнальних входах,

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

інтерфейсах обміну даними та зовнішніх роз'ємах. Додатково використовують фільтрувальні конденсатори, які зменшують високочастотні завади в колах живлення. Для підвищення стійкості системи також важливо правильно розводити провідники живлення та сигналів, уникати довгих незахищених ліній і забезпечувати надійне з'єднання загального провідника.

Важливим елементом захисту є правильна організація заземлення. Заземлення забезпечує відведення статичного заряду та вирівнювання потенціалів між окремими частинами системи. Якщо пристрій розміщується в корпусі, доцільно передбачити конструктивні рішення, які зменшують можливість прямого контакту користувача з відкритими електронними компонентами. Усі частини системи, пов'язані з мережею змінного струму, повинні бути відокремлені від низьковольтної частини та надійно ізольовані.

До організаційних заходів належить використання антистатичних браслетів, антистатичних килимків, спеціальних пакетів для зберігання електронних компонентів і дотримання правил роботи з друкованими платами. Під час монтажу або обслуговування системи не рекомендується торкатися контактів мікросхем, роз'ємів і сигнальних ліній без попереднього зняття статичного заряду. Електронні модулі слід зберігати в антистатичній упаковці до моменту встановлення в пристрій.

Це зменшує ризик пошкодження портів мікроконтролера та інших електронних вузлів. Після завершення монтажу всі відкриті плати повинні бути закріплені в корпусі, а доступ до електронних компонентів має бути обмежений.

Таким чином, захист обладнання від статичної електрики є важливою умовою надійної роботи комп'ютеризованої системи моніторингу енергоспоживання. Поєднання технічних засобів захисту, правильного заземлення, антистатичних матеріалів, дотримання правил монтажу та контролю умов навколишнього середовища дозволяє зменшити ризик ESD-пошкоджень і підвищити стабільність роботи електронних компонентів системи.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютерну систему моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі. Система забезпечує вимірювання параметрів однофазної мережі змінного струму, локальне відображення результатів, передавання даних через Wi-Fi та керування одним контрольованим навантаженням.

Проаналізовано особливості енергоспоживання житлових приміщень, визначено основні групи побутових навантажень і параметри, які необхідно контролювати. Обґрунтовано необхідність моніторингу напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти та коефіцієнта потужності.

Розроблено узагальнену структуру системи та виконано вибір основних апаратних засобів. Як центральний блок обрано ESP32, для вимірювання параметрів мережі використано PZEM-004T V3.0 з трансформатором струму PZCT-02, для локального відображення — HMI-дисплей DWIN DMG80480C070, для керування навантаженням — одноканальний релейний модуль, а для живлення низьковольтної частини — AC/DC-перетворювач Mean Well IRM-05-5. Також розроблено схему електричну принципову та визначено підключення основних модулів до ESP32.

Практична реалізація підтвердила працездатність основних функцій системи: вимірювання електричних параметрів, локальне та віддалене відображення даних, побудову графіків, формування повідомлення при перевищенні порога потужності та вмикання або вимикання контрольованого навантаження.

Розроблена система може використовуватися як основа для побутового енергомоніторингу. У подальшому її можна розширити шляхом додавання кількох вимірювальних каналів, автономного журналювання даних, модуля реального часу, додаткових засобів сигналізації та інтеграції з системами «розумного будинку».

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жаровський Р.О., Луцик Н.С., Осухівська Г.М., Паламар А.М., Луцик Н. С. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 39 с.
2. Паламар М.І., Стрембіцький М.О., Паламар А.М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів: навчальний посібник. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 150 с.
3. Palamar A., Palamar M., Osukhivska H. Real-time Health Monitoring Computer System Based on Internet of Medical Things. CEUR Workshop Proceedings. 2023. Vol. 3628. P. 106–115.
4. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (дата звернення: 01.06.2026).
5. AC Communication Module PZEM-004T V3.0 User Manual. URL: <https://manuals.plus/innovatorsguru/ac-communication-module-pzem-004t-v3-0-manual> (дата звернення: 02.06.2026).
6. Alam M. IoT AC Energy Meter URL: <https://how2electronics.com/iot-ac-energy-meter-with-pzem-004t-esp32-webserver/> (дата звернення: 02.06.2026).
7. Alam M. IoT AC Energy Meter with ESP32. URL: <https://how2electronics.com/iot-ac-energy-meter-with-esp32-hmi-display/> (дата звернення: 01.06.2026).
8. Рожик А.М., Жаровський Р.О. Аналіз ефективності роботи адаптивної системи контролю доступу на основі нечіткої логіки. Матеріали наукової конференції ТНТУ. Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 12–13.
9. Рожик А.М., Жаровський Р.О. Методи та програмно-апаратні засоби ідентифікації працівників з метою визначення робочого часу та доступу до приміщення. Збірник тез доповідей науково-технічної конференції. Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 45.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Blynk Documentation. Virtual Pin. URL: <https://docs.blynk.io/en/blynk.console/templates/datastreams/virtual-pin> (дата звернення: 03.06.2026).

11. Слюз І., Жаровський Р. Критерії ефективності тестування комп'ютерної інформаційної системи. Матеріали XI Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 174

12. Слюз І., Жаровський Р. Принципи та основні етапи комплексного тестування комп'ютерної інформаційної системи. Матеріали X науково-технічної конференції ТНТУ імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі системи та технології» (7-8 грудня 2022 року). Тернопіль: ТНТУ. 2022. С. 93.

13. Шеремета В.З., Жаровський Р.О. Тестування веб-додатків розробленими на основі Spring Boot за допомогою Testing. Матеріали XI науково-технічної конференції ТНТУ імені Івана Пулюя «Інформаційні моделі, системи та технології». Тернопіль: ТНТУ. 2024. С. 162.

14. Демчан Н.І., Жаровський Р.О. Оцінка ефективності роботи програмно-апаратного комплексу контролю за вирощування рослин з урахуванням евапотранспирації. Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» (17-18 грудня 2025 року). Тернопіль: ТНТУ. 2025. 108-110 с.

15. Андрійчук Н. І. Охорона праці: навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021.

16. ДСТУ ISO 9241-5:2004. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до компонування робочого місця та до робочої пози (ISO 9241-5:1998, IDT). Київ : Держстандарт України, 2006.

17. ДСТУ 7299:2013. Дизайн і ергономіка. Робоче місце оператора. Взаємне розташування елементів робочого місця. Загальні вимоги ергономіки. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.

18. ДСТУ EN 61340-5-1:2022. Електростатика. Частина 5-1. Захист електронних пристроїв від електростатичних явищ. Загальні вимоги (EN 61340-5-1:2016, IDT; IEC 61340-5-1:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

					КС КРБ 123.163.00.00 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А
Технічне завдання

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії

Кафедра комп'ютерних систем та мереж

“Затверджую”

Завідувач кафедри КС

_____ Осухівська Г.М.

“ 2 ” лютого 2026 р.

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ
ЖИТЛОВОГО ПРИМІЩЕННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на 9 листках

Вид робіт:

Кваліфікаційна робота

На здобуття освітнього ступеня «Бакалавр»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«УЗГОДЖЕНО»

«ВИКОНАВЕЦЬ»

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент групи СІ-41

_____ к.т.н., доц. Жаровський Р.О.

_____ Дурда В. М.

“ 2 ” лютого 2026 р.

“ 2 ” лютого 2026 р.

Тернопіль 2026

1 Загальні відомості

1.1 Повна назва та її умовне позначення

Повна назва теми кваліфікаційної роботи: «Комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі».

Умовне позначення кваліфікаційної роботи: КС КРБ 123.163.00.00

1.2 Виконавець

Студент групи СІ-41, факультету комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Дурда В. М.

1.3 Підстава для виконання роботи

Підставою для виконання кваліфікаційної роботи є наказ по університету № 4/9-188 від 24.04.2026 р.

1.4 Планові терміни початку та завершення роботи

Плановий термін початку виконання кваліфікаційної роботи – 26.01.2026 р.

Плановий термін завершення виконання кваліфікаційної роботи – 21.06.2026 р.

1.5 Порядок оформлення та пред'явлення результатів роботи

Порядок оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу здійснюється у відповідності до чинних норм та правил ISO, ЕСКД, ЕСПД та ДСТУ.

Пред'явлення проміжних результатів роботи з виконання кваліфікаційної роботи здійснюється у відповідності до графіку, затвердженого керівником роботи. Попередній захист кваліфікаційної роботи відбувається при готовності роботи – наявності пояснювальної записки та графічного матеріалу.

Пред'явлення результатів кваліфікаційної роботи відбувається шляхом захисту на відповідному засіданні ЕК, ілюстрацією основних досягнень за допомогою графічного матеріалу.

2 Призначення і цілі створення системи

2.1 Призначення системи

Проектована комп'ютерна система призначена для моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі. Система повинна забезпечувати вимірювання основних параметрів електричної мережі та навантаження, відображення поточних значень, передавання даних користувачу та керування контрольованим навантаженням.

Система повинна надавати користувачу інформацію про напругу, струм, активну потужність, спожиту електроенергію, частоту мережі, коефіцієнт потужності та орієнтовну вартість споживання. Також повинна бути передбачена можливість формування повідомлення у разі перевищення заданого порога потужності.

2.2 Мета створення системи

Метою створення системи є підвищення зручності контролю енергоспоживання житлового приміщення шляхом автоматизації вимірювання параметрів електричної мережі, локального та віддаленого відображення даних і керування одним контрольованим навантаженням.

2.3 Характеристика об'єкту

Об'єктом автоматизації є житлове приміщення або окрема контрольована лінія електроживлення, до якої підключене побутове навантаження. Для такого об'єкта характерна нерівномірність споживання електроенергії протягом доби, що зумовлено різною потужністю, тривалістю роботи та режимами використання побутових електроприймачів.

3 3 Вимоги до системи

3.1 Вимоги до системи в цілому

Система повинна забезпечувати моніторинг енергоспоживання в режимі реального часу, локальне та віддалене відображення параметрів, розрахунок вартості спожитої електроенергії, керування навантаженням і повідомлення користувача про перевищення заданого порога потужності.

3.1.1 Вимоги до структури та функціонування системи

До складу системи повинні входити функціональні засоби вимірювання параметрів електричної мережі, обробки даних, локального відображення, віддаленого моніторингу, керування навантаженням і живлення низьковольтної частини.

Система повинна виконувати зчитування електричних параметрів, перевірку коректності отриманих даних, розрахунок додаткових показників, оновлення локального інтерфейсу, передавання даних у віддалений інтерфейс і зміну стану контрольованого навантаження за командою користувача.

3.1.2 Вимоги до способів та засобів зв'язку між компонентами системи

Обмін інформацією між компонентами системи повинен здійснюватися через цифрові інтерфейси. Система повинна підтримувати передавання вимірювальних даних до блока обробки, обмін із локальним інтерфейсом користувача, передавання даних через бездротову мережу та приймання команд керування навантаженням.

Для уникнення конфліктів обміну даними різні зовнішні модулі повинні підключатися до окремих інтерфейсів або використовувати узгоджений порядок обміну.

3.1.3 Вимоги до режимів функціонування системи

Система повинна підтримувати режим початкової ініціалізації, режим вимірювання параметрів, режим локального відображення, режим віддаленого моніторингу, режим керування навантаженням і режим повідомлення про перевищення порога потужності.

У нормальному режимі система повинна періодично зчитувати параметри мережі, оновлювати інтерфейси відображення та контролювати стан навантаження. У разі перевищення заданого порога потужності система повинна сформулювати повідомлення користувачу.

3.1.4 Вимоги по діагностуванню системи

Система повинна забезпечувати контроль коректності отриманих вимірювальних даних, стану зв'язку з основними функціональними вузлами, працездатності локального та віддаленого інтерфейсів, а також стану керованого навантаження.

У разі отримання некоректних даних система не повинна використовувати їх для оновлення відображення та розрахунків. За можливості користувачу повинна надаватися інформація про помилку вимірювання або відсутність зв'язку.

3.1.5 Перспективи розвитку, проектування системи

Передбачається можливість подальшого розширення системи шляхом додавання кількох каналів вимірювання, керування кількома навантаженнями, автономного журналювання даних, модуля реального часу, додаткових засобів сигналізації та інтеграції із системами «розумного будинку».

3.2 Показники призначення

Система повинна забезпечувати вимірювання напруги, струму, активної потужності, спожитої електроенергії, частоти мережі та коефіцієнта потужності. Також система повинна виконувати розрахунок орієнтовної вартості споживання, передавання даних користувачу, побудову графіків зміни параметрів і керування одним контрольованим навантаженням.

Система повинна працювати в режимі реального часу та забезпечувати можливість подальшого масштабування.

3.2.1 Вимоги до надійності

Система повинна забезпечувати стабільну роботу під час тривалої експлуатації, періодичного оновлення даних, зміни навантаження та короткочасних відхилень параметрів живлення низьковольтної частини.

Для підвищення надійності повинні бути передбачені стабілізація живлення, узгодження логічних рівнів, перевірка коректності вимірювань, розділення силових і сигнальних кіл та захист від впливу комутаційних завад.

3.3 Вимоги до безпеки

Елементи системи, що працюють із напругою мережі змінного струму, повинні мати захист від випадкового дотику. Силові кола повинні бути відокремлені від низьковольтних кіл керування та передавання даних.

Система повинна забезпечувати безпечне вимкнення навантаження при перевищенні допустимих режимів роботи. Підключення силових провідників повинно виконуватися із застосуванням надійних ізольованих з'єднань. Експлуатація системи повинна здійснюватися з дотриманням вимог електробезпеки для побутового електрообладнання.

3.3.1 Вимоги до експлуатації, технічного обслуговування, ремонту і зберігання компонентів системи

Система повинна експлуатуватися у приміщенні з нормальними умовами мікроклімату, без потрапляння вологи на електронні компоненти та без механічного пошкодження провідників і з'єднань.

Технічне обслуговування повинно включати перевірку стану електричних з'єднань, ізоляції силових провідників, працездатності засобів відображення, зв'язку, вимірювання та керування навантаженням. Перевірку працездатності системи доцільно виконувати після зміни підключення навантаження або періодично під час експлуатації.

3.4 Вимоги до захисту інформації від несанкціонованого доступу

Система повинна забезпечувати обмеження доступу до засобів віддаленого моніторингу та керування навантаженням. Доступ до бездротової мережі та хмарного сервісу повинен здійснюватися з використанням засобів авторизації.

Дані доступу до системи не повинні бути відкритими для сторонніх користувачів. У разі використання локального вебінтерфейсу керування

навантаженням повинно бути доступним лише користувачам, які мають доступ до відповідної мережі.

3.4.1 Вимоги по стандартизації і уніфікації

Система повинна бути побудована з використанням стандартних інтерфейсів обміну даними, типових рівнів живлення, уніфікованих програмних засобів і зрозумілого інтерфейсу користувача.

Інтерфейс системи повинен забезпечувати зручне відображення основних параметрів енергоспоживання, стану навантаження та повідомлень про перевищення порогових значень.

4 Вимоги до документації

Документація повинна відповідати вимогам ЄСКД та ДСТУ

Комплект документації повинен складатись з:

- пояснювальну записку;
- структурну схему системи;
- функціональну схему системи;
- блок-схеми алгоритмів роботи;
- схему електричну принципову;
- макет реалізованої системи;
- результати тестування.

*Примітка: У комплект документації можуть вноситися зміни та доповнення в процесі розробки.

5 Стадії та етапи проектування

Таблиця 1 – Стадії та етапи виконання КРБ

№ етапу	Назва етапу виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання
1	Розробка технічного завдання	26.01 – 02.02
2	Робота над першим розділом «Аналіз технічного завдання»	03.02 – 15.02
3	Робота над другим розділом «Проектна частинв»	20.04 – 25.04
4	Робота над третім розділом «Практична частина»	26.04 – 05.05
5	Робота над четвертим розділом «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	07.05 – 25.05
6	Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	26.05 – 7.06
7	Перевірка на академічний плагіат, перевірка керівником та консультантами	8.06 – 14.06
8	Попередній захист кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06 – 21.06
9	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра	23.06

6 Додаткові умови виконання кваліфікаційної роботи

Під час виконання кваліфікаційної роботи у дане технічне завдання можуть вноситися зміни та доповнення.

Додаток Б

Технічні характеристики модуля вимірювання

Таблиця Б.1 – Детальні технічні характеристики багатфункціонального цифрового вимірювача змінного струму PZEM-004T V3.0

Параметр	Значення
Назва модуля	PZEM-004T V3.0
Тип пристрою	багатфункціональний цифровий вимірювач параметрів змінного струму
Призначення	вимірювання параметрів однофазної мережі змінного струму
Тип мережі	однофазна мережа AC
Наявність власного дисплея	немає, дані зчитуються через інтерфейс обміну
Основні вимірювані параметри	напруга, струм, активна потужність, спожита електроенергія, частота, коефіцієнт потужності
Варіанти виконання	PZEM-004T-10A; PZEM-004T-100A
Особливість версії PZEM-004T-10A	вимірювання струму до 10 А, вбудований шунт
Особливість версії PZEM-004T-100A	вимірювання струму до 100 А, зовнішній трансформатор струму
Рекомендована версія для роботи	PZEM-004T-100A із зовнішнім трансформатором струму
Діапазон вимірювання напруги	80–260 В AC
Роздільна здатність вимірювання напруги	0,1 В
Точність вимірювання напруги	0,5 %
Діапазон вимірювання струму для версії 10 А	0–10 А
Діапазон вимірювання струму для версії 100 А	0–100 А
Початковий струм вимірювання для версії 10 А	0,01 А
Початковий струм вимірювання для версії 100 А	0,02 А
Роздільна здатність вимірювання струму	0,001 А
Точність вимірювання струму	0,5 %
Діапазон вимірювання активної потужності для версії 10 А	0–2,3 кВт
Діапазон вимірювання активної потужності для версії 100 А	0–23 кВт
Початкова потужність вимірювання	0,4 Вт

Параметр	Значення
Роздільна здатність вимірювання потужності	0,1 Вт
Точність вимірювання активної потужності	0,5 %
Формат відображення потужності до 1000 Вт	значення з одним десятковим знаком, наприклад 999,9 Вт
Формат відображення потужності від 1000 Вт	ціле значення у ватах, наприклад 1000 Вт
Діапазон обліку активної енергії	0–9999,99 кВт·год
Роздільна здатність обліку енергії	1 Вт·год
Точність обліку активної енергії	0,5 %
Формат обліку енергії до 10 кВт·год	у Вт·год
Формат обліку енергії від 10 кВт·год	у кВт·год
Можливість скидання значення енергії	передбачено програмне скидання
Діапазон вимірювання частоти	45–65 Гц
Роздільна здатність вимірювання частоти	0,1 Гц
Точність вимірювання частоти	0,5 %
Діапазон вимірювання коефіцієнта потужності	0,00–1,00
Роздільна здатність коефіцієнта потужності	0,01
Точність вимірювання коефіцієнта потужності	1 %
Інтерфейс обміну даними	UART TTL
Протокол обміну	Modbus-RTU
Швидкість обміну	9600 бод
Формат обміну	8 біт даних, 1 стоп-біт
Рівень логіки інтерфейсу	TTL
Живлення інтерфейсної частини	5 В DC
Підключення до мікроконтролера	через лінії TX, RX, VCC, GND
Можливість підключення до ESP32	так, через апаратний UART
Тип вимірювання струму у версії 100 А	за допомогою зовнішнього трансформатора струму
Тип трансформатора струму	роз'ємний трансформатор струму PZCT-02
Номінальний струм трансформатора PZCT-02	100 А

Параметр	Значення
Спосіб встановлення трансформатора струму	на один провідник контрольованої лінії
Рекомендований провідник для встановлення трансформатора	фазний провідник
Особливість монтажу трансформатора струму	через кільце повинен проходити лише один провідник; одночасне пропускання фазного і нульового провідників призводить до компенсації магнітних полів
Живлення вимірювальної частини	від контрольованої АС-мережі
Робоча напруга вимірювальної частини	80–260 В АС
Наявність гальванічної розв'язки вимірювання струму	забезпечується трансформатором струму
Основні виходи модуля	TX, RX, VCC, GND
Основні силові підключення	клеми підключення до АС-мережі та трансформатора струму
Наявність енергонезалежного обліку енергії	передбачено збереження накопиченої енергії в модулі
Програмне зчитування напруги	підтримується
Програмне зчитування струму	підтримується
Програмне зчитування активної потужності	підтримується
Програмне зчитування енергії	підтримується
Програмне зчитування частоти	підтримується
Програмне зчитування коефіцієнта потужності	підтримується
Програмне скидання енергії	підтримується
Зміна адреси пристрою	підтримується протоколом обміну
Типове застосування	системи моніторингу енергоспоживання, IoT-лічильники, навчальні макети, системи домашнього енергоконтролю
Переваги для розроблюваної системи	комплексне вимірювання параметрів, цифровий інтерфейс, зменшення кількості аналогових вимірювань, зручність підключення до ESP32
Основні обмеження	необхідність правильного підключення до мережі змінного струму, дотримання вимог електробезпеки, правильне встановлення трансформатора струму
Призначення в системі	вимірювання параметрів мережі та передавання цифрових даних до мікроконтролерного блока

Додаток В
Перелік елементів

Позн.	Найменування	К-ть	Примітка
	<u>Мікроконтролер</u>		
U1	ESP32 DevKit V1	1	
	<u>Екран</u>		
tft1	DMG80480C070, 7", 800x480, UART	1	
	<u>Датчик</u>		
A1	PZCT-02, 100 A	1	
M1	PZEM-004T V3.0	1	
	<u>Резистори</u>		
R1	YAGEO CFR-25JB-52-1K 1 кОм	1	±5 %, 0,25 Вт.
R2	YAGEO CFR-25JB-52-1K8 1,8 кОм	1	±5 %, 0,25 Вт.
	<u>Конденсатори</u>		
C1	Panasonic EEU-FR1C101, radial, THT	1	100 мкФ, 16 В
C2	C320C104K5R5TA ±10 %, X7R, radial THT	1	0,1 мкФ, 50 В
LED2	Led Lamp, 10 мм	1	
MW-IRM - 05-1	Mean Well IRM-05-5	1	5 В, 1 А, 5 Вт
J2	Роз'єм живлення 230 В АС	1	
Mod1	KY-019/HiLetgo 5V One Channel Relay Module	1	

КС КРБ 123.163.00.00 ПЕ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Дурда В. М.		
Перевірів		Жаровський Р.		
Реценз.		Литвиненко Я		
Н. Контр.		Луцик Н. С.		
Затверд.		Осухівська Г.М.		
Комп'ютерна система моніторингу енергоспоживання житлового приміщення в реальному часі				
Перелік елементів				
		Лім.	Арк.	Аркуші
			1	1
ТНТУ, каф. КС, гр. СІ-41				

Додаток Г

Лістинг програмного забезпечення

```
/*
  ESP32 AC energy monitor:
  - PZEM-004T V3.0 via UART2
  - DWIN DGUS HMI display via UART1
  - Local Wi-Fi web page + JSON endpoint
  - Blynk Cloud monitoring and relay control

  Wiring used in the diploma project:
  PZEM TX  -> ESP32 GPIO16 / RX2 through 1k + 1.8k divider
  PZEM RX  -> ESP32 GPIO17 / TX2
  DWIN TX2 -> ESP32 GPIO26 / RX1, use level shifting if HMI TX is 5 V
  DWIN RX2 -> ESP32 GPIO27 / TX1
  Relay IN -> ESP32 GPIO25
*/

#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPLxxxxxx"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Residential Energy Monitor"
#define BLYNK_AUTH_TOKEN "PASTE_BLYNK_AUTH_TOKEN_HERE"
#define BLYNK_PRINT Serial

#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <WebServer.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <PZEM004Tv30.h>
#include <math.h>

// ----- User settings -----
const char WIFI_SSID[] = "PASTE_WIFI_SSID_HERE";
const char WIFI_PASS[] = "PASTE_WIFI_PASSWORD_HERE";

// Example tariff. Replace with the tariff used in the work.
const float COST_PER_KWH = 4.32f;

// Set false if the relay module jumper is configured as LOW trigger.
const bool RELAY_ACTIVE_HIGH = true;

const float POWER_LIMIT_W = 3500.0f;
const char BLYNK_POWER_EVENT[] = "power_limit";

// ----- Hardware pins -----
const uint8_t PZEM_RX_PIN = 16;
const uint8_t PZEM_TX_PIN = 17;
const uint8_t HMI_RX_PIN = 26;
const uint8_t HMI_TX_PIN = 27;
const uint8_t RELAY_PIN = 25;

const uint32_t HMI_BAUD = 115200;
const uint32_t READ_INTERVAL_MS = 2000;
const uint32_t WIFI_RETRY_MS = 15000;
const uint32_t BLYNK_RETRY_MS = 15000;
const uint32_t ALERT_INTERVAL_MS = 60000;

// DWIN DGUS variable addresses. These match the common How2Electronics UI
// layout where addresses are handled as 0x3100, 0x3200, ...
const uint16_t HMI_ADDR_VOLTAGE = 0x3100;
const uint16_t HMI_ADDR_CURRENT = 0x3200;
```

```

const uint16_t HMI_ADDR_POWER = 0x3300;
const uint16_t HMI_ADDR_POWER_FACTOR = 0x3400;
const uint16_t HMI_ADDR_ENERGY = 0x3500;
const uint16_t HMI_ADDR_COST = 0x3600;
const uint16_t HMI_ADDR_RELAY = 0x3700;

// Scaling must match the decimal settings in the DWIN numeric display
fields.
const float HMI_VOLTAGE_SCALE = 100.0f;      // 230.12 V -> 23012
const float HMI_CURRENT_SCALE = 1000.0f;    // 1.234 A -> 1234
const float HMI_POWER_SCALE = 1.0f;        // 1234 W -> 1234
const float HMI_POWER_FACTOR_SCALE = 100.0f; // 0.95 -> 95
const float HMI_ENERGY_SCALE = 10.0f;      // 12.3 kWh -> 123
const float HMI_COST_SCALE = 100.0f;       // 123.45 -> 12345

// Blynk virtual pins:
// V0 voltage, V1 current, V2 power, V3 PF, V4 energy, V5 cost,
// V6 relay switch, V7 frequency, V8 data-valid flag.

HardwareSerial HmiSerial(1);
PZEM004Tv30 pzem(Serial2, PZEM_RX_PIN, PZEM_TX_PIN);
WebServer server(80);

struct EnergyReadings {
  float voltage = NAN;
  float current = NAN;
  float power = NAN;
  float energy = NAN;
  float frequency = NAN;
  float powerFactor = NAN;
  float cost = NAN;
  bool valid = false;
  uint32_t lastUpdateMs = 0;
};

EnergyReadings readings;
bool relayOn = false;
uint32_t lastReadMs = 0;
uint32_t lastWifiAttemptMs = 0;
uint32_t lastBlynkAttemptMs = 0;
uint32_t lastAlertMs = 0;

const char INDEX_HTML[] PROGMEM = R"rawliteral(
<!doctype html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="utf-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1">
  <title>ESP32 Energy Monitor</title>
  <style>
    :root { font-family: Arial, sans-serif; color: #172033; background:
#f4f7fb; }
    body { margin: 0; padding: 24px; }
    main { max-width: 980px; margin: 0 auto; }
    h1 { margin: 0 0 18px; font-size: 28px; }
    .grid { display: grid; grid-template-columns: repeat(auto-fit,
minmax(180px, 1fr)); gap: 12px; }
    .card { background: #fff; border: 1px solid #dde5f0; border-radius: 8px;
padding: 14px; }
    .label { color: #64748b; font-size: 13px; }
    .value { margin-top: 8px; font-size: 25px; font-weight: 700; }
    .row { display: flex; flex-wrap: wrap; gap: 10px; align-items: center;
margin-top: 18px; }

```

```

    button { border: 0; border-radius: 6px; padding: 11px 16px; color: #fff;
font-weight: 700; cursor: pointer; }
    .on { background: #16803c; }
    .off { background: #b42318; }
    .status { color: #475569; }
</style>
</head>
<body>
<main>
  <h1>ESP32 Energy Monitor</h1>
  <section class="grid">
    <div class="card"><div class="label">Voltage</div><div id="voltage"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Current</div><div id="current"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Power</div><div id="power"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Energy</div><div id="energy"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Frequency</div><div id="frequency"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Power factor</div><div id="pf"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Cost</div><div id="cost"
class="value">--</div></div>
    <div class="card"><div class="label">Relay</div><div id="relay"
class="value">--</div></div>
  </section>
  <div class="row">
    <button class="on" onclick="setRelay(1)">Relay ON</button>
    <button class="off" onclick="setRelay(0)">Relay OFF</button>
    <span id="status" class="status">Connecting...</span>
  </div>
</main>
<script>
function fmt(value, digits, unit) {
  return value === null || Number.isNaN(value) ? "--" :
Number(value).toFixed(digits) + " " + unit;
}
async function refreshData() {
  try {
    const response = await fetch("/data", { cache: "no-store" });
    const data = await response.json();
    document.getElementById("voltage").textContent = fmt(data.voltage, 1,
"V");
    document.getElementById("current").textContent = fmt(data.current, 3,
"A");
    document.getElementById("power").textContent = fmt(data.power, 1, "W");
    document.getElementById("energy").textContent = fmt(data.energy, 3,
"kWh");
    document.getElementById("frequency").textContent = fmt(data.frequency, 1,
"Hz");
    document.getElementById("pf").textContent = data.powerFactor === null ?
"--" : Number(data.powerFactor).toFixed(2);
    document.getElementById("cost").textContent = fmt(data.cost, 2, "UAH");
    document.getElementById("relay").textContent = data.relay ? "ON" : "OFF";
    document.getElementById("status").textContent = data.valid ? "Data OK" :
"Waiting for PZEM data";
  } catch (error) {
    document.getElementById("status").textContent = "Connection error";
  }
}
async function setRelay(state) {

```

```

    await fetch("/relay?state=" + state, { cache: "no-store" });
    refreshData();
}
refreshData();
setInterval(refreshData, 2000);
</script>
</body>
</html>
)rawliteral";

void setupServer();
void connectWiFi();
void maintainNetwork();
bool readPzem();
void printReadings();
void sendToBlynk();
void sendToHmi();
void handleHmiInput();
void processHmiFrame(const uint8_t *frame, uint8_t len);
void setRelay(bool on, bool syncBlynk);
uint8_t relayLevel(bool on);
void hmiWriteWord(uint16_t address, uint16_t value);
void hmiWriteScaled(uint16_t address, float value, float scale);
uint16_t scaledToWorld(float value, float scale);
void handleRoot();
void handleData();
void handleRelayApi();
void handleResetEnergyApi();
void handleNotFound();
String jsonNumber(float value, uint8_t digits);
void checkPowerLimit();

BLYNK_CONNECTED() {
    Blynk.syncVirtual(V6);
    sendToBlynk();
}

BLYNK_WRITE(V6) {
    setRelay(param.asInt() != 0, false);
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    delay(200);
    Serial.println();
    Serial.println("ESP32 PZEM-004T energy monitor");

    HmiSerial.begin(HMI_BAUD, SERIAL_8N1, HMI_RX_PIN, HMI_TX_PIN);

    pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
    setRelay(false, false);

    connectWiFi();
    setupServer();
    server.begin();
    Serial.println("HTTP server started");

    Blynk.config(BLYNK_AUTH_TOKEN);
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        Blynk.connect(3000);
    }

    lastReadMs = millis() - READ_INTERVAL_MS;

```

```

}

void loop() {
  server.handleClient();
  handleHmiInput();
  maintainNetwork();

  uint32_t now = millis();
  if (now - lastReadMs >= READ_INTERVAL_MS) {
    lastReadMs = now;
    if (readPzem()) {
      printReadings();
      sendToHmi();
      sendToBlynk();
      checkPowerLimit();
    } else {
      Serial.println("PZEM read error");
      if (Blynk.connected()) {
        Blynk.virtualWrite(V8, 0);
      }
    }
  }
}

void connectWiFi() {
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
  lastWifiAttemptMs = millis();

  Serial.print("Connecting to Wi-Fi");
  uint32_t startMs = millis();
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - startMs < 15000) {
    delay(300);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println();

  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.print("Wi-Fi connected, IP: ");
    Serial.println(WiFi.localIP());
  } else {
    Serial.println("Wi-Fi not connected yet. The sketch will keep
retrying.");
  }
}

void maintainNetwork() {
  uint32_t now = millis();

  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    if (now - lastWifiAttemptMs >= WIFI_RETRY_MS) {
      lastWifiAttemptMs = now;
      Serial.println("Retrying Wi-Fi connection...");
      WiFi.disconnect();
      WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASS);
    }
    return;
  }

  if (!Blynk.connected()) {
    if (now - lastBlynkAttemptMs >= BLYNK_RETRY_MS) {
      lastBlynkAttemptMs = now;
      Serial.println("Connecting to Blynk...");
    }
  }
}

```

```

        Blynk.connect(1000);
    }
}

if (Blynk.connected()) {
    Blynk.run();
}

bool readPzem() {
    float voltage = pzem.voltage();
    float current = pzem.current();
    float power = pzem.power();
    float energy = pzem.energy();
    float frequency = pzem.frequency();
    float powerFactor = pzem.pf();

    bool ok = !isnan(voltage) && !isnan(current) && !isnan(power) &&
        !isnan(energy) && !isnan(frequency) && !isnan(powerFactor);

    readings.valid = ok;
    readings.lastUpdateMs = millis();

    if (!ok) {
        return false;
    }

    readings.voltage = voltage;
    readings.current = current;
    readings.power = power;
    readings.energy = energy;
    readings.frequency = frequency;
    readings.powerFactor = powerFactor;
    readings.cost = energy * COST_PER_KWH;
    return true;
}

void printReadings() {
    Serial.printf("U: %.2f V | I: %.3f A | P: %.2f W | E: %.3f kWh | F: %.1f Hz
| PF: %.2f | Cost: %.2f\n",
        readings.voltage,
        readings.current,
        readings.power,
        readings.energy,
        readings.frequency,
        readings.powerFactor,
        readings.cost);
}

void sendToBlynk() {
    if (!Blynk.connected()) {
        return;
    }

    Blynk.virtualWrite(V0, readings.voltage);
    Blynk.virtualWrite(V1, readings.current);
    Blynk.virtualWrite(V2, readings.power);
    Blynk.virtualWrite(V3, readings.powerFactor);
    Blynk.virtualWrite(V4, readings.energy);
    Blynk.virtualWrite(V5, readings.cost);
    Blynk.virtualWrite(V6, relayOn ? 1 : 0);
    Blynk.virtualWrite(V7, readings.frequency);
    Blynk.virtualWrite(V8, readings.valid ? 1 : 0);
}

```

```

}

void sendToHmi() {
    if (!readings.valid) {
        return;
    }

    hmiWriteScaled(HMI_ADDR_VOLTAGE, readings.voltage, HMI_VOLTAGE_SCALE);
    hmiWriteScaled(HMI_ADDR_CURRENT, readings.current, HMI_CURRENT_SCALE);
    hmiWriteScaled(HMI_ADDR_POWER, readings.power, HMI_POWER_SCALE);
    hmiWriteScaled(HMI_ADDR_POWER_FACTOR, readings.powerFactor,
HMI_POWER_FACTOR_SCALE);
    hmiWriteScaled(HMI_ADDR_ENERGY, readings.energy, HMI_ENERGY_SCALE);
    hmiWriteScaled(HMI_ADDR_COST, readings.cost, HMI_COST_SCALE);
    hmiWriteWord(HMI_ADDR_RELAY, relayOn ? 1 : 0);
}

void hmiWriteScaled(uint16_t address, float value, float scale) {
    hmiWriteWord(address, scaledToWorld(value, scale));
    delay(2);
}

uint16_t scaledToWorld(float value, float scale) {
    if (isnan(value) || value < 0.0f) {
        return 0;
    }

    float scaled = value * scale;
    if (scaled > 65535.0f) {
        return 65535;
    }

    return (uint16_t)(scaled + 0.5f);
}

void hmiWriteWord(uint16_t address, uint16_t value) {
    uint8_t frame[8] = {
        0x5A, 0xA5, 0x05, 0x82,
        highByte(address), lowByte(address),
        highByte(value), lowByte(value)
    };
    HmiSerial.write(frame, sizeof(frame));
}

void handleHmiInput() {
    static uint8_t frame[32];
    static uint8_t index = 0;
    static uint8_t expectedLen = 0;

    while (HmiSerial.available()) {
        uint8_t b = HmiSerial.read();

        if (index == 0 && b != 0x5A) {
            continue;
        }

        if (index == 1 && b != 0xA5) {
            index = 0;
            expectedLen = 0;
            continue;
        }

        frame[index++] = b;
    }
}

```

```

    if (index == 3) {
        expectedLen = frame[2] + 3;
        if (expectedLen > sizeof(frame) || expectedLen < 6) {
            index = 0;
            expectedLen = 0;
        }
    }

    if (expectedLen > 0 && index >= expectedLen) {
        processHmiFrame(frame, expectedLen);
        index = 0;
        expectedLen = 0;
    }
}

void processHmiFrame(const uint8_t *frame, uint8_t len) {
    if (len < 8) {
        return;
    }

    uint8_t command = frame[3];
    uint16_t address = ((uint16_t)frame[4] << 8) | frame[5];
    uint16_t value = 0;

    if (command == 0x83 && len >= 9) {
        value = ((uint16_t)frame[len - 2] << 8) | frame[len - 1];
    } else if (command == 0x82 && len >= 8) {
        value = ((uint16_t)frame[6] << 8) | frame[7];
    } else {
        return;
    }

    if (address == HMI_ADDR_RELAY || frame[4] == highByte(HMI_ADDR_RELAY)) {
        setRelay(value != 0, true);
    }
}

void setRelay(bool on, bool syncBlynk) {
    relayOn = on;
    digitalWrite(RELAY_PIN, relayLevel(on));
    Serial.println(on ? "Relay ON" : "Relay OFF");

    hmiWriteWord(HMI_ADDR_RELAY, relayOn ? 1 : 0);

    if (syncBlynk && Blynk.connected()) {
        Blynk.virtualWrite(V6, relayOn ? 1 : 0);
    }
}

uint8_t relayLevel(bool on) {
    if (RELAY_ACTIVE_HIGH) {
        return on ? HIGH : LOW;
    }
    return on ? LOW : HIGH;
}

void setupServer() {
    server.on("/", HTTP_GET, handleRoot);
    server.on("/data", HTTP_GET, handleData);
    server.on("/relay", HTTP_GET, handleRelayApi);
    server.on("/resetEnergy", HTTP_GET, handleResetEnergyApi);
}

```

```

    server.onNotFound(handleNotFound);
}

void handleRoot () {
    server.send(200, "text/html; charset=utf-8", INDEX_HTML);
}

void handleData () {
    server.setHeader("Access-Control-Allow-Origin", "*");

    String json = "{";
    json += "\"valid\":";
    json += readings.valid ? "true" : "false";
    json += ",\"voltage\":";
    json += jsonNumber(readings.voltage, 2);
    json += ",\"current\":";
    json += jsonNumber(readings.current, 4);
    json += ",\"power\":";
    json += jsonNumber(readings.power, 2);
    json += ",\"energy\":";
    json += jsonNumber(readings.energy, 4);
    json += ",\"frequency\":";
    json += jsonNumber(readings.frequency, 1);
    json += ",\"powerFactor\":";
    json += jsonNumber(readings.powerFactor, 2);
    json += ",\"cost\":";
    json += jsonNumber(readings.cost, 2);
    json += ",\"relay\":";
    json += relayOn ? "true" : "false";
    json += ",\"wifi\":";
    json += WiFi.localIP().toString();
    json += "\"";
    json += "}";

    server.send(200, "application/json", json);
}

void handleRelayApi () {
    if (!server.hasArg("state")) {
        server.send(400, "text/plain", "Missing state=0|1|on|off");
        return;
    }

    String state = server.arg("state");
    state.toLowerCase();

    if (state == "1" || state == "on" || state == "true") {
        setRelay(true, true);
    } else if (state == "0" || state == "off" || state == "false") {
        setRelay(false, true);
    } else {
        server.send(400, "text/plain", "Invalid relay state");
        return;
    }

    handleData();
}

void handleResetEnergyApi () {
    if (!server.hasArg("confirm") || server.arg("confirm") != "1") {
        server.send(400, "text/plain", "Use /resetEnergy?confirm=1 to reset the PZEM energy counter");
        return;
    }
}

```

```

    }

    bool ok = pzem.resetEnergy();
    server.send(ok ? 200 : 500, "text/plain", ok ? "Energy counter reset" :
"Reset failed");
}

void handleNotFound() {
    server.send(404, "text/plain", "Not found");
}

String jsonNumber(float value, uint8_t digits) {
    if (isnan(value) || isinf(value)) {
        return "null";
    }
    return String(value, digits);
}

void checkPowerLimit() {
    if (!readings.valid || readings.power <= POWER_LIMIT_W ||
!Blynk.connected()) {
        return;
    }

    uint32_t now = millis();
    if (now - lastAlertMs < ALERT_INTERVAL_MS) {
        return;
    }

    lastAlertMs = now;
    String message = "Power limit exceeded: " + String(readings.power, 1) + "
W";
    Blynk.logEvent(BLYNK_POWER_EVENT, message.c_str());
}

```