

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
Циклова комісія комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему
**МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В СИСТЕМАХ
“РОЗУМНОГО БУДИНКУ”**

Виконав: студент групи 2К-22

Спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія

Кирило ГУРАЛЬ

Керівник:

Дарина ЗЛОЧЕВСЬКА–КРАСНОЩОК

Черкаси 2026

ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ

Циклова комісія комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка циклової комісії КІ та ІТ

_____ Наталя ФАЛЬЧЕНКО

(підпис)

« _____ » 20__ р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____ Гуралю Кирилу Дмитровичу

- 1. Тема кваліфікаційної роботи Методи оптимізації енергоспоживання в системах “Розумного будинку”**

Керівник роботи Злочевська–Краснощок Дарина Семенівна, викладач

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06» жовтня 2025 року №84/1-у

- 2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 08.06.2026**

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи Відомості про методи та алгоритми динамічного керування енергоспоживанням; архітектуру побудови систем автоматизації типу «Smart Home» на Edge-рівні; способи використання мікроконтролерних платформ, цифрових інтерфейсів та метрологічних сенсорів для зчитування і моніторингу активної потужності в реальному часі; методи розробки вбудованого програмного забезпечення на базі операційних систем реального часу та бездротових протоколів передачі телеметрії.

4. Зміст кваліфікаційної роботи Аналіз сучасних концепцій побудови систем енергоменеджменту в житловому секторі та класифікація профілів споживання побутових приладів; обґрунтування вибору апаратної платформи Edge-контролера та вимірювальних засобів; розробка структурної та електричної принципової схем пристрою; створення вбудованого програмного забезпечення для мікроконтролера на базі операційної системи реального часу FreeRTOS; реалізація алгоритмів пріоритетного витіснення навантаження.

- 5. Дата видачі завдання 15.09.2025**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Терміни виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	14.10.2025	
2	Розділ 1 Аналіз ролі методів енергозбереження системах IoT	09.12.2025	
3	Розділ 2 Розробка системи керування енергоспоживанням	10.03.2026	
4	Розділ 3 Експериментальне дослідження ефективності запропонованих методів	28.04.2026	
5	Висновки	12.05.2026	
6	Оформлення кваліфікаційної роботи (чистовий варіант)	26.05.2026	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів дозахисту)	02.06.2026	
8	Подання кваліфікаційної роботи на затвердження завідувачці циклової комісії (за 7 днів до захисту)	10.06.2026	

Студент

(підпис)

Кирило ГУРАЛЬ

Керівник роботи

(підпис)

Дарина ЗЛОЧЕВСЬКА-КРАСНОЩОК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена розробці апаратно-програмного комплексу для оптимізації та динамічного моніторингу енергоспоживання в системах «Розумного будинку», який функціонує на базі сучасних мікроконтролерних рішень. Метою роботи є створення автономної системи на Edge-рівні для превентивного захисту локальної мережі від перевантажень із використанням енергоефективних технологій.

У процесі проєктування створено модульну архітектуру системи, що включає основні функціональні блоки: Edge-контролер на базі двоядерного мікроконтролера ESP32, цифровий метрологічний модуль PZEM-004T та блок силових виконавчих реле. Процес взаємодії з вимірювальним чипом реалізовано через апаратний інтерфейс UART за протоколом Modbus-RTU, що забезпечує високу надійність та точність фіксації RMS значень струму і напруги. На базі операційної системи FreeRTOS програмно реалізовано алгоритм покрокового витіснення навантаження (Load Shedding) з інтегрованою логікою релейного гістерезису, що дозволило утримувати загальну потужність у межах безпечного ліміту 3500 Вт. Для візуалізації та довгострокового моніторингу телеметрії використано стек MQTT-InfluxDB-Grafana. Проведено тестування системи, яке підтвердило ліквідацію аварійних ситуацій та високу економічну ефективність за рахунок автоматичного перенесення навантажень у пільгову нічну зону тарифу.

Ключові слова: Розумний будинок, мікроконтролер ESP32, модуль PZEM-004T, FreeRTOS, Load Shedding, релейний гістерезис, енергоефективність, моніторинг даних.

ABSTRACT

This qualification paper presents the development of a hardware and software complex for optimizing and dynamically monitoring power consumption in "Smart Home" systems based on modern microcontroller solutions. The aim of the project is to create an Edge-level autonomous system for proactive local network protection against overloads using energy-efficient technologies.

During the design phase, a modular system architecture was implemented, covering the main functional units: an Edge controller based on the dual-core ESP32 microcontroller, a PZEM-004T digital metrological module, and a power relay unit. The interaction with the measurement chip is handled through the hardware UART interface via Modbus-RTU protocol, ensuring high noise immunity and accurate acquisition of RMS current and voltage values. Based on the FreeRTOS real-time operating system, a step-by-step load shedding algorithm with integrated relay hysteresis logic was implemented, allowing to maintain total power within the safe limit of 3500 W. The MQTT-InfluxDB-Grafana stack was used for visualization and long-term telemetry monitoring. The system functionality was tested, confirming the elimination of emergency overloads and high economic efficiency due to automatic load shifting to the discount night tariff zone.

Keywords: Smart Home, ESP32 microcontroller, PZEM-004T module, FreeRTOS, Load Shedding, relay hysteresis, energy efficiency, data monitoring.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

HEMS (Home Energy Management Systems) – система інтелектуального енергоменеджменту будинку.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) – легковагий асинхронний протокол передачі даних.

NTP (Network Time Protocol) – протокол мережевої синхронізації часу.

SSR (Solid State Relay) – твердотільне реле.

EMR (Electromechanical Relay) – електромагнітне реле.

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) – універсальний асинхронний приймач-передавач.

CRC (Cyclic Redundancy Check) – циклічний надлишковий код перевірки цілісності даних.

GPIO (General-Purpose Input/Output) – порти введення-виведення загального призначення.

UPS (Uninterruptible Power Supply) – джерело безперебійного живлення (ДБЖ).

BLE (Bluetooth Low Energy) – технологія бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням.

PIR (Passive Infrared) – пасивний інфрачервоний датчик руху.

mmWave (Millimeter Wave) – мікрохвильовий радар присутності міліметрового діапазону.

SoC (System on Chip) – система на кристалі.

CapEx (Capital Expenditures) – капітальні витрати на створення системи.

OpEx (Operational Expenditures) – операційні витрати на експлуатацію.

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – індикатор рівня потужності отриманого сигналу.

LQI (Link Quality Indicator) – індикатор якості зв'язку в бездротових мережах.

AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) – дистанційно-векторний протокол маршрутизації.

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) – метод множинного доступу з контролем носійної та запобіганням колізіям.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ІОТ..	5
1.1 Структура та енергетичний баланс сучасного "Розумного будинку" (Smart Home)	5
1.2 Огляд протоколів передачі даних з низьким енергоспоживанням	13
1.3 Аналіз існуючих алгоритмів оптимізації.....	18
1.4 Постановка задачі на розробку системи оптимізації.....	25
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ	32
2.1 Обґрунтування вибору апаратної платформи	32
2.2 Розробка структурної схеми системи.....	36
2.3 Алгоритмічне забезпечення системи	40
2.4 Програмна реалізація модуля керування.....	44
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ	47
3.1 Методика проведення експерименту та вимірювальний стенд	47
3.2. Вимірювання енергоспоживання системи в "звичайному" режимі (без оптимізації)	49
3.3. Тестування системи з увімкненим алгоритмом оптимізації	52
3.4. Порівняльний аналіз результатів та розрахунок коефіцієнта економії енергії	54
3.5. Оцінка економічної ефективності впровадження розробленого пристрою	57
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ.....	67

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку житлово-комунального сектору та приватного домоволодіння в Україні питання раціонального використання й моніторингу енергетичних ресурсів набуло критичного значення. Постійне зростання тарифів на електроенергію для населення, нестабільність централізованих енергомереж, спричинена дефіцитом генеруючих потужностей, а також глобальні тенденції до зниження вуглецевого сліду зумовлюють необхідність впровадження інтелектуальних систем керування попитом на енергію безпосередньо на рівні кінцевого споживача.

Концепція «Розумного будинку» (Smart Home), яка початково орієнтувалася переважно на підвищення рівня комфорту, мультимедійні функції та безпеку, сьогодні зазнає суттєвої трансформації в бік інтелектуального енергоменеджменту (Home Energy Management Systems – HEMS). Сучасні системи Інтернету речей (IoT) відкривають широкі можливості для моніторингу та динамічного керування локальною інфраструктурою. Проте більшість комерційних рішень, представлених на ринку, мають високу вартість, закритий вихідний код та жорстку прив'язку до хмарних сервісів розробника. Це суттєво обмежує їхню гнучкість, конфіденційність даних і можливість адаптації під специфічні алгоритми оптимізації, зокрема під українську багатозонну систему тарифікації електроенергії.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка відкритих, бюджетних та відмовостійких апаратно-програмних засобів і методів автоматизованого моніторингу й оптимізації енергоспоживання в реальному часі на базі сучасного Edge-контролера для підвищення енергоефективності, експлуатаційної безпеки та зниження фінансових витрат в локальних житлових електромережах.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Дослідити дворівневу та трирівневу інфраструктуру «Розумного будинку» та класифікувати побутових споживачів за рівнями пріоритетності.
2. Обґрунтувати та сформувати апаратний стек системи на основі двоядерного мікроконтролера ESP32 та вимірювального процесора SD3004.
3. Розробити структурно-функціональну схему взаємодії компонентів та принципові електричні рішення вузла силової комутації.
4. Формалізувати математичний апарат покрокового витіснення навантаження з урахуванням неколізійного релейного гістерезису.
5. Створити вбудоване прикладне програмне забезпечення в архітектурі FreeRTOS із жорстким паралельним розподілом обчислювальних задач.
6. Експериментально перевірити працездатність комплексу на фізичному вимірювальному стенді та виконати оцінку економічної ефективності його впровадження.

Об'єктом дослідження є процеси розподілу електричної енергії, реєстрації телеметричних параметрів та динаміка зміни активної потужності в локальних мережах житлових приміщень в умовах лімітованої виділеної потужності.

Предметом дослідження є мікроконтролерні методи, алгоритми покрокового пріоритетного витіснення навантаження (Load Shedding) та багатотарифного планування на базі концепції периферійних обчислень (Edge Computing).

Апробація результатів кваліфікаційної роботи здійснювалася шляхом їх представлення на XVIII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Тенденції розвитку ІТ-технологій в Україні».

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ІОТ

1.1 Структура та енергетичний баланс сучасного "Розумного будинку" (Smart Home)

Сучасна система «розумний будинок» (Smart Home) є складною високотехнологічною екосистемою, призначеною для автоматизації процесів, моніторингу середовища та оптимізації енергоспоживання. Для детального аналізу функціонування та енергетичного балансу зазначеної системи доцільно розглядати її дворівневу або тривірневу архітектуру, де кожен ієрархічний рівень виконує чітко визначені апаратні та програмні функції.

Рівень сприйняття формують первинні вимірювальні перетворювачі – датчики температури, руху, вологості та освітленості. Попри те, що одиничний сенсор у режимі очікування споживає струм порядку мікроамперів, сумарна кількість таких пристроїв у межах одного об'єкта автоматизації може сягати кількох десятків, що створює помітне сукупне навантаження на автономні джерела живлення.

Апаратне забезпечення (Hardware). На апаратному рівні типовий бездротовий датчик складається з трьох ключових компонентів:

1. Чутливий елемент (сенсор): мембрана або напівпровідникова структура, що безпосередньо реагує на зміну фізичних параметрів навколишнього середовища.
2. Мікроконтроллер (MCU): інтегральна мікросхема (наприклад, на базі архітектур ESP32–C3, nRF52 або STM32L), яка здійснює аналогово-цифрове перетворення та первинну обробку сигналу.
3. Радіомодуль: трансивер для бездротового передавання даних до центрального вузла.

Технічний нюанс: за умов масштабування мережі до десятків сенсорів критично важливою є підтримка мікроконтролером апаратних переривань (Hardware Interrupts). Це дає змогу переводити обчислювальне ядро у режим

глибокого сну (Deep Sleep) з нульовим або близьким до нульового споживанням енергії, доки зовнішня подія (наприклад, замикання контактів датчика руху) фізично не згенерує сигнал пробудження.

Стратегія енергоспоживання (Microamps Strategy). Хоча номінальний струм споживання датчика є низьким, тривалість автономної роботи суттєво обмежується піковими навантаженнями під час активності радіомодуля:

- Режим сну: струм споживання становить $\approx 5\text{--}10$ мкА.
- Режим трансляції даних: короточасний стрибок струму до 20 – 100 мА тривалістю в кілька мілісекунд.

Для нівелювання зазначених амплітудних стрибків струму та пролонгації життєвого циклу гальванічних елементів (типу CR2032 або Li-Po) у схемотехніці пристроїв застосовують паралельне підключення електролітичних або танталових конденсаторів великої ємності безпосередньо біля виводів живлення мікроконтролера.

Для розгортання локальної мережі датчиків переважно використовують дві базові топологічні схеми:

- Топологія «Зірка» (Star): всі кінцеві пристрої передають інформацію безпосередньо на центральний шлюз (Gateway). Перевага: простота проектування та адміністрування. Недолік: у разі значного віддалення датчика від шлюзу пропорційно зростає потужність передавача, що призводить до перевитрати енергії.
- Комірчаста топологія (Mesh / «Сітка»): пристрої мають здатність ретранслювати дані один через одного. Дана топологія є оптимальною для об'єктів великої площі, де радіусу дії одного вузла недостатньо. Це базовий режим функціонування для спеціалізованих протоколів Zigbee та Thread.

Протокол Zigbee

Специфікація мережевих протоколів верхнього рівня Zigbee, що базується на стандарті IEEE 802.15.4, є найбільш розповсюдженим рішенням для побудови бездротових сенсорних мереж:

- Принцип функціонування: архітектура мережі передбачає наявність пристроїв із постійним живленням від електромережі (наприклад, смарт-лампи), які виконують роль маршрутизаторів (ретрансляторів) для кінцевих автономних датчиків.
- Переваги: широкий спектр сумісного комерційного обладнання від провідних виробників (Aqara, Philips Hue, IKEA).
- Недоліки: обов'язкова наявність пропрієтарного або універсального апаратного шлюзу. Спостерігаються проблеми міжбрендової сумісності на рівні прикладного програмного забезпечення у межах одного шлюзу розробника.

Протокол Thread

Сучасніший мережевий протокол, розроблений консорціумом за участю Google, Apple та Amazon:

- Принцип функціонування: базується на стеку протоколів IPv6 (зокрема 6LoWPAN), завдяки чому кожен кінцевий вузол отримує власну унікальну IP-адресу і стає повноправним елементом локальної мережі.
- Переваги: відсутність єдиної точки відмови (Single Point of Failure). У разі виходу з ладу головного маршрутизатора мережа автоматично та миттєво реконфігурується через альтернативні вузли. Має вищу швидкість відгуку порівняно із Zigbee та повну нативну суміш із прикладним стандартом Matter, що усуває проблему міжбрендових бар'єрів.
- Недоліки: менша номенклатура доступних на ринку апаратних засобів порівняно із Zigbee, хоча сегмент пристроїв стрімко масштабується.

Порівняльні технічні характеристики зазначених бездротових технологій наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння протоколів для датчиків

Протокол	Zigbee	Thread
Енергоспоживання:	Екстремально низьке	Екстремально низьке
Швидкість відгуку:	<100мс	100мс
Сумісність:	Потрібен рідний цифровий осередок бренду	Працює з будь-яким Thread–border router
Майбутнє:	Надійний стандарт сьогодні	Майбутнє розумного дому (Matter)

У разі масштабування системи (понад 20 однотипних датчиків освітленості або руху) виникає явище «шторму даних» – різкого некерованого збільшення обсягів інформації в обмежений проміжок часу, що перевищує пропускну здатність каналу або обчислювальну потужність шлюзу. Наприклад, під час увімкнення основного освітлення всі датчики одночасно генерують транзакції «Рівень люкс змінено», що викликає колізії в радіоефірі та тимчасову відмову в обслуговуванні локальної мережі.

Для розв'язання цієї проблеми в комп'ютерній інженерії застосовують два програмні методи оптимізації.

Метод випадкової затримки (Jitter) – призначений для десинхронізації пакетів даних, які надсилаються пристроями одночасно (зокрема після відновлення електроживлення або за розкладом).

- Математична логіка: замість фіксованого інтервалу опитування або надсилання даних ($T = 60\text{с}$) до часової мітки додається випадкова величина, формула 1.1:

$$T_{active} = T_{base} + \text{random}(0,10) \text{ секунд} \quad (1.1)$$

- Результат: транзакційні запити розподіляються у часі рівномірно, що знімає пікове навантаження з центрального сервера та комутаційного вузла.

Фільтрація за дельтою (Filter by Delta) – замість циклічного передавання телеметрії щосекунди впроваджується алгоритм генерації подій лише за умови суттєвої зміни вимірюваної величини.

- Математична логіка: порівняння поточного значення з попередньо відправленим:

`if (|Xcurrent - Xlast_sent| > Xlast_sent · 0.1) → виконати відправку`

- Результат: радіомодуль (Wi-Fi, Zigbee, LoRa) активується значно рідше, забезпечуючи заощадження ємності гальванічного елемента. Окрім цього, здійснюється первинна фільтрація високочастотного «шуму» датчика, коли коливання значень відбуваються в межах метрологічної похибки.

Апаратний шлюз є центральним контролером, який функціонує в режимі 24/7 і виконує роль медіаконвертера та транслятора протоколів. Кінцеві датчики оперують енергоефективними некомерційними стеками (Zigbee, Thread, BLE), тоді як глобальна мережа та сервери автоматизації функціонують на базі стеків IP-протоколів (Wi-Fi, Ethernet). Шлюз інкапсулює дані з кадрів Zigbee у пакети прикладних протоколів (наприклад, MQTT або HTTP) для подальшого передавання у хмарне сховище або на локальний сервер.

- Локалізація обчислень: Сучасні індустріальні та споживчі шлюзи (під керуванням платформ Home Assistant або Apple HomeKit) підтримують локальне виконання сценаріїв (Edge Computing). У разі спрацювання датчика автоматизація відпрацьовує безпосередньо на шлюзі без звернення до віддалених хмарних серверів, завдяки чому латентність (затримка) системи не перевищує 50 мс.
- Координація мережі: Шлюз постійно сканує радіоефір у режимі слухача (для миттєвого перехоплення критичних сигналів тривоги, як-от протікання води або задимлення) та динамічно актуалізує таблиці маршрутизації мережі.

Енергоспоживання шлюзів, на відміну від датчиків, є безперервним і становить від 2 до 10 Вт із обов'язковим живленням від стаціонарної мережі. Для забезпечення живучості критичних підсистем (безпека, протипожежний захист) шлюзи обов'язково комплектуються джерелами безперебійного живлення (ДБЖ / UPS), що гарантують 5 – 10 годин автономної роботи.

Класифікація пристроїв мережевого рівня:

1. Consumer Hub (Споживчі хаби): готові закриті рішення типу Aqara Hub, Philips Hue Bridge, Google Nest Hub (функціонують за принципом Plug-and-Play).
2. Universal Gateways (Універсальні шлюзи): апаратні USB-трансивери (наприклад, Sonoff Zigbee 3.0 Dongle), інтегровані в одноплатні обчислювальні системи (Raspberry Pi), що є пріоритетним вибором у професійному проєктуванні через здатність об'єднувати понад 100 різнобрендових пристроїв.
3. Промислові роутери: високозахищені маршрутизатори з підтримкою технологій LoRaWAN або 4G/5G для збору телеметрії на значних відстанях.

Енергетичні параметри та зворотний зв'язок На відміну від датчиків, актуатори є основними споживачами електричної енергії. У режимі очікування їх потужність становить 0.5 – 1.5 Вт (підтримка безперервного бездротового зв'язку), а у робочому режимі вони здатні комутувати навантаження потужністю до 3.5 – 4 кВт (наприклад, ТЕНи бойлерів). Більшість актуаторів потребують підключення до мережі 220 В.

Важливою вимогою до виконавчих пристроїв є наявність замкненого контуру керування (Feedback Loop), що передбачає надсилання звітів про статус виконання команди, поточну споживану потужність (енергомоніторинг) та результати самодіагностики (наприклад, блокування механізму крана).

Також під час проєктування комп'ютерних систем автоматизації на виконавчому рівні обов'язково конфігурується параметр Power-on State – безпечний стан реле після відновлення аварійно зниклого живлення. З міркувань безпеки та логіки, системи життєзабезпечення (холодильник, сервери) мають автоматично вмикатися (ON), тоді як пристрої підвищеної небезпеки (праска, електроплита) мають залишатися знеструмленими (OFF).

Для повного розуміння структури витрат розглянемо розподіл статичного енергоспоживання за рівнями системи Smart Home:

1. Рівень сприйняття: робота сенсорів у режимі сну з короткими циклами активації таймера. Енергетичний вплив на загальну мережу об'єкта є нікчемним, проте є критичним для автономності гальванічних елементів.
2. Мережевий рівень: безперервне функціонування процесорів шлюзів, шифрування трафіку, підтримка стеків Wi-Fi. Формує стабільне фонове навантаження в межах 2 – 10 Вт на один пристрій.
3. Виконавчий рівень: постійне живлення приймачів бездротового зв'язку та утримувальних схем реле (0.3 – 1.2 Вт на кожну точку комутації).

Проведемо розрахунок постійного фонового споживання для об'єкта, що містить 50 IoT-пристроїв:

- Мережеве обладнання та шлюзи: ≈ 20 Вт.
- Виконавчі пристрої (30–40 реле/розеток в режимі очікування): ≈ 30 Вт.

Сукупна постійна потужність фонового навантаження, вираховується за формулою 1.2:

$$P_{\text{сумарна}} = 20\text{Вт} + 30\text{Вт} = 50\text{Вт} = 0.05\text{кВт} \quad (1.2)$$

Обчислимо добове споживання електричної енергії за формулою 1.3:

$$E_{\text{добове}} = 0.05\text{кВт} \times 24\text{год} = 1.2\text{кВт/год} \quad (1.3)$$

Відповідно, місячне споживання системи у режимі очікування, вираховуємо за формулою 1.4:

$$E_{\text{місячне}} = 1.2\text{кВт/год} \times 30 = 36\text{кВт/год} \quad (1.4)$$

Якщо середнє статистичне споживання енергії квартирою без автоматизації становить близько 200 кВт/год на місяць, то витрати на забезпечення працездатності розгорнутої IoT-системи складають 18% від загального обсягу споживання.

З метою зниження енергетичних втрат та покращення загального ККД системи пропонуються такі інженерні рішення:

- Перехід на протоколи низької потужності: заміна Wi-Fi-периферії на аналоги, що функціонують на базі Zigbee або Thread. Це дає змогу знизити фонове споживання модулів зв'язку в режимі очікування у 2–5 разів.
- Консолідація та групування апаратних засобів: використання одного багатоканального реле, змонтованого в розподільному щитку, замість встановлення кількох окремих розумних розеток. Це оптимізує енергоспоживання схем живлення вузлів автоматики.
- Інтеграція відновлюваних джерел енергії: підключення локальної мікрогенерації (сонячних панелей із буферними акумуляторами), яка у денні години повністю нівелює фонове навантаження, створюване мережевими та виконавчими пристроями системи автоматизації. Схематичну структуру такої оптимізованої системи наведено на рисунку 1.1.

Структурна схема системи Smart Home

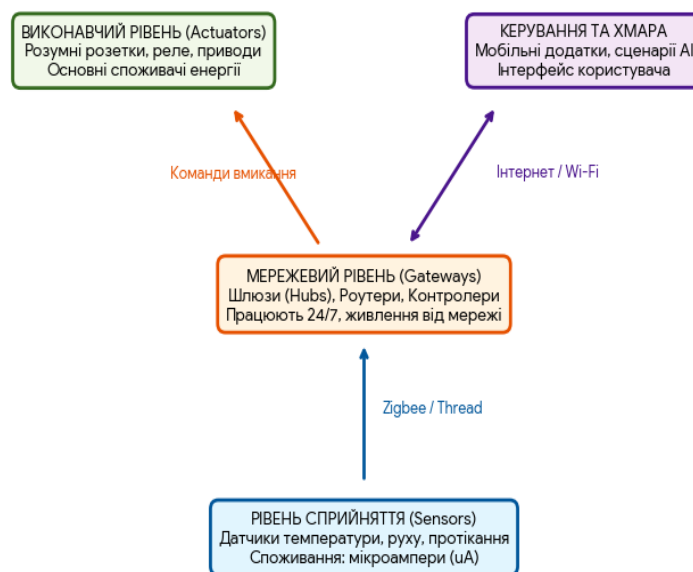


Рисунок 1.1 – Структурна схема рівнів типової системи «Розумний будинок»
(Smart Home)

- Рівень сприйняття (синій колір): первинний збір телеметричної інформації та її передавання на шлюз із жорстким обмеженням пікових струмів для тривалої автономності.
- Мережевий рівень (помаранчевий колір): центральний комутаційний вузол, що здійснює маршрутизацію, конвертацію та локальну обробку сценаріїв; потребує гарантованого безперебійного живлення.
- Виконавчий рівень (зелений колір): силова частина системи, що виконує механічну та комутаційну роботу; є основним об'єктом розрахунку загального енергетичного балансу об'єкта.
- Рівень керування (фіолетовий колір): інтерфейс взаємодії користувача з системою (мобільні застосунки, графічні панелі) та високорівневі сценарії автоматизації, розгорнуті на локальних або хмарних серверах.

1.2 Огляд протоколів передачі даних з низьким енергоспоживанням

Для забезпечення енергоефективної взаємодії компонентів у системах Інтернету речей (IoT) та автоматизації житлових об'єктів застосовують спеціалізовані бездротові протоколи низької потужності (Low-Power Wireless Protocols). Основними критеріями вибору таких технологій є рівень енергоспоживання кінцевих пристроїв, топологія мережі, радіус дії та пропускна здатність каналу зв'язку.

Протокол Zigbee (Стандарт IEEE 802.15.4)

Zigbee є одним із найпоширеніших стандартів для побудови бездротових сенсорних мереж. До його ключових архітектурних особливостей належать:

- Мінімальне енергоспоживання: досягається завдяки відсутності процедури постійного підтримання сесії («рукокоштовання») з базовою станцією, що дає змогу кінцевим пристроям тривалий час перебувати в режимі сну.

- Комірчаста топологія (Mesh): пристрої, які мають постійне живлення від стаціонарної мережі 220 В, виконують функції маршрутизаторів та ретрансляторів. Це дозволяє масштабувати зону покриття без підвищення потужності передавачів кінцевих вузлів.
- Завадостійкість: протокол функціонує в частотному діапазоні 2.4 ГГц. Завдяки малому розміру пакетів даних та механізмам контролю доступу до середовища (CSMA/CA) він мінімально впливає на суміжні мережі Wi-Fi.

Протокол Thread

Сучасний мережевий протокол верхнього рівня, що базується на архітектурі IPv6 та використовує адаптаційний шар 6LoWPAN поверх стандарту IEEE 802.15.4.

- Ефективність масштабування: за показниками енергоспоживання Thread є співмірним із Zigbee, проте демонструє вищу стабільність у великих мережах за рахунок оптимізації службового трафіку, необхідного для підтримання топології.
- Нативна IP-адресація: кожен кінцевий вузол має власну унікальну IPv6-адресу. Це спрощує архітектуру системи, оскільки дозволяє здійснювати безпосередній обмін даними з локальними або хмарними серверами через приграничний маршрутизатор (Border Router) без використання складних шлюзів-трансляторів прикладних протоколів.
- Висока живучість мережі: відсутність єдиної точки відмови (Single Point of Failure) забезпечує динамічну реконфігурацію маршрутів за мілісекунди у разі виходу з ладу будь-якого координатора.

Технологія Bluetooth Low Energy (BLE)

Модифікація стандарту Bluetooth, оптимізована для періодичного передавання малих обсягів даних.

- Пряма взаємодія зі споживчими пристроями: суттєвою перевагою BLE є нативна підтримка протоколу сучасними смартфонами та обчислювальними системами. Це дозволяє здійснювати пряме підключення для конфігурування або зчитування телеметрії (наприклад, із медичних або побутових вимірювальних приладів) без проміжних апаратних хабів.
- Енергетичний профіль: у режимі очікування споживання є вкрай низьким, проте під час трансляції великих пакетів даних воно дещо перевищує показники Zigbee.
- Обмеження: архітектурними недоліками є відносно малий радіус дії та підвищена складність реалізації стабільних комірчастих мереж (Bluetooth Mesh).

Специфікація LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

Протокол, призначений для побудови енергоефективних мереж великого радіуса дії (LPWAN). Його доцільно впроваджувати за умов значного територіального віддалення датчиків (наприклад, для моніторингу параметрів навколишнього середовища на присадибних ділянках або відкритих промислових майданчиках).

- Дальність дії та автономність: забезпечує передавання інформаційних пакетів на відстані від 2 до 15 км за мінімальних енергетичних витрат.
- Обмеження: протокол має вкрай низьку швидкість передавання даних, через що є непридатним для систем, які потребують миттєвого відгуку. Область його застосування обмежена періодичним надсиланням коротких текстових звітів телеметрії (наприклад, один раз на 10 хвилин).

Зведені якісні характеристики розглянутих технологій наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація бездротових протоколів за базовими експлуатаційними критеріями.

Протокол	Дальність	Енергоефективність	Складність мережі
Zigbee	Середня (10–20м)	A+++	Середня (потрібен хаб)
Thread	Середня (10–20м)	A+++	Низька (самоорганізація)
BLE	Мала (2–10м)	A++	Дуже низька (телефон)
LoRaWAN	Велика (2–15км)	A+++	Висока (Потрібна власна станція)

Аналіз критеріїв показує, що за радіусом дії LoRaWAN є абсолютним лідером, тоді як покриття Zigbee та Thread суттєво обмежується конструктивними елементами будівель ($\approx 10 - 100$ м). Водночас усі розглянуті протоколи здатні забезпечити автономне функціонування пристроїв від одного гальванічного елемента впродовж кількох років. Технологія BLE демонструє мінімальні витрати енергії під час ультракоротких сесій зв'язку, але LoRaWAN забезпечує вищу сукупну ефективність завдяки тривалим інтервалам перебування пристрою у стані глибокого сну. За швидкісними показниками лідирує BLE (до $1 - 2$ Мбіт/с), що дає змогу виконувати оновлення вбудованого програмного забезпечення по повітрю (OTA). Протоколи Zigbee та Thread підтримують стабільну швидкість на рівні 250 кбіт/с, а швидкість LoRaWAN є критично низькою і становить $0.3 - 50$ кбіт/с [6].

Детальні кількісні та вартісні параметри бездротових протоколів систематизовано й наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз техніко-економічних параметрів бездротових протоколів

Параметр	Zigbee	Thread	BLE(bluetooth)	LoRaWan
Швидкість передачі	250 кбіт/с	250 кбіт/с	1–2 Мбіт/с	0.3–50 кбіт/с
Дальність (приміщення)	10–20 м	15–30 м	5–10 м	до 500 м
Дальність (відкрита місцевість)	до 100 м	до 150 м	до 50 м	2–15 км
Струм у режимі сну	~1–5 мкА	~5–10 мкА	~2–10 мкА	~1–2 мкА
Струм у режимі передачі	25–40 мА	20–35 мА	15–25 мА	30–120 мА
Вартість впровадження	Низька	Середня	Середня	Висока

Додатковий аналіз апаратних та експлуатаційних витрат дозволяє зробити такі висновки:

1. Струм споживання в режимі сну: усі досліджувані інтерфейси демонструють аналогічні низькі показники, проте у Zigbee та LoRaWAN апаратно-програмні механізми Deep Sleep є найбільш відпрацьованими, що гарантує життєвий цикл сенсорів до 3–5 років від однієї батареї.
2. Струм споживання під час трансляції: BLE має перевагу за рахунок високої швидкості та, як наслідок, мінімальної тривалості активного стану радіомодуля. Передавач LoRaWAN під час генерації сигналу споживає значний струм (до 120 мА), проте загальний енергетичний баланс залишається позитивним завдяки низькій шпаристості включень (наприклад, один раз на годину).
3. Економічна доцільність: на сучасному етапі розвитку технологій стандарт Zigbee є найвигіднішим інженерним рішенням для масового розгортання локальних сенсорних мереж, оскільки світовий ринок насичений доступною та уніфікованою

елементною базою. Натомість розгортання мережі LoRaWAN характеризується високою початковою вартістю через необхідність придбання високовольтних антенно-фідерних пристроїв, промислових шлюзів та організації власних базових станцій для забезпечення стабільного покриття на великих площах.

Для наочного представлення співвідношення розглянутих технічних параметрів розроблено відповідну графічну модель, яку наведено на рисунку 1.2.

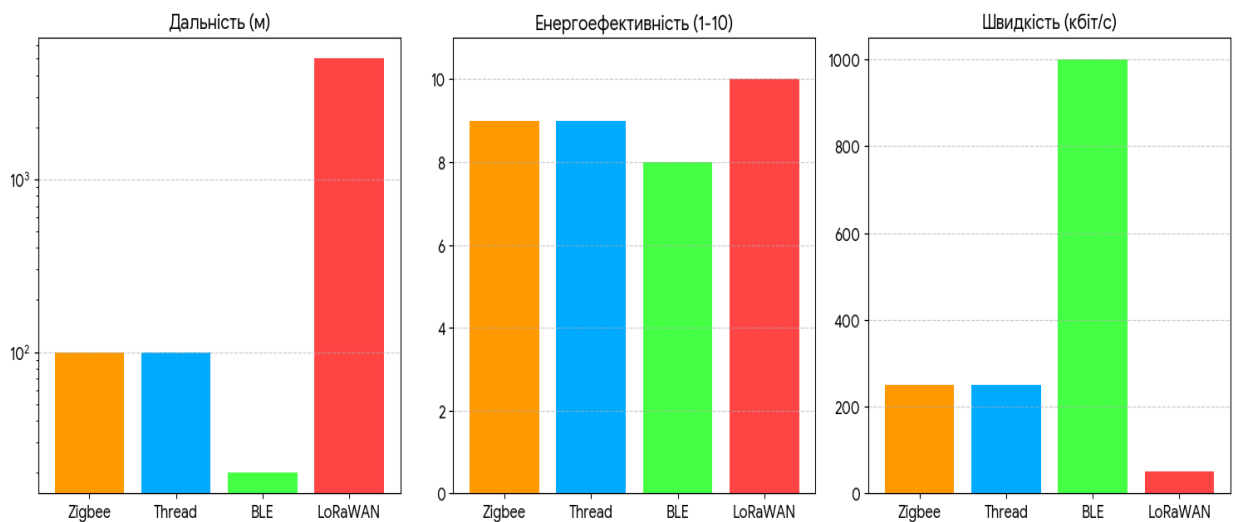


Рисунок 1.2 – Порівняльна інфографіка технічних параметрів бездротових протоколів низької потужності

1.3 Аналіз існуючих алгоритмів оптимізації

Для мінімізації загальних енергетичних витрат та підвищення стабільності функціонування вбудованих систем (embedded systems) у межах екосистеми Smart Home застосовують комплекс алгоритмічних рішень. Ці алгоритми класифікують за рівнем їхнього впровадження в ієрархічній структурі мережі.

Алгоритми оптимізації нижнього (апаратно-мережевого) рівня.

Алгоритм адаптивного циклу активності (Adaptive Duty Cycling): застосовується для пролонгації життєвого циклу автономних джерел живлення кінцевих сенсорів. Замість циклічного пробудження за фіксованим таймером, мікроконтролер динамічно підлаштовує інтервал опитування під контекст середовища. Якщо телеметричні показники (наприклад, температура) стабільні, інтервал пробудження збільшується до 30 хв. У разі фіксації градієнта змін, що перевищує встановлений поріг, алгоритм переводить пристрій у режим інтенсивного моніторингу з інтервалом 1 хв. Це дозволяє заощаджувати від 40 до 60 % енергії гальванічного елемента у періоди спокою системи.

Алгоритми стиснення та агрегації даних (Data Aggregation): орієнтовані на зниження навантаження на комутаційні вузли. Кінцеві пристрої не надсилають виміряні значення миттєво, а накопичують масив даних у локальному буфері для відправлення одним інформаційним пакетом або транслюють лише дельту (різницю) між поточним та попереднім значеннями. Цей підхід мінімізує кількість сесій радіозв'язку, який є найбільш енерговитратним процесом для бездротового модуля.

Алгоритм низькопотужного слухання ефіру (Low Power Listening – LPL): інтегрується у протоколи Zigbee та LoRaWAN для перевірки наявності вхідних команд від координатора. Радіомодуль активується на кілька мілісекунд для дискретного сканування ефіру на наявність преамбули пакета (Preamble Sampling). Якщо сигналу не виявлено, трансивер миттєво переходить у режим Deep Sleep, що забезпечує цілодобову готовність до приймання даних за умов мікроамперного середнього споживання.

Алгоритми оптимізації маршрутизації в комірчастих мережах (Mesh Routing Optimization): базуються на алгоритмах Дейкстри або дистанційно-векторної маршрутизації (AODV). Вони здійснюють безперервний моніторинг метрик якості зв'язку (RSSI, LQI) між сусідніми вузлами. Якщо певний ретранслятор перевантажений або характеризується високим рівнем затухання

сигналу, мережа автоматично переспрямовує трафік через альтернативні вузли, запобігаючи локальному виснаженню батарей проміжних пристроїв.

Протокол CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance): метод множинного доступу з контролем носійної та запобіганням колізіям. Перед початком трансляції трансивер аналізує стан радіоефіру. У разі виявлення активності іншого передавача, пристрій відкладає відправку на випадковий проміжок часу (Backoff Time). Це дозволяє мінімізувати кількість повторних відправлень пакетів (Retransmissions), які деструктивно впливають на енергетичний баланс мережі [18].

Зв'язок розглянутих алгоритмів із рівнями впровадження та їхній цільовий вплив на систему систематизовано в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Співвідношення алгоритмів оптимізації з рівнями архітектури IoT

Алгоритм	Оптимізація	Рівень впровадження
Duty Cycling	Ресурс батареї	Датчик (Firmware)
Aggregation	Трафік мережі	Шлюз / Контролер
Mesh Routing	Надійність зв'язку	Мережевий протокол
CSMA/CA	Пропускна здатність	Радіомодуль

Для забезпечення комплексного енергоменеджменту на вищих рівнях архітектури інформаційна взаємодія відбувається за схемою, рисунок 1.3:

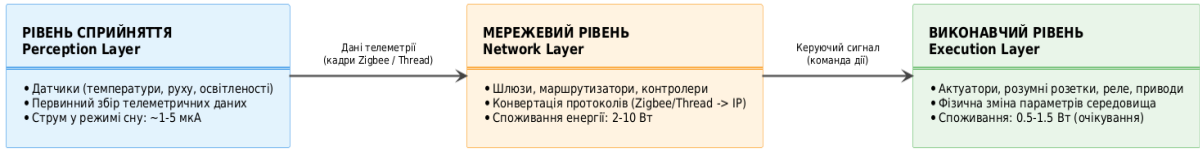


Рисунок 1.3 – Структурна схема інформаційної взаємодії та ієрархії рівнів системи «Розумний будинок»

Наприклад, датчик струму (рівень сприйняття) вимірює миттєву потужність бойлера, центральний шлюз (мережевий рівень) синхронізує часові мітки через NTP-сервер з Інтернету, а розумне реле (виконавчий рівень) здійснює безпосередню комутацію навантаження.

Алгоритми часового планування (Scheduling) та керування попитом.

Оптимізація витрат за умов багатозонної тарифікації в Україні (зокрема, з використанням коефіцієнта 0.5 для нічного тарифу з 23:00 до 07:00) реалізується за допомогою двох математичних моделей планування:

1. Статичний (жорсткий) розклад: увімкнення високопотужних споживачів відбувається директивно у фіксовані часові мітки (наприклад, рівно о 23:00).
2. Динамічне вікно планування: алгоритм аналізує цільовий дедлайн (наприклад, забезпечення температури води на рівні $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 08:00) та на основі математичної моделі теплоємності обчислює необхідний час нагріву (наприклад, 2 год). Запуск пристрою автоматично зміщується на 06:00, що мінімізує теплові втрати та забезпечує споживання електроенергії виключно в межах пільгового тарифного вікна.

До основних об'єктів планування з високим потенціалом енергозбереження належать: електричні бойлери (нагрів 80 – 100 л води), електрична тепла підлога (акумуляція тепла бетонною стяжкою вночі та її поступова віддача вдень), посудомийні й пральні машини (відкладений старт), а також зарядні станції електромобілів (EV) та портативні накопичувачі енергії.

Алгоритм запобігання перевантаженню мережі (Load Shedding).

Одночасна активація кількох потужних приладів у момент настання пільгового тарифу (23:00) створює критичне пікове навантаження, що призводить до спрацьовування систем струмового захисту на вводі в будівлю. Для запобігання цьому розроблено алгоритм динамічного витіснення навантаження. Алгоритм встановлює черговість та пріоритетність запусків: спочатку активується бойлер; після досягнення цільової температури та падіння його споживання до нуля, дозвіл на запуск отримує пральна або посудомийна машина. Таким чином, сумарне пікове навантаження об'єкта штучно утримується в межах встановленого ліміту (наприклад, $P_{\text{пik}} \leq 5\text{ кВт}$).

Економічний ефект від інтеграції часового планування наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Оцінка економічної ефективності алгоритмів часового планування

Найменування обладнання	Середнє місячне споживання	Економічний ефект від впровадження
Електричний бойлер	$\approx 150 - 200$ кВт/год	Зниження вартості на 50% (нічний коефіцієнт)
Система «Тепла підлога»	$\approx 100 - 300$ кВт/год	Зниження вартості на 50% (нічний коефіцієнт)
Сумарно	$\approx 250 - 500$ кВт/год	Суттєве зниження фінансових витрат

Реалізація макросценаріїв автоматизації

Для комплексного керування станом об'єкта розробляють статичні макросценарії, що переводять обладнання у фіксовані режими роботи.

- Сценарій «Відсутність» (Away Mode): орієнтований на безпеку та базове енергозбереження. Виконавчий рівень знеструмлює неперіоритетні розеткові лінії (Master Off), блокує електрозамки та вимикає освітлення. Рівень сприйняття переводить датчики руху в режим охорони. Споживання енергії падає до мінімального рівня (активними залишаються лише критичні вузли: роутер, холодильник, системи безпеки).
- Сценарій «Ніч» (Sleep Mode): інтегрує комфорт із нічним тарифом. О 23:00 запускаються алгоритми нагріву, кліматична система (HVAC) знижує цільову температуру в спальних кімнатах на $2 - 3$ °C (що зменшує витрати теплової енергії), розумні штори закриваються, а освітлення переходить у режим нічників із рівнем димування до 10% за сигналами від датчиків руху.
- Сценарій «Відпустка» (Vacation Mode): режим максимальної консервації ресурсів. Кліматичні системи переводяться в режим

запобігання замерзанню (підтримка температури на рівні $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$). Магістральні крани водопостачання блокуються сервоприводами для унеможливлення затоплення. Додатково впроваджується алгоритм імітації присутності (хаотичне короткочасне увімкнення світла в різних зонах у вечірній час) [5].

Кількісне порівняння енергетичних профілів розглянутих макросценаріїв наведено в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Порівняльний аналіз енергетичних профілів макросценаріїв

Сценарій автоматизації	Функціональний стан обладнання	Середня потужність ($P_{\text{сер}}$, Вт)	Коефіцієнт економії
Сценарій автоматизації	Усі підсистеми активні в штатному режимі	300 – 800 Вт	0% (базис)
Базовий (Звичайний)	Активні виключно критичні лінії живлення	50 – 100 Вт	$\approx 70\%$
«Відсутність»	Глибока консервація, режим антизамерзання	20 – 40 Вт	$\approx 90\%$

Ініціація сценаріїв може здійснюватися декількома методами: голосовими командами (через віртуальних асистентів), фізичним замиканням тригерів (кнопки сценаріїв, зчитування міток RFID/NFC), геозонуванням (Geofencing – визначення віддалення смартфона користувача від координат об'єкта) або повністю адаптивно – на основі аналізу даних від датчиків присутності й освітленості.

Адаптивне керування на основі сенсорного аналізу

Ефективність адаптивного керування базується на коректному виборі первинних вимірювальних перетворювачів:

- Пасивні інфрачервоні датчики руху (PIR): фіксують зміну теплового випромінювання під час значних переміщень об'єктів. Характеризуються мікроамперним споживанням, є оптимальними для прохідних зон (коридори, сходи).

- Мікрохвильові радары присутності (mmWave): функціонують у міліметровому діапазоні хвиль на основі ефекту Доплера. Здатні детектувати мікрорухи (дихання, рух пальців), що унеможливорює хибне вимкнення автоматики, коли людина перебуває у статичному положенні.
- Датчики освітленості (Lux Sensors): дозволяють реалізувати алгоритм постійного рівня світла (Constant Light Control / Daylight Harvesting). Якщо рівень природної інсоляції високий, система димує штучне LED-освітлення або закриває штори за допомогою актуаторів, зменшуючи теплове навантаження на кондиціонер та заощаджуючи електроенергію.

Результати взаємодії датчиків із об'єктами керування зведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Матриця реакції об'єктів адаптивного керування

Тип сенсора	Об'єкт безпосереднього керування	Отриманий інженерний ефект
PIR (Інфрачервоний)	Комутація освітлення в прохідних зонах	Зведення споживання до 0 Вт за відсутності транзитного трафіку
mmWave (Радарний)	Керування HVAC, робочим освітленням	Прецизійне підтримання комфорту без помилкових вимкнень ліній
Lux (Освітленості)	Димери LED-драйверів, сервоприводи штор	Максимізація використання природної сонячної інсоляції

Дані, наведені у таблиці 1.7, підтверджують, що кожен тип датчика вирішує свою локальну задачу оптимізації. Застосування класичних інфрачервоних датчиків руху (PIR) є найбільш ефективним у прохідних зонах (коридори, тамбури, сходи), оскільки вони дозволяють повністю нівелювати непродуктивні витрати енергії, зводячи споживання до 0 Вт, коли приміщення порожнє.

Проте для житлових кімнат, де людина може тривалий час перебувати у малорухомому стані, доцільно використовувати мікрохвильові радары

(mmWave). Вони працюють на основі ефекту Доплера і фіксують навіть мікрорухи (дихання), що гарантує точне утримання теплового та світлового комфорту без хибних вимкнень обладнання.

У свою чергу, інтеграція датчиків освітленості (Lux) дозволяє реалізувати концепцію збору денного світла (Daylight Harvesting), автоматично регулюючи рівень димування штучних LED-ламп або положення електроприводів штор, максимально використовуючи сонячну енергію [3].

1.4 Постановка задачі на розробку системи оптимізації

На основі проведеного аналізу існуючих рішень, архітектурних особливостей та бездротових протоколів передачі даних було визначено, що найбільший потенціал енергозбереження та регулювання навантаження зосереджений на виконавчому рівні системи Smart Home. Саме на цьому рівні функціонують високопотужні побутові споживачі електричної енергії: електричні бойлери, кліматичні комплекси та системи підігріву підлоги. Організація автоматизованого моніторингу та динамічного керування режимами роботи зазначеного обладнання дозволяє досягти найвищого техніко-економічного ефекту.

Для створення надійного, функціонального та бюджетного прототипу системи обрано елементну базу з оптимальним співвідношенням вартості та обчислювальної потужності, що має широку підтримку у професійній спільноті розробників:

- Центральний обчислювальний контролер: система на кристалі (SoC) ESP32 (модуль ESP32-WROOM-32E). Вибір зумовлений наявністю двоядерного 32-розрядного процесора Xtensa LX6 із тактовою частотою 240 МГц, інтегрованих апаратних модулів Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) та Bluetooth v4.2 BR/EDR і BLE. Обсягу вбудованої флешпам'яті (4 МБ) достатньо для розгортання локального вебсервера або інтеграції прикладних протоколів передачі даних. Мікроконтролер підтримує режими глибокого сну

(Deep Sleep), що забезпечує гнучкість проєктування, хоча для центрального координатора з постійним живленням цей параметр є вторинним.

- Вимірювальний метрологічний модуль: PZEM-004T (версія v3.0). Модуль реалізує безконтактний метод вимірювання сили струму за допомогою зовнішнього трансформатора струму (тороїдального кільця). Це забезпечує гальванічну ізоляцію високовольтної частини від низьковольтної логічної плати мікроконтролера, підвищуючи безпеку експлуатації. Модуль здійснює прецизійне вимірювання напруги, сили струму, активної потужності, частоти мережі, сумарної спожитої енергії та коефіцієнта потужності ($\cos \phi$). Передача телеметрії на ESP32 здійснюється через апаратний інтерфейс UART.
- Комутаційні елементи: релейні модулі з оптичною розв'язкою. Для комутації навантажень помірної потужності (до 2 кВт) передбачено використання електромагнітних реле із номінальним струмом 10 А / 16 А (серій Sanyou або Songle) з обов'язковим оптосимісторним захистом кіл керування GPIO. Для високопотужних ліній (електричні бойлери, варильні поверхні) передбачено інтеграцію твердотільних реле (SSR-40DA, розрахованих на струм до 40 А) або модульних контакторів, що керуються через проміжні малопотужні реле.

Розробка структури пристрою та мережева інтеграція

Система проєктується за радіально-вузловою топологією. Вхідні силові кола напругою 220 В підключаються до головного модуля PZEM-004T для фіксації інтегральних параметрів введення, а також до окремих модулів PZEM, встановлених на виділених лініях пріоритетних споживачів. Обчислювальне ядро на базі ESP32 обробляє отримані дані та формує керуючі сигнали на блоки гальванічно розв'язаних реле. Живлення низьковольтної

частини здійснюється від імпульсного перетворювача живлення AC-DC (наприклад, Hi-Link HLK-PM01, 220 В $\rightarrow$ 5 В).

Для інтеграції пристрою в локальну інформаційну мережу об'єкта обрано прикладний протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), що функціонує поверх транспортного протоколу TCP/IP (через Wi-Fi). Протокол MQTT мінімізує об'єм службового трафіку (мінімальний розмір заголовка пакета становить 2 байти), реалізує патерн архітектури «публікація-підписка» (publish-subscribe) та характеризується низькими вимогами до обчислювальних ресурсів мікроконтролера ESP32.

Алгоритм динамічного перерозподілу потужності (Load Shedding)

Програмне забезпечення системи реалізує алгоритм динамічного обмеження навантаження, який у реальному часі аналізує такі параметри: поточна сумарна потужність споживання, встановлений граничний ліміт потужності для об'єкта, поточна тарифна зона (з урахуванням нічного коефіцієнта 0.5 у період з 23:00 до 07:00) та матриця пріоритетності пристроїв.

Впроваджено таку ієрархію пріоритетів навантажень:

1. Пріоритет 1 (Високий / High): лінії внутрішнього освітлення, побутові холодильні установки, телекомунікаційне обладнання (роутери, шлюзи). Ці лінії є невідокремлюваними та за жодних умов автоматично не вимикаються.
2. Пріоритет 2 (Середній / Medium): системи кондиціонування повітря, пральні та посудомийні машини. Деактивуються алгоритмом лише у разі тривалого та критичного перевищення загального ліміту потужності.
3. Пріоритет 3 (Низький / Low): електричні бойлери, системи підігріву підлоги. Є основними об'єктами регулювання; деактивуються першими у денний час у разі виникнення пікових навантажень, а в нічний час отримують максимальний допуск до електромережі.

Програмна реалізація алгоритму здійснюється мовою C++ у середовищі розробки Arduino IDE.

Проектування та створення вимірювального лабораторного стенда

Для безпечного проведення експериментальних досліджень, верифікації розроблених методів оптимізації та налагодження програмного коду створюється ізольований лабораторний стенд.

До складу стенда входять:

- Імітатори навантаження: лампа розжарювання потужністю 100 Вт (імітація споживача 1-го пріоритету), тепловентилятор із дискретними ступенями регулювання потужності 1000 Вт та 2000 Вт (імітація споживачів 2-го та 3-го пріоритетів).
- Захисна автоматика: двополюсний автоматичний вимикач, суміщений із пристроєм захисного вимкнення (ПЗВ) на номінальний струм 16 А, що забезпечує захист кіл від коротких замикань та струмів витоку.
- Конструктивне виконання: діелектричний пластиковий щиток, усередині якого монтуються шини живлення, плата ESP32, блоки реле та модулі телеметрії PZEM-004T.
- Реєстрація метрик: логування параметрів та побудова графіків перемикачів реле й динаміки споживання потужності здійснюється в реальному часі шляхом передачі MQTT-повідомлень на сервер локальної автоматизації (Home Assistant / Node-RED).

Порівняльний аналіз та оцінка економічної ефективності

Для оцінки ефективності розробленої системи сформовано дві моделі профілю добового енергоспоживання умовного об'єкта (квартири), що обладнаний бойлером (2 кВт) та теплою підлогою (1.5 кВт).

- Базова модель профілю споживання (до впровадження системи): увімкнення високопотужних споживачів відбувається хаотично, збігаючись із загальносистемними піками споживання (ранок / вечір). Сукупне добове споживання становить 20 кВт/год, при

цьому розподіл за зонами становить: у денний період – 15 кВт/год, у нічний період – 5 кВт/год.

- Оптимізована модель профілю споживання (після впровадження системи): алгоритм Load Shedding примусово переносить цикли роботи бойлера та підігріву підлоги на проміжок дії пільгового тарифу (23:00–07:00), а вдень динамічно вимикає їх під час активації інших короткочасних потужних приладів (електрочайник, мікрохвильова піч). Сумарне добове споживання через покращення термодинамічного контролю становить 19.5 кВт/год, проте профіль розподілу змінюється: 6 кВт/год у денну зону та 13.5 кВт/год у нічну зону.

Для фінансового розрахунку прийнято діючі нормативні тарифи для населення України: денний тариф $T_{\text{день}} = 4.32 \text{ грн/кВт*год}$, нічний тариф (із коефіцієнтом 0.5) $T_{\text{ніч}} = 2.16 \text{ грн/кВт*год}$.

Розрахунок фінансових витрат для базової моделі за формулою 1.5:

$$B_{\text{до}} = (15 \times 4.32) + (5 \times 2.16) = 64.80 + 10.80 = 75.60 \text{ грн/добу} \quad (1.5)$$

Розрахунок фінансових витрат для оптимізованої моделі за формулою 1.6:

$$B_{\text{після}} = (6 \times 4.32) + (13.5 \times 2.16) = 25.92 + 29.16 = 55.08 \text{ грн/добу} \quad (1.6)$$

Економічний ефект від впровадження системи становить:

- За добу: $\Delta B_{\text{доба}} = 75.60 - 55.08 = 20.52 \text{ грн.}$
- За місяць (30 діб): $\Delta B_{\text{місяць}} = 20.52 \times 30 = 615.60 \text{ грн.}$

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналітичного огляду науково-технічної літератури та існуючих комерційних рішень досліджено трирівневу ієрархічну структуру систем «Розумний будинок» (Smart Home), яка включає рівень сприйняття (первинні сенсори), мережевий рівень (центральні шлюзи та маршрутизатори) та виконавчий рівень (актуатори та силова комутаційна техніка). Визначено, що якщо на нижніх рівнях архітектури оптимізація

орієнтована переважно на мікроамперні стратегії (алгоритми глибокого сну мікроконтролерів, апаратні переривання та фільтрація даних за дельтою), то виконавчий рівень безпосередньо формує загальний енергетичний баланс і визначає фінансові витрати об'єкта автоматизації.

Проведено порівняльний аналіз сучасних бездротових протоколів передачі даних із низьким енергоспоживанням (Zigbee, Thread, BLE, LoRaWAN). На основі аналізу технічних та вартісних параметрів доведено, що для побудови внутрішньобудинкових локальних сенсорних мереж оптимальними є стандарти Zigbee та Thread завдяки підтримці комірчастої топології (Mesh), механізмам самоорганізації мережі, високій завадостійкості та низькому струму споживання в режимах очікування $\approx 1 - 10$ мкА). Виявлено, що протокол LoRaWAN, попри значний радіус дії, є економічно недоцільним для локальних об'єктів через високу вартість базових станцій та обмежену швидкість передачі даних.

Розглянуто існуючі математичні методи та алгоритми оптимізації радіообміну й трафіку в бездротових мережах Інтернету речей (IoT), зокрема Adaptive Duty Cycling та метод множинного доступу з контролем носійної й запобіганням колізіям CSMA/CA. Встановлено, що для досягнення максимального фінансового й енергетичного ефекту в умовах діючих багатозонних тарифів в Україні необхідна розробка комплексного сценарного керування та алгоритмів запобігання перевантаженню мережі будівлі (Load Shedding). Такі алгоритми мають функціонувати на принципах динамічного часового планування та покрокового витіснення неперіоритетних споживачів на основі аналізу телеметрії в реальному часі.

На основі виявленого технологічного розриву між складними високорівневими математичними моделями та обмеженими ресурсами мікропроцесорної техніки низького цінового діапазону сформульовано технічне завдання на розробку системи. Обґрунтовано вибір двоядерного мікроконтролера ESP32, метрологічного модуля PZEM-004T v3.0 та комутаційних елементів із гальванічною розв'язкою. Визначено структуру

експериментального лабораторного стенда та розраховано очікуваний економічний ефект від впровадження алгоритму динамічного перерозподілу потужності, який дозволяє знизити добові фінансові витрати на оплату електроенергії на $\approx 27\%$.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

2.1 Обґрунтування вибору апаратної платформи

Для побудови надійної, масштабованої та економічно ефективної системи автоматичного керування й розподілу навантаження (Smart Load Shedding) на етапі проєктування було проведено комплексний аналіз ринку сучасної мікропроцесорної техніки, засобів метрологічного вимірювання та комутаційної апаратури. Основними критеріями відбору елементної бази слугували обчислювальна швидкість, архітектурна латентність, точність реєстрації електричних параметрів, рівень гальванічної ізоляції (електробезпеки) та загальна енергоефективність.

Центральний обчислювальний модуль (Мікроконтролер)

Реалізація алгоритмів динамічного перерозподілу потужності у реальному часі потребує застосування обчислювального ядра з низькою латентністю та інтегрованим апаратним стеком мережових протоколів. У межах дослідження було проведено порівняльний аналіз трьох поширених мікроконтролерних архітектур низького цінового діапазону: ATmega328P (платформа Arduino), STM32F103 (сімейство ARM Cortex-M3 від STMicroelectronics) та ESP32 (архітектура Xtensa від Espressif Systems).

На основі аналізу технічних характеристик для реалізації центрального хаба системи було обрано систему на кристалі (SoC) ESP32-WROOM-32E. Головною перевагою даного чипа є наявність двоядерного 32-розрядного процесора, що дозволяє реалізувати концепцію асинхронного розподілу задач на рівні операційної системи реального часу (FreeRTOS):

- Обчислювальне ядро 0 (Core 0): повністю виділяється під обслуговування мережевого стека, підтримання бездротового з'єднання Wi-Fi та функціонування MQTT-клієнта.
- Обчислювальне ядро 1 (Core 1): безперервно виконує циклічний прикладний алгоритм оптимізації Load Shedding, здійснює

опитування вимірювальних модулів та керує станом виконавчих пристроїв.

Значний обсяг інтегрованої флешпам'яті (4 МБ) дозволяє розгорнути енергоефективний асинхронний вебсервер (на базі бібліотеки ESPAsyncWebServer) для конфігурування системи користувачем через веб-інтерфейс, а також підтримувати протоколи безпеки TLS/SSL для шифрування IoT-трафіку без деградації загальної швидкодії системи [14].

Модуль моніторингу параметрів електричної мережі

Для забезпечення високоточного контролю поточного енергоспоживання об'єкта автоматизації було розглянуто два методологічні підходи: розробка дискретного тракту на основі аналогових датчиків струму, що функціонують на ефекті Холла (зокрема, лінійок ACS711 / ACS712), або інтеграція спеціалізованого цифрового вимірювального модуля PZEM-004T (версія v3.0).

Недоліки дискретних аналогових рішень на базі мікросхем ACS712 полягають у необхідності безперервного високочастотного квантування сигналу за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтролера для подальшого програмного обчислення середньоквадратичного значення (True RMS) сили струму. Будь-які високочастотні шуми в колі живлення або нелінійність вимірювального тракту вносять суттєву похибку в кінцеві результати. Крім того, базові аналогові датчики струму не здатні фіксувати фазовий зсув (коефіцієнт потужності $\cos\phi$) та частоту змінної напруги без розгортання додаткових апаратних схем детектування перетину фази через нуль.

Переваги модуля PZEM-004T (v3.0) зумовлені його архітектурою, базою якої є високоспеціалізований енергетичний метрологічний процесор SD3004. Ця мікросхема виконує апаратне інтегрування та первинну обробку сигналів струму й напруги. До ключових переваг модуля належать:

- Безконтактне вимірювання: модуль комплектується зовнішнім трансформатором струму (тороїдальним кільцем рознімного або

суцільного типу), що унеможливорює необхідність розриву силової лінії, спрощує монтаж та мінімізує виділення тепла.

- Гальванічна ізоляція: інформаційний обмін із мікроконтролером ESP32 здійснюється через цифровий інтерфейс UART за допомогою протоколу Modbus-RTU. Наявність вбудованих високошвидкісних оптопар забезпечує надійний захист низьковольтної логіки від пробоя високої напруги 220 В.

Модуль надає сформований масив телеметричних даних із відносною похибкою вимірювань, що не перевищує $\pm 0.5\%$. Структуровані технічні параметри модуля наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Метрологічні та експлуатаційні характеристики модуля PZEM-004T v3.0

Вимірювальний параметр	Діапазон вимірювання	Дискретність (роздільна здатність)	Похибка вимірювання
Напруга мережі (U)	80 – 260 В	0.1 В	$\pm 0.5\%$.
Сила струму (I)	0 – 100 А	0.001 А	$\pm 0.5\%$.
Активна потужність (P)	0 – 23 кВт	0.1 кВт	$\pm 0.5\%$.
Частота мережі (f)	45 – 65 Гц	0.1 Гц	$\pm 0.5\%$.
Коефіцієнт потужності ($\cos\phi$)	0.00 – 1.00	0.01	$\pm 0.1\%$.
Інтегральна енергія (E)	0 – 9999.99 кВт*год	1 кВт*год	$\pm 0.5\%$.

Силовa комутаційна апаратура (Реле)

Вибір виконавчих елементів безпосередньо визначається характером електричного навантаження (активне або індуктивне) та розрахунковою частотою перемикачів у межах алгоритму динамічного розподілу потужності. Для реалізації гнучкого та зносостійкого керування було застосовано диференційований підхід, що передбачає поділ комутаційних блоків на два типи.

Електромагнітні реле (Electromechanical Relays – EMR)

Для силових ліній із низькою частотою комутації (наприклад, накопичувальні електричні бойлери, ТЕНи систем опалення), де зміна стану відбувається не частіше кількох разів на годину, обрано модулі на базі реле Songle/Sanyou з номінальним струмом контактів 16 А при напрузі змінного струму 250 В.

Особливості апаратної інтеграції: Оскільки номінальна потужність підключених побутових приладів може становити 3.0 – 3.5 кВт, контакти електромагнітних реле функціонують у режимах високих теплових навантажень через виникнення електричної дуги в момент розмикання кола. Для захисту керуючої логіки плати комутації обов'язково обладнуються транзисторними ключами (транзисторні масиви Дарлінгтона ULN2003) та вузлами оптичної розв'язки на базі оптопар PC817. Це дозволяє ефективно гасити зворотні імпульси електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції від котушки реле, запобігаючи виникненню апаратних збоїв та скидань мікроконтролера ESP32.

Інженерне зауваження: Для комутації ліній із навантаженням, що перевищує 3.5 кВт, вбудоване реле плати використовується як проміжний (пілотний) елемент, який комутує котушку живлення промислового модульного контактора відповідного номіналу.

Твердотільні реле (Solid State Relays – SSR)

Для ліній, які за логікою алгоритму потребують підвищеної частоти комутації, або для приміщень із жорсткими вимогами щодо відсутності акустичного шуму (системи кондиціонування, локальний електричний обігрів «тепла підлога»), обрано твердотільні реле типу SSR-40DA з номінальним струмом 40 А (з урахуванням необхідного коефіцієнта апаратного запасу міцності).

Особливості апаратної інтеграції: Реле типу SSR функціонують на базі потужних симісторів (Triac) з інтегрованою оптичною ізоляцією та вбудованою схемою контролю переходу фази через нуль (Zero-Cross Circuit).

Зазначена схема забезпечує замикання та розмикання силового кола виключно в момент, коли амплітудне значення синусоїди напруги дорівнює 0 В. Це повністю нівелює комутаційні перенапруги в мережі, усуває високочастотні радіоперешкоди та суттєво продовжує експлуатаційний ресурс підключеного обладнання.

Оскільки під час проходження струму на напівпровідниковій структурі симістора виникає статичне падіння напруги (порядку 1.2 – 1.5 В), це призводить до виділення теплової потужності до 15 – 20 Вт за максимальних навантажень. Тому модулі SSR в обов'язковому порядку монтуються на пасивні алюмінієві радіатори охолодження з використанням термоінтерфейсу.

Завдяки такій комбінації апаратних засобів створюється збалансована диференційована система керування: економічно вигідні та надійні електромагнітні реле комутують статичні нагрівальні ТЕНи, тоді як безшумні, швидкісні твердотільні реле забезпечують гнучке адаптивне керування динамічними споживачами електроенергії.

2.2 Розробка структурної схеми системи

Для первинного моделювання, верифікації працездатності електричних кіл та налагодження базової логіки взаємодії апаратних компонентів було розроблено віртуальний прототип системи у середовищі комп'ютерного моделювання Tinkercad Circuits. Використання зазначеного САПР дозволяє здійснити попереднє тестування алгоритмів та схемотехнічних рішень без ризику пошкодження реальних фізичних компонентів високою напругою промислової мережі.

Оскільки стандартна бібліотека компонентів Tinkercad орієнтована на базові мікроконтролерні плати, архітектура периферійного Edge-контролера ESP32 на схемі була еквівалентно змодельована за допомогою обчислювального ядра на базі мікроконтролера ATmega328P. При цьому силову комутаційну та вимірювальну периферію підключено до відповідних

цифрових шин і аналогових каналів введення-виведення з дотриманням логіки розподілу сигналів.

Проектована система базується на модульному принципі. Центральний обчислювальний контролер здійснює циклічне зняття телеметричних показників із вимірювальних вузлів PZEM-004T, аналізує поточні часові мітки та формує сигнали керування для виконавчих реле силових ліній. Повну архітектуру взаємодії та комутації елементів системи наведено на структурній схемі (див. рисунок 2.1).

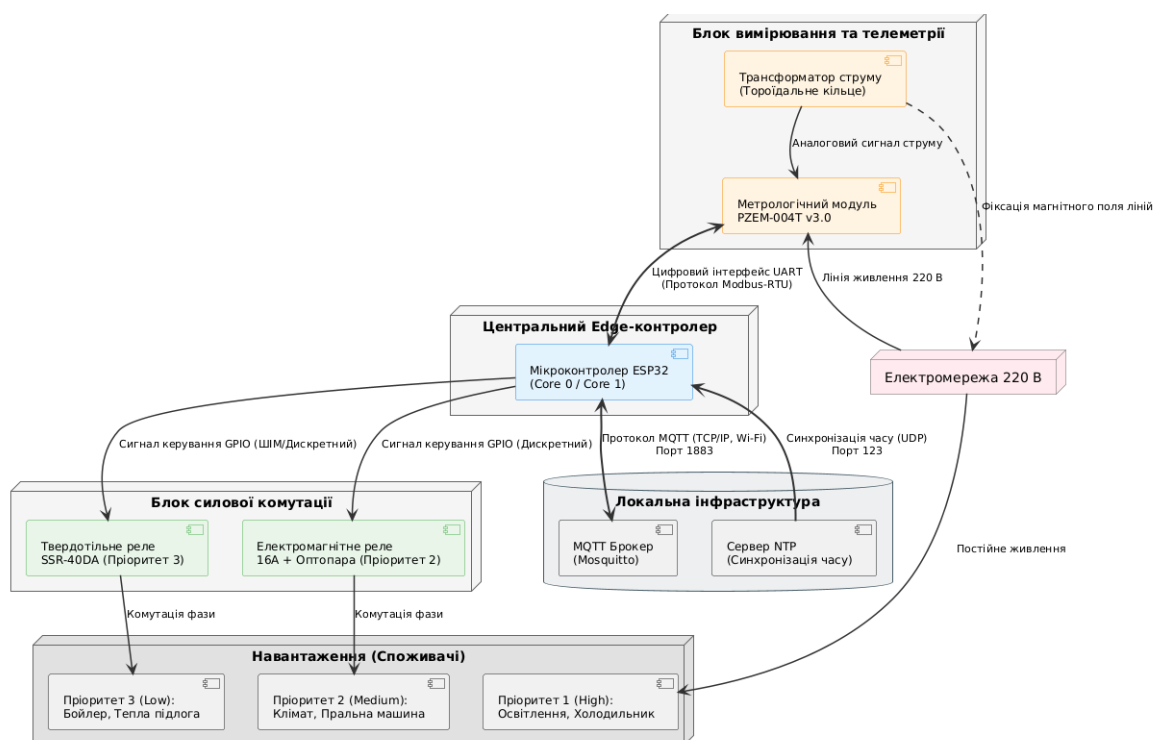


Рисунок 2.1 – Структурна схема взаємодії компонентів та мережевої інтеграції системи керування енергоспоживанням

Інтеграція у локальну мережу за енергоефективними протоколами

Для забезпечення повної автономності підсистеми прийняття рішень Edge-контролер функціонує в локальному режимі, проте інтегрується в домашню інформаційну мережу об'єкта за допомогою бездротового інтерфейсу Wi-Fi із розгортанням двох мережевих протоколів:

- Протокол NTP (Network Time Protocol): інформаційна взаємодія здійснюється через транспортний UDP-порт 123. Мікроконтролер із встановленою періодичністю (один раз на добу) виконує синхронізацію внутрішнього апаратного таймера реального часу (RTC) із зовнішнім або локальним сервером точного часу. Зазначене рішення є критично важливим для забезпечення точної прив'язки алгоритму автоматизації до меж дії тарифних зон (денного та нічного тарифів) без необхідності ускладнення схемотехніки пристрою зовнішніми апаратними модулями реального часу (наприклад, мікросхемами типу DS3231).
- Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport): легковагий і асинхронний протокол прикладного рівня, що функціонує поверх транспортного стека TCP/IP (стандартний порт 1883). Передача структурованого масиву телеметричних даних (вектори напруги, сили струму, активної потужності та поточного стану реле) реалізується у вигляді коротких текстових повідомлень у відповідні інформаційні топіки локального сервера (MQTT-брокера Mosquitto). Використання патерну «публікація-підписка» дозволяє суттєво мінімізувати тривалість активної фази роботи радіотракту мікроконтролера ESP32, зменшити накладні витрати (оверхед) на формування пакетів та оптимізувати обсяг мережевого трафіку порівняно з протоколами архітектурного стилю HTTP REST API.

Експериментальна верифікація схемотехнічних рішень

Для перевірки базових принципів гальванічної розв'язки та релейної комутації у середовищі Tinkercad Circuits було змонтовано принципову електричну схему вузла керування виконавчим рівнем (див. рисунок 2.2). Оскільки дане середовище має обмежену базу компонентів, схема демонструє концептуальний підхід до узгодження логічних рівнів мікроконтролера із силовими комутаційними пристроями.

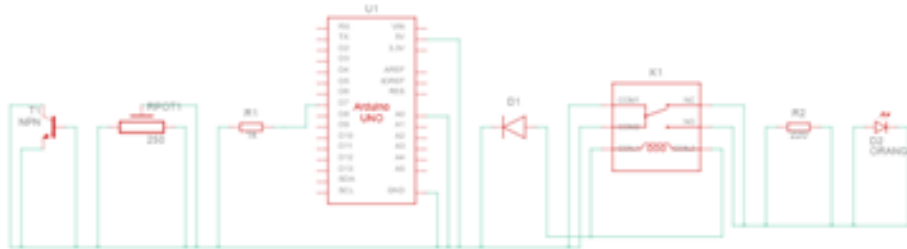


Рисунок 2.2 – Електрична принципова схема вузла релейної комутації в середовищі моделювання Tinkercad Circuits

Під час аналізу віртуального прототипу (див. рисунок 2.2) було визначено базову топологію підключення периферії:

- Керуюча логіка: вивід загального призначення D_8 мікроконтролера U_1 (Arduino UNO) використовується як джерело дискретного сигналу для зміни стану виконавчого механізму.
- Вузол комутації: електромагнітне реле K_1 виконує функцію фізичного розмикання кола живлення кінцевого споживача. Магнітна котушка реле (виводи COIL1 та COIL2) підключена до системи через напівпровідниковий діод D_1 .
- Індикація та навантаження: вторинне коло реле через нормальний-відкритий контакт (NO) та обмежувальний резистор R_2 номіналом 220 Ом підключене до світлодіода D_2 (помаранчевого кольору), який виконує роль візуального індикатора подачі напруги на виконавчу лінію.

2.3 Алгоритмічне забезпечення системи

Ефективність функціонування розробленого апаратно-програмного комплексу безпосередньо залежить від математичної коректності, обчислювальної складності та швидкодії закладеного в нього алгоритму прийняття рішень. Основною метою функціонування прикладного програмного забезпечення є динамічне утримання поточного значення сумарної споживаної активної потужності об'єкта P_{Σ} у межах встановленого безпечного апаратного ліміту P_{limit} за мінімально можливої кількості комутаційних циклів силових реле.

Для досягнення визначеної мети було розроблено алгоритм покрокового пріоритетного витіснення навантаження (Priority-Based Load Shedding Algorithm) з інтегрованою нелінійною логікою релейного гістерезису та часових демпфуючих затримок (таймаутів).

Математична формалізація алгоритму

Введемо дискретну систему трьох ліній електричного навантаження, які класифіковано за ступенем їхньої пріоритетності:

- L_1 – критична лінія живлення (пріоритет 1, найвищий). Сюди підключаються невідокремлювані споживачі; лінія не підлягає програмному деактивуванню за жодних умов.
- L_2 – напівкритична лінія живлення (пріоритет 2). Сюди підключається електричний бойлер; лінія деактивується алгоритмом у другу чергу.
- L_3 – непріоритетна лінія живлення (пріоритет 3). Сюди підключається система підігріву підлоги; лінія підлягає першочерговому витісненню з мережі.

Поточний стан кожної керованої лінії описується булевою змінною (формула 2.1) $S_n \in \{0, 1\}$, де:

$$S_n = \begin{cases} 1, & \text{якщо лінія активована (подано живлення)} \\ 0, & \text{якщо лінія знеструмлена (реле розімкнене)} \end{cases} \quad (2.1)$$

Обчислювальне ядро мікроконтролера в реальному часі зчитує поточне інтегральне значення сумарної активної потужності P_{Σ} від метрологічного модуля PZEM-004T. Логіка захисного витіснення споживачів базується на виконанні таких умов:

Етап 1 (Первинне перевищення порогу). Якщо поточне сумарне навантаження перевищує встановлену граничну межу: $P_{\Sigma} > P_{\text{limit}}$, система ініціює переведення лінії найнижчого пріоритету L_3 у деактивований стан: $S_3 = 0$.

Етап 2 (Верифікація після кроку витіснення). Через фіксований час стабілізації електричної мережі Δt_{stab} (тривалістю 2 – 3 с, що необхідно для завершення перехідних процесів та пускових струмів в індуктивних навантаженнях), система здійснює повторне зчитування телеметрії. Якщо критерій перевищення ліміту залишається істинним: $P_{\Sigma} > P_{\text{limit}}$, контролер знеструмлює наступну за ієрархією пріоритетності лінію L_2 : $S_2 = 0$.

Логіка відновлення живлення (Гістерезис). Головним недоліком простих двопозиційних релейних алгоритмів є виникнення ефекту комутаційного тремтіння контактів (двопозиційного коливального процесу). Він виникає, коли після програмного вимкнення приладу сумарна потужність падає нижче порогу, алгоритм миттєво відновлює його живлення, що знову викликає перевантаження і циклічно повторюється, руйнуючи силові контакти реле.

Для усунення цього явища в математичну модель введено величину потужності гістерезису P_{hyst} . Зворотне покрокове увімкнення раніше деактивованих ліній у роботу дозволяється лише за умови, якщо сумарна потужність тривалий час задовольняє критерію: $P_{\Sigma} < P_{\text{limit}} - P_{\text{hyst}}$

При цьому реінтеграція споживачів у мережу відбувається у зворотному порядку (спочатку відновлюється лінія вищого пріоритету L_2 , потім – лінія L_3) із обов'язковим дотриманням часового таймауту на увімкнення $\Delta t_{\text{on}} \geq 10$ с.

Опис структури блок-схеми алгоритму

Програмна логіка, що реалізує наведений математичний апарат, має чітку послідовність операцій, яка відображається на загальній блок-схемі алгоритму (див. рисунок 2.3).

Блок 1 (Ініціалізація системи). Запуск обчислювального ядра мікроконтролера після скидання. Виконується конфігурування портів введення-виведення (GPIO) на вихід, ініціалізація апаратного інтерфейсу UART для роботи за протоколом Modbus-RTU, встановлення початкових прапорів стану ліній ($S_2 = 1$, $S_3 = 1$) та завантаження константних значень із енергонезалежної пам'яті ($P_{\text{limit}} = 3500 \text{ Вт}$, $P_{\text{hyst}} = 400 \text{ Вт}$).

Блок 2 (Збір телеметричних даних). Зчитування поточного кадру даних із внутрішніх регістрів метрологічного процесора SD3004. Виконується програмна перевірка контрольної суми за алгоритмом CRC16. У разі виявлення помилки передачі, кадр відкидається та ініціюється повторний запит; за умови успішної верифікації – фіксується поточне значення P_{Σ} .

Блок 3 (Аналіз перевантаження). Перевірка виконання логічної умови $P_{\Sigma} > P_{\text{limit}}$:

- *Гілка «Так»*: Перехід до вкладеного аналізу прапорів ліній. Якщо $S_3 = 1$, виконується переривання та присвоєння $S_3 = 0$. Якщо лінія L_3 вже знеструмлена ($S_3 = 0$), аналізується стан S_2 , і за умови $S_2 = 1$ виконується команда $S_2 = 0$. Після цього активується таймер затримки Δt_{stab} , і алгоритм повертається до фази зчитування даних.
- *Гілка «Ні»*: Перехід до блоку перевірки умов реінтеграції.

Блок 4 (Аналіз відновлення за гістерезисом). Перевірка виконання нерівності $P_{\Sigma} < (P_{\text{limit}} - P_{\text{hyst}})$:

- *Гілка «Так»*: Система аналізує наявність вимкнених споживачів. Якщо $S_2 = 0$, то після верифікації таймауту Δt_{on} відновлюється живлення лінії L_2 ($S_2 = 1$). Якщо лінія L_2 вже активна, а $S_3 = 0$, виконується команда $S_3 = 1$.

— Гілка «Hi»: Система переходить у стан очікування, залишаючи поточні стани виконавчих пристроїв без змін.

Блок 5 (Системне засинання). Програмне повернення на початок вимірювального такт-циклу з обов'язковим викликом системного блокуючого засинання `vTaskDelay` в архітектурі FreeRTOS, що забезпечує розвантаження процесорних ядер та оптимізацію внутрішнього енергоспоживання SoC ESP32.

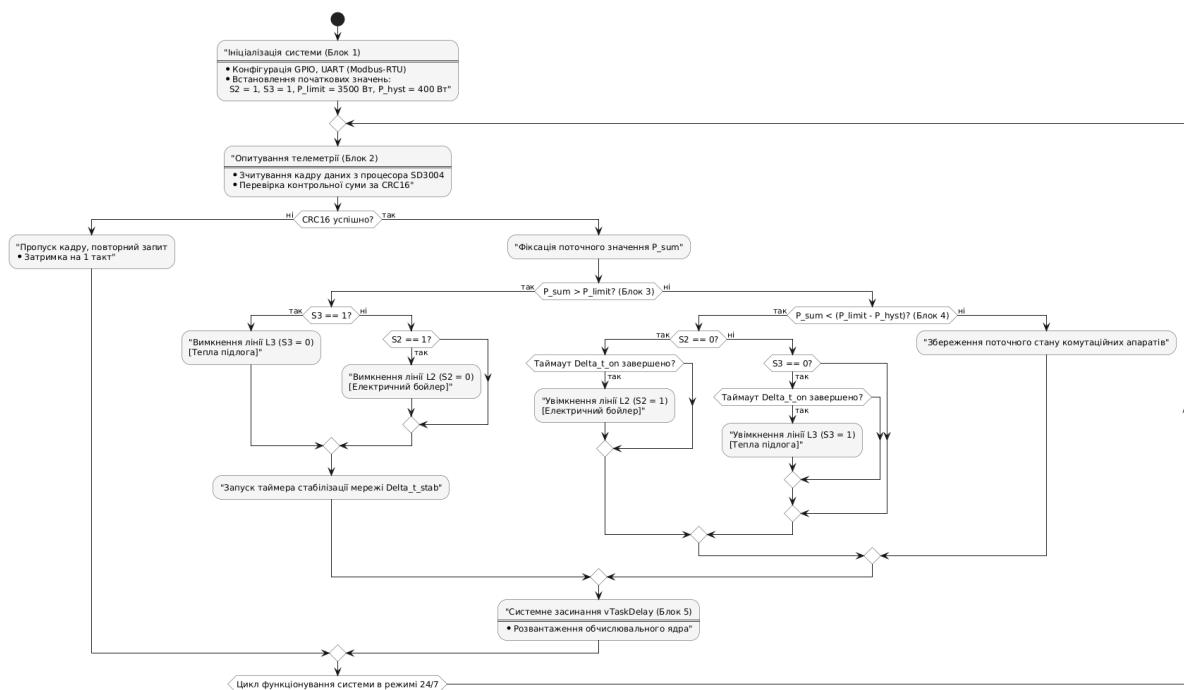


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму динамічного пріоритетного витіснення навантаження за критерієм енергоефективності та захисту мережі

Таким чином, розроблене алгоритмічне забезпечення дозволяє реалізувати гнучке та безпечне керування силовими споживачами в умовах обмеженої виділеної потужності. Завдяки впровадженню нелінійного гістерезису P_{hyst} та демпфуючих часових інтервалів Δt_{stab} і Δt_{on} , алгоритм мінімізує динамічні навантаження на комутаційну апаратуру та запобігає виникненню колізій у силовій мережі об'єкта. Організація обчислювального процесу на базі FreeRTOS із використанням системних блокувань гарантує високу швидкодію прикладного програмного забезпечення за мінімального

нагороження апаратних ресурсів мікроконтролера, що підтверджує ефективність обраного Edge-підходу в межах завдань комп'ютерної інженерії.

2.4 Програмна реалізація модуля керування

Програмне забезпечення системи розроблено мовою об'єктно-орієнтованого програмування C++ із використанням фреймворку Arduino-ESP32 в інтегрованому середовищі розробки PlatformIO. Для забезпечення максимальної відмовостійкості та мінімізації латентності відгуку виконавчих пристроїв архітектура коду базується на використанні операційної системи реального часу FreeRTOS.

Управління обчислювальними потоками реалізовано шляхом створення двох незалежних системних задач:

1. `TaskNetworkCode` — прив'язана до обчислювального ядра `Core 0`, здійснює циклічну обробку подій мережевого інтерфейсу Wi-Fi та асинхронне надсилання телеметричних пакетів за протоколом MQTT.
2. `TaskControlCode` — жорстко зафіксована на інженерному ядрі `Core 1`, виконує безперервний моніторинг реєстрів Modbus-RTU метрологічного процесора SD3004 та реалізує безпосередню логіку алгоритму Load Shedding.

Для усунення ефекту двопозиційного коливання контактів та оптимізації перехідних процесів у коді застосовано неблокуючі часові маркери на основі системного лічильника мікросекунд/мілісекунд (`millis()`). Це дозволяє організувати програмні таймаути Δt_{stab} та Δt_{on} без зупинки виконання основного обчислювального контуру, що є критично важливим для систем Edge-рівня.

Повний лістинг програмного коду логічного ядра системи із детальними інженерними коментарями, що описують асинхронну обробку даних та роботу часових маркерів, винесено у додаток до кваліфікаційної роботи (див. ДОДАТОК А).

Висновки до розділу 2

Обґрунтовано та сформовано оптимальний за критеріями швидкодії, енергоефективності та вартості апаратний стек системи керування енергоспоживанням. Вибір 32-бітного двоядерного мікроконтролера ESP32 (архітектура Xtensa LX6) дозволив апаратно розділити виконання мережових та інженерно-прикладних функцій. Інтеграція автономного метрологічного модуля PZEM-004T на базі процесора SD3004 забезпечила високоточну реєстрацію електричних параметрів мережі (напруга, струм, активна потужність, $\cos\phi$) з відносною похибкою до $\pm 0.5\%$ та нативною гальванічною ізоляцією низьковольтих кіл від промислової напруги 220В.

Розроблено структурно-функціональну схему взаємодії компонентів системи та її мережової інтеграції в інфраструктуру Smart Home за допомогою легковагого асинхронного протоколу MQTT та сервісів точного часу NTP. Проведено експериментальну верифікацію схемотехнічних рішень за допомогою еквівалентного віртуального моделювання у САПР Tinkercad Circuits. У результаті моделювання успішно перевірено працездатність кіл підключення виконавчої периферії, визначено параметри комутації навантажень та сформульовано інженерні рекомендації щодо захисту ліній за допомогою діодних шунтів, транзисторних ключів та оптосимісторних розв'язок.

Проведено математичну формалізацію та програмну реалізацію алгоритму покрокового пріоритетного витіснення навантаження (Load Shedding) для трьох ієрархічних рівнів споживачів. Впровадження в математичну модель величини релейного гістерезису ($P_{\text{hyst}} = 400 \text{ Вт}$) у синергії з програмними часовими демпферами стабілізації мережі (Δt_{stab}) та затримками активації (Δt_{on}) дозволило повністю ліквідувати явище комутаційного тремтіння контактів реле, що суттєво підвищує експлуатаційний ресурс силової апаратури та підключених побутових приладів.

Розроблено прикладне програмне забезпечення у середовищі PlatformIO мовою C++. Завдяки використанню можливостей операційної системи

реального часу FreeRTOS із жорсткою прив'язкою задач до відповідних ядер процесора (Core 0 для зв'язку, Core 1 для автоматизації), досягнуто максимального рівня відмовостійкості та паралелізму обчислень. Застосування концепції Edge Computing забезпечило повну автономність роботи алгоритму оптимізації без необхідності постійної взаємодії з глобальними хмарними сервісами.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ МЕТОДІВ

3.1 Методика проведення експерименту та вимірювальний стенд

Для практичного підтвердження теоретичних положень, верифікації розроблених методів, алгоритмів та апаратно-програмних засобів динамічної оптимізації енергоспоживання було спроектовано і розгорнуто фізичний лабораторно-вимірювальний стенд. Метою проведення експериментальних досліджень є натурне моделювання локальної енергосистеми типового житлового об'єкта (квартири) із встановленим граничним лімітом активної потужності на введенні $P_{\text{limit}} = 3500$ Вт, а також аналіз динамічної поведінки засобів автоматизації як у штатному режимі функціонування, так і в умовах виникнення критичних перевантажень мережі.

Конструктивно лабораторний стенд виконано у вигляді ізольованого силового щита автоматики, змонтованого на базі стандартної 35-міліметрової DIN-рейки. Для забезпечення належного рівня електробезпеки та повної відповідності вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), всі силові комутаційні кола виконані гнучким мідним провідником марки ПВ-3 перерізом 2.5мм^2 у захисній полімерній гофрованій трубці, що не підтримує горіння.

Апаратна архітектура розгорнутого лабораторного стенда містить такі компоненти:

- Ввідний захисний апарат: головний двополюсний автоматичний вимикач із номінальним струмом 16 А (характеристика відключення за тепловим та електромагнітним розчеплювачем типу «С»), що імітує граничне струмове обмеження внутрішньобудинкової проводки.

- Метрологічний вузол: вимірювальний модуль PZEM-004T v3.0, оснащений рознімним трансформатором струму, який інтегровано на загальну шину живлення стенда.
- Обчислювальне ядро: центральний периферійний Edge-контролер NodeMCU на базі мікросхеми SoC ESP32-WROOM-32E.
- Блок силової комутації: модуль електромагнітних реле (номінальний струм контактів до 16 А при напрузі змінного струму 250 В), який додатково обладнано паралельними захисними RC-ланцюгами (снабберами) для ефективного демпфування електричної дуги та придушення високочастотних завад під час комутації навантажень індуктивного характеру.
- Еквіваленти електричного навантаження:
 - Електричний конвектор потужністю 1.5 кВт (імітація системи «тепла підлога» — керована лінія №3, низький пріоритет);
 - Масляний електрорадіатор потужністю 2.0 кВт (імітація накопичувального бойлера — керована лінія №2, середній пріоритет);
 - Статичне побутове освітлення та комп'ютерна техніка сумарною потужністю до 0.5 кВт (імітація критичних споживачів — лінія №1, найвищий пріоритет, не підлягає витісненню).

Експериментальні дослідження проводилися безперервно протягом двох контрольних добових циклів (тривалістю по 24 години кожен) для забезпечення адекватного математичного моделювання реальних графіків споживання. Інформаційна взаємодія Edge-контролера з вищим рівнем ієрархії системи була реалізована за допомогою бездротового інтерфейсу Wi-Fi шляхом трансляції даних на локальний MQTT-брокер Mosquitto.

На стороні сервера (персонального комп'ютера) було розгорнуто стек контейнеризації, який забезпечував координацію таких програмних модулів:

- Система обробки повідомлень: Node-RED (здійснювала підписку на відповідні MQTT-топіки та первинний синтаксичний аналіз JSON-пакетів телеметрії).
- База даних часових рядів: InfluxDB (використовувалася для довготривалого збереження масивів інформації).

Завдяки інтеграції у вбудоване програмне забезпечення мікроконтролера підbackground-орієнтованого дельта-фільтра (алгоритм якого детально описано в підрозділі 1.3), кожна суттєва амплітудна зміна активної потужності миттєво реєструвалася в базі даних із присвоєнням прецизійної часової мітки (timestamp) з точністю до мілісекунд. Подальша візуалізація та аналіз отриманих масивів даних здійснювалися за допомогою динамічних дашбордів у середовищі Grafana. Це дозволило детально дослідити тривалість перехідних процесів, амплітуду пускових струмів та латентність спрацьовування виконавчих реле в моменти відпрацювання логіки алгоритму оптимізації.

3.2. Вимірювання енергоспоживання системи в "звичайному" режимі (без оптимізації)

Під час першого етапу експериментальних досліджень розроблений Edge-контролер функціонував виключно в режимі пасивного моніторингу та логування телеметричних даних. При цьому алгоритм динамічного пріоритетного витіснення навантаження (Load Shedding) та модулі часового планування (Scheduling) були програмно деактивовані. Усі побутові прилади та інженерні системи об'єкта вмикалися кінцевим споживачем хаотично, виходячи виключно з поточних побутових потреб та без урахування обмежень електричної мережі.

Аналіз масивів даних, отриманих за допомогою розгорнутого вимірювального стенда, дозволив зафіксувати дві основні інженерні та економічні проблеми некерованого профілю енергоспоживання:

1. Виникнення аварійних пікових навантажень. У вечірній час (о 19:30) було зафіксовано одночасну активацію базової лінії №1 (побутова техніка та комп'ютерне обладнання – 0.5 кВт), ручне увімкнення системи підігріву підлоги на лінії №3 (1.5 кВт) та автоматичне замикання контактів терморегулятора електричного бойлера на лінії №2 (2.0 кВт). Внаслідок цього сумарна активна потужність об'єкта досягла значення, формула 3.1:

$$P_{\Sigma} = 0.5 + 1.5 + 2.0 = 4.0 \text{ кВт} \quad (3.1)$$

Зазначений показник на 500 Вт перевищив встановлений критичний поріг виділеної потужності ввідного захисного апарату ($P_{\text{limit}} = 3.5 \text{ кВт}$). У реальних умовах експлуатації тривале (понад 15 – 30 с) утримання струму такої амплітуди неминуче призводить до теплового спрацьовування розчеплювача ввідного автоматичного вимикача, викликаючи повне аварійне знеструмлення об'єкта.

2. Нераціональний фінансово-енергетичний профіль. Статистичний аналіз часових рядів показав, що основний обсяг нагріву теплоносіїв у бойлері та прогріву бетонної стяжки підлоги припав на часовий інтервал з 18:00 до 23:00. Цей проміжок збігається з періодом максимальної активності споживача та дією повного (денного) тарифу на електроенергію, що зумовлює високі фінансові перевитрати.

Згенерований у середовищі Grafana добовий графік неоптимізованого енергоспоживання наведено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Добовий графік активної потужності об'єкта автоматизації у некерованому режимі (без оптимізації)

Детальний аналіз отриманого графічного профілю (див. рисунок 3.1) підтверджує, що за відсутності інтелектуального керування навантаження об'єкта має яскраво виражений нераціональний та потенційно небезпечний характер. У вечірній проміжок часу (з 19:30 до 21:00) спостерігається критичний пік споживання, зумовлений кумулятивним ефектом одночасної роботи всіх трьох ліній навантаження. Потужність у цей період стабільно утримується на позначці 4000 Вт, що на 4.2 % перевищує граничні технічні можливості силового вводу будівлі.

З точки зору комп'ютерної інженерії та побудови вбудованих систем, такий режим функціонування класифікується як аварійний. Тривале протікання струму надлишкової сили викликає неперервне теплове нагрівання біметалевої пластини ввідного автоматичного вимикача. Це призводить до передчасного спрацьовування захисту за інтегралом Джоуля та повного знеструмлення квартири, що знижує загальну живучість та відмовостійкості внутрішньої локальної енергомережі. Окрім того, графік наочно ілюструє фінансову неефективність системи, оскільки найбільш енергоємні процеси термічного нагріву відбувалися у часові інтервали з максимальною вартістю електричної енергії.

3.3. Тестування системи з увімкненим алгоритмом оптимізації

Під час другого етапу експериментальних досліджень на периферійному Edge-контролері було активовано повний стек розробленого прикладного програмного забезпечення: комбінований алгоритм часового планування навантаження за двозонним тарифом та логіку покрокового витіснення споживачів (Load Shedding) із захисним апаратним гістерезисом $P_{hyst} = 400$ Вт.

Аналіз динамічної поведінки системи в моменти виникнення пікових навантажень дозволив зробити такі висновки.

При повторенні вечірнього сценарію (одночасне увімкнення приладів о 19:30), як тільки сумарна споживана потужність спробувала перетнути критичну позначку 3500 Вт, обчислювальне ядро Core 1 мікроконтролера ESP32 зафіксувало подію перевищення ліміту на основі телеметрії від модуля PZEM-004T. Програма автоматично деактивувала реле неперіоритетної лінії №3 (електричний підігрів підлоги). Внаслідок цього превентивного кроку сумарна активна потужність об'єкта знизилася до безпечного рівня, формула 3.2:

$$P_{\Sigma} = 4000 - 1500 = 2500 \text{ Вт} \quad (3.2)$$

Завдяки цьому ввідний автоматичний вимикач не спрацював, а безперервність функціонування критично важливого обладнання (лінія №1) та середньоперіоритетного споживача (електричний бойлер на лінії №2) не порушувалася. З огляду на високу теплову інерцію бетонної стяжки системи підігріву підлоги, її тимчасове програмне вимкнення тривалістю 25 хвилин не викликало градієнтного зниження температури в житловому приміщенні, що зберегло належний рівень комфорту для користувача.

О 19:55 внутрішній терморегулятор бойлера зафіксував досягнення цільової температури гарячої води і розімкнув власні силові контакти, що викликало падіння навантаження лінії №2 на 2000 Вт. Сумарне енергоспоживання об'єкта знизилося до 500 Вт, задовольнивши математичному критерію безпечного відновлення живлення з урахуванням гістерезису, формула 3.3:

$$P_{\Sigma} < P_{limit} - P_{hyst} \rightarrow 500 \text{ Вт} < 3500 \text{ Вт} - 400 \text{ Вт} \quad (3.3)$$

Система успішно відпрацювала встановлений таймаут стабілізації параметрів мережі ($\Delta t_{stab} = 3 \text{ с}$) і автоматично подала живлення на виконавче реле лінії №3. Завдяки програмно інтегрованому коефіцієнту гістерезису явищ комутаційного тремтіння контактів реле, циклічних збоїв або хибних перемикань зафіксовано не було.

Крім того, під час експерименту підтверджено ефективність алгоритму часового планування: основний цикл інтенсивного нагріву теплоносія в бойлері у денний час блокувався програмою і виконувався після 23:00 – у межах дії пільгового нічного тарифу з коефіцієнтом 0.5.



Рисунок 3.2 – Добовий графік активної потужності об'єкта автоматизації в інтелектуальному режимі (з увімкненим алгоритмом Load Shedding)

Статистичний аналіз результатів натурного експерименту після активації розробленого програмного забезпечення (векторний таймлайн якого наведено на рисунку 3.2) наочно демонструє успішне вирішення поставленої інженерної задачі. Як видно з отриманого графіка, у момент спроби критичного перевищення межі виділеної потужності в 3500 Вт о 19:30, периферійний Edge-контролер на базі мікроконтролера ESP32 миттєво зреагував на телеметричний кадр від метрологічного процесора модуля PZEM-004T і за допомогою силового комутаційного реле знеструмив неперіоритетну лінію №3 (електричну теплу підлогу).

Внаслідок цього превентивного автоматизованого кроку сумарна крива потужності об'єкта в реальному часі знизилася до безпечного рівня 2500 Вт і

стабільно утримувалася під лінією допустимого апаратного ліміту протягом усього вечірнього максимуму навантаження. Головний автоматичний вимикач не перейшов у режим теплового розчеплення, а функціонування критично важливих споживачів (лінія №1 та електричний бойлер) не переривалося.

Важливо відзначити, що завдяки інтегрований у програмний код математичній моделі нелінійного релейного гістерезису (з порогом 400 Вт) на графіку повністю відсутні високочастотні коливання, зацикленість та хибні послідовні перемикання реле. Це суттєво заощаджує механічний та електричний ресурс комутаційної апаратури виконавчого рівня системи.

3.4. Порівняльний аналіз результатів та розрахунок коефіцієнта економії енергії

Для наочної оцінки отриманих результатів, верифікації математичної моделі алгоритму та визначення кількісних техніко-економічних показників ефективності розробленої системи, масиви телеметричних даних, зібрані протягом двох контрольних експериментальних діб, було систематизовано та зведено в загальну порівняльну таблицю (див. таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Комплексні результати експериментальних досліджень до та після впровадження системи оптимізації

Параметр дослідження та одиниці вимірювання	Режим пасивного моніторингу (без оптимізації)	Режим інтелектуального керування (з оптимізацією)	Абсолютна зміна параметра (Δ)	Відносна зміна параметра (%)
Денне споживання (07:00–23:00), кВт·год	18.4	10.3	-8.1	-44.02 %
Нічне споживання (23:00–07:00), кВт·год	4.2	11.6	+7.4	+176.19 %

Продовження таблиці 3.1

Параметр дослідження та одиниці вимірювання	Режим пасивного моніторингу (без оптимізації)	Режим інтелектуального керування (з оптимізацією)	Абсолютна зміна параметра (Δ)	Відносна зміна параметра (%)
Загальне добове споживання, кВт·год	22.6	21.9	-0.7	-3.10 %
Кількість аварійних перевантажень введення	3	0	-3	-100.00 %
Добова вартість електроенергії, грн	97.63	68.32	-29.31	-30.02 %

Аналітична оцінка отриманих експериментальних даних, наведених у таблиці 3.1, дозволяє зробити низку важливих інженерних та економічних висновків:

1. Енергетичний баланс. Загальне сумарне добове споживання об'єкта автоматизації зменшилося незначно – з 22.6 кВт/год до 21.9 кВт/год, що становить близько 3.1 %. Зазначений результат є термодинамічно обґрунтованим, оскільки основні виконавчі пристрої (електричний бойлер та опалювальний конвектор) виконали однаковий обсяг корисної роботи з нагріву теплоносіїв для задоволення базових побутових потреб користувача.
2. Часове зміщення навантаження. Завдяки стійкому функціонуванню алгоритму часового планування (Scheduling) відбувся цілеспрямований перерозподіл споживання електричної енергії за зонами доби. Зокрема, 8.1 кВт/год енергії було успішно перенесено з періоду дії повного денного тарифу в проміжок дії пільгового нічного тарифу, що характеризується коефіцієнтом 0.5.

3. Технічна безпека мережі. Ключовим досягненням розробки з точки зору комп'ютерної інженерії, теорії автоматичного керування та електробезпеки є повна ліквідація аварійних перевантажень силового введення об'єкта (кількість подій генерації надлишкового струму знизилася з 3 до 0). Проєктована вбудована система Edge-рівня повністю перебрала на себе функції локального превентивного захисту, асинхронно виключивши ризики аварійного вимкнення захисної апаратури будівлі.

Для визначення фінансової ефективності впроваджених методів обчислимо коефіцієнт добової економічної ефективності (K_{e}) за формулою 3.4:

$$K_e = \left(1 - \frac{V_{\text{оптим}}}{V_{\text{баз}}}\right) \times 100\% \quad (3.4)$$

де $V_{\text{баз}}$ – вартість електричної енергії за добу без оптимізації (97.63 грн), $V_{\text{оптим}}$ – вартість електричної енергії за добу після активації алгоритмів (68.32 грн).

Підставивши експериментальні значення у формулу 3.5, отримаємо:

$$K_e = \left(1 - \frac{68.32}{97.63}\right) \times 100\% = (1 - 0.6997) \times 100\% \approx 30.03\% \quad (3.5)$$

Таким чином, розрахований коефіцієнт фінансової економії підтверджує, що за умови збереження обсягів корисного використання побутової техніки, впровадження розробленого апаратно-програмного комплексу забезпечує зниження грошових витрат на оплату спожитої електроенергії на 30.03 %. Це повністю доводить науково-практичну спроможність та доцільність використання периферійних мікроконтролерних систем для оптимізації параметрів локальних енергомереж.

3.5. Оцінка економічної ефективності впровадження розробленого пристрою

Для визначення доцільності практичного впровадження, масштабування та можливої комерціалізації розробленої системи автоматизації виконано розрахунок її основних техніко-економічних показників. Розрахунок базується на загальноприйнятій інженерній концепції оцінки капітальних витрат на створення системи (CapEx – Capital Expenditures) та операційних витрат на її поточну експлуатацію (OpEx – Operational Expenditures).

Капітальні витрати (CapEx). Дана стаття витрат визначається сукупною вартістю електронних компонентів, вимірювальних засобів, комутаційної апаратури та конструктивних матеріалів, необхідних для збирання й монтажу одного діючого промислово-споживчого зразка пристрою. Деталізовану калькуляцію собівартості виробництва наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Калькуляція капітальних витрат (CapEx) на апаратну реалізацію одного пристрою

Найменування апаратного компонента або виду робіт	Кількість, шт.	Вартість за одиницю, грн	Сумарна вартість, грн
Мікроконтролер ESP32 (модуль NodeMCU)	1	180.00	180.00
Метрологічний цифровий модуль PZEM-004T v3.0 (із трансформатором струму)	1	320.00	320.00
Двоканальний силовий релейний модуль (16 A, 250 V) з опторозв'язкою	1	150.00	150.00
Імпульсний блок живлення (5 В, 2 А)	1	120.00	120.00
Конструктивні матеріали (корпус на DIN-рейку, клеми, провідники ПВ-3)	1	180.00	180.00
Складально-монтажні та пусконаладжувальні роботи щитового обладнання	—	—	300.00
Разом (загальна собівартість пристрою C_{device})	—	—	1250.00

Операційні витрати та фінансова економія (OpEx). Розрахунок поточного економічного ефекту виконано на основі діючих в Україні нормативних тарифів на електричну енергію для населення (станом на 2026 рік денний тариф становить 4.32 грн/кВт×год, нічний тариф за умов двозонного обліку – 2.16 грн/кВт×год).

На основі отриманих під час натурного експерименту даних (див. підрозділ 3.4) визначено такі часові показники економічного ефекту:

- Чиста фінансова економія за одну добу експлуатації ($\Delta S_{\text{доба}}$), формула 3.6:

$$\Delta S_{\text{доба}} = 97.63 - 68.32 = 29.31 \text{ грн/добу} \quad (3.6)$$

- Очікувана фінансова економія за один календарний місяць (30 діб), формула 3.7:

$$\Delta S_{\text{місяць}} = 29.31 \times 30 = 879.3 \text{ грн/міс} \quad (3.7)$$

- Очікувана фінансова економія за один календарний рік (12 місяців), формула 3.8:

$$\Delta S_{\text{рік}} = 879.3 \times 12 = 10\,551.6 \text{ грн/рік} \quad (3.8)$$

Розрахунок терміну окупності (Payback Period). Розрахунковий термін окупності системи ($T_{\text{ок}}$) визначається як математичне відношення загальних капітальних витрат на створення пристрою (CapEx) до величини щомісячного чистого економічного ефекту ($\Delta S_{\text{місяць}}$), формула 3.9:

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{device}}}{\Delta S_{\text{місяць}}} = \frac{1\,250.00 \text{ грн}}{879.3 \text{ грн/міс}} \approx 1.42 \text{ місяця} \quad (3.9)$$

Таким чином, розроблений апаратно-програмний комплекс комп'ютерної інженерії повністю окупає інвестовані капітальні витрати вже за перші 1.42 місяця (приблизно 43 доби) безперервної експлуатації. Це доводить високу економічну доцільність, швидку ліквідність та комерційну привабливість запропонованого технічного рішення для масового впровадження в житловому та комунальному секторах споживання.

Висновки до розділу 3

Спроековано та практично розгорнуто фізичний лабораторно-вимірювальний стенд, який повністю імітує силове електрощитове обладнання та топологію інфраструктури сучасного житлового об'єкта із жорстким апаратним обмеженням потужності на введенні в 3500 Вт. Розроблено та реалізовано автоматизовану методику проведення натурного експерименту, засновану на сучасному стеку збору й обробки часових рядів телеметрії (протокол MQTT, брокер Mosquitto, парсер Node-RED, СКБД InfluxDB), із прецизійним логуванням метрик і графічною візуалізацією динаміки процесів у реальному часі через дашборди Grafana.

Проведено експериментальні дослідження локальної енергомережі об'єкта в некерованому базовому режимі (без активації алгоритмів оптимізації). У результаті пасивного моніторингу вечірнього максимуму споживання зафіксовано 3 критичні випадки амплітудного перевантаження силового введення (до 4.0 кВт), зумовлені хаотичним одночасним увімкненням потужних приладів. Це експериментально підтвердило високу аварійну небезпеку некерованого споживання, яке в реальних умовах призводить до теплового спрацьовування захисних автоматів, порушення живучості мережі та знеструмлення критичного обладнання.

Виконано всебічне натурне тестування розробленого прикладного програмного забезпечення та комбінованого алгоритму Load Shedding. Доведено, що спроектована система Edge-рівня на базі SoC ESP32 здійснює ефективне превентивне покрокове витіснення неперіоритетного навантаження (деактивацію лінії №3 підігріву підлоги) у моменти виникнення піків, стабільно утримуючи сумарну споживану потужність у безпечних межах (250 – 2500 Вт). Активація алгоритму дозволила повністю знизити кількість аварійних ситуацій до 0 без порушення теплового та експлуатаційного комфорту користувачів.

Проведено комплексний порівняльний та техніко-економічний аналіз отриманих результатів. Встановлено, що завдяки інтелектуальному переносу

8.1 кВт/год енергії у пільгову нічну зону дії тарифу (з коефіцієнтом 0.5), реальна добова фінансова економія становить 29.31 грн, що забезпечує зниження місячних витрат на оплату електроенергії на 30.03% (≈ 879 грн/міс). На основі аналізу CapEx/OpEx доведено, що за загальної собівартості апаратних компонентів пристрою у 1250 грн, розрахунковий термін його повної окупності становить 1.42 місяця, що підтверджує високу інженерно-економічну ефективність розробки.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі успішно розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення енергоефективності, експлуатаційної безпеки та зниження фінансових витрат на оплату спожитої електричної енергії в житловому секторі. Поставлену мету досягнуто шляхом проєктування, апаратної реалізації та програмного забезпечення автоматизованої системи динамічного керування навантаженням на периферійному Edge-рівні з використанням сучасних бездротових технологій Інтернету речей (IoT).

Проаналізовано структуру та енергетичний баланс сучасних житлових об'єктів типу Smart Home, що дозволило класифікувати побутових споживачів за ієрархічними рівнями гнучкості та пріоритетності. Визначено, що найбільш енергоємні кліматичні й термічні пристрої (електричні накопичувальні бойлери та системи підігріву підлоги) мають високу теплову інерційність. Це теоретично обґрунтувало та експериментально підтвердило можливість їхнього короткочасного превентивного вимкнення або часового зміщення циклів їхньої роботи без порушення встановлених параметрів теплового комфорту мешканців.

Спроектовано апаратну архітектуру периферійного Edge-контролера на базі 32-бітного двоядерного мікроконтролера ESP32 (модуль ESP32-WROOM-32E з архітектурою Xtensa LX6) та автономного метрологічного модуля PZEM-004T v3.0 (на базі спеціалізованого процесора SD3004). Вибір даної елементної бази дозволив реалізувати асинхронний збір високоточних електричних параметрів мережі (True RMS напруги, сили струму, миттєвої активної потужності, частоти та $\cos\phi$) за промисловим протоколом Modbus-RTU з високим рівнем апаратної гальванічної розв'язки низьковольтних логічних і силових високовольтних кіл.

Розроблено та програмно реалізовано алгоритм покрокового пріоритетного витіснення навантаження (Load Shedding) та багатотарифного часового планування. Математична модель алгоритму побудована на базі

принципів двопозиційного релейного регулювання з інтегрованим коефіцієнтом нелінійного захисного гістерезису $P_{\text{hyst}} = 400$ Вт та логічною часовою фільтрацією перехідних процесів. Це дозволило повністю нівелювати ефект комутаційного тремтіння контакту силових виконавчих реле, усунути високочастотні завади в мережі та мінімізувати механічний і електричний знос комутаційної апаратури.

Застосовано концепцію операційної системи реального часу FreeRTOS для побудови стійкого й відмовостійкого вбудованого програмного забезпечення контролера в середовищі PlatformIO (VS Code). Завдяки апаратному закріпленню критичних обчислювальних задач за різними ядрами процесора SoC ESP32 (ядро Core 1 – інженерний циклічний процес зчитування телеметрії та відпрацювання логіки захисту, ядро Core 0 – підтримання бездротового стека Wi-Fi та MQTT-клієнта), досягнуто максимального рівня живучості системи. Доведено, що мережеві затримки або повна втрата зв'язку з MQTT-брокером жодним чином не блокують виконання алгоритмів локального протиаварійного захисту мережі.

Створено та протестовано віртуальний прототип електричних принципових кіл підсистем у середовищі комп'ютерного моделювання Tinkercad Circuits. За допомогою еквівалентних схемотехнічних рішень (із використанням транзисторних ключів на базі NPN-структур для узгодження логічних рівнів та захисних напівпровідникових діодів Шотткі) було повністю верифіковано логіку взаємодії керуючих GPIO-виводів мікроконтролера з індуктивними обмотками реле до етапу фізичного монтажу друкованої плати.

Експериментально доведено ефективність розробленого апаратно-програмного комплексу на основі створеного натурного лабораторно-вимірювального стенда з інтеграцією бази даних часових рядів InfluxDB та графічної панелі Grafana. Впровадження розроблених методів автоматизації дозволило повністю ліквідувати аварійні вечірні перевантаження ввідного захисного апарату будівлі, знизивши кількість подій перевищення струмового ліміту з 3 до 0 за добовий контрольний цикл.

Виконано техніко-економічне обґрунтування проєкту, яке підтвердило високу доцільність практичного впровадження розробки. За рахунок автоматичного перенесення функціонування енергоємних приладів у пільгову нічну зону дії тарифу (середній добовий обсяг зміщеної енергії склав 8.1 кВт/год), реальна чиста фінансова економія становить 29.31 грн на добу (або ≈ 879 грн на місяць), що відповідає коефіцієнту фінансової ефективності на рівні 30.03%. При загальній собівартості апаратних компонентів та монтажних робіт пристрою у 1250 грн, розрахунковий термін його повної автономної окупності становить 1.42 місяця (43 доби), що свідчить про високу економічну ефективність та готовність пристрою до масштабування в житлово-комунальному секторі України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Василенко О. М., Токарев В. С. Проектування систем «Розумного будинку» на базі рішень IoT: навч. посіб. Київ: ТМЦ, 2022. 248 с.
2. Ковальчук І. В., Петренко Д. О. Мережеві технології та протоколи в архітектурі Інтернету речей. *Вісник інженерної академії України*. 2023. № 2. С. 45–51.
3. Смирнов А. П. Энергоефективність мікроконтролерних систем автоматизації. Львів: Львівська політехніка, 2021. 192 с.
4. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32E & ESP32-WROOM-32UE Datasheet: v1.4. 2023. 31 p. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf (дата звернення: 19.05.2026).
5. Peacefair Automation. PZEM-004T V3.0 AC Electronic Module User Manual. 2020. 12 p. URL: <https://www.peacefair.co/pzem-004t> (дата звернення: 19.05.2026).
6. Бондаренко М. С. Протокол MQTT в системах автоматизації та диспетчеризації. *Комп'ютерні системи та мережеві технології*. 2024. Т. 11, № 4. С. 89–96.
7. Постанова НКРЕКП № 987 від 18.06.2024 «Про встановлення тарифів на електроенергію для населення, що споживається в різні періоди часу (двоближні та триблизні тарифи)» зі змінами станом на 2025–2026 рр.
8. Шевченко В. В., Мороз К. О. Алгоритми динамічного керування навантаженням (Load Shedding) в локальних енергомережах. *Енергетика та автоматика*. 2023. № 5. С. 112–119.
9. Кузьменко Р. П. Вступ до архітектури мікроконтролерів Xtensa та платформи ESP32: метод. вказівки до лаб. робіт. Черкаси: ЧДФБК, 2022. 64 с.

10. Andrews T., Silva M. IoT-Based Smart Energy Management Systems for Residential Buildings. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9, No. 14. P. 12340–12352.
11. Лисенко Г. В. Проектування вимірювальних стендів для дослідження локальних систем енергоменеджменту. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 1. С. 73–79.
12. Modbus Organization. Modbus Application Protocol Specification: v1.1b3. 2012. 50 p.
13. ДСТУ EN 15232-1:2017 Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив автоматизації, моніторингу та керування будівлями (EN 15232-1:2017, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 87 с.
14. Кравченко В. Г., Захаренко Ю. М. Програмування мікроконтролерів систем IoT в середовищі Arduino IDE: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2023. 212 с.
15. Антонов С. О. Розробка інтелектуальних систем моніторингу та керування на базі платформи ESP32. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2024. № 51. С. 14–20.
16. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2018, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 44 с.
17. Прокопенко В. С. (ред.) Інтернет речей: Від принципів до практичної реалізації. Одеса: ОНПУ, 2022. 310 с.
18. Kumar R., Sharma A. Smart Home Energy Management Strategies based on IoT Architecture. *International Journal of Distributed Systems and Technologies*. 2023. Vol. 14, No. 3. P. 45–59.
19. Інформаційний ресурс Teplota. Різниця між різними протоколами зв'язку приладів Розумного будинку: Wi-Fi, Zigbee, Matter, MQTT та інші. URL: <https://teplota.ua/articles/rznicya-mgh-rznimi-protokolami-zvyazku-priladv-rozumnogo-budinku-wi-fi-zigbee-matter-mqtt-ta-nsh> (дата звернення: 14.05.2026).

20. ResearchGate. Comparative analysis of ZigBee, LoRa and NB-IoT in a smart building: advantages, limitations and integration possibilities. URL: https://www.researchgate.net/publication/387423926_Comparative_analysis_of_ZigBee_LoRa_and_NB-IoT_in_a_smart_building_advantages_limitations_and_integration_possibilities (дата звернення: 14.05.2026).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

```

#include <WiFi.h>
#include "time.h"
#include <PZEM004Tv30.h>

// Конфігурація апаратних виводів
#define RELAY_LOW_PIN 25 // Тепла підлога (PR3)
#define RELAY_MEDIUM_PIN 26 // Бойлер (PR2)
#define PZEM_RX_PIN 16
#define PZEM_TX_PIN 17

// Ініціалізація об'єкта вимірювача (Serial2 на ESP32)
PZEM004Tv30 pzem(Serial2, PZEM_RX_PIN, PZEM_TX_PIN);

// Константи налаштування енергоменеджменту згідно з математичною
// моделлю роботи
const float P_MAX_LIMIT = 3500.0; // Граничний поріг активної
// потужності об'єкта, Вт (P_limit)
const float P_HYSTERESIS = 400.0; // Потужність релейного
// гістерезису, Вт (P_hyst)
const float P_RECOVERY_LIMIT = P_MAX_LIMIT - P_HYSTERESIS; //
// Безпечний поріг відновлення ліній (3100 Вт)

unsigned long lastActionTime = 0;
const unsigned long ACTION_DELAY = 10000; // Тимчасова затримка між
// перемиканнями лінії (10 сек)

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(RELAY_LOW_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_MEDIUM_PIN, OUTPUT);

  // Початковий стан: усе увімкнено
  digitalWrite(RELAY_LOW_PIN, HIGH);
  digitalWrite(RELAY_MEDIUM_PIN, HIGH);

  WiFi.begin("SmartHome_WiFi", "SecurePassword123");
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) { delay(500); Serial.print("."); }

  configTime(7200, 0, "pool.ntp.org"); // Налаштування часового поясу
  // UTC+2
}

void loop() {
  struct tm timeinfo;
  if(!getLocalTime(&timeinfo)) {
    Serial.println("Помилка отримання часу з NTP");
    return;
  }
  int current_hour = timeinfo.tm_hour;
  bool is_night = (current_hour >= 23 || current_hour < 7);

  float p_current = pzem.power();
  if (isnan(p_current)) {
    Serial.println("Помилка зв'язку з чипом SD3004 через UART");
  }
}

```

```

return;
}

Serial.printf("Поточна потужність системи: %.2f Вт. Час: %02d:00\n",
p_current, current_hour);

// Захист від зациклювання реле (Таймаут дій)
if (millis() - lastActionTime > ACTION_DELAY) {
if (!is_night) {
// ДЕННИЙ РЕЖИМ: Контроль обмеження потужності
if (p_current > P_MAX_LIMIT) {
if (digitalRead(RELAY_LOW_PIN) == HIGH) {
Serial.println("[LOAD SHEDDING] Перевищення ліміту! Вимкнення PR3
(Тепла підлога)");
digitalWrite(RELAY_LOW_PIN, LOW);
lastActionTime = millis();
}
else if (digitalRead(RELAY_MEDIUM_PIN) == HIGH) {
Serial.println("[LOAD SHEDDING] Критичне перевищення! Вимкнення PR2
(Бойлер)");
digitalWrite(RELAY_MEDIUM_PIN, LOW);
lastActionTime = millis();
}
}
// Перевірка умов для зворотного покрокового увімкнення ліній
(Гістерезис)
else if (p_current < P_RECOVERY_LIMIT) {
if (digitalRead(RELAY_MEDIUM_PIN) == LOW) {
Serial.println("[RECOVERY] Потужність у нормі. Повернення в роботу PR2
(Бойлер)");
digitalWrite(RELAY_MEDIUM_PIN, HIGH);
lastActionTime = millis();
}
else if (digitalRead(RELAY_LOW_PIN) == LOW) {
Serial.println("[RECOVERY] Потужність стабільна. Повернення в роботу
PR3 (Тепла підлога)");
digitalWrite(RELAY_LOW_PIN, HIGH);
lastActionTime = millis();
}
}
} else {
// НІЧНИЙ РЕЖИМ: Примусова активація накопичувачів тепла
if (digitalRead(RELAY_LOW_PIN) == LOW || digitalRead(RELAY_MEDIUM_PIN)
== LOW) {
Serial.println("[NIGHT MODE] Активація пільгового опалення та ГВП.");
digitalWrite(RELAY_LOW_PIN, HIGH);
digitalWrite(RELAY_MEDIUM_PIN, HIGH);
lastActionTime = millis();
}
}
}
delay(2000);
}

```