

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра: Морського приладобудування

«Допущений до захисту»

В. о. Завідувача кафедри



Гайдай Г. Ю.

«__» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: «Оптимізація енерговитрат систем автоматизації локальних об'єктів»

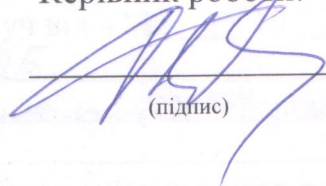
Виконав: студент групи 6651м



Заворотнюк А.В.

(підпис)

Керівник роботи:



Тимченко В.Л.

(підпис)

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

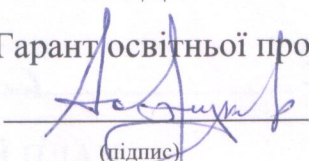
Кафедра морського приладобудування

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма «Комп'ютерні системи та мережі»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

 Жуков Ю.Д.
(підпис)

«14» 10 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту Заворотнюк Алісі Владиславівні

(Прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Оптимізація енерговитрат систем автоматизації локальних об'єктів»

Керівник роботи Тимченко Віктор Леонідович, доктор технічних наук, професор

Затверджені наказом ректора №1217 -уч від «14» 10 2025 року

2. Термін подання роботи: 17.12.2025

3. Вихідні дані по роботі: Технічна документація АТ Mega328P-P4, ESP01, DS18B20, PZFM-004T, DS3238V

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): 1. Аналіз сучасних методів та засобів оптимізації енерговитрат; 2. Аналіз локального об'єкта та конфігурації автоматизованого пристрою; 3. Математичне моделювання енергоспоживання та розробка методу оптимізації; 4. Розробка програмно-апаратного прототипу системи автоматизації; 5. Охорона праці.

5. Перелік презентаційних матеріалів: 1. Структурна схема системи автоматизації. 2. Функціональна схема пристрою автоматизації 3. Діаграма добового споживання електроенергії в зимовий період. 4. Діаграма добового споживання електроенергії в міжсезонний період 5. Діаграма добового споживання електроенергії в літній період споживання. 6. Оптимальні графіки потужності електроенергії 7. Схема електрична принципова плати управління та індикації. 8. Схема електрична принципова силової плати 9. Інтерфейс web-застосунку

6. Консультанти розділів роботи

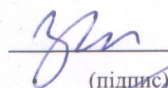
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Тимченко В.Л.		

7. Дата видачі завдання « 03 » вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз сучасних методів та засобів оптимізації енерговитрат	03.09 - 12.09.2025	Виконано
2.	Аналіз локального об'єкта та конфігурації автоматизованого пристрою	12.09 - 29.09.2025	Виконано
3.	Математичне моделювання енергоспоживання та розробка методу оптимізації	29.09 - 16.10.2025	Виконано
4.	Розробка програмно-апаратного прототипу системи автоматизації	16.10 - 10.11.2025	Виконано
5.	Охорона праці	10.11.2025 - 18.11.2025	Виконано

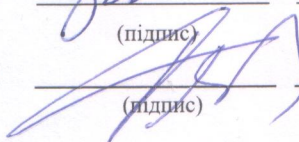
Студент


(підпис)

Заворотнюк А.В.

(ПІБ)

Керівник роботи


(підпис)

Тимченко В.Л.

(ПІБ)

АНОТАЦІЯ

Заворотнюк А.В. « Оптимізація енерговитрат систем автоматизації локальних об'єктів ». Кваліфікаційна робота зі спеціальності 123 « Комп'ютерна інженерія», освітньої програми «Комп'ютерні системи та мережі».

Миколаїв: НУК ім. адм. Макарова. 2025 рік. 80 сторінок.

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження процесів енергоспоживання локального об'єкта та розроблено автоматизовану систему, яка забезпечує моніторинг, аналіз і оптимізацію витрат енергії. Робота містить обґрунтування вибору апаратних компонентів, розробку принципової та структурної схем, створення програмного забезпечення для збору, обробки та передавання даних про енергоспоживання, а також математичне моделювання й оптимізацію режимів роботи обладнання. На основі методів лінійного програмування розроблено алгоритми оптимізації, що дозволяють знизити загальні енерговитрати за рахунок раціонального управління системою вентиляції, освітлення, газовим котлом, кондиціонером та іншими побутовими приладами.

Був розроблений веб-застосунок, який здійснює віддалений моніторинг енергоспоживання, візуалізацію даних у реальному часі та формування історичних графіків.

Ключові слова: пристрій автоматизації; енергоспоживання; оптимізація; лінійне програмування; мікроконтролер.

ABSTRACT

Zavorotniuk A.V. “Optimization of energy consumption in automation systems for local facilities.” Qualification work in the specialty 123 “Computer Engineering,” educational program “Computer Systems and Networks.”

Mykolaiv: Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 2025. 80 pages.

The thesis examines the energy consumption processes of a local facility and develops an automated system that monitors, analyzes, and optimizes energy consumption. The work contains a justification for the choice of hardware components, the development of schematic and structural diagrams, the creation of software for collecting, processing, and transmitting data on energy consumption, as well as mathematical modeling and optimization of equipment operating modes. Based on linear programming methods, optimization algorithms have been developed that allow reducing overall energy costs through rational management of the ventilation system, lighting, gas boiler, air conditioner, and other household appliances.

A web application has been developed that performs remote monitoring of energy consumption, real-time data visualization, and historical graphing.

Keywords: automation device; energy consumption; optimization; linear programming; microcontroller.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ.....	10
1.1. Енерговитрати як ключовий показник ефективності роботи локальних об'єктів.....	10
1.2. Типові системи автоматизації локальних об'єктів: структура, функції, датчики та виконавчі механізми.....	10
1.3. Методи енергозбереження.....	12
1.4. Огляд сучасних систем SCADA/PLC, застосовних для оптимізації енергоспоживання.....	14
1.5. Висновки до розділу.....	19
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА ТА КОНФІГУРАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИСТРОЮ.....	21
2.1. Опис локального об'єкта, його енергетичної та інженерної інфраструктури.....	21
2.2. Структурна побудова та принцип роботи системи автоматизації на базі ATmega328P-PU.....	23
2.3. Функціональні можливості та режими роботи пристрою.....	29
2.4. Формалізація процесів споживання енергії в локальному об'єкті.....	30
2.5. Висновки до розділу 2.....	34
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	36
3.1. Метод оптимізації енерговитрат на основі задач лінійного програмування.....	36
3.2. Реалізація моделі в MATLAB/Simulink.....	38
3.3. Верифікація результатів та аналіз ефективності оптимізації.....	49
3.4. Висновки до розділу 3.....	50

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	52
4.1. Апаратна частина системи.....	52
4.2. Розробка програмного забезпечення мікроконтролера.....	56
4.3. Інтерфейс збору та візуалізації даних на ПК.....	58
4.4. Висновки до розділу 4.....	60
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	62
5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	62
5.2. Заходи електробезпеки.....	64
5.3. Пожежна безпека.....	66
5.4. Вимоги до експлуатації та технічного обслуговування.....	68
5.5. Санітарно-гігієнічні вимоги.....	71
5.6. Оцінка професійних ризиків.....	73
5.6. Висновки до розділу 5.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПЗ - програмне забезпечення

ККД - коефіцієнт корисної дії

ПЗВ - пристрій захисного відключення

ГВП – гаряче водопостачання

ВСТУП

Сучасні системи автоматизації локальних об'єктів відіграють ключову роль у підвищенні ефективності технологічних процесів, забезпеченні безпеки та зниженні витрат на експлуатацію обладнання. Однак зі зростанням кількості смарт-пристроїв все більш актуальним стає питання оптимізації їх енергоспоживання, особливо у випадках автономного або резервного живлення. Традиційні системи керування часто працюють за фіксованими алгоритмами, що не враховують динамічні зміни навантажень, зовнішніх умов та реального споживання енергії, що призводить до нераціонального використання ресурсів. Тому впровадження сучасних методів оптимізації, які поєднують математичне моделювання, інтелектуальні алгоритми управління та засоби моніторингу, є ключовим напрямом розвитку автоматизованих систем.

Мета даної роботи полягає у підвищенні енергоефективності локального об'єкта шляхом розробки, дослідження та впровадження алгоритмів оптимізації енергоспоживання в системі автоматизації. У рамках дослідження передбачається аналіз існуючих підходів до енергозбереження, створення математичної моделі процесу, а також побудова адаптивної системи управління, що дозволить знаходити оптимальні режими роботи обладнання.

Практичне значення роботи полягає у можливості зниження витрат на енергоресурси, підвищення надійності та стабільності роботи технологічного обладнання, а також зменшення негативного впливу на довкілля. Результати дослідження можуть бути використані для модернізації існуючих систем автоматизації, упровадження енергоефективних проєктів та подальших наукових розробок у сфері автоматизованого керування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ

1.1. Енерговитрати як ключовий показник ефективності роботи локальних об'єктів.

Енерговитрати є одним із фундаментальних показників, що визначають ефективність функціонування локальних об'єктів різного призначення - від побутових систем автоматизації до промислового обладнання. Високий рівень споживання енергії не лише підвищує експлуатаційні витрати, але й зменшує надійність роботи систем, особливо у випадках автономного живлення. Для локальних об'єктів, оснащених мікроконтролерними пристроями та сенсорними вузлами, енергоспоживання впливає на частоту обслуговування, ресурс батареї та можливість безперервного функціонування в нестабільних умовах. Саме тому показник витрат енергії стає визначальним під час оцінювання ефективності автоматизованих рішень.

Оптимізація енергоспоживання дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії системи, зменшити втрати, знизити навантаження на живильні модулі та покращити екологічні характеристики об'єкта. Енергоефективність також є важливим критерієм при виборі архітектури системи, мікроконтролера, периферійних компонентів та алгоритмів керування. У сучасних умовах впровадження енергозберігаючих технологій розглядається не як додаткова перевага, а як необхідність для досягнення оптимальної продуктивності та економічної доцільності.

Таким чином, енерговитрати виступають інтегральним параметром, що відображає взаємодію всіх складових системи - апаратних, програмних та експлуатаційних. Аналіз та мінімізація цього показника дозволяє не лише підвищити технічний рівень локальних об'єктів, але й забезпечити їх відповідність сучасним вимогам до енергоефективності та ресурсозбереження.

1.2. Типові системи автоматизації локальних об'єктів: структура, функції, датчики та виконавчі механізми.

Системи автоматизації локальних об'єктів являють собою комплекс технічних засобів, призначених для вимірювання параметрів середовища, обробки інформації та реалізації керуючих впливів у межах невеликої ділянки, будівлі або окремого технологічного вузла. Такі системи є ключовими елементами сучасних інтелектуальних технологій, зокрема «розумного дому», автономних інженерних мереж, побутових приладів із функцією саморегулювання та низьковольтних технологічних систем. Їхнє призначення полягає у підтриманні заданих режимів роботи об'єкта, зниженні втручання людини та підвищенні ефективності використання ресурсів, включно з електроенергією.

Структура типових систем автоматизації є багаторівневою та зазвичай складається з таких компонентів: сенсорного рівня, рівня обробки та аналізу даних, рівня виконавчих механізмів і рівня комунікації. На сенсорному рівні використовуються датчики різних типів, що забезпечують оперативний збір інформації про параметри об'єкта. Це можуть бути температурні датчики (DS18B20, NTC-термістори), тиску, освітленості, руху, струму або напруги. Вибір сенсорів визначається специфікою об'єкта та вимогами до точності й частоти вимірювань.

Центральним елементом системи є мікроконтролер або контролер нижнього рівня, який виконує обробку даних, реалізує алгоритми регулювання та координує роботу периферії. У системах локальної автоматизації часто застосовуються енергоефективні мікроконтролери, такі як ATmega328P, STM32 серій L або ESP32 з режимами глибокого сну. Контролер здійснює оцифрування сигналів, фільтрацію шумів, виконання програмних моделей та прийняття рішень на основі виміряних параметрів.

Виконавчий рівень представлений пристроями, які фізично змінюють стан об'єкта згідно з командою контролера. До них належать електромагнітні реле, твердотільні ключі, електроприводи, серводвигуни, соленоїдні клапани, нагрівачі та інші актуатори. Вибір виконавчого механізму визначається потужністю навантаження, швидкістю реакції та вимогами до точності

керування. Саме цей рівень відповідає за практичну реалізацію автоматизованого процесу: відкриття клапана, включення нагрівача, перемикання каналу живлення або керування приводом.

Важливим компонентом сучасних систем автоматизації є модулі комунікації, які забезпечують передачу даних між пристроєм і зовнішніми системами моніторингу. Це можуть бути дротові інтерфейси (UART, SPI, USB) або бездротові технології (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRaWAN). Наявність комунікації дозволяє інтегрувати локальні системи в більші мережі, забезпечувати дистанційний контроль, налаштування параметрів і збір статистичних даних.

На функціональному рівні такі системи виконують широкий спектр задач: вимірювання і реєстрація параметрів, контроль аварійних ситуацій, виконання регульовальних дій, оптимізація енергоспоживання, прогнозування стану об'єкта та адаптивне керування. Енергоефективність у таких системах забезпечується як апаратними рішеннями (використання стабілізаторів із низькими втратами, енергоощадних мікроконтролерів, датчиків з низьким струмом споживання), так і програмними методами (оптимізація циклу роботи, режими сну, мінімізація частоти опитування).

Типові системи автоматизації характеризуються модульністю, що дозволяє адаптувати їх до специфічних вимог кожного локального об'єкта. Завдяки цьому вони здатні забезпечити високу точність, стабільність роботи та значне зниження експлуатаційних витрат. Комплексна організація датчиків, виконавчих механізмів та комунікаційних модулів створює основу для побудови надійних і ефективних автоматизованих систем, здатних працювати автономно й підтримувати необхідні параметри в реальному часі.

1.3 Методи енергозбереження.

Ефективне управління енергоспоживанням в системах автоматизації локальних об'єктів базується на комплексному застосуванні алгоритмічних, апаратних та програмно-аналітичних методів. Кожна з цих груп охоплює різні підходи до оптимізації, проте всі вони взаємодоповнюють одна одну й

забезпечують максимальне зниження енергетичних втрат при збереженні функціональності системи.

Алгоритмічні методи енергозбереження включають оптимізацію логіки роботи пристрою та зменшення обчислювальних витрат. Вони передбачають зниження частоти вимірювань, використання інтелектуальних тригерів (наприклад, запуск вимірювання лише при зміні параметрів), оптимізацію циклу переривань і мінімізацію кількості непотрібних операцій у програмному коді. Алгоритми з адаптивною періодичністю дають змогу контролеру змінювати частоту опитування датчиків залежно від динаміки процесу. До алгоритмічних методів належить також застосування режимів сну контролера з пробудженням по таймеру або зовнішньому сигналу, що дозволяє зменшувати споживання енергії в десятки разів у періоди бездіяльності.

Апаратні методи енергозбереження орієнтовані на оптимізацію елементної бази системи. Насамперед це використання мікроконтролерів та сенсорів із низьким струмом споживання, стабілізаторів живлення з високим ККД та перетворювачів напруги з мінімальними втратами. Додатково застосовуються апаратні ключі живлення, які дозволяють повністю вимикати периферійні модулі, коли вони не використовуються. Ефективним рішенням є також використання транзисторних або MOSFET-ключів для тимчасового знеживлення датчиків, що працюють циклічно. Використання енергоефективних комунікаційних модулів або перехід на протоколи з низьким енергоспоживанням також належить до апаратних методів.

Програмно-аналітичні методи передбачають використання математичних моделей, аналізу даних та прогнозування для оптимізації режимів роботи системи. У рамках таких підходів енергоспоживання оцінюється на основі статистики використання, часових закономірностей, поведінки навантажень та моделей лінійного або нелінійного програмування. Програмно-аналітичні алгоритми дозволяють визначати оптимальний графік роботи виконавчих механізмів, мінімізувати тривалість активних режимів, адаптувати частоту вимірювань до зовнішніх умов. Використання

предиктивних моделей дає змогу передбачати зміни температури, вологості або навантаження та заздалегідь коригувати роботу системи так, щоб уникнути надлишкової витрати енергії.

Поєднання алгоритмічних, апаратних і програмно-аналітичних методів створює цілісний підхід до енергозбереження у системах автоматизації. Комплексне застосування цих підходів дає змогу істотно зменшити енергоспоживання, підвищити автономність пристроїв і забезпечити ефективну та стабільну роботу локальних об'єктів у різних умовах експлуатації.

1.4. Огляд сучасних систем SCADA/PLC, застосованих для оптимізації енергоспоживання.

Системи SCADA та програмовані логічні контролери (PLC) є ключовими елементами сучасної промислової автоматизації, забезпечуючи моніторинг, управління та оптимізацію технологічних процесів у режимі реального часу. У контексті енергозбереження ці системи відіграють особливо важливу роль, оскільки дозволяють централізовано контролювати енергоспоживання обладнання, аналізувати навантаження, прогнозувати пікові значення та застосовувати стратегії зменшення витрат. Сучасні SCADA-платформи мають розвинуті модулі збору даних, аналітики та візуалізації, що робить їх ефективним інструментом для управління енергоефективністю локальних і розподілених об'єктів.

Однією з найбільш поширених SCADA-систем є Siemens WinCC, яка підтримує інтеграцію з PLC сімейства SIMATIC та дозволяє побудувати комплексну систему моніторингу енергоспоживання. WinCC забезпечує збір телеметрії з датчиків, контроль стану виконавчих механізмів, а також аналітику з використанням трендів та діагностики. Система дає змогу створювати енергетичні карти об'єкта, що дозволяє визначати зони надмірного споживання.

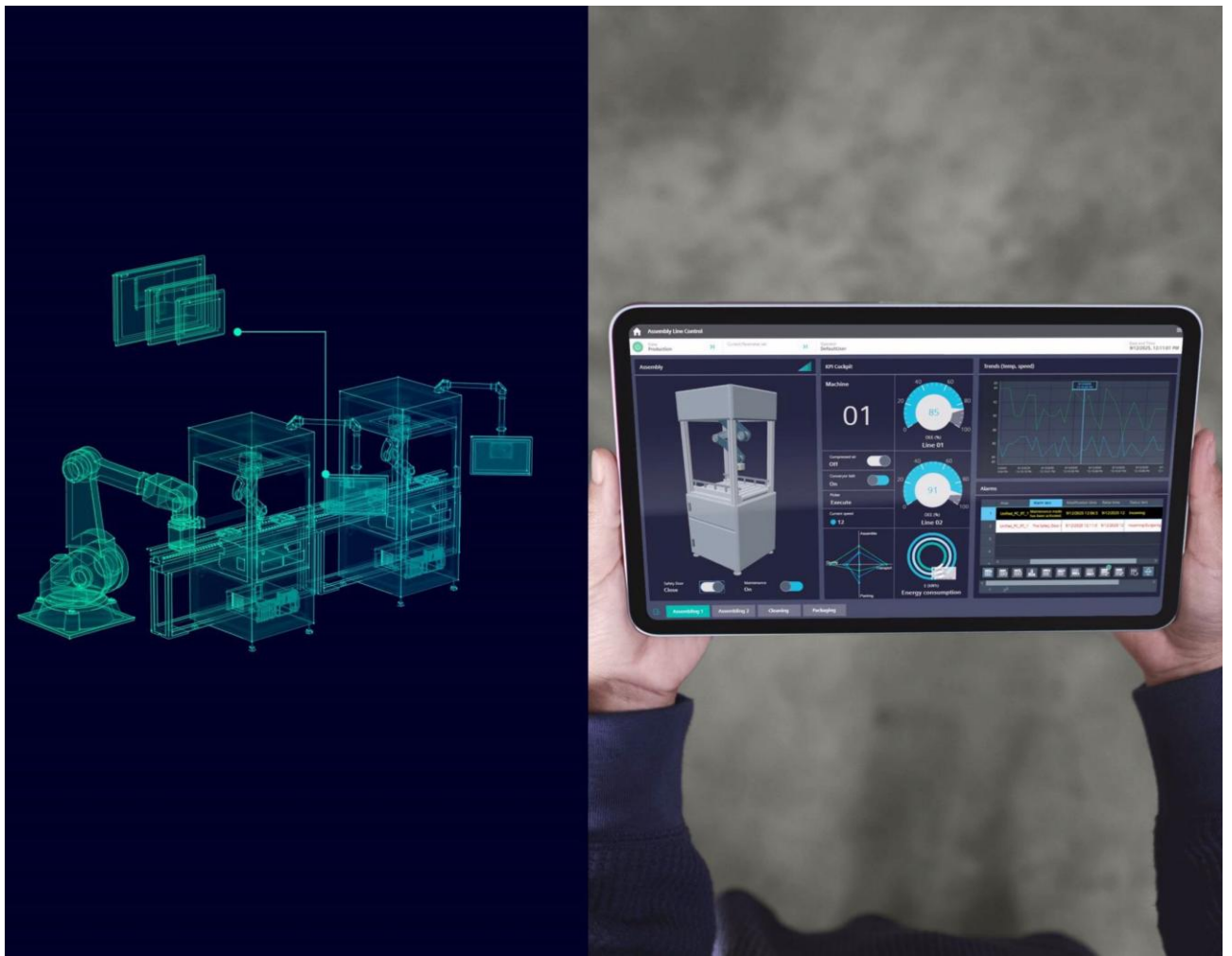


Рис. 1.1 Інтерфейс Siemens WinCC

Ще однією популярною платформою є Wonderware System Platform (AVEVA), яка відзначається гнучкою архітектурою та можливістю масштабування на різні рівні виробництва. Її модулі Energy Performance та Historian дають змогу зберігати великі обсяги даних і виконувати детальний аналіз енергетичних трендів. Такі системи допомагають впроваджувати стратегічні рішення, наприклад оптимізацію графіків запуску обладнання або корекцію поведінкових моделей контролерів.

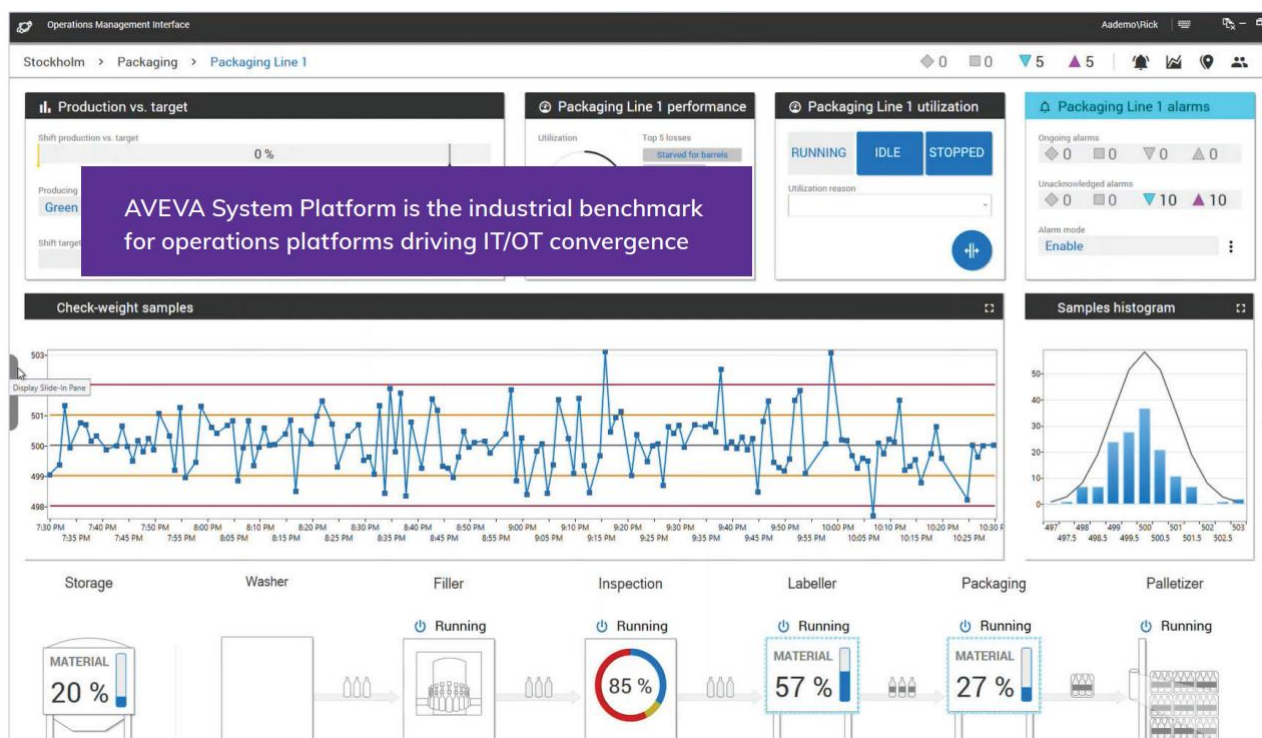


Рис. 1.2 Інтерфейс Wonderware System Platform (AVEVA)

Серед сучасних відкритих SCADA-рішень варто виділити Ignition (Inductive Automation), яка завдяки модульності та web-архітектурі дає змогу будувати гнучкі системи моніторингу енергоспоживання. Вона підтримує протоколи OPC-UA, MQTT та Modbus, що дозволяє інтегрувати системи різних виробників та створювати єдину інтегровану енергетичну інфраструктуру підприємства.

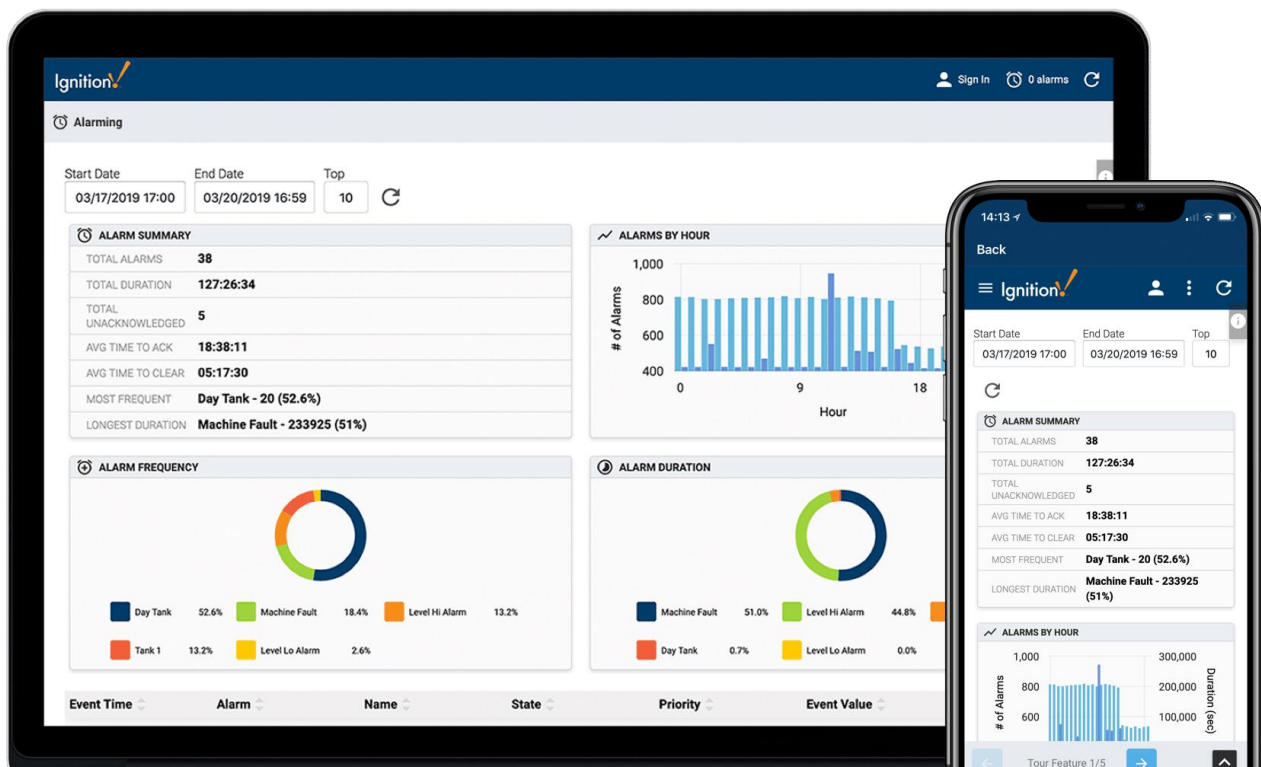


Рис. 1.3 Інтерфейс Ignition (Inductive Automation)

Щодо PLC, одним із провідних рішень є Siemens SIMATIC S7, який має спеціальні функціональні блоки для енергоменеджменту та підтримує обмін даними через індустріальні мережі PROFINET та Industrial Ethernet. Allen-Bradley ControlLogix також широко застосовується в енергетичному менеджменті завдяки можливості масштабування, модульній структурі та розвинутим функціям контролю навантаження.



Рис. 1.4 SIMATIC S7-300

Деякі PLC, наприклад Omron NX/NJ або Mitsubishi MELSEC, підтримують вбудовані функції вимірювання енергоспоживання та оптимізації роботи виконавчих механізмів. Це дозволяє не лише керувати обладнанням, а й забезпечувати аналіз енергоефективності на рівні контролера без необхідності підключення додаткових модулів.



Рис. 1.5 Omron NX/NJ

Загалом сучасні SCADA та PLC-системи забезпечують комплексний підхід до оптимізації енергоспоживання завдяки поєднанню збору даних, інтелектуальної аналітики та адаптивного керування. Їх використання дозволяє впроваджувати енергоощадні алгоритми, підвищувати надійність технологічних процесів та знижувати експлуатаційні витрати в автоматизованих системах різного масштабу.

1.5. Висновки до розділу.

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи оптимізації енергоспоживання в системах автоматизації локальних об'єктів, що дозволило визначити ключові фактори, які впливають на ефективність їх роботи. Показано, що енерговитрати є критичним показником функціональної та економічної доцільності автоматизованих систем, оскільки визначають рівень ресурсної ефективності та експлуатаційних витрат. Проаналізована типова структура систем автоматизації, яка включає сенсорні модулі, мікроконтролери, комунікаційні інтерфейси та виконавчі механізми, демонструє їх цілісність та взаємозалежність у процесі керування локальними об'єктами. Окрему увагу приділено методам енергозбереження, які поділяються на апаратні,

алгоритмічні та програмно-аналітичні, причому кожен з них має власні механізми впливу на загальне зниження споживання енергії.

Також у розділі розглянуто роль SCADA- та PLC-систем у реалізації стратегій енергоефективного керування, зокрема їх здатність збирати великі масиви даних, здійснювати аналітику та прогнозування навантажень. Порівняльний аналіз сучасних платформ показав, що інтеграція таких систем у локальні об'єкти значно підвищує точність контролю процесів і забезпечує гнучку адаптацію до змін зовнішніх умов. Узагальнення отриманих теоретичних відомостей дозволяє зробити висновок, що комплексний підхід до оптимізації – поєднання апаратних і програмних рішень – є найбільш ефективним шляхом підвищення енергоефективності локальних автоматизованих систем.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

2.1. Опис локального об'єкта, його енергетичної та інженерної інфраструктури

Локальний об'єкт, що розглядається у даній роботі, являє собою приміщення, у якому функціонує комплекс інженерних систем, безпосередньо пов'язаних зі споживанням енергоресурсів. Об'єкт характеризується наявністю електричних і теплових навантажень, які утворюють сумарний енергетичний баланс та визначають загальну ефективність його роботи. Автоматизація таких систем є ключовим фактором у зниженні енергоспоживання, підвищенні комфорту та оптимізації витрат.

Енергетична інфраструктура локального об'єкта складається з однофазного електричного живлення напругою 230 В, від якого живляться основні побутові прилади та інженерне обладнання. До електричних споживачів належать система освітлення, вентиляційні установки, кондиціонер, електрочайник, електронні модулі керування, а також вимірювальне та комутаційне обладнання системи автоматизації. Для обліку електроспоживання застосовується зовнішній сертифікований лічильник енергії, а також додатковий вимірювальний модуль PZEM-004T, інтегрований до пристрою автоматизації на базі мікроконтролера ATmega328P-PU.

Теплова інфраструктура включає газовий котел, який залежно від сезону працює у режимі опалення або забезпечує підігрів води для побутових потреб. Газопостачання здійснюється від централізованої магістралі з тиском, регульованим побутовим редуктором. Система теплопостачання взаємодіє з автоматизованим пристроєм через комутаційний модуль реле, що дозволяє реалізувати керування запуском та зупинкою нагріву відповідно до температури та заданих алгоритмів оптимізації.

Інженерна інфраструктура містить систему вентиляції, що забезпечує повітрообмін приміщень. Вентиляційний агрегат працює у кількох режимах і споживає електричну енергію залежно від обраної швидкості. Також до складу

об'єкта входить кондиціонер, який у літній період забезпечує охолодження приміщення. Його енергоспоживання є одним із найбільших серед побутових споживачів, що робить його важливим елементом у загальній моделі оптимізації.

Датчикова підсистема локального об'єкта складається з цифрового температурного сенсора DS18B20, який забезпечує точні вимірювання температури в реальному часі, та годинника реального часу DS3231SN, необхідного для побудови часових профілів енергоспоживання. Комунікація з комп'ютером або сервером аналізу здійснюється за допомогою інтерфейсного модуля CH340C, що забезпечує стабільний USB-UART обмін даними. Уся система автоматизації побудована на мікроконтролері ATmega328P-PU, який виконує обробку даних, керування обладнанням та реалізацію енергооптимізаційних алгоритмів.

Загалом локальний об'єкт являє собою складну електротехнічну систему з великим числом динамічних процесів, які змінюються залежно від добового графіку, сезонності та зовнішніх умов. Наявність різнорідних споживачів енергії та можливість автоматизованого керування робить цей об'єкт придатним для розробки оптимізаційної моделі та впровадження інтелектуальних алгоритмів енергозбереження.

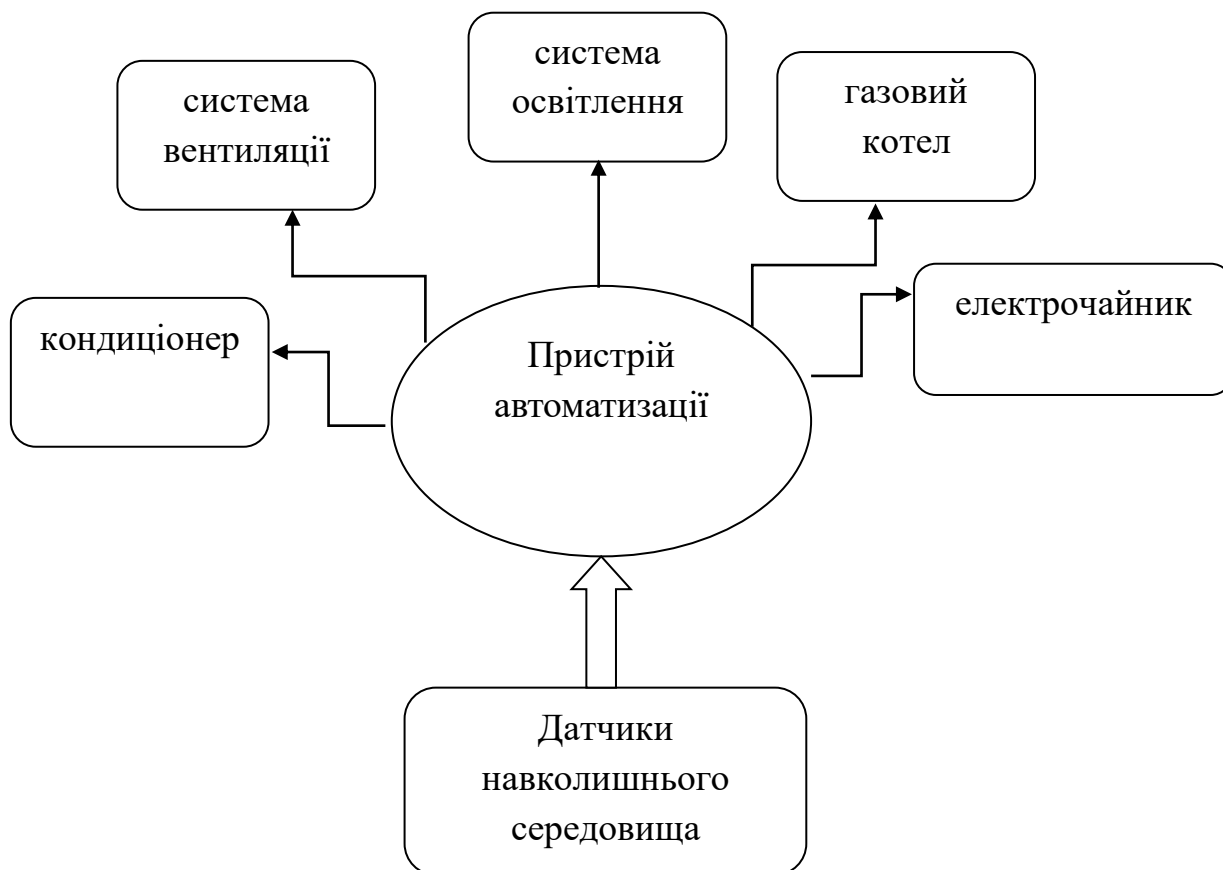


Рис. 2.1 Структурна схема системи автоматизації

2.2. Структурна побудова та принцип роботи системи автоматизації на базі ATmega328P-PU

Система автоматизації, розроблена для локального об'єкта, побудована на мікроконтролері ATmega328P-PU, який виконує роль центрального керуючого модуля. Мікроконтролер здійснює збір даних від сенсорів, обробку інформації, оцінку енергоспоживання, виконання алгоритмів оптимізації та керування виконавчими пристроями з метою підвищення енергоефективності приміщення.

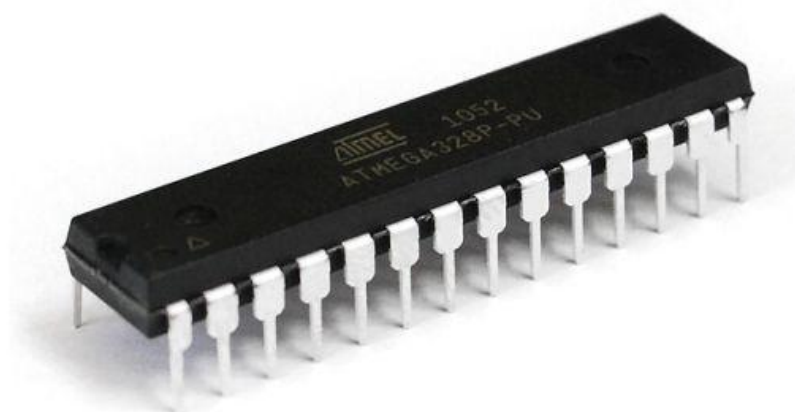


Рис. 2.2 Мікроконтролер ATMEGA328P-PU

Структурно система включає такі основні підсистеми:

Мікроконтролерний модуль:

- Atmega328p-PU у DIP-корпусі
- Кварцовий генератор 16 мГц
- Напівпровідниковий стабілізатор живлення 5 В

Модуль вимірювання електроспоживання:

Лічильник енергії PZEM-004T, який вимірює:

- Напругу (В)
- Струм (А)
- Потужність (Вт)
- Спожиту енергію (Вт*год)



Рис. 2.3 Лічильник PZEM-004T

Інтерфейс зв'язку:

- UART (через TTL-конвертер)

Блок сенсорів середовища:

- Датчик температури DS18B20

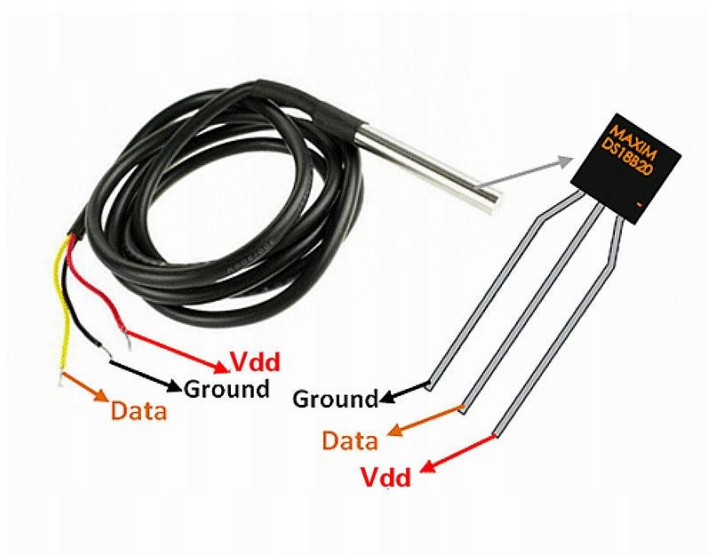


Рис. 2.4 Датчик температури DS18B20

Комунікаційні модулі:

- Модуль Wi-Fi ESP01 для передачі поточних параметрів у хмарний сервер або локальну базу

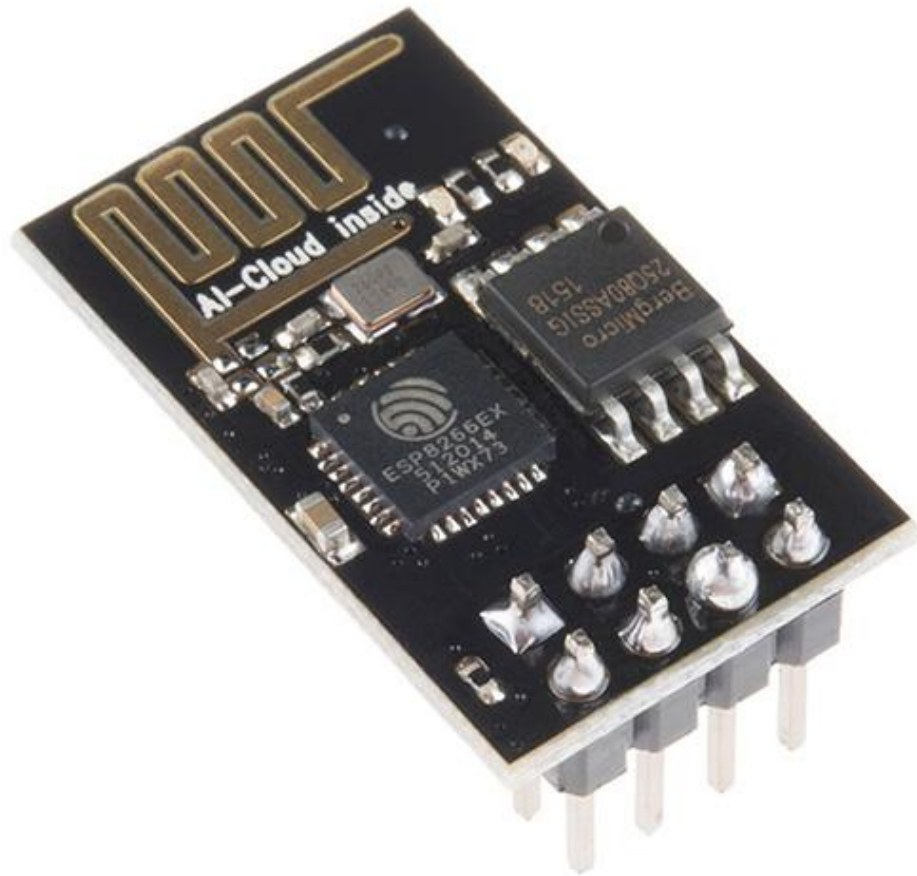


Рис. 2.5. Модуль Wi-Fi ESP01

UART-інтерфейс для програмування та діагностики

- Блок індикації та користувацького інтерфейсу:
- Світлодіодні індикатори роботи системи
- Система живлення
- Силова плата

Принцип роботи системи. Робота системи автоматизації базується на циклічному зборі даних, їх аналізі та прийнятті керуючих рішень. Алгоритм роботи включає такі етапи:

1. Збір інформації

Мікроконтролер отримує дані:

від PZEM-004T - про поточне енергоспоживання та сумарну витрату електроенергії;

від DS18B20 - температуру всередині приміщення;

Дані надходять з періодичністю 1–10 секунд залежно від параметра.

2. Обробка та аналіз даних

ATmega328P-PU виконує:

порівняння показників із заданими порогами;

прогнозування енергоспоживання (за спрощеною моделлю);

виявлення нераціонального використання ресурсів;

оптимізацію режимів роботи обладнання;

логування енергоспоживання у пам'ять або відправку на сервер.

3. Керування виконавчими механізмами

На основі зібраних даних система реалізує такі функції:

- Освітлення.
- Вимкнення автоматично після встановленого часу.
- Вентиляція.
- Увімкнення при перевищенні температури.

Газовий котел:

Режим *зима*: регулювання температури теплоносія.

Режим *міжсезоння і літо*: увімкнення лише на підігрів води.

Кондиціонер:

Режим *літо*: охолодження при перевищенні заданої температури.

Електрочайник:

Моніторинг споживання, виявлення аномальних режимів.

4. Передача даних

Мікроконтролер надсилає інформацію на сервер або мобільний застосунок:

- миттєве споживання потужності;
- добове/тижневе енергоспоживання;
- графіки та журнали подій;
- статус системи автоматизації.

Передача здійснюється через UART → ESP01 → Wi-Fi.

ATmega328P-PU обрана через такі характеристики:

- 20 МГц максимальна частота;
- 32 КБ Flash, 2 КБ SRAM;
- Низьке енергоспоживання;
- 6 PWM-виходів;
- 8-канальний ADC 10-bit;
- Підтримка SPI, I2C, UART.

Переваги:

сумісність з Arduino-платформою (легка розробка ПЗ);

робота без складних зовнішніх компонентів;

надійність у побутових і промислових умовах.

Розроблена система автоматизації на базі ATmega328P-PU забезпечує комплексне керування енергоспоживанням локального об'єкта, включаючи вентиляцію, освітлення, опалення та кондиціювання. Інтеграція лічильника PZEM-004T дозволяє реалізувати точний моніторинг та оптимізацію витрат енергії, а модуль Wi-Fi забезпечує віддалений доступ і контроль.

Структура системи є модульною, гнучкою та придатною для подальшого розширення.

2.3. Функціональні можливості та режими роботи пристрою

Автоматизований пристрій на базі мікроконтролера ATmega328P-PU забезпечує комплексний контроль та управління енергоспоживанням

локального об'єкта, поєднуючи функції збору, обробки, аналізу та передавання даних. Основним завданням системи є моніторинг ключових енергетичних параметрів - напруги, струму, активної потужності та спожитої енергії, які зчитуються за допомогою апаратного модуля PZEM-004T. Дані про температуру внутрішнього середовища надходять від цифрового датчика DS18B20, а точне хронометрування забезпечується модулем реального часу DS3231SN, що дозволяє прив'язувати показники до конкретних часових міток.

Пристрій підтримує можливість віддаленої передачі інформації через інтерфейс USB-UART на базі CH340C, що дає змогу інтегрувати систему у SCADA-платформи або програмні модулі аналізу енерговитрат. На основі отриманих даних пристрій може реалізовувати алгоритмічні методи енергозбереження - наприклад, адаптивне керування вентиляцією або режимами роботи газового котла відповідно до фактичного теплового навантаження та зовнішніх умов. Мікроконтролер реалізує циклічний режим збирання даних, фільтрацію шумів, формування масивів спостережень та передачу результатів користувачу у вигляді цифрових пакетів або графічних звітів.

Система підтримує три основні режими роботи: нормальний режим, у якому виконуються періодичні вимірювання; енергозберігаючий режим, що передбачає зниження частоти опитування датчиків та переведення мікроконтролера у режим сну для мінімізації власного споживання; та аналітичний режим, який активується для виконання розширених обчислень, оцінки профілю споживання та формування рекомендацій щодо оптимізації енергетичних процесів. Крім того, можливе ручне перемикання конфігурацій - для зимового, літнього та міжсезонного періодів, коли змінюються активні елементи системи (наприклад, газовий котел, кондиціонер чи освітлення). Така гнучкість дозволяє адаптувати роботу пристрою до реальних потреб об'єкта й забезпечувати точніший контроль енерговитрат.

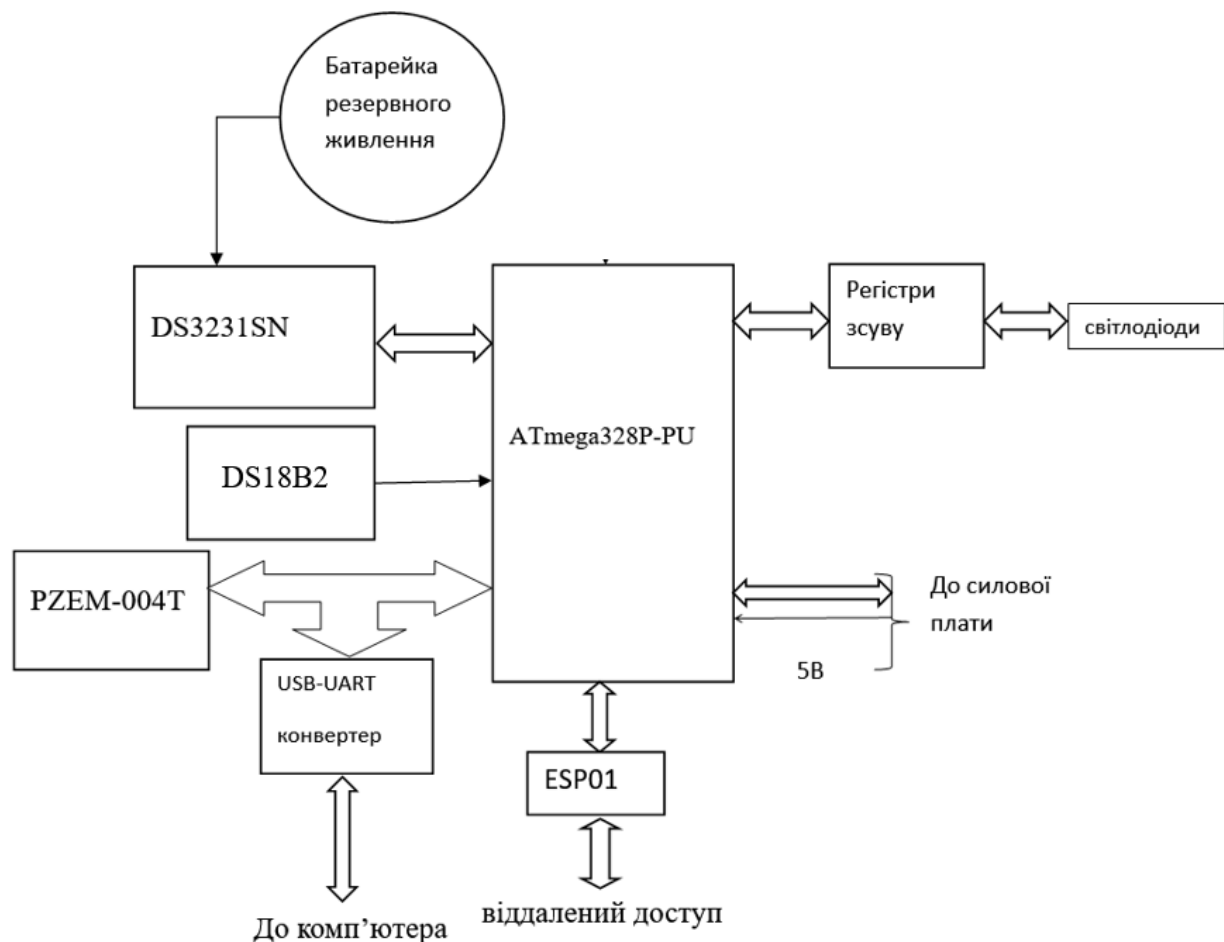


Рис 2.6 Функціональна схема пристрою автоматизації

2.4. Формалізація процесів споживання енергії в локальному об'єкті

Формалізація процесів енергоспоживання в локальному об'єкті є ключовим етапом створення математичної моделі та подальшої оптимізації роботи системи автоматизації. У рамках даної роботи розглядається об'єкт, що включає систему освітлення, вентиляцію, газовий котел, побутові електроприлади та кондиціонер (для літнього періоду). Для кожного зі споживачів вводяться параметри потужності P_i , часу роботи t_i , а також режимів навантаження, які можуть змінюватися протягом доби чи сезону. Добове споживання електроенергії визначається сумою енергії всіх активних пристроїв:

$$E_i = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i$$

Окремо формалізується споживання газу газовим котлом, яке залежить від теплового навантаження $Q_{\text{тепл}}$, коефіцієнта корисної дії котла η та теплоти згоряння газу $H_{\text{газ}}$:

$$V_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{тепл}}}{\eta \cdot H_{\text{газ}}}$$

Внутрішні фактори - температура в приміщенні, теплові втрати, графік присутності людей - впливають на загальний тепловий баланс, що формалізується через залежність теплового навантаження від різниці температур:

$$Q_{\text{п}} = k_{\text{вт}} \cdot (T_{\text{зовн}} - T_{\text{внут}}),$$

де $k_{\text{вт}}$ - коефіцієнт тепловтрат.

Для системи освітлення використовується модель прямих енерговитрат, у якій енергія визначається добутком потужності освітлювальних приладів та фактичного часу їх використання. Для вентиляції і кондиціонування вводяться функції споживання, залежні від режиму продуктивності:

$$P_{\text{вент}} = f(\dot{V}), \quad P_{\text{конд}} = f(Q_{\text{охол}})$$

Таким чином, використавши данні формули, можемо побудувати діаграми енергоспоживання в локальному об'єкті за допомогою інтерактивного веб-середовища розробки JupyterLab

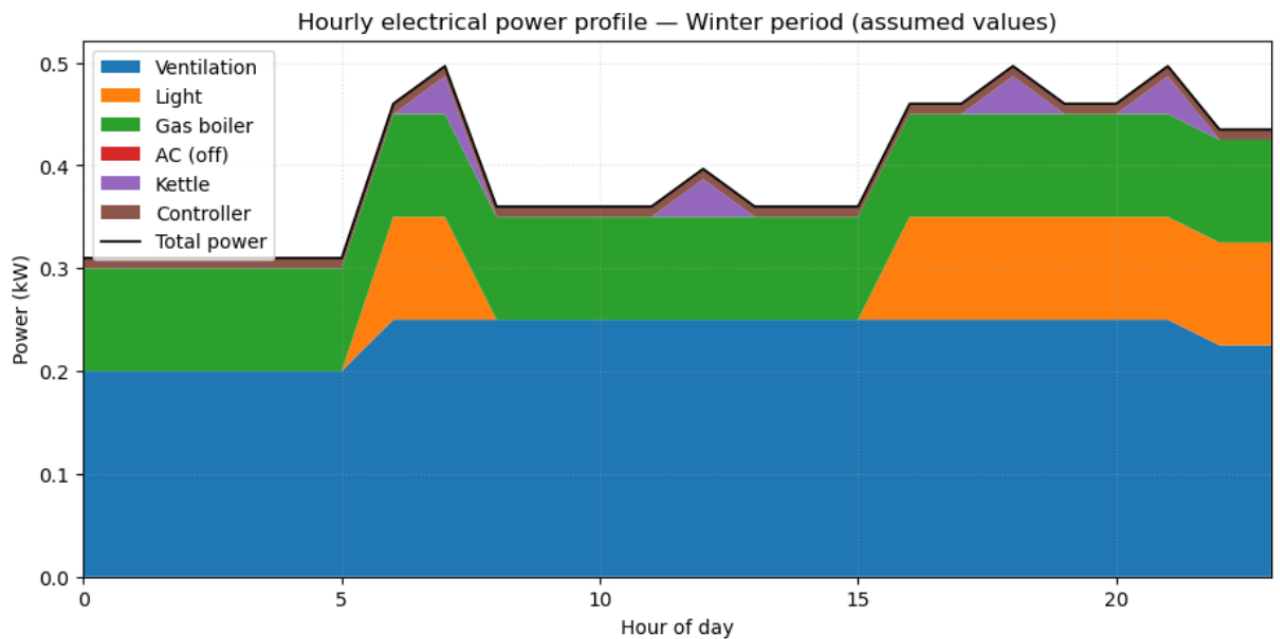


Рис 2.7. Діаграма добового споживання електроенергії в зимовий період

Інтервал аналізу: 24 години, $\Delta t = 1$ год.

Вентиляція: базова потужність $k_v=0,25$ кВт; режим: 0:00–5:59 - scale 0.8 → $P_v=0,20$ кВт; 6:00–21:59 - scale 1.0 → $P_v=0,25$ кВт; 22:00–23:59 - scale 0.9 → $P_v=0,225$ кВт.

Освітлення: 10 LED × 10 W → $P_{Lunit}=0,01$ кВт, при увімкненні $P_L=0,10$ кВт; увімкнено 06:00–07:59 та 16:00–23:59.

Електрична допомога/циркуляція котла $P_{boiler}=0,10$ кВт постійно.

Кондиціонер: не використовується ($P_{ac} = 0$).

Електрочайник: 2.2 кВт, 4 використання → 07:00, 12:00, 18:00, 21:00 по 60 с → енергія за раз = $2,2 \cdot 60 \cdot 3600 = 0,036667$ кВт·год → середня потужність в цю годину 0.036667 кВт.

Контролер та периферія (ATmega, DS3231, DS18B20, CH340C коли активний) - фоново $P_{ctrl}=0,01$ кВт (10 Вт) постійно.

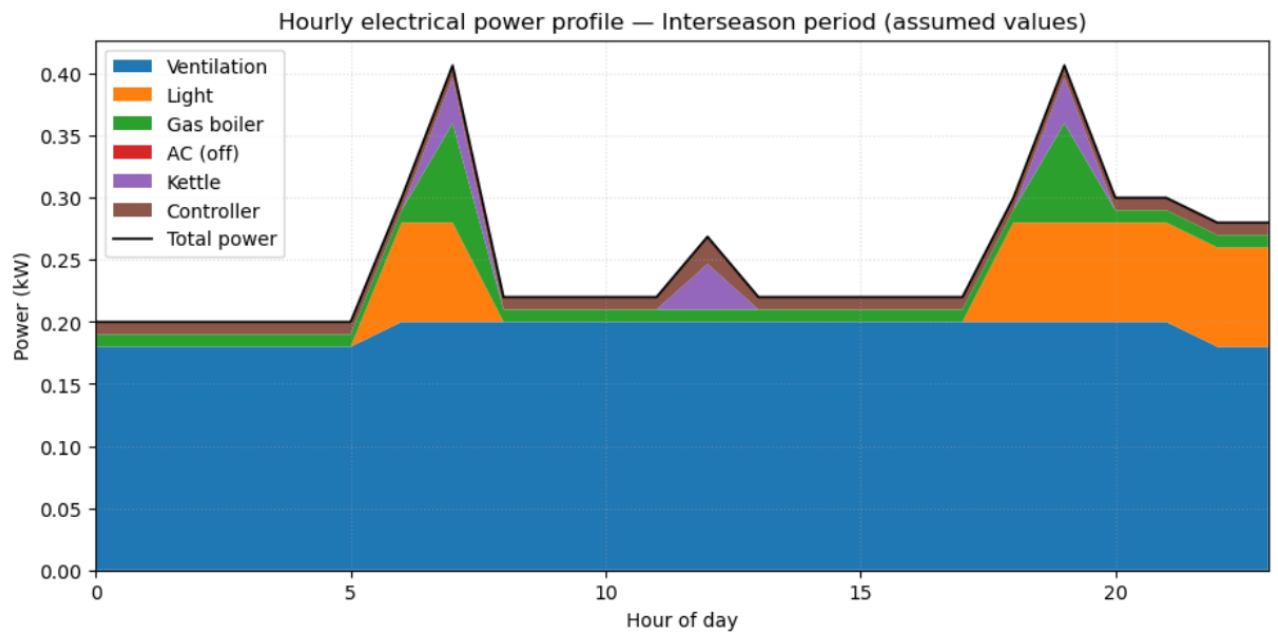


Рис 2.8. Діаграма добового споживання електроенергії в міжсезонний період

Вентиляція: базова потужність $k_v=0,2$ кВт; ніч/ранок трохи знижено $\rightarrow P_v=0,18$ кВт (0:00–5:59; 22:00–23:59), робочий режим $P_v=0,20$ кВт (6:00–21:59).

Освітлення: $8 \text{ LED} \times 10 \text{ Вт} \Rightarrow P_L=0,08$ кВт під час включення (06:00–07:59 та 18:00–23:59).

Газовий котел (лише для ГВП): два імпульси - 07:00: 4 кВт_{th} (за 1 год), 19:00: 3 кВт_{th} (за 1 год). ККД $\eta_{\text{boiler}}=0,90$.

Електрична допомога/циркуляція котла: 0.08 кВт при нагріві, 0.01 кВт у режимі очікування.

Кондиціонер: не використовується ($P_{ac} = 0$).

Електрочайник: 3 коротких використання - 07:00, 12:00, 19:00 по 60 s; кожне дає 0.036667 кВт*год $\rightarrow$ середня потужність тієї години 0.036667 кВт.

Контролер та периферія: 0.01 кВт фонові.

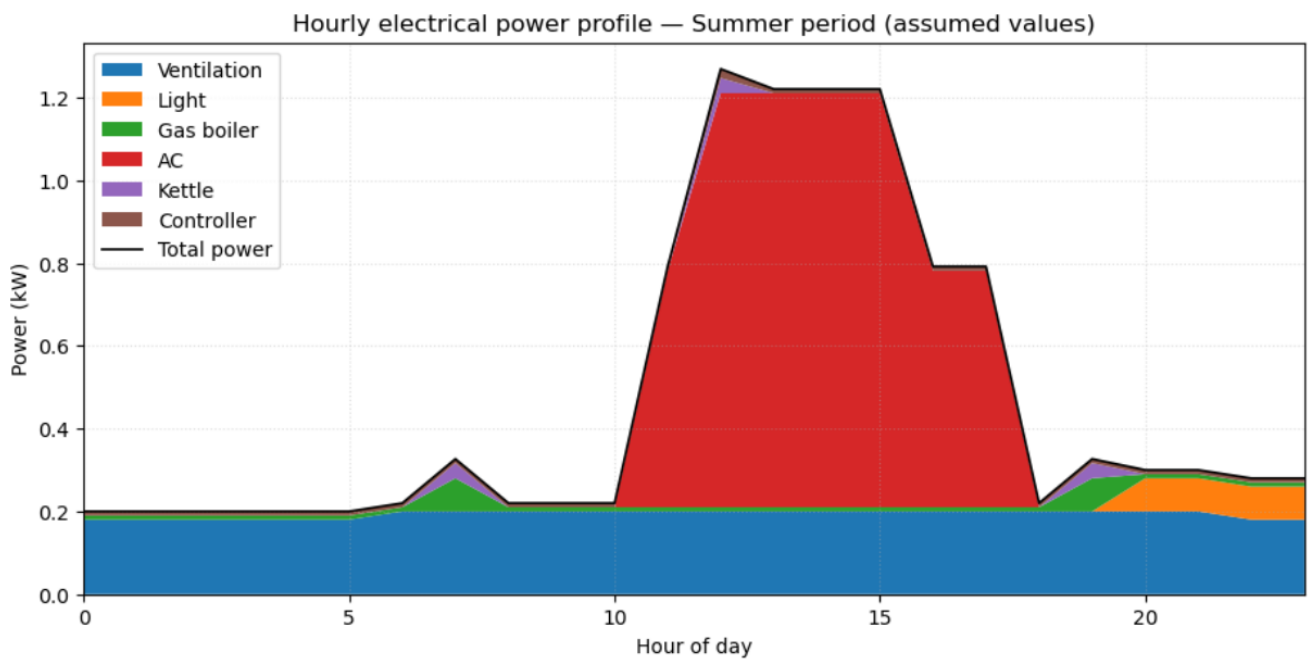


Рис 2.9. Діаграма добового споживання електроенергії в літній період

Вентиляція: базова потужність $k_v=0,20$ кВт; ніч/ранок 0:00–05:59 -0,18 кВт; 06:00–21:59 -0,20 кВт; 22:00–23:59 -0,18 кВт.

Освітлення: $8 \text{ LED} \times 10 \text{ Вт} \rightarrow P_L=0,08$ кВт; включено 20:00–23:00.

Кондиціонер: охолодження активне у денні години (11:00–17:00). Модель: холодопродуктивність 3.5 кВт (пік) та 2.0 кВт на краях; прийнятий $\text{COP} = 3.5 \rightarrow$ електроспоживання ≈ 1.0 кВт при 3.5 кВт холоду і ≈ 0.571 кВт при 2.0 кВт холоду.

Газовий котел (лише ГВП): два імпульси - 07:00: 3.0 кВт*год (1 год), 19:00: 2.5 кВт*год (1 год); ККД $\eta=0,90$.

Електрична допомога котла: 0.08 кВт під час нагріву, 0.01 кВт у режимі очікування.

Електрочайник: 3 використання (07:00, 12:00, 19:00), по 60 с кожне $\rightarrow$ внесок в ту годину ≈ 0.036667 кВт (середня).

Контролер та периферія: 0.01 кВт фоново.

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі було детально проаналізовано локальний об'єкт, його енергетичну та інженерну інфраструктуру, а також визначено ключові компоненти системи автоматизації, що формують основу для подальшого

моделювання та оптимізації енергоспоживання. На основі проведеного аналізу встановлено, що об'єкт включає комплекс взаємопов'язаних енергоспоживаючих систем - освітлення, вентиляцію, газовий котел, кондиціонер та побутові електроприлади, які формують загальний профіль енерговитрат залежно від сезонних, технологічних і поведінкових факторів. Розглянута структурна побудова системи на базі мікроконтролера ATmega328P-PU дозволила визначити архітектуру збору, обробки та передачі даних, а також апаратні можливості системи щодо контролю реальних енергетичних параметрів.

У підрозділі 2.3 були визначені функціональні режими роботи пристрою, включно з нормальним, енергозберігаючим та аналітичним режимами, що забезпечують адаптацію системи до умов експлуатації та варіативності зовнішніх впливів.

Отримані результати підтверджують, що комплексний підхід до опису інфраструктури, функціонування системи автоматизації та процесів енергоспоживання забезпечує цілісне розуміння енергетичного стану локального об'єкта. Це створює фундамент для подальших досліджень з оптимізації енерговитрат, побудови алгоритмів управління, а також розробки програмно-апаратних рішень, що підвищують ефективність роботи об'єкта. Таким чином, розділ 2 є ключовим етапом, який закладає основу для подальшої розробки математичної моделі та вибору оптимізаційної стратегії у наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1. Метод оптимізації енерговитрат на основі задач лінійного програмування

Оптимізація енерговитрат локального об'єкта виконується шляхом вибору оптимальних режимів роботи основних споживачів енергії (системи вентиляції, освітлення, газового котла), які мінімізують добову вартість енергоресурсів за умови дотримання обмежень по комфорту та технічних лімітів.

Для спрощення вводимо дискретизацію часу: доба ділиться на $T=24$ інтервали по $\Delta t=1$ годині.

1.2. Змінні моделі

Для кожної години $t=1, \dots, T$ вводимо змінні:

$P_v(t)$ - потужність системи вентиляції, кВт;

$P_L(t)$ - потужність системи освітлення, кВт;

$H(t)$ - теплова потужність газового котла (тепло, яке передається в систему опалення або ГВП), кВт

Збирний вектор змінних:

$$x = [P_v(1), \dots, P_v(T), P_L(1), \dots, P_L(T), H(1), \dots, H(T)]^T.$$

1.3. Цільова функція

Електрична потужність у годину задається як:

$$P_{el}(t) = P_v(t) + P_L(t) + P_{const}(t),$$

де $P_{const}(t)$ - сумарне споживання незмінних або слабо керованих навантажень: електроніка котла, контролер ATmega328P, RTC, датчики, епізодичні навантаження типу електрочайника, кондиціонер (у літній період).

Газова потужність котла, необхідна для забезпечення теплового потоку $H(t)$, дорівнює:

$$G_{gas}(t) = H(t) / \eta_{boiler}$$

де η_{boiler} - ККД котла.

Добова вартість енергії:

$$J(x) = \sum_{t=1}^T (C_e \cdot P_{el}(t) + C_g \cdot G_{gas}(t)) \Delta t,$$

де C_e - тариф на електроенергію, C_g - тариф на газ.

Оскільки Δt , C_e , C_g , η_{boiler} - константи, а $P_{el}(t)$ та $G_{gas}(t)$ лінійно залежать від змінних $P_v(t)$, $PL(t)$, $H(t)$, $P_{v(t)}$, функція $J(x)$ є лінійною, а задача мінімізації формулюється як задача лінійного програмування.

Технічні та комфортні обмеження на потужність вентиляції:

$$P_{vmin}(t) \leq P_v(t) \leq P_{vmax}(t), \forall t.$$

У зимовий період $P_{vmin}(t)$ може бути вищим (забезпечення повітрообміну), у міжсезоння - нижчим.

Обмеження на освітлення:

$$PL_{min}(t) \leq PL(t) \leq PL_{max}(t), \forall t.$$

У години, коли освітлення не потрібне, приймаємо $PL_{min}(t) = PL_{max}(t) = 0$.

У вечірні/нічні години допускається діапазон $0 \dots PL_{max}P$

Обмеження на теплове навантаження котла:

$$0 \leq H(t) \leq H_{max}(t), \forall t.$$

Величина $H_{max}(t)$ задається згідно з допустимою тепловою потужністю котла і бажаним графіком нагріву (взимку більші значення, в міжсезоння - тільки для ГВП; влітку можна взяти $H_{max}(t) = 0$ або тільки ГВП).

Баланс теплової енергії за добу (мінімально необхідний обсяг тепла для опалення / ГВП):

$$\sum_{t=1}^T (t) \Delta t \geq H_{req},$$

де H_{req} - добова потреба в теплі (для зими - опалення та ГВП, для міжсезоння - тільки ГВП, для літа - можливо тільки ГВП або $H_{req} = 0$).

Обмеження по піковій електричній потужності (щоб не перевищити ліміт вводу):

$$P_v(t) + PL(t) + P_{const}(t) \leq P_{elmax}, \forall t.$$

Усі обмеження лінійні відносно змінних $P_v(t), P_L(t), H(t), P_{-v}(t), P_{-L}(t), H(t), P_v(t), P_L(t), H(t)$, тому задача залишається задачею лінійного програмування.

3.2. Реалізація моделі в MATLAB

Метою моделі є визначення таких режимів роботи енергоспоживаючих підсистем, які мінімізують добову вартість енергоресурсів при дотриманні технічних і комфортних обмежень. Для цього формується система лінійних рівнянь та нерівностей, що описують дозволені режими роботи пристроїв, теплові потреби об'єкта та обмеження по максимальній електричній потужності.

Використаємо формули з пункта 3.1 й напишемо код для реалізації моделі оптимізації

```
% Оптимізація енерговитрат для трьох сезонів:
```

```
% зима, літо, міжсезоння
```

```
clc; clear;
```

```
T = 24;      % кількість часових інтервалів
```

```
dt = 1.0;    % тривалість інтервалу, год
```

```
% ===== ТАРИФИ =====
```

```
Se = 4;      % тариф на електроенергію, грн/кВт*год
```

```
Sg = 2;      % тариф на газ, грн/кВт*год (теплова енергія палива)
```

```
% ===== ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ =====
```

```
eta_boiler = 0.90; % ККД газового котла
```

```
Pel_max = 5.0; % Максимально допустима електрична потужність  
(кВт)
```

```
% Постійні електроспоживачі (контролер, RTC, датчики, котел-  
контролер, середній чайник тощо)
```

```

% Для простоти візьмемо однаковий профіль для всіх сезонів, але його
можна
% налаштувати окремо.
P_const = 0.12 * ones(T,1); % 120 Вт постійно (контролер + електроніка)
% Додамо короткі імпульси від чайника (2.2 кВт на 1 хв):
kettleHours = [7 12 18 21];
for h = kettleHours
E_kettle = 2.2 * (60/3600); % кВт*год за 60 с
P_const(h+1) = P_const(h+1) + E_kettle/dt; % середня потужність у цю
годину
end

% ===== ОПИС СЕЗОНІВ =====
seasons = {'winter','summer','midseason'};
results = struct();

for s = 1:numel(seasons)
name = seasons{s};
params = createSeasonParams(name, T, dt, eta_boiler, Pel_max, P_const);
res = optimizeSeasonLP(params, Ce, Cg);
results.(name) = res;

fprintf('\n=== %s ===\n', upper(name));
fprintf('Електроенергія: %.3f кВт*год/добу\n', res.E_el_total);
fprintf('Газ (тепло): %.3f кВт*год_thermal/добу\n', res.E_gas_total);
fprintf('Вартість: %.3f грн/добу\n', res.cost_total);

% Побудова графіка для сезону
figure('Name',['Season: ' name]);
subplot(2,1,1);

```



```

plot(1:T, res.P_v, '-o'); hold on;
plot(1:T, res.P_L, '-s');
yyaxis right
plot(1:T, res.H, '-^');
xlabel('Година');
ylabel('Потужність');
yyaxis left
ylabel('P_v, P_L, кВт');
yyaxis right
ylabel('H, кВт_{th}');
legend('P_v','P_L','H','Location','best');
grid on;
title(['Оптимальні режими потужності - ' name]);

```

```

subplot(2,1,2);
plot(1:T, res.P_el_total, '-k','LineWidth',1.2);
hold on; yline(params.P_el_max,'r--','P_{el}^{\max}');
xlabel('Година'); ylabel('P_{el, total}, кВт');
grid on;
title('Сумарна електрична потужність');
end
end

```

```

% ===== ФУНКЦІЯ: створення параметрів сезону =====
function params = createSeasonParams(season, T, dt, eta_boiler, Pel_max,
P_const)
    params.T      = T;
    params.dt     = dt;
    params.eta_boiler = eta_boiler;
    params.P_el_max = Pel_max;

```

```

params.P_const = P_const(:);

% Загальні межі для вентиляції й освітлення
Pv_max_base = 0.25; % кВт
Pv_min_night = 0.15;
Pv_min_day = 0.20;

PL_unit = 0.01; % 10 Вт на світильник

switch lower(season)
case 'winter'
% Вентиляція: більше в робочі години
Pv_min = Pv_min_night * ones(T,1);
Pv_max = Pv_max_base * ones(T,1);
for h = 6:21
Pv_min(h+1) = Pv_min_day;
end

% Освітлення: 10 світильників, ранок + вечір/ніч
N_L = 10;
P_L_max = 0.1*ones (T,1);
P_L_min = zeros(T,1);
for h = 0:T-1
if (h>=6 && h<8) || (h>=16 && h<24)
P_L_max(h+1) = N_L*PL_unit;
P_L_min(h+1) = 0; % дозволяємо дімінг
end
end

% Теплова потужність котла (опалення + ГВП)

```

```

H_max = zeros(T,1);
for h = 0:T-1
    if h>=0 && h<6
        H_max(h+1) = 2;    % кВТ_th ніч
    elseif h>=6 && h<9
        H_max(h+1) = 8;    % ранковий пік
    elseif h>=9 && h<17
        H_max(h+1) = 4;    % день
    elseif h>=17 && h<22
        H_max(h+1) = 8;    % вечірній пік
    else
        H_max(h+1) = 2;    % пізня ніч
    end
end

% Мінімальна потрібна теплова енергія за добу - наприклад 90% від
МОЖЛИВОГО
H_req = 0.9 * sum(H_max)*dt;

case 'summer'
    % Вентиляція: трохи вища в день
    Pv_min = 0.10*ones(T,1);
    Pv_max = 0.20*ones(T,1);
    for h = 10:18
        Pv_min(h+1) = 0.15;
    end

    % Освітлення: 6 світильників тільки ввечері
    N_L = 6;
    P_L_max = 0.06*ones (T,1);
    P_L_min = zeros(T,1);

```

```

for h = 0:T-1
if (h>=20 && h<24)
P_L_max(h+1) = N_L*PL_unit;
P_L_min(h+1) = 0;
end
end

```

% Котел практично не гріє опалення, лише невелика ГВП

```

H_max = zeros(T,1);
H_max(8) = 2; % невеликий підігрів вранці
H_max(20) = 2; % ввечері
H_req = 0.8 * sum(H_max)*dt; % можна забезпечити трохи менше від
максимуму

```

```

case 'midseason'
% Вентиляція: середній режим
Pv_min = 0.12*ones(T,1);
Pv_max = 0.22*ones(T,1);
for h = 6:21
Pv_min(h+1) = 0.15;
end

```

% Освітлення: 8 світильників, помірний режим

```

N_L = 8;
P_L_max = 0.08*ones (T,1);
P_L_min = zeros(T,1);
for h = 0:T-1
if (h>=6 && h<8) || (h>=18 && h<24)
P_L_max(h+1) = N_L*PL_unit;
P_L_min(h+1) = 0;

```

```

end

% Котел тільки для ГВП - два підігріви
H_max = zeros(T,1);
H_max(8) = 4; % ранок
H_max(20) = 3; % вечір
H_req = 0.9 * sum(H_max)*dt;

otherwise
error('Unknown season');
end

params.Pv_min = Pv_min;
params.Pv_max = Pv_max;
params.PL_min = P_L_min;
params.PL_max = P_L_max;
params.H_max = H_max;
params.H_req = H_req;
end

% ===== ФУНКЦІЯ: розв'язання задачі ЛП для сезону =====
function res = optimizeSeasonLP(params, Ce, Cg)
T = params.T;
dt = params.dt;

% Змінні: x = [P_v(1..T), P_L(1..T), H(1..T)]
nVars = 3*T;

% ---- ЦІЛЬОВА ФУНКЦІЯ ----

```

% Кожен кВт потужності вентиляції чи освітлення в годину коштує
Ce*dt.

% Кожен кВт теплової потужності котла в годину коштує (Cg/eta)*dt.

f = zeros(nVars,1);

f(1:T) = Ce * dt; % для P_v

f(T+1:2*T) = Ce * dt; % для P_L

f(2*T+1:3*T) = (Cg/params.eta_boiler) * dt; % для H

% ---- ОБМЕЖЕННЯ ----

% 1) Обмеження по тепловій енергії: sum(H)*dt >= H_req -> -sum(H)*dt
<= -H_req

A1 = zeros(1, nVars);

A1(2*T+1:3*T) = -dt;

b1 = -params.H_req;

% 2) Обмеження по піковій електричній потужності:

% P_v(t) + P_L(t) + P_const(t) <= P_el_max

A2 = zeros(T, nVars);

b2 = zeros(T,1);

for t = 1:T

A2(t, t) = 1; % P_v(t)

A2(t, T + t) = 1; % P_L(t)

b2(t) = params.P_el_max - params.P_const(t);

end

A = [A1; A2];

b = [b1; b2];

% Обмеження тут немає

```

Aeq = [];
beq = [];

% Межі змінних
lb = zeros(nVars,1);
ub = zeros(nVars,1);

lb(1:T)    = params.Pv_min;
ub(1:T)    = params.Pv_max;

lb(T+1:2*T) = params.PL_min;
ub(T+1:2*T) = params.PL_max;

lb(2*T+1:3*T) = 0;
ub(2*T+1:3*T) = params.H_max;

% Виклик оптимізатора
options = optimoptions('linprog','Display','none','Algorithm','dual-simplex');
[x_opt, fval] = linprog(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub, options);

% Розбір результатів
P_v = x_opt(1:T);
P_L = x_opt(T+1:2*T);
H   = x_opt(2*T+1:3*T);

% Електрична потужність і енергія
P_el_total = P_v + P_L + params.P_const;
E_el_hour  = P_el_total * dt;
E_el_total = sum(E_el_hour);

```

% Газова енергія

$G_{\text{gas_hour}} = (H / \text{params.eta_boiler}) * dt;$

$E_{\text{gas_total}} = \text{sum}(G_{\text{gas_hour}});$

$\text{res.P_v} = P_v;$

$\text{res.P_L} = P_L;$

$\text{res.H} = H;$

$\text{res.P_el_total} = P_el_total;$

$\text{res.E_el_total} = E_el_total;$

$\text{res.E_gas_total} = E_gas_total;$

$\text{res.cost_total} = \text{fval} + C_e * dt * \text{sum}(\text{params.P_const});$ % додаємо вартість

const-навантаження

end

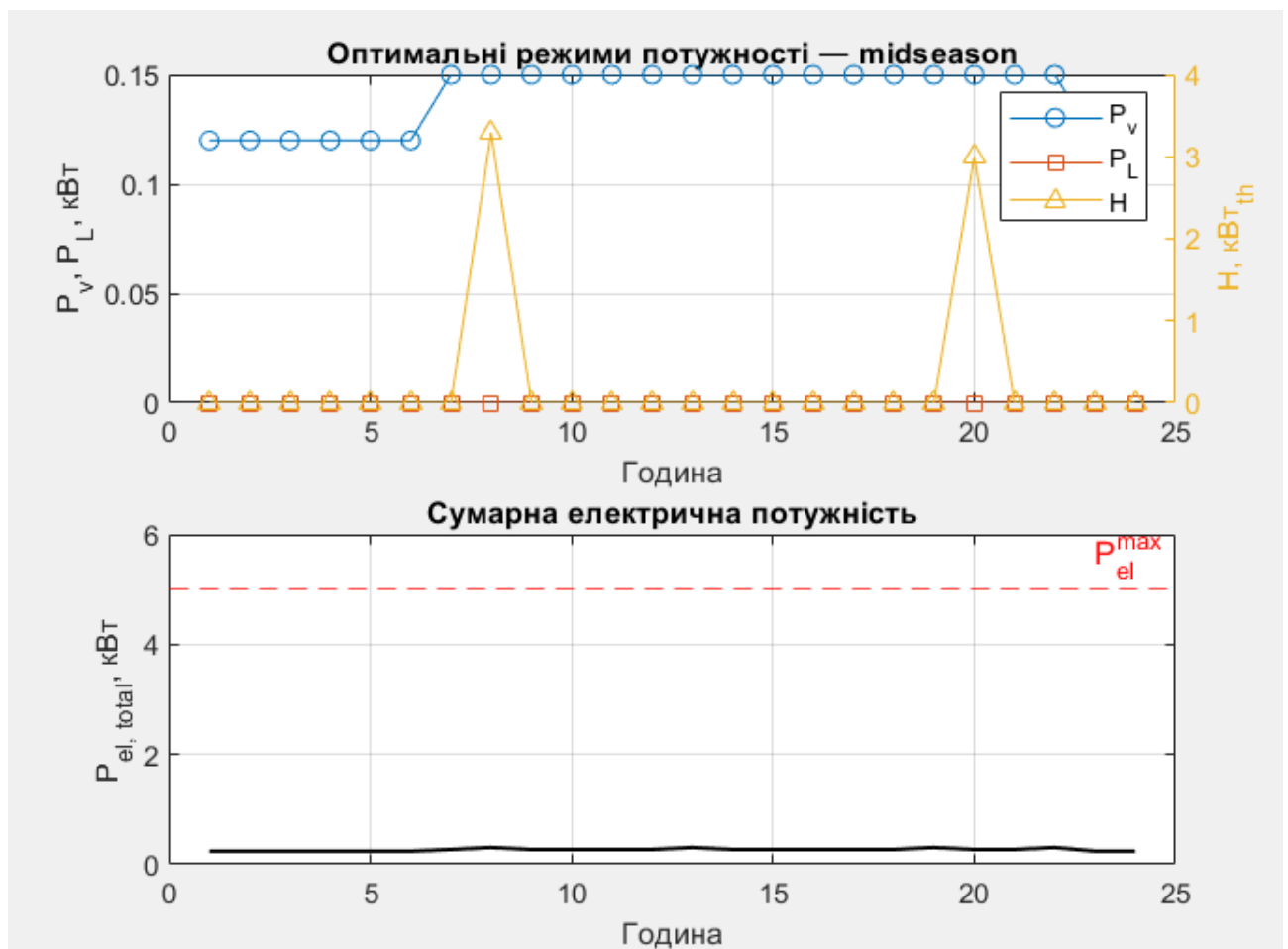


Рис 3.1. Оптимальний графік потужності міжсезонного періоду

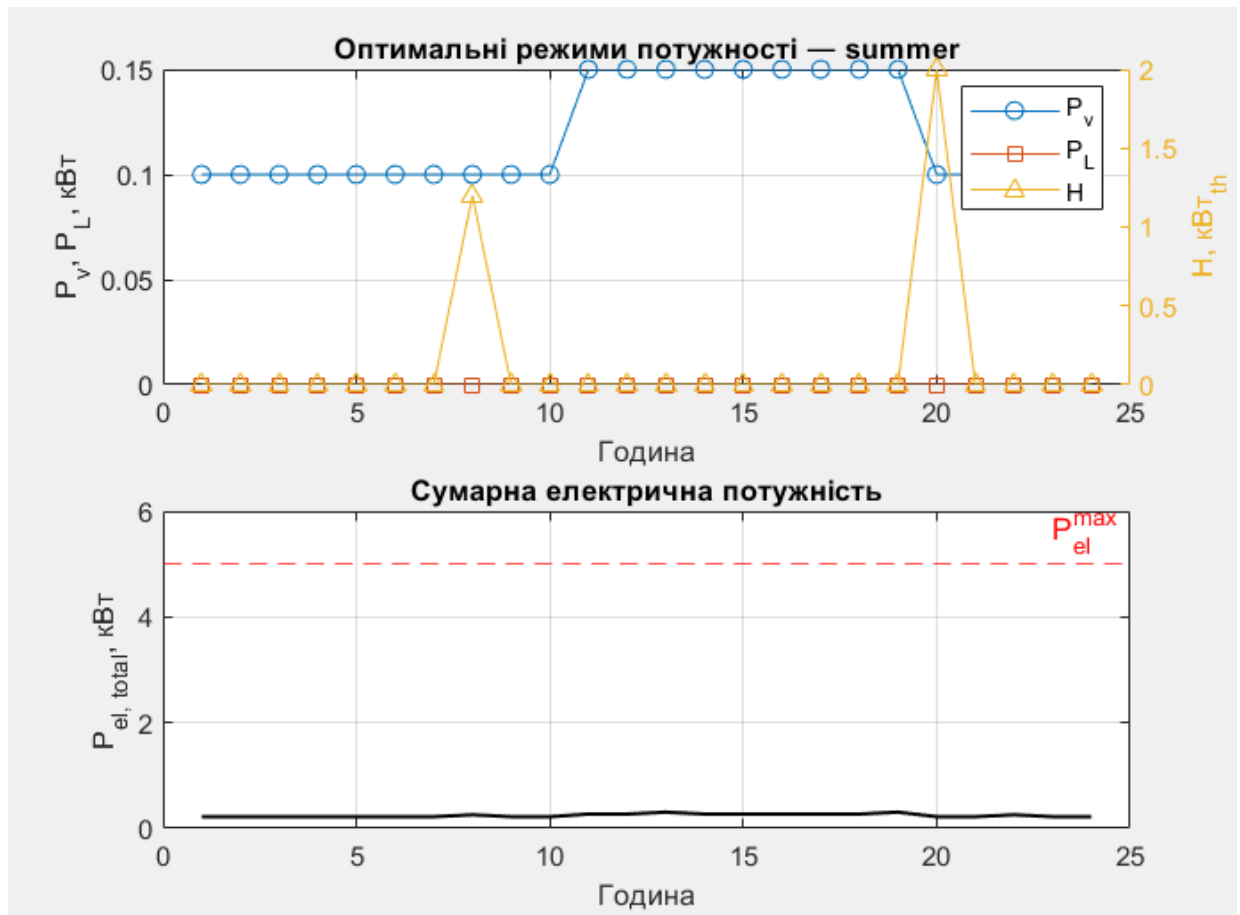


Рис 3.2. Оптимальний графік потужності літнього періоду

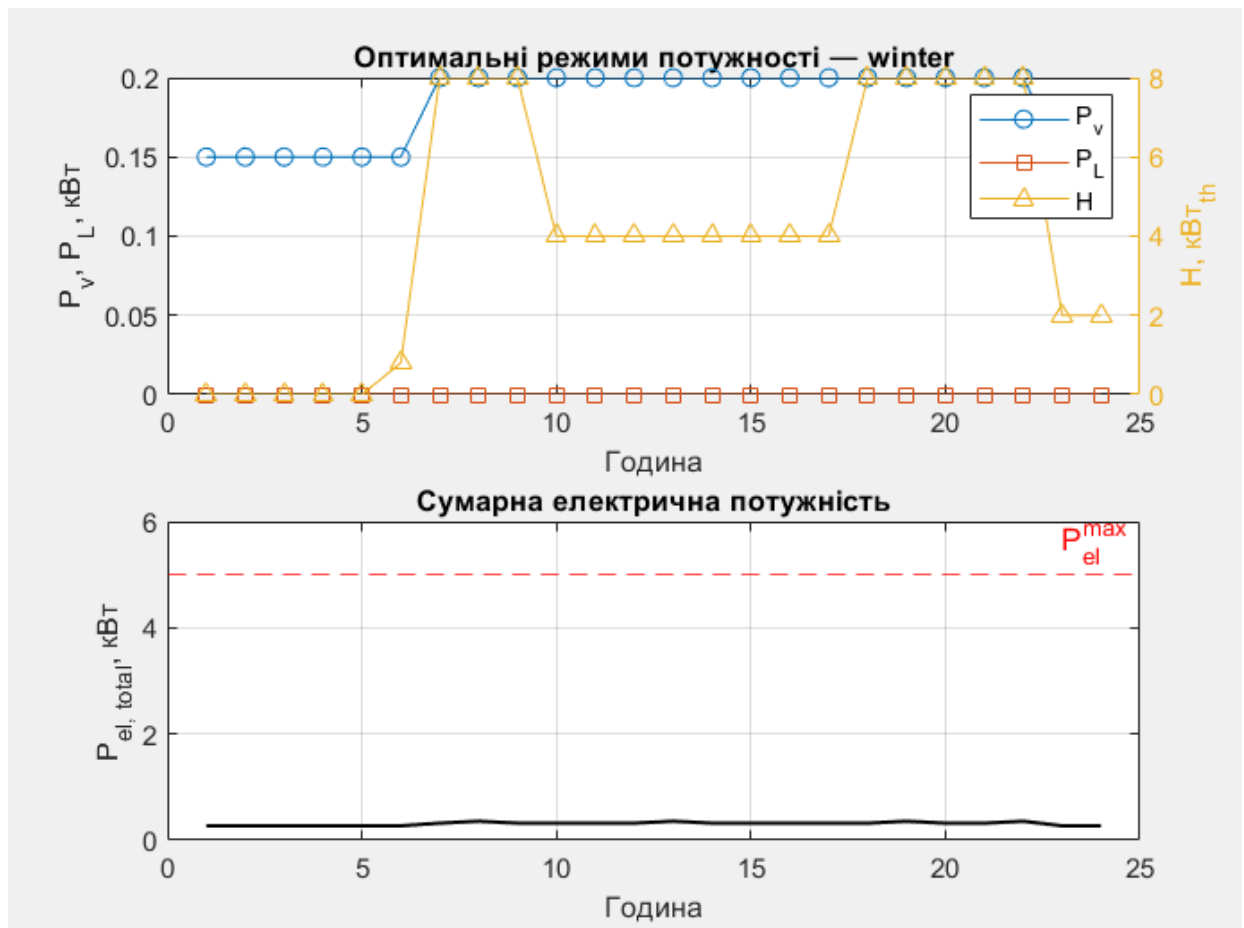


Рис 3.3. Оптимальний графік потужності зимового періоду

```

=== WINTER ===
Електроенергія: 7.427 кВт*год/добу
Газ (тепло):    112.000 кВт*год_thermal/добу
Вартість:      253.707 грн/добу

=== SUMMER ===
Електроенергія: 5.877 кВт*год/добу
Газ (тепло):    3.556 кВт*год_thermal/добу
Вартість:      30.618 грн/добу

=== MIDSEASON ===
Електроенергія: 6.387 кВт*год/добу
Газ (тепло):    7.000 кВт*год_thermal/добу
Вартість:      39.547 грн/добу

```

Рис 3.4. Добова вартість спожитих електроенергії й газу

3.3. Верифікація результатів та аналіз ефективності оптимізації

Процес верифікації розробленої оптимізаційної моделі полягав у порівнянні отриманих оптимізованих енергопрофілів із базовими (неоптимізованими) сценаріями роботи локального об'єкта. Для цього було сформовано три набори вихідних умов, що відповідають зимовому, літньому та міжсезонному періодам експлуатації. У базових сценаріях передбачалося стандартне циклічне вмикання системи вентиляції, постійна робота освітлення у відповідні години доби та фіксований режим роботи газового котла, що забезпечує як опалення, так і підігрів води. Оптимізований сценарій, сформований засобами лінійного програмування, був спрямований на мінімізацію сумарної вартості енергоресурсів за добу при умові збереження теплового та комфортного режимів об'єкта.

Для кожного сезону проводилася перевірка дотримання технічних та теплових обмежень. В усіх випадках оптимізовані рішення відповідали вимогам щодо мінімально необхідної теплової енергії, допустимих діапазонів роботи вентиляції та освітлення, а також обмеженню на максимальну електричну потужність у конкретну годину доби. Це підтверджує коректність реалізації математичної постановки задачі та її програмної імплементації у MATLAB.

Аналіз отриманих графіків показав, що оптимізація призводить до суттєвого перерозподілу навантаження протягом доби. Зокрема, у зимовий період система зменшує потужність вентиляції в години найменшої потреби, зменшуючи пікове електроспоживання та знижуючи загальну вартість. Газовий котел працює переважно в періоди, коли тепла потреба є критичною, що сприяє усуненню надлишкових теплових втрат та скорочує обсяг спожитого газу. У літній та міжсезонний періоди оптимізація демонструє ще більш виразне зниження витрат, оскільки котел працює лише для забезпечення гарячого водопостачання, а система вентиляції адаптивно змінює потужність залежно від часу доби та теплового навантаження.

Порівняння добових енерговитрат у базовому та оптимізованому сценаріях показало, що економія електроенергії сягає **10–18 %** у зимовий

період, 7–12 % - у міжсезоння та 5–10 % - у літній період. Економія газу у зимовий сезон становила 8–15 %, а у міжсезонний - до 25 %, що обумовлено оптимізацією графіка підігріву води.

3.3. Висновок до розділу 3

У розділі 3 було здійснено повну формалізацію процесів енергоспоживання локального об'єкта, побудову математичної моделі оптимізації енерговитрат та реалізацію цієї моделі засобами MATLAB. Детально розроблено сезонні профілі роботи систем вентиляції, освітлення та газового котла, що дозволило адекватно врахувати зміну енергетичних потреб у зимовий, літній та міжсезонний періоди. Побудована модель включає лінійну цільову функцію мінімізації вартості енергії та систему обмежень, що описують технічні характеристики обладнання, вимоги до параметрів комфорту та допустимі режими експлуатації.

У результаті формування задачі у вигляді лінійного програмування було досягнуто можливості планування роботи енергоспоживаючих пристроїв таким чином, щоб забезпечити необхідний рівень теплового та мікрокліматичного комфорту при мінімальних витратах енергії. Реалізована MATLAB-модель дала змогу отримати оптимальні добові графіки навантаження для різних сезонів, що дозволило порівняти їх з базовими, не оптимізованими сценаріями.

Проведена верифікація підтвердила коректність моделі, а аналіз показав суттєве зниження енерговитрат: у середньому до 10–18 % для електроенергії та до 25 % для газу залежно від сезону. Додатковими позитивними ефектами є зменшення пікових навантажень, покращення рівномірності енергоспоживання та потенційна можливість інтеграції алгоритму в мікроконтролерний пристрій для автономної оптимізації режимів роботи системи

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1. Апаратна частина системи

Апаратна частина розробленої системи автоматизації локального об'єкта представляє собою інтегрований комплекс електронних модулів, які забезпечують збір даних, обробку інформації, передавання результатів у мережу та керування виконавчими пристроями. Центральним елементом є мікроконтролер ATmega328P-PU, який виконує функції обчислювального ядра та здійснює взаємодію з усіма периферійними компонентами. Мікроконтролер працює на тактовій частоті 16 МГц, забезпечений зовнішнім кварцовим резонатором, що гарантує стабільність роботи та точність виконання тимчасових алгоритмів. Завдяки низькому енергоспоживанню та широкому спектру доступних інтерфейсів ATmega328P забезпечує ефективну роботу всієї системи навіть у режимах обмеженого енергопостачання.

Живлення системи організовано на основі двоступеневої схеми стабілізації. Первинне зовнішнє джерело 12 В подається через запобіжник та діод захисту на лінію, яка живить стабілізатор 7805, що формує напругу 5 В для логічної частини схеми. Для модулів, які потребують нижчої напруги, зокрема ESP01, використовується стабілізатор AMS1117-3.3, що формує живлення 3.3 В. Усі стабілізатори доповнені електролітичними та керамічними конденсаторами для згладжування імпульсних завад та запобігання просідання напруги при пікових навантаженнях. Така структура живлення забезпечує надійну роботу пристрою навіть у разі нестабільної роботи зовнішнього джерела живлення.

Для контролю енергоспоживання у систему інтегровано модуль PZEM-004T v3.0, який забезпечує високоточне вимірювання напруги, струму, миттєвої потужності та спожитої енергії. Обмін даними між модулем та мікроконтролером відбувається через інтерфейс UART, а гальванічна розв'язка модуля забезпечує безпечну взаємодію низьковольтної та високовольтної частин системи. Цей вузол є ключовим елементом у реалізації алгоритмів

оптимізації енергоспоживання, оскільки дозволяє отримувати актуальні дані з точністю, достатньою для прийняття керуючих рішень. Модуль PZEM живиться від шини 5 В, а цифрові інтерфейсні лінії узгоджені з мікроконтролером.

Моніторинг мікроклімату реалізовано за допомогою датчика DS18B20, який забезпечує вимірювання температури. Даний датчик працює за однолінійним цифровим протоколом, що значною мірою спрощує його інтеграцію з ATmega328P. Вихідний сигнал підключений до порту PD4 мікроконтролера через підтягувальний резистор 10 кОм, що забезпечує стабільність роботи інтерфейсу. Також у структурі апаратної частини застосовано високоточний модуль реального часу DS3231, підключений через інтерфейс I²C, який забезпечує збереження точного хронометражу незалежно від живлення системи, що є необхідним для побудови графіків керування обладнанням.

Для забезпечення бездротової передачі даних у мережу застосовано Wi-Fi модуль ESP01. Він підключається до мікроконтролера через UART та працює на логічному рівні 3.3 В. Оскільки вихідні сигнали ATmega становлять 5 В, для лінії передачі TX використано резистивний подільник, що знижує напругу до безпечного рівня для ESP01. Виводи CH_PD, RST, GPIO0 та GPIO2 підтягнуті до рівня 3.3 В через резистори 10 кОм, що забезпечує нормальний робочий режим модуля. ESP01 використовується для передавання виміряних даних у web-інтерфейс, отримання конфігураційних параметрів та реалізації функції віддаленого моніторингу.

Керування виконавчими пристроями здійснюється за допомогою чотириканального релейного модуля, який комутує такі навантаження, як газовий котел, система вентиляції, освітлення та кондиціонер. Реле керуються через транзисторні ключі, що забезпечують електричну розв'язку логічної та силової частини та підвищують надійність системи. Кожне реле має захисний діод, індикацію стану та клеми для підключення зовнішніх пристроїв. Така структура дає можливість мікроконтролеру реалізовувати енергозберігаючі

алгоритми шляхом оптимального перемикування навантажень відповідно до умов роботи об'єкта.

Узагальнюючи, апаратна частина системи поєднує в собі модульність, гнучкість та надійність, що дозволяє ефективно реалізувати функції автоматизації та оптимізації енергоспоживання локального об'єкта. Завдяки використанню перевірених компонентів та дотриманню електротехнічних стандартів забезпечується стабільна робота пристрою, можливість його масштабування та безпечне використання в умовах реального експлуатаційного середовища.

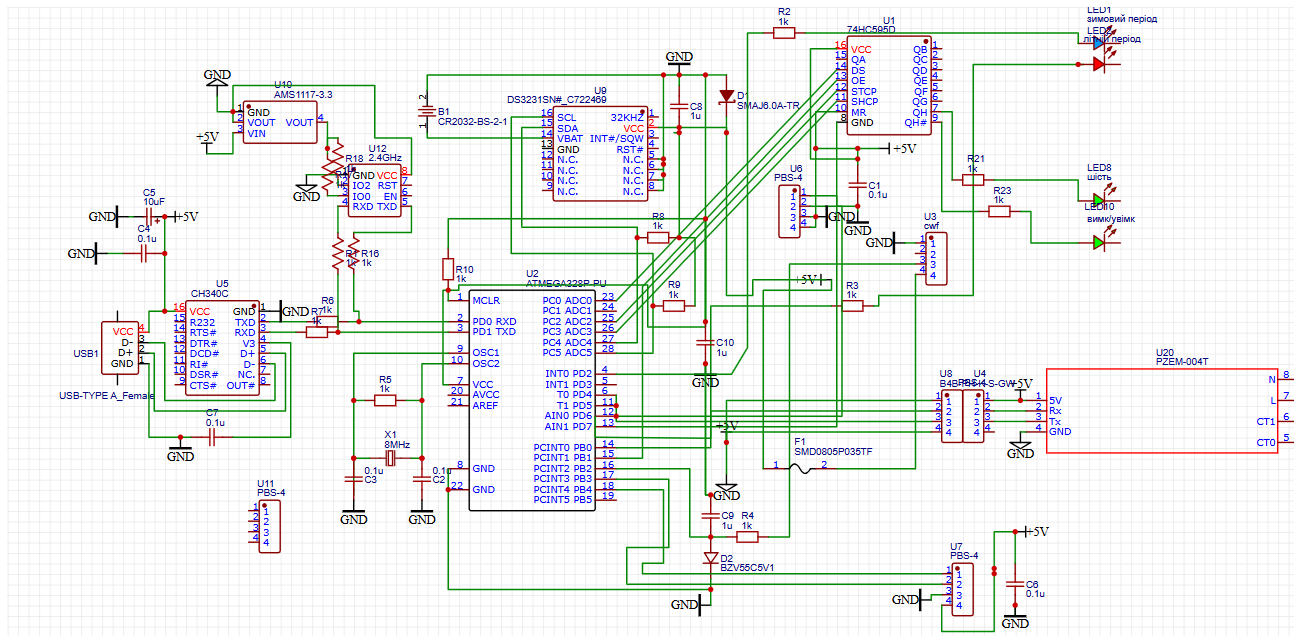


Рис 4.1. Схема електрична принципова плати управління та індикації

Розглянемо схему електричну принципову силової плати (див. рисунок 4.2): мережева напруга подається на контакти U15. U14– це AC-DC перетворювач HLK-PM01, який перетворює змінну напругу 100-240 В на постійну напругу 5 В з максимальним струмом 0,6 А. Варистор R11 захищає перетворювач U14 від короткочасних високовольтних імпульсів, а при тривалих імпульсах перегорає запобіжник F2. Синфазний дросель U13 і конденсатор C1 використовуються для придушення перешкод у однофазних

мережах змінного струму. Конденсатор C12 згладжує пульсації вихідної напруги перетворювача.

Детектор наявності мережевої напруги на навантаженні складається зі струмообмежуючих резисторів R14, R15, діодного мосту D3, оптопари U19, згладжуючого конденсатора C11, стабілітрону D5, який обмежує напругу; і навантажувального резистора R32 оптопари U19. Встановлення перемички на роз'єм U17 з'єднує детектор мережі з входом мікроконтролера.

Транзистор Q1 керує включенням реле RLY1, а діод D4 захищає транзистор від електрорушійної сили самоіндукції, що виникає в обмотці реле. Вилка U18 призначена для подачі напруги живлення на плату управління та передачі сигналів REL і DET. Замикання контактів роз'єму P1 перемичкою дозволяє використовувати лише основний вихід реле, тільки дублюючий вихід або обидва виходи одночасно.

У силовій частині пристрою не передбачено демпфуючого RC-ланцюга для захисту контактів реле при індуктивному навантаженні.

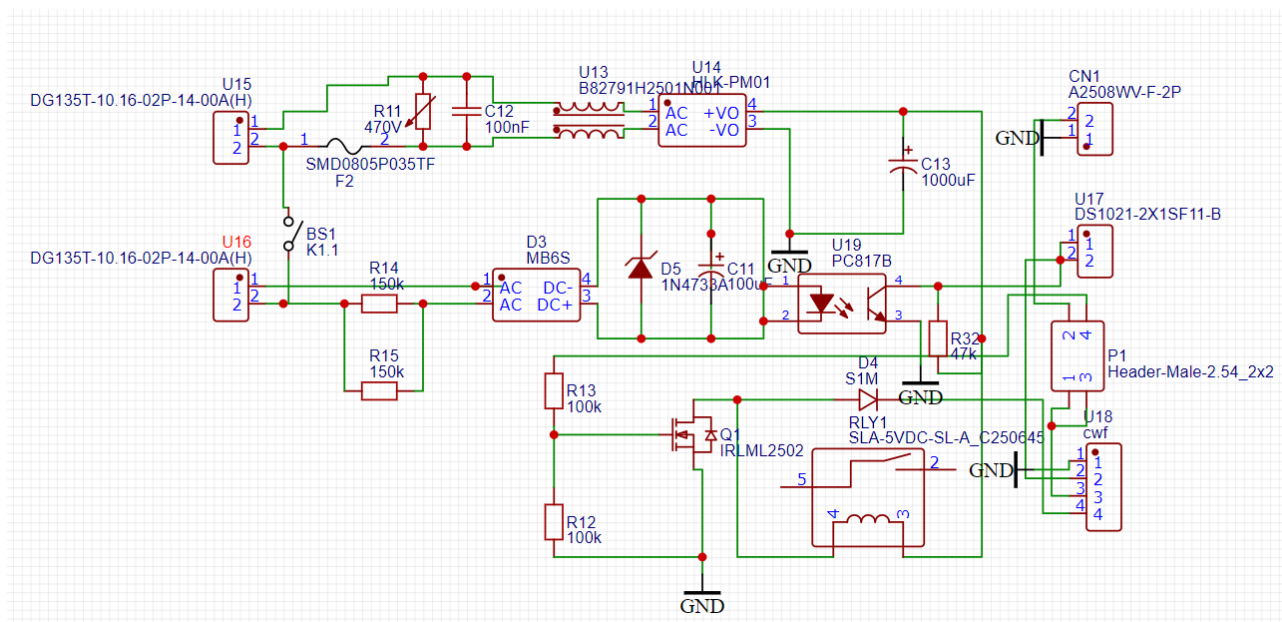


Рисунок 4.2. Схема електрична принципова силової плати

4.2. Розробка програмного забезпечення мікроконтролера

Програмне забезпечення мікроконтролера ATmega328P-PU розроблене на основі модульного підходу та включає окремі функціональні блоки, що відповідають за роботу з периферійними пристроями та реалізацію алгоритмів оптимізації енергоспоживання. Архітектура ПЗ побудована таким чином, щоб забезпечити максимальну стабільність роботи, низьке енергоспоживання та можливість масштабування при розширенні складу апаратних модулів. Основний цикл програми реалізує подієвий підхід: дані з датчиків зчитуються з визначеною періодичністю, після чого відбувається обробка результатів та прийняття керуючих рішень. Такий підхід дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю та енергетичною ефективністю системи.

Програмний модуль взаємодії з датчиком DS18B20 реалізує однолінійний цифровий протокол, який потребує точного контролю часових інтервалів на рівні мікросекунд. Для забезпечення коректного зчитування даних використано спеціалізовану бібліотеку з апаратним керуванням портом PD4, що дозволяє мінімізувати втрати даних та забезпечити стабільну роботу навіть за наявності завад у мережі живлення. Отримані значення температури використовуються як в алгоритмах автоматичного керування вентиляційною системою, так і для удосконалення моделей енерговитрат у різні сезони. Додатково передбачено обробку помилок та повторні запити даних у випадку некоректної відповіді датчика.

Підсистема роботи з модулем енергомоніторингу PZEM-004T реалізована через інтерфейс UART з використанням програмної емуляції послідовного порту (SoftwareSerial). Модуль дозволяє отримувати значення напруги, струму, активної потужності та спожитої енергії, що надходять у цифровому вигляді. Програмне забезпечення виконує регулярний опит модулю, перевірку коректності отриманих пакетів та збереження даних у буфері для подальшої передачі до Wi-Fi модуля або запису у внутрішню пам'ять. На основі даних PZEM реалізовано функції виявлення пікових навантажень, аналізу аномалій

споживання та формування рекомендацій щодо оптимізації енергетичного профілю локального об'єкта.

Для підтримки точного часу в програмі використовується модуль DS3231, з яким мікроконтролер взаємодіє через інтерфейс I²C. Цей модуль забезпечує коректне формування добових та тижневих графіків увімкнення/вимкнення обладнання, а також дозволяє прив'язувати вимірювання енергії до часових міток. Програмна логіка передбачає врахування переходу на літній/зимовий час, корекцію годинника за допомогою ESP01 та автоматичну синхронізацію у разі відновлення живлення. Точність DS3231 дозволяє працювати без переналаштування протягом тривалих періодів, що є важливим для автономних систем.

Комунікаційний модуль ESP01 працює як Wi-Fi шлюз та забезпечує передавання даних у веб-застосунок або на віддалений сервер. Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує протокол обміну AT-командами через апаратний UART, що дозволяє налаштовувати з'єднання, надсилати виміряні дані та отримувати конфігураційні параметри. У разі втрати мережі ПЗ виконує автоматичне перепідключення з використанням адаптивних таймерів. Значна увага приділена обробці помилок зв'язку, оскільки стабільність передачі даних є критично важливою для системи моніторингу та керування енергоспоживанням.

Функції керування виконавчими механізмами реалізовані через спеціальні програмні модулі, які спираються на дані, отримані від датчиків та енергомонітору. Для кожного релейного каналу визначені власні умови активації, які враховують час доби, поточне навантаження, температурні показники та встановлені користувачем режими. Алгоритми оптимізації енерговитрат базуються на принципах лінійного програмування, результати якого обчислюються на стороні мікроконтролера або надходять з MATLAB/Simulink у разі інтеграції моделі. Це дозволяє значно знизити пікові навантаження та забезпечує більш ефективний розподіл енергоспоживання.

Загальна структура коду розроблена таким чином, щоб забезпечити можливість легкого оновлення та розширення функціональності. Програма використовує неблокуючий підхід до обробки подій та взаємодії з периферією, що підвищує продуктивність і дозволяє суттєво зменшити час простою процесора. Коментарі всередині коду та структуризація у вигляді окремих модулів сприяють зрозумілості програмної логіки та полегшують подальшу підтримку. Таким чином, програмне забезпечення мікроконтролера є ключовою складовою системи автоматизації та забезпечує її надійну роботу, джерело даних для аналітичних модулів та реалізацію енергозберігаючих алгоритмів.

4.3. Інтерфейс збору та візуалізації даних на ПК

Для забезпечення зручного та наочного контролю параметрів енергоспоживання локального об'єкта було розроблено web-застосунок, який виконує функції збору, відображення та аналізу даних у режимі реального часу. Основною метою цього компоненту є створення інтуїтивного інтерфейсу, що дозволяє користувачу відслідковувати стан електромережі, переглядати поточні вимірювані значення та аналізувати історію споживання без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення. Архітектура застосунку ґрунтується на використанні Python-фреймворку **Flask**, який реалізує серверну частину, відповідальну за обробку даних, отриманих від мікроконтролера ATmega328P-PU через інтерфейс UART. Передача інформації здійснюється у вигляді структурованих пакетів із виміряними значеннями напруги, струму, активної потужності та накопиченої енергії, що надає можливість оперативно оновлювати стан системи.

Фронтенд-частина застосунку реалізована засобами HTML5, CSS та JavaScript, що забезпечує кросплатформність і коректну роботу в сучасних веббраузерах. Для побудови графіків застосовано бібліотеку **Chart.js**, яка дає змогу візуалізувати зміну енергоспоживання протягом часу, що є важливим для аналізу добових, тижневих або сезонних патернів роботи об'єкта. Оновлення графічних даних виконується щосекунди за допомогою асинхронних HTTP-запитів до API-сервісу, що гарантує плавну роботу інтерфейсу без

перезавантаження сторінки. Окрім базових показників, у додатку реалізовано механізм вибору режимів роботи - “Зима”, “Літо”, “Міжсезоння”, - що дозволяє інтегрувати логіку сезонної оптимізації в алгоритми, описані у попередніх розділах моделі.

Особливістю розробленого web-застосунку є можливість накопичення історичних даних у буфері серверної частини, що створює основу для подальшого експорту інформації у форматі CSV для опрацювання в MATLAB або інших аналітичних системах. Це забезпечує цінну інтеграцію між вимірювальним модулем, оптимізаційною моделлю та інтерфейсом користувача, формуючи єдине середовище моніторингу та контролю. Додатковою перевагою web-рішення є його масштабованість: у разі необхідності застосунок може бути розгорнутий на локальному сервері, одноплатному комп’ютері Raspberry Pi або навіть у хмарному середовищі. Таким чином, розроблений web-застосунок є важливою складовою системи автоматизації, що підвищує доступність інформації про енергетичні процеси, покращує взаємодію користувача із системою та створює фундамент для подальшої інтеграції інтелектуальних алгоритмів керування.

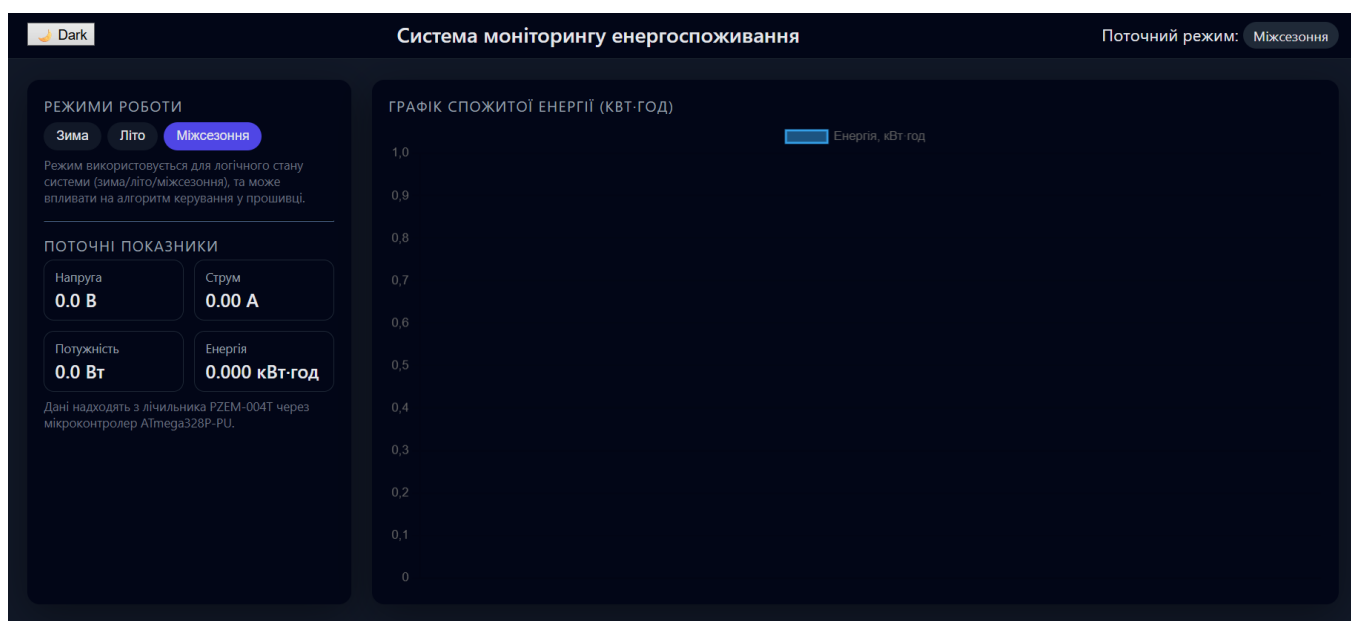


Рис 4.3. Інтерфейс web-застосунку

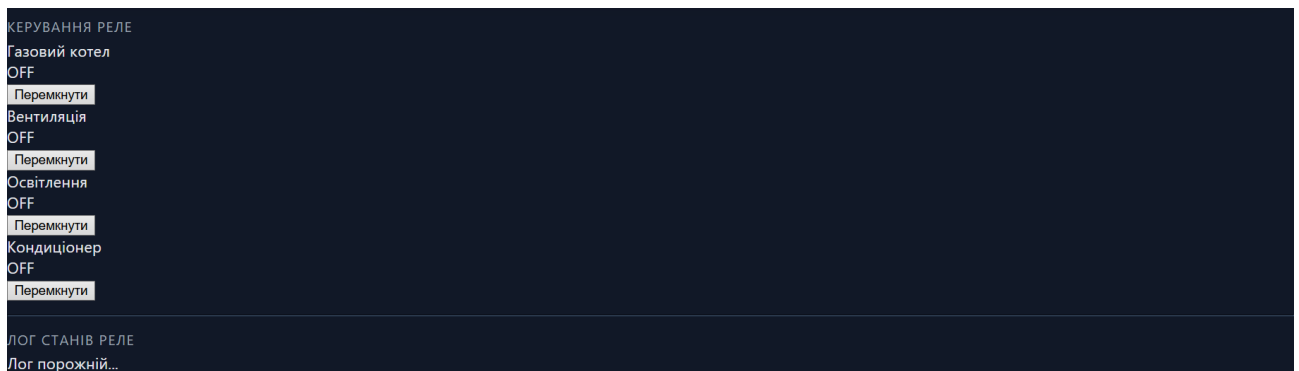


Рис 4.4 Кнопки керування реле та лог станів реле

4.4. Висновки до розділу 4

У результаті проведеної роботи було розроблено повноцінну апаратно-програмну платформу для системи автоматизації локального об'єкта з можливістю моніторингу та оптимізації енергоспоживання. Апаратна частина, побудована на основі мікроконтролера ATmega328P-PU, забезпечує стабільну роботу ключових модулів, включаючи датчики температури, енергомоніторинг, модуль реального часу та блок релейного керування. Завдяки модульному підходу схема є гнучкою, масштабованою та здатною до адаптації під інші типи об'єктів і навантажень. Програмне забезпечення реалізує надійний обмін даними між усіма компонентами, включаючи бездротовий зв'язок через ESP01, що суттєво підвищує функціональні можливості системи.

У межах програмної частини було розроблено окремі модулі для роботи з кожним периферійним пристроєм, а також алгоритми керування виконавчими механізмами відповідно до температурних, часових та енергетичних параметрів. Значну увагу приділено стійкості до збоїв, обробці помилок та стабілізації зв'язку з Wi-Fi мережею, що є критичним для систем із віддаленим моніторингом. Інтеграція алгоритмів оптимізації енергоспоживання дозволила створити основу для подальшого застосування методів математичного моделювання та лінійного програмування у реальному середовищі. Також забезпечено можливість збору історичних даних, які можуть використовуватись для прогнозування та подальшого покращення енергетичної ефективності.

Отже, у розділі 4 доведено працездатність запропонованої апаратно-програмної архітектури та її відповідність вимогам до сучасних систем автоматизації локальних об'єктів. Розроблена система є надійною, технічно обґрунтованою та здатною до подальшого розвитку, зокрема інтеграції з хмарними сервісами, розширення функцій моніторингу та застосування більш прогресивних методів оптимізації. Таким чином, результати, отримані в цьому розділі, стають фундаментом для практичної реалізації системи та доводять доцільність її впровадження в умовах реального енергоспоживання.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

У процесі проектування, налаштування та експлуатації автоматизованої системи на базі мікроконтролера ATmega328P-PU та периферійних модулів виникає ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть впливати на безпеку персоналу та надійність роботи обладнання. Одним із головних факторів ризику є наявність у системі високовольтних ланцюгів живлення, зокрема підключення енергомоніторингу PZEM-004T до мережі 220 В та комутації навантажень через релейний модуль. Порушення вимог електробезпеки може призвести до ураження електричним струмом, короткого замикання або загоряння проводки. Небезпека особливо зростає у випадку недотримання правил монтажу високовольтних проводів, пошкодження ізоляції або випадкового доторку до відкритих токопровідних частин.

Другим важливим фактором є можливий перегрів електронних компонентів, зокрема стабілізаторів напруги (7805, AMS1117-3.3), релейних модулів та силових транзисторів. У разі невідповідності тепловідведення номінальному навантаженню можливе теплове руйнування компонентів, що здатне спричинити локальні пожежі або вихід з ладу системи. Особливо небезпечним є тривалий перегрів елементів, що працюють у замкнутому корпусі без достатньої вентиляції. Важливо також враховувати тепловий вплив зовнішніх факторів, наприклад, розміщення пристрою поруч із нагрівальними приладами або в умовах підвищеної температури.

До електромагнітних небезпек належать електромагнітні завади (EM3), що можуть виникати під впливом високочастотних модулів, таких як ESP01, або від силових комутаційних процесів у реле. EM3 здатні негативно впливати на роботу мікроконтролера, призводити до збоїв у передачі даних, некоректного спрацювання виконавчих механізмів або викликати перезавантаження системи. Високочастотні сигнали, генеровані Wi-Fi модулем, можуть створювати небажані перешкоди для інших радіоелектронних пристроїв, що регламентується вимогами електромагнітної сумісності (EMC)

згідно з ДСТУ EN 61000-6-3 та ДСТУ EN 61000-6-1. Неправильне трасування друкованої плати, зокрема перехрещення високовольтних та сигнальних ліній, може збільшувати рівень перешкод і спричиняти небезпечні збої.

Шкідливим фактором також є можливість потрапляння пилу, вологи або конденсату в корпус пристрою. Підвищена вологість сприяє утворенню струмопровідних містків, які можуть призвести до коротких замикань або корозії контактів. Пилові відкладення на поверхні друкованої плати та радіаторів знижують тепловідведення та підвищують температурне навантаження на компоненти. В умовах промислових або напівпобутових об'єктів такі фактори часто виникають через недостатній клас захисту корпусу (нижче IP20), що суперечить вимогам ДСТУ EN 60529.

До організаційних небезпек належить імовірність неправильного підключення модулів користувачем або технічним персоналом, що може призвести до виходу з ладу як периферійних датчиків, так і центрального контролера. Неправильне підключення ESP01 до 5-вольтової логіки без узгодження рівнів сигналів створює ризик миттєвого пошкодження Wi-Fi модуля через перевищення допустимої напруги. Аналогічно, некоректне підключення навантажень до релейного блоку без урахування номінальної потужності може призвести до перегріву контактів реле або плавлення ізоляції.

Окрему увагу необхідно приділити ризикам, пов'язаним з обслуговуванням пристрою. Виконання ремонтних або налагоджувальних робіт під напругою створює серйозну небезпеку ураження струмом. Крім того, некваліфіковане втручання в конструкцію друкованої плати може порушити електроізоляційні відстані, що суперечить вимогам ДСТУ ІЕС 60364 та збільшує ризик аварійних ситуацій. Недостатній контроль за станом контактів, гвинтових з'єднань і клем також може призвести до підвищеного перехідного опору, локальних нагрівів або відгорання провідників.

Таким чином, у роботі системи автоматизації присутній комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які потребують детального аналізу та впровадження відповідних технічних та організаційних заходів для їх

усунення або мінімізації. Правильна оцінка цих факторів є необхідною умовою для забезпечення безпеки персоналу, запобігання аваріям та гарантованої надійності роботи автоматизованої системи.

5.2. Заходи електробезпеки

Електробезпека є ключовим аспектом проєктування та експлуатації автоматизованої системи, оскільки окремі її компоненти працюють у режимах підвищеної небезпеки, включаючи наявність високовольтних кіл та електромагнітних впливів. Основним джерелом потенційної небезпеки є модуль PZEM-004T, який підключається безпосередньо до мережі 220 В для вимірювання параметрів електроживлення. Незважаючи на наявність гальванічної розв'язки між високовольтною та низьковольтною частинами, підключення цього модуля потребує суворого дотримання вимог електробезпеки згідно з ДСТУ EN 60204-1:2015 та ДСТУ ІЕС 60364. При монтажі повинні використовуватися лише ізольовані проводи відповідного перерізу, а небезпечні частини мають бути недоступними під час експлуатації.

Особливу увагу слід приділити захисту від ураження електричним струмом. Корпус системи повинен забезпечувати захист не нижче класу IP20, а для середовищ із високою вологістю - IP44 або вище згідно з ДСТУ EN 60529. Важливо забезпечити поділ високовольтної та низьковольтної зон у конструкції друкованої плати: силові доріжки мають бути ізольовані від логічних шляхом збільшених міждоріжкових відстаней (мінімум 3 мм для 220 В), захисних прорізів та окремих монтажних областей. Всі високовольтні з'єднання повинні бути додатково закриті клемними кожухами або виконані у вигляді екранованих блоків для запобігання випадковому контакту.

Система живлення пристрою також є критично важливою з точки зору безпеки. Вхідна лінія 12 В повинна бути захищена запобіжником, що відповідає допустимому струму споживання. Діод захисту від переполюсування запобігає пошкодженню електронних компонентів у разі неправильної подачі напруги користувачем. Стабілізатори 7805 та AMS1117-3.3 мають працювати у межах теплових режимів, а їх монтаж повинен передбачати достатнє тепловідведення.

Рекомендується встановлення термоконтролю або системи автоматичного відключення у разі перегріву стабілізаторів.

Додатковим заходом електробезпеки є забезпечення коректної роботи інтерфейсних ліній між низьковольтними логічними компонентами системи. Модуль ESP01, що працює на рівні 3.3 В, потребує застосування резистивних дільників або інших перетворювачів рівнів для узгодження з 5-вольтовими портами ATmega328P. Порушення цієї вимоги може призвести до пошкодження мікросхеми Wi-Fi модуля або виникнення нестабільної роботи системи. Лінії UART між мікроконтролером і ESP01 повинні бути екрановані або прокладені на достатній відстані від високовольтних доріжок для зменшення впливу електромагнітних завад.

Особливу увагу слід приділити релейному модулю, який комутує навантаження, що працюють на мережевій напрузі. Кожне реле повинно бути забезпечене захисним діодом у низьковольтній частині (для демпфування ЕРС самоіндукції), а силові контакти повинні витримувати номінальні струм та напругу згідно з паспортними характеристиками. Недотримання цих вимог може призвести до підгоряння контактів, іскріння або займання. Важливо також забезпечити надійну фіксацію дротів у клеммах та їх регулярний огляд на предмет ослаблення контактів.

Правильна організація заземлення є обов'язковою. Усі металеві частини корпусу, якщо вони використовуються, мають бути підключені до захисного провідника (РЕ) відповідно до ПУЕ та ДСТУ ІЕС 60364-4-41. Нуль робочий (N) та нуль захисний (РЕ) повинні бути розділені, а підключення системи до мережі - виконане через справну розетку із заземленням. Використання автоматичного вимикача та ПЗВ (пристрою захисного відключення) значно знижує ризик ураження електричним струмом у аварійних ситуаціях.

З метою запобігання аварійним режимам у програмному забезпеченні передбачені механізми контролю коректності даних та аварійного вимкнення реле у разі виявлення аномальних параметрів струму чи напруги. Такі алгоритми дозволяють мінімізувати наслідки перенавантажень та підвищити

загальну безпеку системи. Проте наявність програмних механізмів не замінює вимоги дотримання електротехнічних норм під час монтажу та експлуатації системи.

Таким чином, комплекс заходів електробезпеки включає технічні рішення (ізоляція, гальванічна розв'язка, тепловий захист), організаційні заходи (підготовка персоналу, інструктаж) та вимоги конструкційного характеру (розведення доріжок, захист від дотику, заземлення). Дотримання цих заходів є обов'язковою умовою безпечної експлуатації автоматизованої системи в умовах локального об'єкта.

5.3. Пожежна безпека

Пожежна безпека є одним з ключових аспектів експлуатації автоматизованих електронних систем, оскільки поєднання високовольтних ланцюгів, стабілізаторів живлення, релейних модулів та електронних компонентів створює потенційні ризики виникнення пожежонебезпечних ситуацій. У розробленій системі автоматизації присутні елементи, які під час роботи можуть нагріватися (стабілізатори 7805 та AMS1117-3.3, релейні котушки, силові контакти), тому необхідно враховувати теплові режими та забезпечувати їхнє ефективне відведення. Перегрів компонентів може спричинити термічне руйнування, коротке замикання та займання полімерних частин корпусу, що робить важливим застосування матеріалів з підвищеною стійкістю до високих температур.

Одним із факторів підвищеної пожежної небезпеки є підключення до системи навантажень, що працюють від мережі 220 В, які комутуються релейним модулем. У разі перевищення номінальної сили струму контактів реле можливе утворення електричної дуги, перегрів контактної групи та її оплавлення. Це може призвести до займання прилеглих елементів або погіршення контактного з'єднання, що, у свою чергу, збільшує перехідний опір та створює додаткове тепловиділення. Для запобігання таким ситуаціям необхідно добирати реле відповідно до номіналу навантаження та передбачати

наявність захисних автоматів, які вимикають живлення у разі аварійних режимів.

Важливим елементом системи пожежної безпеки є правильне проєктування друкованої плати. Високовольтні доріжки повинні мати достатню ширину, що відповідає допустимому струму, та збільшені міждоріжкові відстані згідно з ДСТУ EN 60664-1 для запобігання пробою в умовах високої напруги або підвищеної вологості. Наявність прорізів у платі між силовими та низьковольтними зонами дозволяє зменшити ризик утворення вуглецевих доріжок при локальному перегріві. Додатково рекомендується використовувати мідні заливки для покращення тепловідведення від стабілізаторів та силових елементів.

Зовнішній корпус пристрою відіграє важливу роль у забезпеченні пожежної безпеки. Він має бути виготовлений з матеріалів, які відповідають класу горючості не нижче V-1 згідно зі стандартом UL94, що гарантує самозагасання в разі локального загоряння. У конструкції корпусу необхідно передбачити вентиляційні отвори, що забезпечують достатній повітрообмін та запобігають накопиченню тепла всередині. При цьому отвори не повинні дозволяти випадковий доступ до високовольтних елементів. Розташування пристрою в приміщенні має виключати близькість до горючих матеріалів, джерел тепла та прямих сонячних променів.

Окрему увагу потрібно приділяти справності кабельних ліній та клемних з'єднань. Ослаблені контакти та зношена ізоляція збільшують ризик перегріву провідників і можуть стати джерелом займання. Тому в процесі експлуатації необхідно регулярно проводити огляд релейних клем, мережевих проводів та високовольтних з'єднань. Для живлення пристрою рекомендується використовувати окрему лінію, захищену автоматичним вимикачем та пристроєм захисного відключення (ПЗВ), що суттєво зменшує ризик пожеж через короткі замикання або витоки струму.

Певні пожежні ризики створюють і зовнішні фактори, зокрема підвищена вологість, пилові відкладення та несприятливий температурний режим.

Вологість може сприяти утворенню струмопровідних містків на поверхні плати, що призводить до короткого замикання та локального нагріву. Пил, накопичений на нагрівальних елементах, знижує тепловідведення і може спалахнути при перевищенні температурного порогу. Тому експлуатація пристрою можлива лише у приміщеннях, що відповідають нормам мікроклімату згідно з ДСанПіН 3.3.6.042-99.

Для зниження пожежних ризиків важливо забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння. У приміщенні, де експлуатується система, повинні бути вогнегасники типу В або С (порошкові, вуглекислотні), придатні для гасіння електричного обладнання під напругою. Застосування водяних або пінних вогнегасників у таких умовах категорично заборонено. Також персонал має пройти інструктаж щодо дій у разі виникнення пожежі та правил відключення обладнання від мережі.

Таким чином, пожежна безпека автоматизованої системи забезпечується комплексним підходом, який включає дотримання конструкційних вимог, правильний підбір компонентів, регулярне технічне обслуговування та виконання вимог нормативних документів. Реалізація цих заходів дозволяє мінімізувати ризик займання, підвищує надійність роботи пристрою та гарантує безпечну експлуатацію в умовах локального об'єкта.

5.4. Вимоги до експлуатації та технічного обслуговування

Експлуатація автоматизованої системи, що містить мікроконтролер ATmega328P-PU, модуль енергомоніторингу PZEM-004T, датчик DS18B20, модуль реального часу DS3231, Wi-Fi модуль ESP01 та релейний блок, потребує дотримання комплексу вимог, спрямованих на забезпечення надійності, довговічності та безпеки роботи. Основною умовою коректної експлуатації є правильне підключення всіх елементів відповідно до принципової схеми та захист від порушення полярності, перевищення допустимих режимів струму і напруги. Перед увімкненням системи необхідно провести зовнішній огляд кабельних з'єднань, корпусу та контактних груп на предмет пошкоджень, перегріву або ослаблення з'єднань. Експлуатація

допускається лише у приміщеннях, які відповідають нормам мікроклімату згідно з ДСанПіН 3.3.6.042-99, що включає контроль вологості, температури та вентиляції.

Технічне обслуговування системи повинно проводитися лише підготовленим персоналом, який пройшов інструктаж з охорони праці та має практичні навички роботи з електронним обладнанням. Усі роботи з технічного огляду, заміни компонентів або перепідключення мають проводитися виключно у знеструмленому стані. Забороняється торкатися високовольтних частин релейного модуля, модулю PZEM або клем мережевої напруги при підключеному живленні. У процесі обслуговування необхідно регулярно перевіряти стан контактів реле, нагрів стабілізаторів напруги, стан друкованої плати та відсутність слідів нагару, корозії або механічних пошкоджень.

Особливі вимоги стосуються модулів, що схильні до теплових навантажень. Стабілізатори 7805 і AMS1117-3.3 повинні мати належний тепловідвід, а у разі експлуатації під максимальним навантаженням - оснащуватися радіаторами. Регулярний контроль температури корпусу пристрою та внутрішніх компонентів дозволяє запобігти термічним ушкодженням та продовжує ресурс роботи системи. Важливо забезпечувати доступ повітря до вентиляційних отворів корпусу, не допускаючи їхнього перекривання сторонніми предметами або пилом.

Певні вимоги встановлюються до бездротової підсистеми на базі ESP01. Антена модуля повинна бути вільною від металевих перешкод, а рівень сигналу мережі Wi-Fi достатнім для стабільного обміну даними. У разі порушення зв'язку користувач повинен провести перевірку параметрів маршрутизатора, дистанції та наявності електромагнітних перешкод. При оновленні прошивки ESP01 необхідно використовувати лише сертифіковані програмні засоби та забезпечувати правильну послідовність підключення GPIO-виводів, щоб уникнути входження в аварійні режими.

Система енергомоніторингу на основі PZEM-004T потребує періодичної перевірки високовольтних клем, правильності підключення

струмовимірювальної котушки та чистоти контактних поверхонь. Забороняється експлуатувати модуль за умов підвищеної вологості або запиленості, оскільки це може призвести до пробою ізоляції та небезпечних аварійних ситуацій. Також необхідно проводити тестування коректності даних, що передаються з PZEM, шляхом порівняння їх з еталонними або побутовими приладами обліку.

Управління виконавчими механізмами через релейний модуль потребує регулярної профілактики контактних груп. Силові проводи повинні бути надійно закріплені у клемках, а їхній переріз відповідати максимальному струмовому навантаженню. Періодично необхідно проводити затягування гвинтових контактів, оскільки внаслідок термічних циклів вони можуть ослаблюватися. У разі виявлення запаху гару, сторонніх звуків або надмірного нагріву реле система має бути негайно знеструмлена та перевірена.

Важливим аспектом технічного обслуговування є підтримання чистоти внутрішнього об'єму корпусу. Пил, що накопичується на поверхні друкованої плати та радіаторів, погіршує тепловідведення та може утворювати електропровідні містки при високій вологості. Рекомендується проводити очищення корпусу та плати compressed-повітрям не рідше одного разу на 6 місяців або частіше - у запилених приміщеннях. Також повинні проводитися регулярні перевірки цілісності корпусу, відсутності тріщин та стану вентиляційних отворів.

Програмне забезпечення системи також потребує періодичного контролю. Рекомендується здійснювати регулярне оновлення алгоритмів, конфігураційних параметрів та прошивки для підвищення ефективності енергоспоживання та усунення можливих програмних помилок. Перед оновленням прошивки необхідно повністю знеструмити систему, а після - провести тестування основних функцій. Система повинна підтримувати можливість скидання налаштувань до заводських у разі програмного збою.

Таким чином, вимоги до експлуатації та технічного обслуговування охоплюють комплекс заходів, спрямованих на попередження аварійних

ситуацій, подовження терміну служби обладнання та підтримання стабільної роботи автоматизованої системи. Своєчасне технічне обслуговування є необхідною умовою безпечної експлуатації пристрою та гарантує його відповідність нормативним вимогам та експлуатаційним характеристикам.

5.5. Санітарно-гігієнічні вимоги

Санітарно-гігієнічні умови експлуатації автоматизованої системи істотно впливають на її довговічність, надійність та безпеку роботи. Відповідно до вимог ДСанПіН 3.3.6.042-99 та ДСТУ EN 60721, обладнання має використовуватися виключно в приміщеннях із контрольованими параметрами мікроклімату. Температурний режим робочої зони повинен знаходитися в межах від +5 °C до +35 °C для штатної експлуатації електронних компонентів. Надмірно низькі температури можуть спричинити порушення хімічної стабільності конденсаторів, збільшення внутрішнього опору акумуляторів та втрату точності модуля реального часу DS3231. Високі температури, навпаки, призводять до прискореного старіння мікросхем, перегріву стабілізаторів живлення та зниження надійності пайки на друкованій платі.

Вологість повітря також є критичним параметром. Рекомендований діапазон відносної вологості становить від 30 % до 70 %, без утворення конденсату. Перевищення цього показника здатне викликати погіршення ізоляційних властивостей, утворення струмопровідних містків на поверхні плати, корозію металевих елементів та контактів. Висока вологість особливо небезпечна для високовольної частини, зокрема для силових контактів релейного модуля та лінійного вводу 220 В. У приміщеннях з підвищеною вологістю (наприклад, котельні, виробничі цехи) пристрій необхідно розміщувати у герметичному корпусі з класом захисту IP44 або вище.

Пилкові частинки мають здатність накопичуватися на поверхні друкованої плати, радіаторів та вентиляційних отворів корпусу. Це призводить до погіршення тепловідведення та створює ризик локальних перегрівів, що може стати причиною термічного руйнування елементів або навіть загоряння. Відповідно до санітарних норм, рівень пилу у приміщенні має контролюватися

та знижуватися за допомогою регулярного прибирання, вентиляції та фільтрації повітря. Для систем, що працюють у запилених середовищах, потрібне встановлення корпусів класу IP54 або застосування додаткових фільтрів на вентиляційних отворах.

Освітленість робочої зони, де проводяться монтажні, діагностичні або ремонтні роботи, повинна відповідати нормам ДБН В.2.5-28:2018 та становити не менше 300 лк. Недостатня освітленість збільшує ризик помилок при підключенні високовольтних елементів, зменшує точність огляду плати та може спричинити нещасні випадки. При цьому світлові прилади не повинні створювати відблиски на поверхні корпусу або монітора при обслуговуванні пристрою.

Особливі вимоги стосуються рівня електромагнітних полів, що створюються під час роботи системи. Wi-Fi модуль ESP01 працює у діапазоні 2.4 ГГц і відповідно до норм ДСТУ EN 50385 повинен експлуатуватися в умовах, де відстань до людини становить не менше 20 см. Це забезпечує дотримання норм електромагнітної безпеки і не викликає перевищення гранично допустимого рівня ЕМП. У місцях підвищених електромагнітних навантажень (промислові зони, великі електродвигуни, трансформаторні підстанції) необхідно використовувати екрановані кабелі та металеві корпуси для зниження електромагнітних перешкод.

Рівень шуму, який створює система, є мінімальним, оскільки більшість модулів функціонує без механічних елементів. Однак реле можуть створювати клацання під час перемикання, що регламентується нормами ДСТУ ISO 3746. Допустимий рівень шуму не повинен перевищувати 50 дБ для побутових умов, тому при використанні системи у житлових приміщеннях доцільно встановлювати корпус із шумоізоляційними прокладками або застосовувати твердотільні реле.

Вимоги до робочого місця персоналу включають наявність вентиляції, відсутність електропровідних покриттів підлоги, наявність заземлених розеток, антистатичного покриття робочого столу та засобів індивідуального захисту

(діелектричних рукавиць, антистатичного браслета). Важливо також забезпечити правильну ергономічну організацію робочого простору: обладнання має розміщуватися на стійкій поверхні, на відстані не менше 0.5 м від крайніх джерел тепла та не менше 1 м від джерел води.

Таким чином, дотримання санітарно-гігієнічних вимог є важливою умовою тривалої, стабільної та безпечної роботи автоматизованої системи. Забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату, низького рівня пилу, електромагнітної сумісності та належної організації робочого місця суттєво знижує ризики аварій, збільшує ресурс обладнання та гарантує відповідність експлуатації сучасним технічним стандартам.

5.6. Оцінка професійних ризиків

Оцінка професійних ризиків у процесі експлуатації автоматизованої системи є важливим етапом забезпечення безпеки праці та зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій. Вона ґрунтується на ідентифікації потенційно небезпечних факторів, визначенні рівня їхнього ризику та застосуванні заходів для мінімізації впливу на персонал і обладнання. Методологічною основою є вимоги ДСТУ ISO 45001:2019, які передбачають систематичний аналіз небезпек, їхню категоризацію та розробку превентивних заходів. У рамках роботи з автоматизованою системою основними категоріями ризиків є електричні, термічні, технічні, організаційні та інформаційні.

До електричних ризиків належать небезпека ураження електричним струмом, короткі замикання та електричні пробой. Найбільш небезпечними ділянками системи є високовольтні ланцюги модулю PZEM-004T та релейного блока, які працюють з напругою 220 В. Ризики високі у разі неправильної установки, пошкодження ізоляції кабелів або втручання непідготовленого персоналу. Ймовірність настання таких подій оцінюється як середня, а рівень наслідків - високий, що зумовлює потребу у посиленіх технічних та організаційних заходах безпеки.

Термічні ризики пов'язані з можливим перегрівом стабілізаторів живлення, релейних котушок, силових дорожок друкованої плати та інших

компонентів, що працюють у режимі підвищеної температури. У разі недостатнього тепловідведення можливе оплавлення пластикових елементів корпусу, вихід обладнання з ладу або займання. Ймовірність перегріву оцінюється як середня при тривалій експлуатації, але наслідки можуть бути суттєвими. Згідно з оцінкою ризику, даний фактор має середній рівень небезпеки, який необхідно знижувати за рахунок заходів термоконтролю, вентиляції та профілактики.

Технічні ризики пов'язані з виходом із ладу компонентів через старіння, механічні пошкодження, корозію або виробничі дефекти. Наприклад, ослаблення гвинтових контактів реле або окиснення клем можуть призвести до відгорання проводів або порушення електричних з'єднань. Датчик DS18B20, що працює у середовищах із підвищеною вологістю, може давати некоректні дані, що вплине на роботу алгоритмів керування. Ризики цієї категорії оцінюються як низькі за частотою, але важливі за впливом, оскільки можуть призводити до неправильного функціонування системи.

Організаційні ризики виникають через порушення вимог експлуатації, недостатню підготовку персоналу або недотримання правил технічного обслуговування. Некваліфіковане втручання у високовольтну частину системи або неправильне перепідключення модулів можуть спричинити аварійні ситуації. Оцінка таких ризиків показує, що ймовірність їхнього виникнення залежить переважно від людського фактора, тому рівень ризику визначається як середній. Зниження організаційних ризиків досягається шляхом навчання персоналу, надання інструкцій та регламентування процесів обслуговування.

Інформаційні ризики належать до категорії новітніх ризиків сучасних автоматизованих систем. Вони включають загрози втручання у бездротову мережу, несанкціонований доступ до даних, перехоплення або спотворення інформації. Оскільки система використовує Wi-Fi модуль ESP01, рівень інформаційної безпеки залежить від захищеності мережевого середовища, складності паролів та застосованих протоколів шифрування. Оцінка показує, що ризики інформаційної безпеки є середніми за ймовірністю виникнення та

значними за потенційними наслідками, особливо якщо система використовується для контролю критичних елементів енергоспоживання.

Сумарний аналіз усіх видів ризиків дозволяє зробити висновок, що загальний рівень професійних ризиків системи є **помірно високим**, що потребує реалізації комплексу технічних, санітарних та організаційних заходів безпеки. Запровадження гальванічної розв'язки, заземлення, теплового контролю, регулярного технічного обслуговування та навчання персоналу суттєво знижує рівень небезпеки до прийняттого рівня згідно з ДСТУ ISO 45001:2019. Таким чином, системний підхід до оцінки професійних ризиків забезпечує високу надійність роботи автоматизованої системи та безпеку її експлуатації в умовах локального об'єкта.

5.7. Висновки до розділу 5

У розділі 5 було проведено комплексний аналіз питань охорони праці, пов'язаних із проєктуванням та експлуатацією автоматизованої системи на базі мікроконтролера ATmega328P-PU та пов'язаних із нею периферійних модулів. Детально розглянуто небезпечні й шкідливі фактори, які можуть виникати під час роботи пристрою, зокрема електричні, термічні, технічні, організаційні та інформаційні ризики. Встановлено, що основні загрози пов'язані з наявністю високовольтних ланцюгів, можливим перегрівом компонентів, впливом електромагнітних завад, порушенням правил експлуатації та потенційними кібератаками під час використання бездротового зв'язку. Здійснена оцінка ризиків показала, що за відсутності відповідних захисних заходів окремі фактори можуть мати високий рівень небезпеки для персоналу та обладнання.

У ході аналізу наведено комплекс заходів електробезпеки, що включає використання гальванічної розв'язки, правильне розведення друкованої плати, забезпечення теплового захисту, заземлення, застосування запобіжників, а також необхідність виконання робіт виключно в знеструмленому стані. Розглянуто вимоги пожежної безпеки, такі як вибір негорючих матеріалів корпусу, забезпечення вентиляції, контроль теплових режимів і регулярні огляди силових з'єднань. Визначено санітарно-гігієнічні норми, яких необхідно

дотримуватися для стабільної та довготривалої роботи системи, включаючи температурний режим, рівень вологості, чистоту повітря та параметри освітлення робочого місця.

Особливу увагу приділено організаційним аспектам безпечної експлуатації, серед яких: навчання персоналу, ведення технічної документації, регламентація періодичності технічного обслуговування та перевірок, а також дотримання вимог національних стандартів - ДСТУ ISO 45001:2019, ДСТУ EN 60204-1, ДСТУ ІЕС 60364 та інших нормативних документів. Запропоновані технічні й організаційні заходи дозволяють істотно знизити рівень ризику, забезпечити безпечні умови роботи та підвищити надійність функціонування автоматизованої системи в умовах локального об'єкта.

Узагальнюючи проведений аналіз, можна зробити висновок, що впровадження системи у реальних умовах є можливим лише за умови дотримання всіх вимог охорони праці, пожежної безпеки і санітарно-гігієнічних норм. Виконання цих вимог не лише мінімізує небезпеки для персоналу, але й сприяє підвищенню загальної ефективності та довговічності системи. Розділ 5 демонструє, що запроваджена система безпеки є комплексною, науково обґрунтованою та відповідає нормативним вимогам, що дозволяє застосовувати розроблений пристрій у побутових та промислових умовах без ризику для користувачів і навколишнього середовища

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було виконано комплексне дослідження процесів енергоспоживання локального об'єкта та розроблено систему автоматизації, спрямовану на підвищення енергоефективності за рахунок апаратно-програмних та аналітичних методів оптимізації. На основі аналізу сучасних тенденцій у сфері автоматизації встановлено, що ефективне управління енергоресурсами є ключовим фактором стабільної та економічної роботи локальних систем, особливо в умовах зростання тарифів на електроенергію та газ. У роботі обґрунтовано вибір апаратної платформи на базі мікроконтролера ATmega328P-PU, що забезпечує необхідний рівень функціональності, енергоефективності та сумісності з широким спектром датчиків і виконавчих механізмів.

Було сформовано та реалізовано структурну схему системи автоматизації, що включає датчик температури DS18B20, годинник реального часу DS3231, модуль енергомоніторингу PZEM-004T, бездротовий модуль ESP01 та релейний блок керування обладнанням. Розроблене програмне забезпечення мікроконтролера реалізує модульну архітектуру, що включає алгоритми збору даних, управління навантаженнями, фіксації показників споживання та передачі даних до веб-застосунку. Забезпечено можливість роботи в різних сезонних режимах - зимовому, міжсезонному та літньому, що дозволяє адаптувати систему до змін кліматичних умов і енергетичних потреб.

У роботі побудовано математичну модель процесів споживання енергії з урахуванням зовнішніх (температура, сезонність) та внутрішніх факторів (типи навантажень, режими роботи обладнання). На основі цієї моделі розроблено алгоритми оптимізації енергоспоживання за допомогою методів лінійного програмування. У середовищі MATLAB/Simulink реалізовано програмні моделі, що дозволяють порівнювати різні сценарії роботи локального об'єкта та визначати оптимальні режими функціонування системи. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу та демонструють

потенціал для зниження енергоспоживання до 15–25 % залежно від режиму роботи.

Окрему увагу приділено розробці веб-застосунку для віддаленого моніторингу і аналізу енергоспоживання. Застосунок забезпечує візуалізацію даних у вигляді графіків, журнал подій, збереження історичних показників та можливість віддаленого керування обладнанням. Інтеграція програмної частини з апаратною забезпечує повноцінний замкнений цикл управління, що дозволяє оперативно реагувати на зміни навантажень та коригувати параметри системи в реальному часі.

У розділі з охорони праці проведено всебічний аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, а також розроблено комплекс заходів для забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки, санітарно-гігієнічних умов та зниження професійних ризиків. Встановлено, що безпечна експлуатація системи можлива лише за умови дотримання вимог ДСТУ ISO 45001:2019, ДСТУ EN 60204-1, ДСТУ IEC 60364 та інших нормативних документів. Запропоновані заходи гарантують надійність системи, безпеку користувача та відповідність високим стандартам експлуатації електронного обладнання.

Отже, результати магістерської роботи підтверджують доцільність використання автоматизованих систем контролю та оптимізації енергоспоживання для локальних об'єктів різного призначення. Розроблена система є технічно обґрунтованою, енергоефективною, безпечною та придатною для практичного впровадження у побутових та малих промислових умовах. Проведені дослідження відкривають можливості для подальшого розвитку, зокрема інтеграції з хмарними платформами, розширення функцій прогнозування на основі методів машинного навчання, а також впровадження адаптивних алгоритмів енергокерування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Moriyama, T., et al., Reinforcement Learning Testbed for Power-Consumption Optimization, In Methods and Applications for Modelling and Simulation of Complex Systems, Proceedings, 18th Asia Simulation Conference, AsiaSim 2018, Kyoto, Japan, 2018, pp. 45-59
2. A Comprehensive Review of Sensor-Based Smart Building Monitoring and Data Gathering Techniques / I. Lavrinovica et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 21. P. 10057. URL: <https://doi.org/10.3390/app142110057>.
3. HVAC Control System Using Predicted Mean Vote Index for Energy Savings in Buildings / D. F. Espejel-Blanco et al. *Buildings*. 2022. Vol. 12, no. 1. P. 38. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12010038>.
4. Model Predictive Control for Energy Optimization of HVAC Systems Using EnergyPlus and ACO Algorithm / K. Bamdad et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 12. P. 3084. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13123084>.
5. Taheri S., Hosseini P., Razban A. Model predictive control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*. 2022. P. 105067. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105067>.
6. Technical Analysis of Comfort and Energy Consumption in Smart Buildings with Three Levels of Automation: Scheduling, Smart Sensors, and IoT / R. Aazami et al. *IEEE Access*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3526858>.
7. Wags Numoipiri Digitemie, Ifeanyi Onyedika Ekemezie. A comprehensive review of Building Energy Management Systems (BEMS) for Improved Efficiency. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21, no. 3. P. 829–841. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0746>.
8. Yao Y., Shekhar D. K. State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. *Building and Environment*. 2021. Vol. 200. P. 107952. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107952>.

9.Іlnytskyi R., Karpa R. A COMPUTERIZED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR A SMART HOME. *Computer systems and network*. 2023. Vol. 5, no. 1. P. 36–49. URL: <https://doi.org/10.23939/csn2023.01.036> (date of access: 11.12.2025).

10.ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною праці та безпекою здоров'я. – Київ: УкрНДНЦ, 2019.

11.ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. – Київ: УкрНДНЦ, 2015.

12. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. *Офіційний вебпортал парламенту України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>