

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ВІКОН НА ОСНОВІ  
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

INTELLIGENT WINDOW SYSTEM BASED ON AI

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи КІМ-21

Лисюк Юрій Валентинович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Поліщук Микола Миколайович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« \_\_\_\_\_ » грудня \_\_\_\_\_ 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Г. Терлецький

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Лисюку Юрію Валентиновичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Інтелектуальна система вікон на основі штучного інтелекту

Керівник роботи к.т.н., доцент Поліщук Микола Миколайович

затвердені наказом закладу вищої освіти від «17» червня 2025 року №0 290/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 09.12.2025р.

3. Вихідні дані до роботи Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Теоретичні основи інтелектуального регулювання освітлення

Апаратна реалізація системи інтелектуального регулювання освітлення

Реалізація та дослідження інтелектуальної віконної системи

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Теоретичні основи інтелектуального регулювання освітлення</i>	<i>Поліщук М.М., доцент</i>		
<i>Апаратна реалізація системи інтелектуального регулювання освітлення</i>	<i>Поліщук М.М., доцент</i>		
<i>Реалізація та дослідження інтелектуальної віконної системи</i>	<i>Поліщук М.М., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	_____ %		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання 18.06.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми, аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 01.08.2025 р.	
2	<i>Теоретичні основи інтелектуального регулювання освітлення</i>	до 02.09.2025 р.	
3	<i>Вибір апаратної та програмної бази для проекту</i>	до 15.09.2025 р.	
4	<i>Реалізація та дослідження інтелектуальної віконної системи</i>	до 05.10.2025 р.	
5	<i>Висновки та пропозиції</i>	До 25.10.2025 р.	
6	<i>Формування списку використаних джерел</i>	До 27.10.2025 р.	
7	<i>Формування додатків</i>	До 30.10.2025 р.	
8	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	До 05.11.2025 р.	
9	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	До 11.11.2025 р.	
10	<i>Нормоконтроль</i>	До 29.11.2025 р.	
11	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	До 02.12.2025 р.	
12	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедру</i>	До 09.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Лисюк Ю.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Поліщук М.М.

(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Лисюк Ю. В. Інтелектуальна система вікон на основі штучного інтелекту.  
Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатку.

У першому розділі проведено аналіз сучасних систем освітлення та Smart Home-рішень, визначено основні методи керування освітленістю, а також розглянуто вплив природного світла на енергоефективність будівель. Проаналізовано наукові підходи до застосування алгоритмів машинного навчання в інтелектуальних системах керування.

У другому розділі виконано вибір та обґрунтування апаратних компонентів системи: мікроконтролера ESP32, сенсорів освітленості, відкритості вікон, температури та вологості, а також виконавчих елементів. Розроблено схемотехнічне рішення і побудовано апаратну архітектуру системи, інтегровану у середовище Smart Home.

У третьому розділі реалізовано прототип інтелектуальної віконної системи, проведено експериментальні дослідження та вимірювання енергоспоживання.

Ключові слова: ESP, NodeMCU, якість повітря, сенсори, архітектура, віконна система

## ANNOTATION

Lysyuk Y. Intelligent window system based on artificial intelligence. Manuscript.

Qualification work of the master of the specialty «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of sources used, an appendix.

The first section analyzes modern lighting systems and Smart Home solutions, identifies the main methods of lighting control, and also considers the impact of natural light on the energy efficiency of buildings. Scientific approaches to the application of machine learning algorithms in intelligent control systems are analyzed.

In the second section, the hardware components of the system are selected and justified: ESP32 microcontroller, sensors of illumination, window openness, temperature and humidity, as well as executive elements. A schematic solution is developed and the hardware architecture of the system is built, integrated into the Smart Home environment.

In the third section, a prototype of an intelligent window system is implemented, experimental studies and energy consumption measurements are carried out.

Keywords: ESP, NodeMCU, air quality, sensors, architecture, window system

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОСВІТЛЕННЯ .....	10
1.1 Аналіз сучасних систем освітлення та Smart Home-рішень .....	10
1.2 Методи керування освітленням у приміщеннях .....	13
1.3 Вплив природного світла та відкритості вікон на енергоефективність будівель .....	18
1.4 Алгоритми та моделі прийняття рішень для регулювання освітлення: огляд наукових досліджень .....	21
РОЗДІЛ 2 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОСВІТЛЕННЯ .....	26
2.1 Вибір апаратних компонентів для реалізації системи .....	26
2.1.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера .....	27
2.1.2 Датчики освітленості .....	28
2.1.3 Датчики відкритості вікон .....	29
2.1.4 Виконавчі елементи .....	29
2.2 Схемотехнічне рішення підключення компонентів до мікроконтролера ..	30
2.3 Інтеграційна архітектура апаратної системи у середовищі Smart Home ...	32
2.4 Апаратна реалізація алгоритмів регулювання освітлення на базі ESP32 ..	35
РОЗДІЛ 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВІКОННОЇ СИСТЕМИ .....	43
3.1 Опис інтелектуальної системи .....	43
3.2 Реалізація інтелектуального вікна .....	46
3.3 Конструкція апаратного забезпечення .....	46
3.4 Методика та результати експериментальних досліджень .....	51
3.4.1 Постановка експерименту .....	51
3.4.2 Випробування системи при різних сценаріях .....	53

3.5 Вимірювання енергоспоживання та порівняння з традиційними системами.....	56
3.6 Аналіз результатів і оцінка ефективності.....	58
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63
ДОДАТКИ.....	67

## ВСТУП

Сучасний розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ) та Інтернету речей (IoT) створює нові можливості для підвищення комфорту, енергоефективності та безпеки житлових і комерційних будівель. Одним із перспективних напрямів є розробка інтелектуальних систем керування мікрокліматом і освітленням, які здатні адаптивно реагувати на зміну зовнішніх умов і потреб користувачів.

Традиційні системи освітлення та регулювання відкритості вікон працюють за фіксованими сценаріями або потребують ручного керування, що призводить до нераціонального використання енергії та зниження рівня комфорту. У зв'язку з цим актуальною є задача створення інтелектуальної системи вікон, здатної автоматично визначати оптимальний рівень освітленості приміщення, враховувати природне світло, положення вікон та зовнішні умови, а також самостійно приймати рішення щодо відкриття, закриття чи регулювання штор.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження інтелектуальної системи вікон на основі штучного інтелекту, що забезпечує автоматичне регулювання освітлення у приміщенні з урахуванням природного освітлення, стану вікон та рівня енергоспоживання.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено вирішення таких завдань:

- провести аналіз сучасних Smart Home-рішень у сфері інтелектуального керування освітленням;
- дослідити методи автоматичного регулювання освітлення та енергоефективності;
- розробити апаратну архітектуру системи з використанням мікроконтролера ESP32 та відповідних сенсорів;
- провести експериментальні дослідження ефективності роботи системи порівняно з традиційними рішеннями.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого регулювання освітлення у приміщеннях.

Предметом дослідження – методи та алгоритми інтелектуального керування відкритістю вікон і освітленням з використанням штучного інтелекту.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні комбінованого підходу до керування освітленням, який поєднує аналіз природного світла, положення вікон та прогнозування змін зовнішніх умов за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Практичне значення роботи полягає у створенні прототипу інтелектуального вікна, який може бути інтегрований у систему «розумного будинку» для підвищення енергоефективності та зручності користувачів.

Апробація роботи на Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених та студентів (6 травня 2025 р), де було висвітлено основні положення кваліфікаційної роботи [1].

# РОЗДІЛ 1

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОСВІТЛЕННЯ

### 1.1 Аналіз сучасних систем освітлення та Smart Home-рішень

У контексті енергоефективності та інтелектуальної автоматизації, сучасні системи освітлення трансформуються у розумні платформи, що забезпечують не лише освітлення, а й адаптивне, автоматичне керування залежно від умов. Традиційні рішення з простими вимикачами поступаються місцем системам, що здійснюють дистанційне або автоматичне регулювання яскравості, кольору та часу роботи світла.

Завдяки LED-технологіям, smart-світильники значно знижують енергоспоживання порівняно з лампами розжарювання. Наприклад, LED-розумні лампи (рис. 1.1) можуть споживати на 70-90 % менше енергії, забезпечуючи при цьому корисний життєвий цикл [2].



Рисунок 1.1 – Розумні лампи E26/E27 10 Вт Bluetooth RGB світлодіодні лампи з регулюванням яскравості [2]

Енергоефективність можна подальше підвищити, застосовуючи автоматизацію, як-от керування освітленням за розкладом або сенсорне вмикання/вимикання – такі підходи забезпечують економію до 60 % у деяких сценаріях [3, 4].

Основні методи автоматизації:

– керування за розкладом (time-based control) – попередньо встановлений графік роботи освітлення дає змогу уникати непотрібної роботи світильників у неробочі години. Наприклад, в офісах світло автоматично вмикається лише під час робочого дня та вимикається після завершення робочого часу. Дослідження показують, що такий підхід забезпечує економію до 25 % у комерційних приміщеннях [4];

– сенсорне керування (occupancy & motion sensors) – використання датчиків руху або присутності дозволяє освітленню активуватися лише тоді, коли у приміщенні знаходяться люди. Це особливо ефективно у коридорах, санвузлах, аудиторіях та складських приміщеннях. Практичні експерименти свідчать, що впровадження сенсорів присутності забезпечує додаткову економію до 30-40 % у житлових та офісних будівлях [5];

– daylight harvesting (використання природного світла) – система регулює інтенсивність штучного освітлення залежно від рівня природного світла, який надходить через вікна. У цьому випадку споживання електроенергії може скорочуватися на 20-60 %, залежно від архітектурних особливостей будівлі та сезонності [6];

– комбіновані (гібридні) підходи – найбільшої ефективності досягають системи, які поєднують різні методи. Наприклад, у класах та офісах застосовується одночасно керування за розкладом, датчики присутності та daylight harvesting. У таких умовах підтверджено економію до 60 % енергії без зниження рівня комфорту користувачів [7].

Наукові дослідження демонструють суттєве зниження енергоспоживання: до 50 % економії у офісних приміщеннях завдяки smart-освітленню, що включає датчики, дані про природне освітлення та адаптивні алгоритми, зокрема на базі

правил (rule-based) [5]. Одне з найновіших рішень – IoT-система «ISLS», яка через оптимізацію затухання світла та врахування присутності людей досягає зменшення енергоспоживання на 26-80 %, залежно від кількості користувачів [7].

Крім економії, smart-освітлення несе переваги в зручності та автоматизації. Наприклад, розумні лампи дозволяють налаштовувати світловий режим з мобільного застосунку або за допомогою голосових асистентів, що створює комфорт і підтримує природні циркадні ритми [3].

Новітній тренд – інтеграція мікрофонів і локального AI в саме обладнання, наприклад, серія Lepro AI Lighting Pro з власним голосовим помічником (рис. 1.2), усуває необхідність у зовнішніх контролерах, але піднімає питання приватності [8].



Рисунок 1.2 – Розумна настільна лампа Lepro [8]

Розумна настільна лампа Lepro – це інноваційна система інтелектуального освітлення, що поєднує психологію кольору, алгоритми генеративного моделювання та можливості голосового керування. Вона підтримує роботу як із власним вбудованим помічником, так і з Alexa чи Google Assistant, дозволяючи користувачеві створювати індивідуальні світлові сцени відповідно до настрою або діяльності. Завдяки технології LightBeats освітлення синхронізується з музикою, а чіп RGB+IC із 196 адресованими діодами забезпечує плавні динамічні переходи та унікальні ефекти. Система пропонує як автоматично згенеровані

3D-сцени, так і можливість ручного налаштування кольорів і яскравості, що робить її гнучким і креативним інструментом у смарт-оселі.

Також важливо брати до уваги комунікаційну інфраструктуру: сучасні smart-системи інтегруються з IoT екосистемами через стандарти (Wi-Fi, Thread, Matter), що підвищують сумісність і масштабованість рішень.

Упровадження smart-освітлення супроводжується економічними та екологічними вигодами, але також залежить від нюансів, таких як географічне розташування, ціна енергії та профіль використання – ці фактори значною мірою впливають на окупність проєкту.

## **1.2 Методи керування освітленням у приміщеннях**

У сучасних інтелектуальних будівлях освітлення перестає бути статичною інфраструктурою та перетворюється на адаптивну систему, що реагує на зміну зовнішніх умов і потреб користувачів. Методи керування освітленням можна умовно поділити на три основні групи: сенсорні, візуальні (на основі комп'ютерного зору) та гібридні. Найбільш поширеними є системи, які використовують датчики руху, присутності та освітленості.

Сенсорні методи ґрунтуються на використанні спеціалізованих датчиків, які забезпечують збирання даних про умови в приміщенні та автоматично

передають сигнали на систему керування освітленням. Їх можна поділити на кілька ключових груп:

1) PIR-датчики (Passive Infrared Sensor) призначені для виявлення переміщення людей у приміщенні шляхом фіксації змін інфрачервоного випромінювання, що виникають під час руху. Вони широко застосовуються у коридорах, санвузлах, сходових клітинах та паркінгах, а результати досліджень підтверджують, що впровадження таких сенсорів у службових приміщеннях дозволяє знизити витрати електроенергії на освітлення до 30 %.

PIR-датчик (HC-SR501) живиться від 5 В і видає логічний сигнал HIGH (1), коли виявляє рух. Цей сигнал подається на цифровий вхід Arduino. Мікроконтролер обробляє подію та активує реле (через транзистор), яке вмикає лампу. При відсутності руху PIR повертає сигнал LOW, і світло вимикається.

Схема роботи PIR-датчика (рис. 1.3) для освітлення демонструє принцип автоматичного керування світильниками залежно від наявності руху в приміщенні. У такій системі датчик пасивної інфрачервоної дії (PIR) реєструє зміни теплового випромінювання, спричинені переміщенням людини, і формує керуючий сигнал для мікроконтролера або реле. Отриманий сигнал активує освітлювальний прилад, який вмикається лише за потреби, що дає змогу суттєво знизити енергоспоживання та підвищити зручність користування системою.

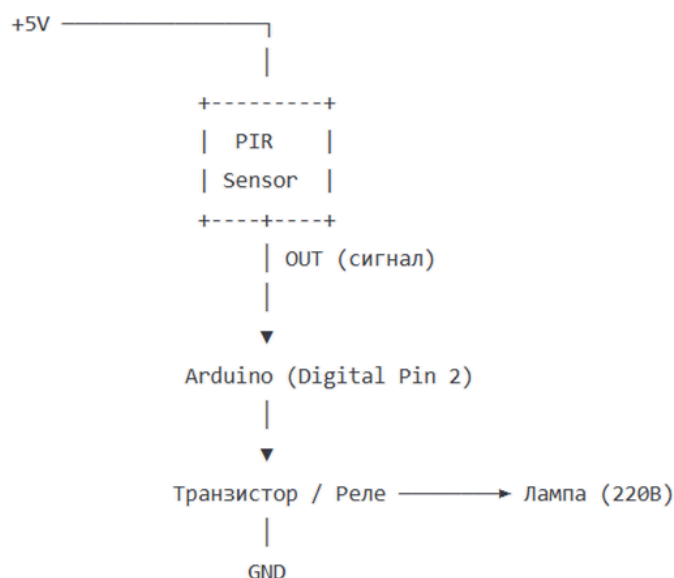


Рисунок 1.3 – Схема роботи PIR-датчика для освітлення [5]

2) Датчики присутності (Occupancy Sensors) відрізняються від датчиків руху тим, що здатні виявляти не лише переміщення, а й наявність людини у стані спокою, для чого застосовуються комбінації ультразвукових та інфрачервоних сенсорів, вони широко використовуються у класах, офісах та бібліотеках, забезпечуючи вищу енергоефективність, оскільки світло не вимикається, якщо користувач перебуває у приміщенні без рухів, наприклад під час читання чи роботи за комп'ютером (рис. 1.4).

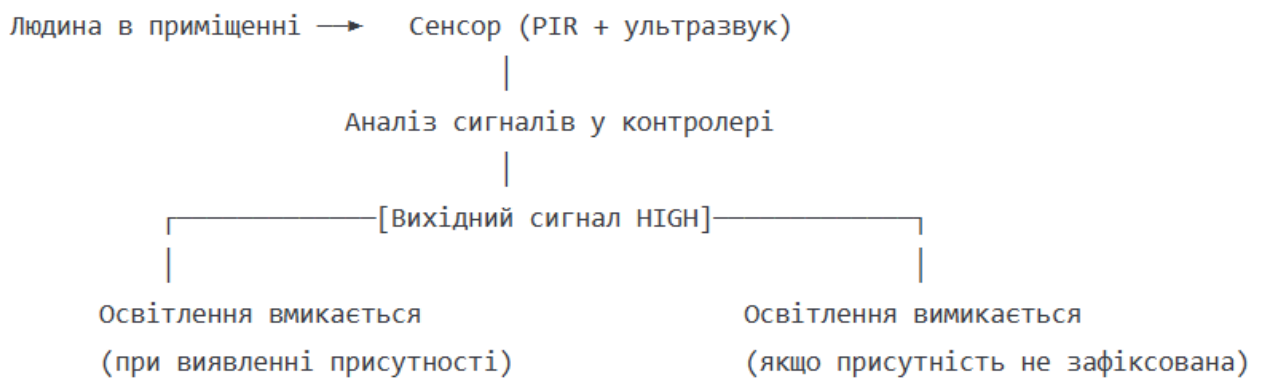


Рисунок 1.4 – Принцип роботи оссирпансу-сенсора (датчика присутності) [9]

Схематичне застосування оссирпансу-сенсора ґрунтується на тому, що він поєднує в собі два канали виявлення – інфрачервоний (PIR) та ультразвуковий. PIR-канал реагує на зміну теплового випромінювання від людини під час руху, тоді як ультразвуковий канал аналізує відбиті хвилі й здатний зафіксувати навіть невеликі коливання в приміщенні, що дозволяє визначати присутність користувача у стані спокою. Отримані сигнали обробляються вбудованим контролером, який формує керуючий вихід на систему освітлення: за наявності людини світло залишається увімкненим, а за відсутності – вимикається, що забезпечує як комфорт, так і зменшення енергоспоживання [9].

3) Датчики освітленості (Light Sensors / Photocells) застосовуються для вимірювання рівня природного світла в приміщенні та забезпечують автоматичне регулювання штучного освітлення: при досягненні заданого порогу, наприклад 300 люкс, система зменшує інтенсивність або повністю

вимикає лампи (рис. 1.5). Типовим прикладом використання таких сенсорів є технологія daylight harvesting, яка дозволяє ефективно поєднувати природне та штучне освітлення, що, за результатами досліджень, забезпечує скорочення витрат на електроосвітлення у межах 20-60 % залежно від архітектурних умов та рівня інсоляції приміщення.

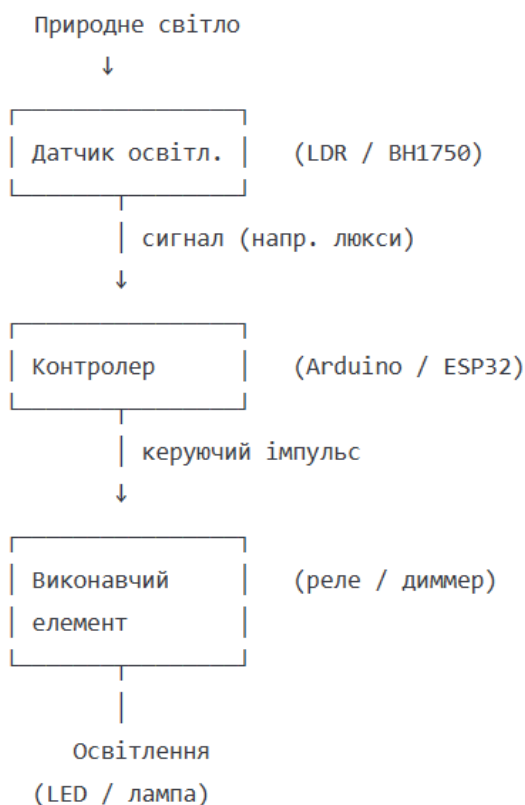


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення принципу роботи Light Sensors / Photocells (датчика освітленості) [5]

Принцип роботи датчиків освітленості (Light Sensors / Photocells) полягає у перетворенні інтенсивності світлового потоку в електричний сигнал, який далі може використовуватися системою автоматичного керування освітленням. Найпростіші фоторезистори змінюють свій електричний опір залежно від рівня освітленості: у темряві їх опір зростає, а при яскравому світлі – зменшується, що дає змогу формувати сигнал для вмикання чи вимикання світильників.

4) Комбіновані сенсорні модулі у сучасних smart-системах реалізуються у вигляді мультимодальних вузлів, що об'єднують декілька типів сенсорів – руху,

присутності, освітленості та температури, – забезпечуючи комплексний збір даних про середовище (рис. 1.6). Передача інформації здійснюється як через дротові інтерфейси (I<sup>2</sup>C, UART), так і через бездротові стандарти зв'язку (ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth), що робить такі модулі гнучкими та масштабованими. Завдяки інтеграції кількох сенсорних каналів комбіновані рішення дозволяють значно підвищити точність регулювання освітлення та досягати високої енергоефективності, знижуючи витрати на електроосвітлення у комерційних приміщеннях на 40-55 % [5].

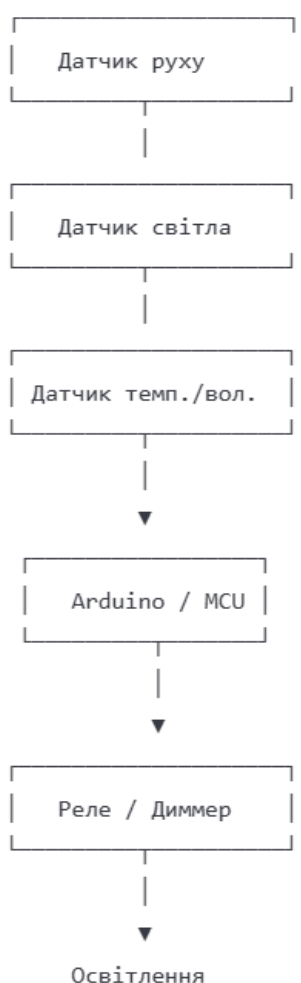


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення принципу роботи багатофункціонального сенсорного модуля [5]

Кілька сенсорів (руху, освітленості, температури/вологості) одночасно передають дані на контролер (Arduino / ESP32). Контролер аналізує інформацію

і керує виконавчим елементом (реле або димер), який вмикає або регулює освітлення.

Отже, методи керування освітленням у приміщеннях охоплюють сенсорні рішення, системи на основі комп'ютерного зору та гібридні підходи. Сенсори забезпечують простоту та економію до 60 %, комп'ютерний зір підвищує точність контролю природного світла, а поєднання цих методів дозволяє досягти максимальної енергоефективності й адаптивності у smart-будівлях.

### **1.3 Вплив природного світла та відкритості вікон на енергоефективність будівель**

Природне освітлення є одним із ключових факторів підвищення енергоефективності будівель, оскільки воно зменшує потребу у використанні штучного світла та впливає на тепловий баланс приміщень. Архітектурні рішення з великими віконними прорізами, атріумами або світловими ліхтарями дозволяють значно скоротити споживання електроенергії на освітлення, забезпечуючи при цьому комфортні умови для користувачів. За даними досліджень, оптимальне використання природного світла може зменшити витрати на електроосвітлення до 80 % у денний час [10].

В умовах підвищення вартості енергоресурсів та посилення вимог до сталого розвитку архітектури, інтеграція природного освітлення у системи інтелектуального керування штучним світлом стає не лише технологічним трендом, а й економічною необхідністю. Дослідження International Energy Agency [11] показують, що від 20 до 40 % електроенергії у будівлях споживається саме на освітлення, і до 60 % цього обсягу можна компенсувати завдяки оптимальному використанню денного світла.

Природне освітлення надходить у приміщення через віконні прорізи, світлові ліхтарі та відбиття від внутрішніх поверхонь. Ефективне використання цього ресурсу вимагає інтеграції датчиків освітленості (наприклад, BH1750) та датчиків відкритості вікон (герконів), які дозволяють системі оцінювати

фактичну інсоляцію і приймати рішення щодо зменшення або вимкнення штучного освітлення.

У разі виявлення відкритого вікна система враховує збільшений приплив денного світла та відповідно коригує інтенсивність світильників. Такий підхід формує адаптивну логіку керування, що динамічно реагує на зміну природного освітлення (рис. 1.7).

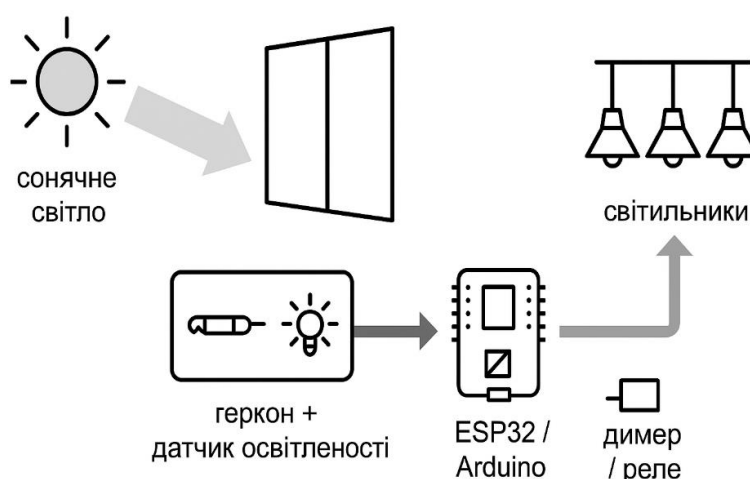


Рисунок 1.7 – Схема взаємодії природного освітлення, сенсорів відкритості вікон і системи керування освітленням [12]

Використання природного світла дозволяє суттєво знизити навантаження на електромережу. Згідно з дослідженням [12], раціональне керування природним освітленням сприяє скороченню енергоспоживання до 45 % у приміщеннях із часткою скління понад 30 % від площі фасаду. У комерційних спорудах із системами daylight harvesting зниження споживання становить 35-60 %.

Розрахунок ефективності часто базується на двох показниках:

- Daylight Factor (DF) – відсоткове співвідношення рівня природного світла у приміщенні до зовнішнього освітлення за похмурої погоди;

- Daylight Autonomy (DA) – частка часу, протягом якого природне освітлення забезпечує необхідний рівень яскравості без участі штучного освітлення.

У розумних системах освітлення ці параметри використовуються для навчання моделей прийняття рішень або формування нечітких правил, що дозволяє гнучко адаптувати рівень освітлення під змінні умови освітленості та положення вікон.

Датчики відкритості (геркони, магнітні сенсори) є важливою складовою у контексті інтелектуального керування енергоспоживанням. Вони забезпечують подвійний ефект – оптимізацію освітлення, оскільки відкриття вікна зазвичай супроводжується зростанням природного освітлення та керування мікрокліматом, що дозволяє уникнути надмірного нагріву або охолодження приміщення.

Такі сенсори працюють на основі замикання магнітного поля – при роз'єднанні віконної стулки контакт розмикається, формуючи сигнал, який зчитує мікроконтролер (Arduino, ESP32). Надалі контролер виконує алгоритм:

- якщо вікно відкрите і рівень освітленості  $> 400$  люкс, зменшити яскравість LED-світильників на 50 %;
- якщо вікно зачинене або освітленість  $< 200$  люкс, поступово збільшити інтенсивність освітлення.

Такі логічні алгоритми, як показано у [13], забезпечують додаткову економію 15-20 % електроенергії у порівнянні з традиційними daylight harvesting системами, де стан вікон не враховується.

Моделі розподілу освітленості враховують кут падіння сонячного світла, площу вікна, коефіцієнт пропускання скла ( $\tau$ ) та відбивну здатність внутрішніх поверхонь ( $\rho$ ). Узагальнений вираз для оцінки частки природного освітлення в енергетичному балансі будівлі визначається за формулою (1.1):

$$E_{nat} = E_{out} \times \tau \times \frac{A_w}{A_r} \times (1 - \rho), \quad (1.1)$$

де  $E_{nat}$  – природна освітленість у приміщенні;

$E_{out}$  – зовнішня освітленість;

$A_w$  – площа вікон;

$A_r$  – площа підлоги приміщення.

Отримані значення використовуються у системі регулювання освітлення для корекції роботи димерів або драйверів світлодіодів. Такий підхід застосовано в експериментальній системі IntelliLight 2.0 [14], де адаптивне регулювання дозволило скоротити споживання енергії на 62 % без втрати комфортності освітлення.

Отже, інтеграція природного освітлення та контролю відкритості вікон у системи інтелектуального регулювання освітлення є ефективним способом зниження енергоспоживання будівель. Завдяки використанню датчиків освітленості та герконів мікроконтролерна система може автоматично регулювати яскравість світильників відповідно до реальних умов. Це не лише зменшує витрати електроенергії, а й підвищує комфорт користувачів та сприяє сталому розвитку архітектури.

#### **1.4 Алгоритми та моделі прийняття рішень для регулювання освітлення: огляд наукових досліджень**

Інтелектуальне регулювання освітлення базується на здатності системи самостійно приймати рішення щодо рівня яскравості, часу вмикання та вимикання світильників, з урахуванням зовнішніх і внутрішніх чинників – рівня природного освітлення, присутності людей, відкритості вікон, часу доби тощо. В основі таких рішень лежать алгоритмічні моделі, що можуть бути детермінованими (логічними) або адаптивними (на основі нечіткої логіки чи машинного навчання) [13].

Найпростішою формою інтелектуального керування є rule-based systems – системи з набором логічних умов, що описують дії у відповідь на конкретні події. Такі правила реалізуються в мікроконтролерах (Arduino, ESP32) у вигляді простих умовних операторів if-else, перевагою яких є простота реалізації, проте,

обмежена адаптивність, система реагує лише на заздалегідь визначені умови, не враховуючи контекст (пора року, орієнтація вікон, поведінка користувачів).

Для підвищення адаптивності використовуються моделі нечіткої логіки (fuzzy logic), які дозволяють системі оперувати не бінарними, а плавними значеннями параметрів, наприклад, «низька», «середня» або «висока» освітленість.

Алгоритм складається з трьох етапів:

- фазифікація – перетворення реальних значень (люкс, градуси відкриття вікна) у лінгвістичні змінні;
- нечітке виведення – обчислення результату за набором правил (метод Мамдані або Сугено);
- дефазифікація – перетворення результату у конкретну команду для виконавчого пристрою [12].

Такі моделі забезпечують гнучке реагування системи, коли різні фактори (природне світло, час доби, відкрите вікно) змінюються одночасно. За результатами експериментів [12], використання нечітких алгоритмів у системах освітлення дозволяє зменшити енергоспоживання на 50-65 % у порівнянні з жорстко запрограмованими системами.

Новий етап розвитку – застосування алгоритмів машинного навчання (ML), що дозволяють системам прогнозувати потребу в освітленні на основі історичних даних і контексту. Найчастіше використовуються моделі:

- лінійна регресія (Linear Regression) – прогноз яскравості залежно від часу доби та рівня природного світла;
- рандомні ліси (Random Forest) – для класифікації станів системи («увімкнути», «вимкнути», «зменшити яскравість»);
- штучні нейронні мережі (ANN) – для адаптації до складних багатофакторних сценаріїв.

Такі моделі можуть навчатися у хмарі або локально (на ESP32 із TensorFlow Lite).

Дослідження [14] показало, що система на основі ML забезпечила додаткову економію 12-18 % електроенергії порівняно з нечіткими алгоритмами, завдяки здатності прогнозувати зміни природного освітлення та поведінку користувачів.

Оптимальним є гібридний підхід, у якому базові логічні правила визначають межі роботи системи, нечітка логіка забезпечує адаптацію до зовнішніх умов, а машинне навчання – довгострокове прогнозування. Так, система SmartLight-FLML об'єднує нечіткий контролер з нейронною мережею, що самостійно оновлює правила виведення залежно від поведінки користувачів і природного освітлення. Результати показали зниження енергоспоживання до 72 % при збереженні комфортної яскравості (близько 350 люкс у робочих зонах) [15].

В Україні протягом останніх 5 років активно розвиваються дослідження у сфері інтелектуального керування енергоефективними системами освітлення, що інтегруються в архітектуру розумних будівель і міських інфраструктур. Значна увага приділяється застосуванню адаптивних та гібридних моделей, які поєднують принципи нечіткої логіки, класичних алгоритмів керування та машинного навчання.

У роботі [16] розглянуто систему керування освітленням на основі нечіткої логіки, але акцентовано на зовнішньому освітленні й транспортному світлотехнічному контексті. Зокрема, зазначається, що багато існуючих нечітких систем «сфокусовані тільки на рівні освітленості (як основної величини)» і не враховують інші чинники (наприклад, тариф електроенергії).

Запропоновано модель, що базується на принципах нечіткої логіки Мамдані, орієнтовану на підвищення енергоефективності систем зовнішнього освітлення. Автор обґрунтовує, що класичні алгоритми регулювання не враховують багатофакторність середовища, зокрема змінну інтенсивність транспортного руху, погодні умови, рівень природної освітленості та тарифні коливання на електроенергію. Розроблена система формує рішення на основі лінгвістичних правил типу «якщо-то», що дозволяє плавно змінювати рівень

яскравості LED-світильників у режимі реального часу. Залежно від сценарію використання, контролер обирає джерело живлення (електромережа або акумулятор), забезпечуючи адаптивний розподіл енергоресурсів. Експериментальні результати, наведені в роботі, підтверджують зменшення енергоспоживання на 35-50 %, а також покращення рівномірності освітлення вуличних зон, що сприяє підвищенню безпеки руху та комфорту населення [16].

О. Вишневський та Л. Журавчак [17] досліджували методи машинного навчання (регресії, ансамблі, нейронні мережі) для прогнозування витрат енергії у будівлях. Хоч безпосередньо не про освітлення, але підходи й моделі показують, як можна використовувати ML-алгоритми в енергоефективному управлінні будівлями, і це може бути застосовано й до систем освітлення. Результати демонструють потенціал машинного навчання в підвищенні енергоефективності.

Запропоновані методики можуть бути адаптовані до інтелектуальних систем освітлення для створення самонавчальних моделей, які враховують поведінку користувачів, природне освітлення та графіки роботи приміщень. У статті підкреслюється, що інтеграція моделей машинного навчання у Smart Building-системи є ключем до підвищення ефективності енергокористування та переходу до концепції енергонезалежних і «зелених» будівель [17].

У статті [18] автори наголошують, що інтелектуальні системи освітлення відіграють ключову роль у переході до сталого енергоспоживання, зокрема у житлових, офісних і промислових будівлях. Робота містить узагальнений аналіз архітектури систем автоматичного керування, у яких поєднуються різні типи сенсорів – часу, присутності, руху та освітленості. Встановлено, що застосування комплексного сенсорного підходу дозволяє автоматично адаптувати освітлення до умов навколишнього середовища, скорочуючи витрати електроенергії до 50-65 % порівняно з традиційними схемами. Автори також підкреслюють важливість гібридних систем, які поєднують апаратні сенсори та програмно-адаптивні модулі, здатні аналізувати поведінку користувачів і час доби для оптимізації роботи світильників.

Аналіз зарубіжних та вітчизняних наукових досліджень засвідчив активний розвиток напрямів, пов'язаних із впровадженням інтелектуальних систем керування освітленням на базі IoT-технологій, нечіткої логіки та машинного навчання. Дослідники приділяють особливу увагу створенню адаптивних алгоритмів, здатних автоматично регулювати інтенсивність освітлення залежно від природного світла, присутності користувачів, тарифів на електроенергію та прогнозованого навантаження енергомережі.

## РОЗДІЛ 2

### АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ОСВІТЛЕННЯ

#### 2.1 Вибір апаратних компонентів для реалізації системи

Побудова інтелектуальної системи регулювання освітлення потребує ретельного добору апаратних компонентів, які забезпечують точне вимірювання параметрів освітленості, контроль стану вікон, а також ефективне керування світловими приладами. Основна мета вибору апаратної частини полягає у досягненні балансу між енергоефективністю, функціональністю та економічною доцільністю.

У системі, що розробляється, апаратна архітектура включає такі основні компоненти:

- мікроконтролер (Arduino UNO або ESP32);
- датчики освітленості (наприклад, BH1750);
- датчики відкритості вікон (герконові сенсори);
- виконавчі елементи (реле або LED-димери);
- допоміжні модулі зв'язку та живлення.

Структура апаратної частини системи подана на рисунку 2.1.

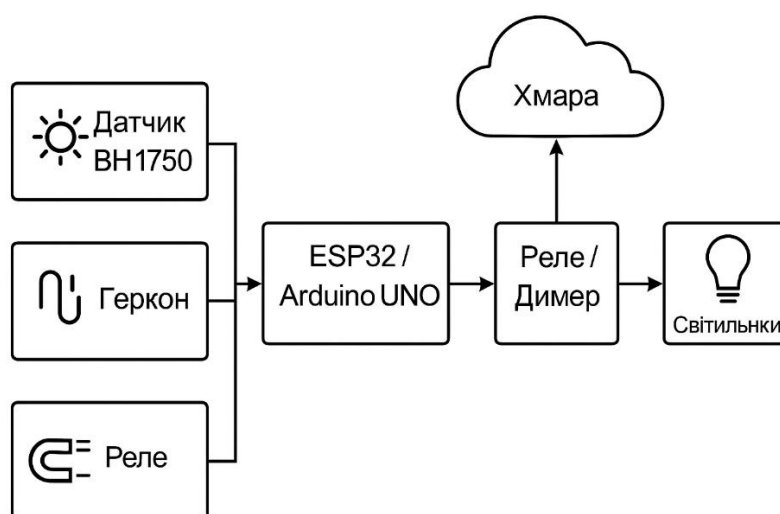


Рисунок 2.1 – Структура апаратної системи інтелектуального керування освітленням

Апаратна структура інтелектуальної системи керування освітленням базується на модульному принципі й передбачає взаємодію кількох функціональних блоків:

- сенсорний блок – складається з датчика освітленості (BH1750) для вимірювання рівня природного та штучного світла та герконового сенсора для визначення стану вікна (відкрите/закрите). Ці компоненти формують вхідні сигнали, що відображають поточний стан навколишнього середовища;

- обчислювальний блок – представлений мікроконтролером ESP32 або Arduino Uno, який зчитує дані з сенсорів через інтерфейс I<sup>2</sup>C і цифрові GPIO, обробляє отримані дані згідно з алгоритмами (логічні правила, нечітка логіка або ML), генерує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв;

- виконавчий блок – включає реле або димер для керування світильниками, світлодіодні лампи (LED) як кінцеві елементи системи, якими здійснюється регулювання яскравості;

- комунікаційний модуль – реалізований на базі Wi-Fi або Bluetooth (ESP32) для інтеграції з системою Smart Home або хмарною платформою моніторингу;

- блок живлення – забезпечує стабілізовану напругу 3,3-5 В для контролера та периферії, використовуючи адаптер або модуль живлення (наприклад, LM2596).

Сенсор освітленості та геркон подають сигнали на контролер ESP32, який обробляє дані, виконує алгоритм нечіткої логіки або логічних правил і керує реле чи димером для регулювання світлового потоку.

### 2.1.1 Обґрунтування вибору мікроконтролера

Для реалізації системи розглянуто дві альтернативні платформи – Arduino Uno та ESP32. Arduino Uno базується на мікроконтролері ATmega328P і характеризується стабільністю, простотою програмування та великою кількістю бібліотек. ESP32, у свою чергу, має вбудовані Wi-Fi і Bluetooth-модулі, а також двоядерний процесор із частотою до 240 МГц, що дає змогу реалізовувати складні алгоритми нечіткої логіки або машинного навчання.

З огляду на необхідність бездротової інтеграції з IoT-середовищем, подальша реалізація системи базується на ESP32, який забезпечує більшу обчислювальну потужність та можливість передачі даних у хмарні сервіси [19, 20].

### 2.1.2 Датчики освітленості

Для вимірювання інтенсивності природного та штучного світла обрано BH1750 – цифровий фотометричний сенсор із вихідним інтерфейсом I<sup>2</sup>C, який вимірює освітленість у діапазоні 1-65000 люкс. Його ключовою перевагою є точність і стабільність показів навіть за змінних температур та спектральних умов. Датчик формує цифрове значення, що безпосередньо передається до мікроконтролера без потреби аналогово-цифрового перетворення.

Застосування BH1750 забезпечує точну оцінку рівня природного світла, що дозволяє алгоритму системи приймати коректні рішення щодо зменшення або збільшення інтенсивності освітлення [21]. На рисунку 2.2 наведено зовнішній вигляд датчика BH1750.



Рисунок 2.2 – Датчик освітленості на чіпі BH1750 [21]

Таким чином, інтеграція BH1750 у систему керування сприяє підвищенню енергоефективності, комфорту користувачів та точності роботи алгоритмів освітлення.

### 2.1.3 Датчики відкритості вікон

Контроль стану вікон здійснюється за допомогою герконових датчиків (reed switch), які реагують на магнітне поле постійного магніту, закріпленого на стулці вікна (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Магнітоконтактний датчик відкриття вікна [22]

При його відкритті контакт розмикається, формуючи сигнал «LOW» на цифровому вході контролера. Такий принцип дозволяє ідентифікувати стан «відкрито/закрито» без додаткових рухомих частин і забезпечує високу надійність у довготривалій експлуатації.

### 2.1.4 Виконавчі елементи

Керування світильниками здійснюється за допомогою реле (наприклад, модуля SRD-05VDC-SL-C) або димера, що дозволяє плавно змінювати яскравість LED-світильників. У системі реалізовано два режими:

- дискретний – увімкнення або вимкнення ламп при досягненні порогових рівнів освітленості;
- аналоговий – зміна яскравості через широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ).

Димерні модулі підтримують роботу зі світлодіодними драйверами типу MOSFET-контролю (наприклад, PWM LED Dimmer 12-24 В) [18].

Завдяки можливості працювати як у дискретному, так і в аналоговому режимі, система може адаптувати інтенсивність освітлення до реальних умов, зменшуючи споживання електроенергії та підвищуючи комфорт користувачів. Застосування ШІМ-керування та MOSFET-драйверів дозволяє досягти високої точності регулювання яскравості при мінімальних втратах енергії та подовженому терміні служби LED-світильників.

## **2.2 Схемотехнічне рішення підключення компонентів до мікроконтролера**

Проектування схемотехнічного рішення системи інтелектуального регулювання освітлення здійснюється з урахуванням функціональних зв'язків між сенсорами, мікроконтролером і виконавчими пристроями. Основна мета розроблення схеми полягає у забезпеченні надійного обміну даними, стабільного живлення елементів і захисту мікроконтролера від перевантаження або зворотної полярності.

Архітектура побудована за модульним принципом і включає три логічні частини: сенсорний модуль, який формує вхідні сигнали системи, мікроконтролерний модуль, що виконує обробку даних і прийняття рішень, а також виконавчий модуль, який здійснює керування світильниками на основі команд контролера.

На рисунку 2.4 подано принципову електричну схему підключення компонентів системи інтелектуального керування освітленням. Вона демонструє взаємозв'язок між сенсорами BH1750 та герконом, контролером ESP32, виконавчими елементами (реле або димером) і світильниками.

Для зчитування рівня освітленості використовується цифровий датчик BH1750, який працює через інтерфейс I<sup>2</sup>C. Лінії SDA (дані) та SCL (тактовий сигнал) підключаються до відповідних виводів мікроконтролера ESP32 (GPIO21 та GPIO22). Живлення сенсора здійснюється від лінії 3,3 В, а спільна земля (GND) об'єднує всі модулі.

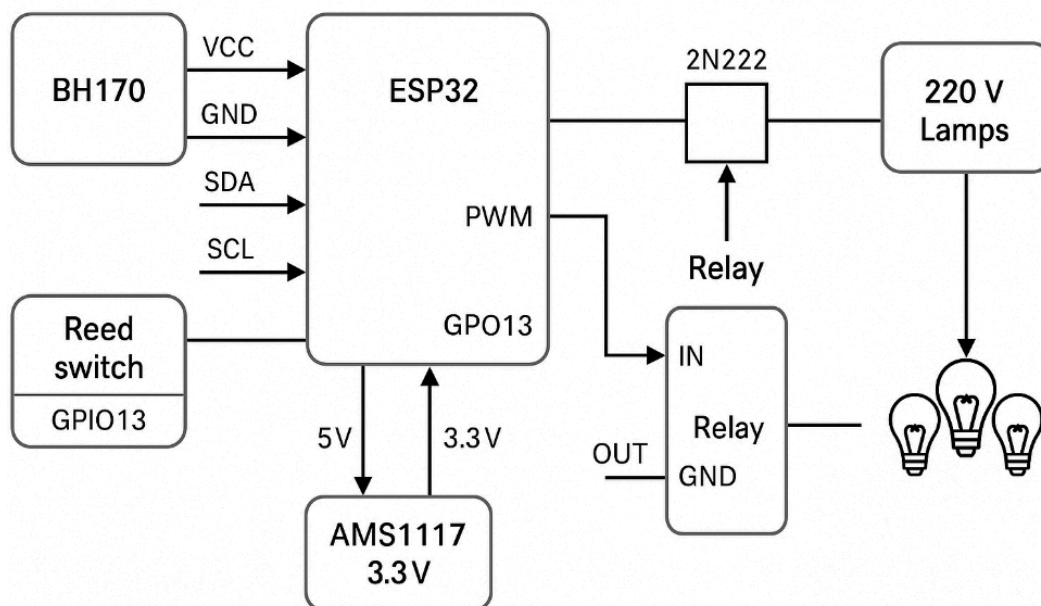


Рисунок 2.4 – Схемотехнічне рішення підключення компонентів до мікроконтролера [19]

Герконовий сенсор (reed switch) підключається до цифрового входу D13 або іншого GPIO-контакту ESP32 через підтягувальний резистор 10 кОм до VCC. Це дозволяє уникнути помилкових спрацювань у стані «floating input». У замкненому стані (вікно зачинене) контакт геркона формує рівень HIGH, а при розмиканні (вікно відкрите) – LOW, що обробляється мікроконтролером як подія відкриття вікна.

Для реалізації функції керування освітленням застосовується модуль реле SRD-05VDC-SL-C, який дозволяє комутувати навантаження до 10 А при 220 В. Вивід керування реле (IN) підключається до цифрового виходу мікроконтролера (наприклад, GPIO26). При подачі логічної «1» активується електромагнітне реле, що замикає силове коло світильників. Якщо система працює у режимі плавного регулювання яскравості, замість реле підключається PWM-диммер, який приймає ШІМ-сигнал із виходу GPIO25 ESP32. Ширина імпульсів визначається алгоритмом керування, що дозволяє точно регулювати інтенсивність освітлення.

Для захисту мікроконтролера передбачено діод Шоттки паралельно котушці реле (для компенсації зворотної ЕРС) та транзистор NPN (наприклад,

2N2222) у ключовій схемі між ESP32 і реле, що зменшує струмове навантаження на вихід контролера.

Система живиться від адаптера 5 В, який забезпечує стабільне напруження для реле та лінії логіки 3,3 В для ESP32 і датчиків. Для зниження шумів і стабілізації сигналів у колі живлення застосовуються конденсатори фільтрації (100 мкФ і 0,1 мкФ), розташовані паралельно біля входу контролера та сенсорів. У разі використання Arduino Uno живлення модулів здійснюється безпосередньо від виводу 5 В, а для ESP32 – через стабілізатор AMS1117-3,3 В.

Розроблена схема підключення забезпечує узгоджену роботу сенсорів, контролера та виконавчих елементів, гарантує надійність і стабільність функціонування системи навіть за змінних умов освітленості. Вибір інтерфейсу I<sup>2</sup>C для BH1750 мінімізує кількість з'єднань, а використання транзисторного ключа підвищує безпеку та довговічність реле. Запропоноване схемотехнічне рішення створює гнучку основу для подальшої програмної реалізації алгоритмів регулювання освітлення з урахуванням відкритості вікон та рівня природного світла.

### **2.3 Інтеграційна архітектура апаратної системи у середовищі Smart Home**

Інтелектуальне регулювання освітлення приміщення через контроль відкритості вікон доцільно реалізовувати як IoT-вузол розумного дому, що поєднує сенсорний, контролерний, виконавчий та комунікаційний рівні. Така трирівнева організація відповідає сучасним практикам побудови дистрибутивних кіберфізичних систем освітлення, де частина функцій (фільтрація, порогова логіка) виконується «на краю» (edge), а агрегація та звітність – на сервері [12, 15].

Польовий рівень є базовою складовою системи, оскільки саме на цьому етапі здійснюється збір первинної інформації про стан середовища. До його

складу входять датчик освітленості BH1750 та герконовий сенсор відкритості вікон.

Датчик BH1750 виконує високоточне вимірювання інтенсивності природного й штучного світла у діапазоні 1-65000 лк. Згідно з результатами дослідження [14], використання BH1750 у подібних IoT-системах забезпечує стабільність вимірювань навіть за змінного спектрального складу освітлення, що підвищує точність прийняття рішень. Герконовий сенсор (reed switch) реалізує бінарний контроль стану вікна – «відкрито/закрито». Його герметична конструкція без рухомих частин забезпечує довговічність, низьку чутливість до механічних навантажень і надійність в умовах тривалої експлуатації.

Таким чином, польовий рівень формує телеметричні дані про освітленість та стан вікон, перетворює їх у цифрову форму та передає на контролерний рівень для подальшої обробки.

Контролерний рівень відповідає за оброблення сигналів, виконання обчислень і формування керуючих дій. Центральним компонентом є мікроконтролер ESP32, який зчитує показники BH1750 через інтерфейс I<sup>2</sup>C (GPIO 21, 22) і стан геркона через цифровий вхід (GPIO 13). Після цього виконується обчислення згідно з алгоритмами регулювання освітлення.

Залежно від типу алгоритму – логічного, нечіткого чи адаптивного (на основі ML), ESP32 формує керуючі сигнали до виконавчих елементів: реле або димера (через виходи GPIO 25/26, у режимі ШІМ або дискретного керування). Завдяки двоядерному процесору з частотою до 240 МГц мікроконтролер здатний одночасно виконувати вимірювання, логічну обробку та передавання даних у мережу без зниження швидкодії [19].

З метою підвищення надійності реалізовані захисні механізми схемотехнічного рівня: підтягувальні резистори на входах, транзисторні ключі (2N2222) між ESP32 та реле, діоди Шотткі для гасіння зворотної ЕРС. Таке рішення відповідає вимогам безпечного проєктування IoT-пристроїв, що гарантує стійкість до перешкод і захист від перенавантажень [20].

Узагальнюючи, контролерний рівень виконує роль інтелектуального ядра системи, яке перетворює сирі сенсорні дані у керуючі команди та забезпечує двосторонню взаємодію з інтеграційним рівнем.

Інтеграційний рівень виступає комунікаційною ланкою між апаратною частиною системи й середовищем Smart Home. Його основне завдання – забезпечення обміну даними між мікроконтролером і зовнішніми IoT-платформами для моніторингу, аналітики й віддаленого керування.

Передавання даних здійснюється через вбудований у ESP32 модуль Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n). Основним протоколом телеметрії є MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), що функціонує за принципом «публікації-підписки». Контролер виступає видавцем повідомлень (publisher), а MQTT-брокер передає інформацію до клієнтів (наприклад, Home Assistant, ThingsBoard або мобільних застосунків). Така архітектура забезпечує низькі затримки, мінімальне енергоспоживання та високу стабільність передачі даних навіть у бездротових мережах обмеженої пропускної здатності [12, 14].

Альтернативно система може використовувати HTTP/REST-API для прямої інтеграції з веб-сервісами. Як зазначають науковці [15], поєднання локального керування (edge computing) із хмарною аналітикою створює розподілену Smart Home-архітектуру, у якій локальні пристрої діють автономно, але синхронізуються з хмарним сервером для збереження історичних даних і прогнозування споживання.

Додаткову масштабованість забезпечує підтримка стандартів Matter, Zigbee, Z-Wave, що гарантують уніфіковану взаємодію між пристроями різних виробників. Таким чином, апаратна система на базі ESP32 може бути інтегрована у комплексну інфраструктуру розумного дому, взаємодіючи з підсистемами освітлення, клімат-контролю, безпеки та енергоменеджменту (рис. 2.5).

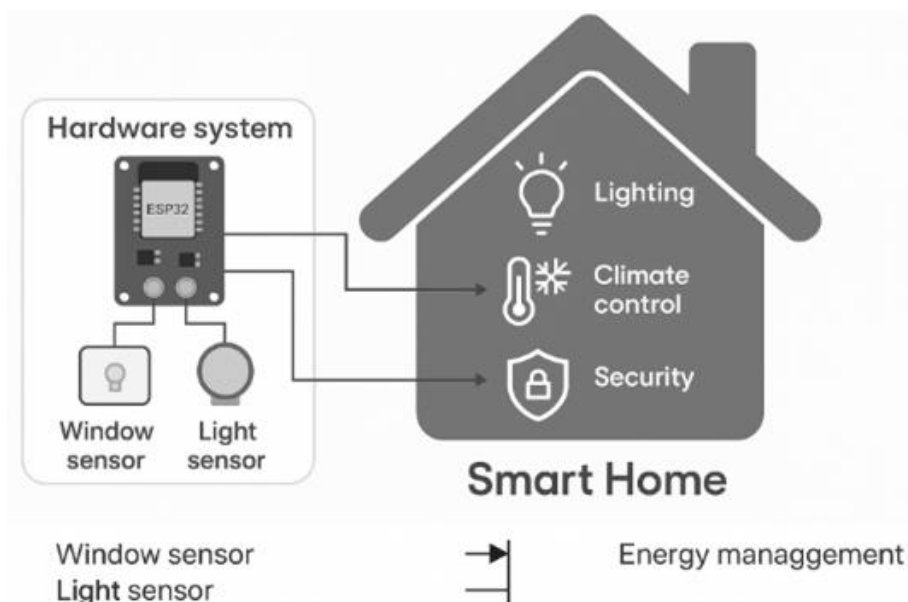


Рисунок 2.5 – Інтеграція апаратної системи на базі ESP32 у комплексну інфраструктуру розумного дому [19]

Отже, інтеграційний рівень забезпечує віддалений моніторинг, централізовану аналітику й керування, перетворюючи локальну систему на складову єдиного кіберфізичного простору будівлі.

Синергія трьох рівнів – польового, контролерного та інтеграційного, формує інтелектуальну IoT-архітектуру системи регулювання освітлення. Польовий рівень виконує роль сенсорного шару збору даних, контролерний – аналітичного та керуючого ядра, інтеграційний – комунікаційного інтерфейсу з мережею Smart Home. Така рівнева побудова відповідає вимогам сучасних систем: енергоефективність, модульність, масштабованість і кіберфізична сумісність.

## 2.4 Апаратна реалізація алгоритмів регулювання освітлення на базі ESP32

На рівні ESP32 реалізуються три профілі керування, які можуть перемикатися залежно від вимог експерименту або сценаріїв Smart Home:

- порогово-логічний профіль – дискретне керування реле/димера за порогами  $L_{on}/L_{off}$  з урахуванням стану вікна [14, 18];
- нечіткий профіль (FL) – формування цільової яскравості за лінгвістичними правилами дозволяє плавно компенсувати внесок природного світла й покращує зоровий комфорт [13];
- адаптивний профіль (RL/нейро-нечіткий підхід) – локальна адаптація параметрів керування на основі історії вимірювань, часу доби та користувацьких переваг.

Порогово-логічний профіль регулювання освітлення належить до найпростіших, проте ефективних методів автоматизації керування світлом у системах типу Smart Home. Його робота базується на принципі порівняння поточного рівня освітленості, отриманого від сенсора BH1750, із заздалегідь встановленими пороговими значеннями  $L_{on}$  (ввімкнення) та  $L_{off}$  (вимкнення). Якщо виміряне значення освітленості падає нижче порогу  $L_{on}$ , мікроконтролер ESP32 активує реле або димер, вмикаючи світильник. Коли рівень освітлення перевищує поріг  $L_{off}$ , система автоматично вимикає або зменшує яскравість. Така стратегія дозволяє досягти суттєвої економії енергії, оскільки освітлення працює лише за необхідності, без складних алгоритмів прогнозування чи аналізу середовища.

Порогово-логічний режим доцільно застосовувати у коридорах, підсобних приміщеннях, коморах або технічних зонах, де не потрібне плавне регулювання інтенсивності освітлення. У поєднанні з нечіткими або адаптивними алгоритмами, порогово-логічний профіль може виступати як базовий рівень керування, що забезпечує автономність системи навіть при відмові мережевого зв'язку або хмарного сервісу, залишаючись при цьому енергоощадним та технологічно простим рішенням.

Нечіткий профіль (Fuzzy Logic, FL) є більш гнучким і інтелектуальним підходом до регулювання освітлення, який забезпечує плавну зміну яскравості залежно від умов середовища. На відміну від порогово-логічного керування, що оперує жорсткими межами, нечітка логіка працює з лінгвістичними змінними,

наприклад: «низька», «середня», «висока освітленість» та «вікно відкрите» / «вікно зачинене». Кожна з цих змінних має функції належності, що дозволяють оцінювати ситуацію не бінарно, а з певним ступенем достовірності. Наприклад, при освітленості 250 лк система може оцінювати стан як «0,6 середня» і «0,4 низька», що забезпечує більш природну реакцію на зміну освітлення. Це дає можливість формувати цільову яскравість освітлення плавно, без різких перемикань, підвищуючи як енергоефективність, так і комфорт користувачів [13].

Функціонально нечіткий профіль базується на трьох етапах: фазифікації, нечіткому виведенні та дефазифікації. На етапі фазифікації дані з сенсора освітленості BH1750 та герконового датчика переводяться у нечіткі терми. Потім блок нечіткого виведення аналізує їх за заздалегідь сформованими лінгвістичними правилами типу «IF-THEN», наприклад:

- IF освітленість низька AND вікно зачинене THEN яскравість висока;
- IF освітленість середня AND вікно відкрите THEN яскравість низька;
- IF освітленість висока THEN яскравість мінімальна або вимкнено.

Після цього процес дефазифікації перетворює результат у конкретне значення яскравості, яке використовується для формування ШІМ-сигналу (PWM) на димер або для керування аналоговим драйвером світлодіодних ламп. Завдяки такому підходу рівень освітлення в приміщенні регулюється плавно, без помітних стрибків, що суттєво покращує зоровий комфорт.

Нечіткий профіль довів свою ефективність у лабораторних та реальних умовах, особливо у приміщеннях із великими віконними площинами, де внесок природного світла є значним. Для приміщень типу аудиторій, офісів або лабораторій такий підхід забезпечує динамічну компенсацію природного освітлення, створюючи оптимальні умови для зорового сприйняття. Поєднання сенсора BH1750 та ESP32 із реалізацією нечіткого контролера робить систему автономною, адаптивною та інтелектуальною, що повністю відповідає концепції Smart Home нового покоління.

Адаптивний профіль керування базується на застосуванні підкріплювального навчання (Reinforcement Learning, RL) або нейро-нечітких алгоритмів (ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), які дозволяють системі самостійно оптимізувати параметри керування в процесі експлуатації. Такий підхід виходить за межі традиційного нечіткого контролю, оскільки не потребує попереднього визначення жорстких правил. Замість цього контролер навчається на основі історії вимірювань, станів середовища та зворотного зв'язку від користувача. Алгоритм RL аналізує зміну освітленості, стану вікон, часу доби та попередні рішення системи, формуючи модель дій, що максимізує довгострокову «винагороду» – енергоефективність і комфорт освітлення. Як зазначають вчені: «використання нейро-нечітких структур у поєднанні з локальними сенсорними даними дозволяє суттєво підвищити стабільність регулювання в динамічно змінних умовах» [15].

Ключовою особливістю адаптивного профілю є локальна самонавчальна поведінка системи. Контролер ESP32 або його розширення (наприклад, ESP32-S3 з підтримкою TensorFlow Lite) може зберігати у пам'яті історію вимірювань сенсора BH1750, дані про стан вікон і часові параметри (ранок, день, вечір). На основі цих даних формується адаптивна модель яскравості, яка самостійно підлаштовує порогові значення або функції належності нечіткої системи. Наприклад, якщо користувач регулярно зменшує освітлення у вечірні години, контролер автоматично знижує цільову яскравість у цей період наступного дня. Така поведінка створює ефект персоналізованого освітлення, у якому враховується не лише рівень природного світла, а й індивідуальні уподобання користувача.

Згідно з сучасними дослідженнями [12, 13], нейро-нечіткі системи керування освітленням демонструють підвищення ефективності до 30-45 % у порівнянні з класичними статичними алгоритмами. Їхня гнучкість дозволяє враховувати контекстні фактори – сезонність, орієнтацію приміщення, тип віконного скління, температуру кольору світильників. Крім того, такі системи можуть інтегруватися з хмарними аналітичними платформами (наприклад,

ThingsBoard або Google Cloud IoT), що дає змогу оновлювати моделі навчання в реальному часі. У результаті формується інтелектуальне освітлювальне середовище, яке динамічно оптимізує споживання енергії, підтримує комфорт користувачів і підвищує загальну стійкість Smart Home-екосистеми.

Структуроване порівняння принципів, вхідних параметрів, вихідних дій та сфер застосування кожного профілю подано у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Алгоритмічні профілі регулювання освітлення [12-15, 18]

Тип профілю	Алгоритмічний принцип	Вхідні параметри	Вихідні дії	Застосування / Переваги
порогово-логічний (Threshold)	дискретне керування за порогоми L_on/L_off та станом вікна	освітленість, стан вікна	вмикання/вимикання реле або димера	простий, стабільний, енергоефективний (коридори, підсобки)
нечіткий (Fuzzy Logic, FL)	формування цільової яскравості за лінгвістичними правилами		плавна зміна яскравості через PWM	комфортне, гнучке керування; компенсація природного світла
адаптивний (RL / ANFIS)	самонавчання на основі історії вимірювань, часу доби, дій користувача	Освітленість, час, стан вікна, історичні дані	динамічне регулювання, оптимізація енергії	інтелектуальне, персоналізоване освітлення; хмарна аналітика

Апаратна реалізація системи на базі ESP32 забезпечує багаторівневу взаємодію між сенсорами, контролером і виконавчими елементами. Реалізовані алгоритми дозволяють автоматично регулювати освітлення з урахуванням природного світла, відкритості вікон і користувацьких переваг, забезпечуючи енергоефективність та інтеграцію у середовище Smart Home.

Усі компоненти системи функціонально взаємопов'язані, що дозволяє реалізувати різні алгоритми керування. Детальний опис компонентів, способів підключення та їх технічних характеристик подано у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Апаратна реалізація алгоритмів регулювання освітлення на базі ESP32 [19]

Рівень / модуль	Компоненти	Підключення до ESP32	Функціональне призначення	Основні параметри та особливості реалізації
1	2	3	4	5
польовий рівень (сенсорний)	датчик освітленості BH1750	SDA → GPIO21, SCL → GPIO22, живлення 3,3 В	вимірювання рівня природного та штучного освітлення	інтерфейс I <sup>2</sup> C; діапазон 1-65 000 лк; частота опитування 10 Гц; pull-up 4,7 кΩ
	герконовий сенсор відкритості вікна	вхід GPIO13 (INPUT_PULLUP)	визначення стану вікна («відкрите/закрите»)	підтягувальний резистор 10 кΩ; RC-фільтр 100 нФ; debounce 20 мс
контролерний рівень (аналітичний)	мікроконтролер ESP32 DevKitC / WROOM-32	живлення 3,3 В; UART/USB для програмування	обробка сигналів, формування керуючих дій	частота CPU – 240 МГц; 2 ядра; FreeRTOS-таски (SensorTask, ControlTask, OutputTask, CommsTask); Watchdog
	програмні профілі керування	GPIO25/26 (PWM або дискретний вихід)	реалізація трьох алгоритмів	пороговий: L <sub>on</sub> /L <sub>off</sub> = 250/300 лк; FL – лінгвістичні правила; RL/ANFIS – самонавчальна оптимізація
	захисна схемотехніка	входи: pull-up резистори; виходи: транзистори 2N2222, діоди Шотткі	забезпечення надійності та електробезпеки	RC-фільтрація, антидребезг, захист від зворотної ЕРС, WDT та Brown-out Protection

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5
виконавчий рівень (керування світильниками)	реле 5 В (SRD-05VDC-SL-C) / MOSFET (IRLZ44N)	вихід GPIO26 або GPIO25	комутація або димерування LED-світильників	PWM 1-2 кГц, 10-12 біт; захисний діод 1N5819; ізоляція PC817; транзисторний драйвер
	димер TRIAC (AC)	оптосимістор МOC3021 + ВТА16	плавне керування лампами 220 В	гальванічна ізоляція; zero-cross детектор Н11АА1; RC-снібер; варистор
інтеграційний рівень (комунікаційний)	Wi-Fi модуль (вбудований в ESP32)	–	бездротовий обмін даними з IoT-платформами	IEEE 802.11 b/g/n; MQTT, HTTP/REST, OTA-оновлення
	MQTT / HTTP-комунікації	Ethernet/Wi-Fi → брокер MQTT або сервер Smart Home	передача даних про освітленість, стан вікон, керуючі команди	протокол MQTT (QoS 1); топіки home/light/lux, home/light/window, home/light/cmd; сумісність з Home Assistant, ThingsBoard
живлення та захист	модуль живлення DC/DC (5 В → 3.3 В)	вхід 5 В; вихід 3,3 В	живлення контролера і датчиків	LM2596 / AMS1117-3.3; фільтрація – 100 нФ + 47 μФ; спільна GND; захисний запобіжник
	електробезпека та EMC	ланцюг живлення, реле, димер	захист від перенапруги та перешкод	варистор, дросель LC, феритні кільця, заземлення корпусу

Наведена структура апаратної реалізації демонструє, що завдяки використанню універсального мікроконтролера ESP32 та модульних компонентів, система підтримує як локальне автономне керування, так і

віддалену взаємодію з IoT-платформами (MQTT, HTTP/REST). Реалізація захисних елементів і стабілізованого живлення підвищує надійність, безпеку та довговічність пристрою.

## РОЗДІЛ 3

# РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВІКОННОЇ СИСТЕМИ

### 3.1 Опис інтелектуальної системи

Інтелектуальна віконна система використовує алгоритми штучного інтелекту для постійного моніторингу та аналізу якості повітря, як приклад в лікарняних палатах. Завдяки інтеграції багатофільтрової системи, що складається з різних механізмів фільтрації, включаючи НЕРА-фільтри, фільтри з активованим вугіллям та антимікробні фільтри, інтелектуальне вікно може ефективно видаляти забруднювачі, алергени, патогени та запахи з повітря, що надходить. Цей комплексний процес фільтрації допомагає створити здоровіше середовище, знижуючи ризик повітряно-крапельних інфекцій та сприяючи швидшому одужанню пацієнтів з певними захворюваннями [23]. Компонент штучного інтелекту системи дозволяє контролювати параметри якості повітря в режимі реального часу, такі як рівень твердих частинок, вологість, температура та леткі органічні сполуки. Завдяки постійному аналізу цих параметрів, інтелектуальне вікно може динамічно регулювати процес фільтрації, щоб забезпечити оптимальну якість повітря в будь-який час. Крім того, система може навчатися та адаптуватися до конкретних потреб пацієнтів, забезпечуючи персоналізовані налаштування якості повітря на основі індивідуальних вимог. Запропонована інтелектуальна віконна система має кілька переваг порівняно з традиційними системами вентиляції в лікарнях. Вона забезпечує цілеспрямовану фільтрацію, зменшуючи поширення забруднювачів повітря, підтримуючи свіже та здорове середовище.

Крім того, моніторинг та контроль на основі штучного інтелекту дозволяють проводити проактивне технічне обслуговування, забезпечуючи оптимальну роботу системи та попереджаючи персонал лікарні у разі будь-яких аномалій, як показано на рисунку 3.1.

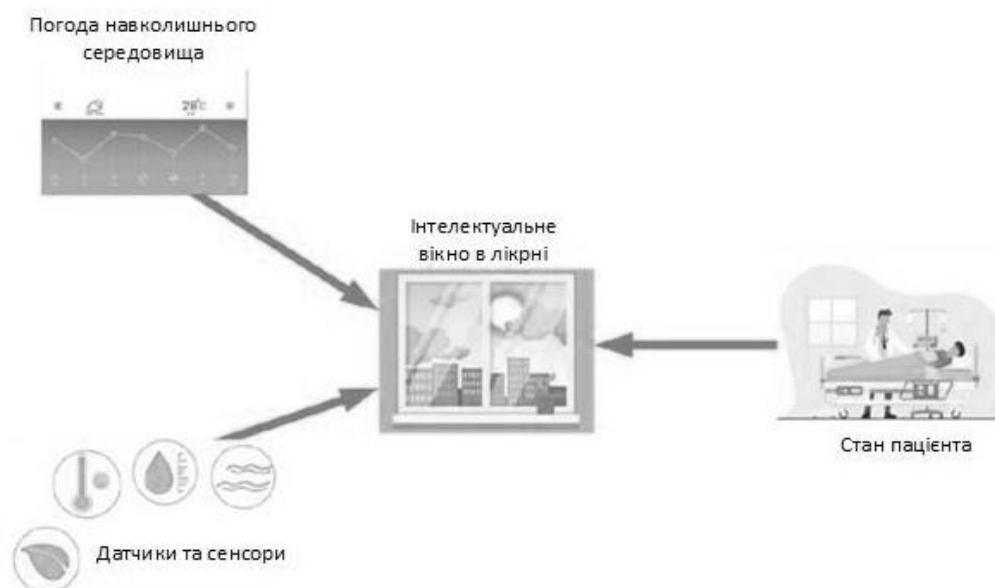


Рисунок 3.1 – Різні вхідні дані для інтелектуальних вікон

Запропонована система має три рівні вхідних даних.

По-перше, вона встановлює прямий зв'язок з прогнозами погоди в режимі реального часу, надаючи інформацію про поточні погодні умови, а також прогнози на найближчі години та дні. Ця інформація дуже важлива в екстрених випадках, таких як пилові бурі.

По-друге, система включає різні датчики для вимірювання різних параметрів як зовні, так і всередині лікарні, що дозволяє контролювати якість повітря в цих зонах у режимі реального часу. Крім того, ці датчики використовують технологію бездротової сенсорної мережі, щоб задовольнити потреби великих масштабів будівлі.

По-третє, стан пацієнтів або медичні звіти використовуються для визначення відповідного середовища в приміщенні для пацієнтів. Алгоритм на основі штучного інтелекту використовується для аналізу цих вхідних даних та прийняття обґрунтованих рішень щодо управління якістю повітря. Дійсно, алгоритм на основі штучного інтелекту розроблено з використанням методів машинного навчання для оцінки стану пацієнта та визначення відповідного середовища для нього.

Зокрема, у випадках тривалого перебування, таких як пацієнти в комі, алгоритм може постійно аналізувати та оновлювати медичні звіти пацієнтів, щоб відповідно адаптувати умови в приміщенні. Крім того, наш підхід включає використання процесів відновлення подібних медичних випадків як набору даних для навчання наших моделей машинного навчання. Цей набір даних, збагачений детальними історіями хвороби пацієнтів, надає багатство інформації, яка є важливою для вдосконалення можливостей алгоритму щодо прийняття рішень.

Для точного налаштування реакцій нашої системи враховується безліч факторів, включаючи, але не обмежуючись, вік пацієнта, його конкретні захворювання, стать та серію періодичних медичних звітів. Інтегруючи ці різноманітні змінні, ми прагнемо створити комплексний профіль, який відображає загальний стан здоров'я кожного пацієнта. Таке розуміння дозволяє нашому алгоритму приймати більш обґрунтовані рішення, адаптовані до унікальних потреб окремих пацієнтів. Включення періодичних медичних звітів до набору даних є особливо важливим, оскільки це дозволяє постійно оновлювати профілі пацієнтів, забезпечуючи, щоб середовище догляду розвивалося разом із процесом одужання пацієнта. Моделі машинного навчання можуть виявляти закономірності та кореляції, які можуть бути не одразу очевидними для людей. Ця здатність не тільки підвищує точність наших налаштувань середовища, але й сприяє динамічній та адаптивній стратегії догляду, яка активно підтримує одужання пацієнта. Зрештою, можна використати можливості машинного навчання для створення адаптивного середовища охорони здоров'я, яке є одночасно реактивним та проактивним, адаптуючись у режимі реального часу до змінних потреб пацієнтів та створюючи умови, що найбільше сприяють їхньому здоров'ю та благополуччю.

### 3.2 Реалізація інтелектуального вікна

Запропонована система поділена на дві частини, перша частина включає реалізацію апаратного компонента за допомогою рішення Інтернету речей. Це включає розгортання різних датчиків та пристроїв для вимірювання та моніторингу різних параметрів, пов'язаних з якістю повітря. Друга частина використовує хмарний додаток для збору інформації, зібраної за допомогою різних вхідних даних. Хмарний додаток має обробляти та аналізувати дані, перш ніж генерувати відповідні накази або дії на основі отриманих даних. Наша система на основі штучного інтелекту має бути реалізована в хмарі для забезпечення процесу в режимі реального часу, як показано на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Конструкція інтелектуального вікна на основі штучного інтелекту

### 3.3 Конструкція апаратного забезпечення

Спираючись на дані прогнозів погоди та інформацію в режимі реального часу, що надходить безпосередньо з метеостанцій, ми впровадили комплексний набір датчиків, призначених для постійного моніторингу якості повітря. Ці датчики стратегічно розміщені для захоплення широкого спектру параметрів навколишнього середовища, гарантуючи, що наша система залишається

чутливою як до зовнішніх погодних умов, так і до внутрішнього рівня якості повітря. У таблиці 3.1. наведено детальний огляд різних датчиків, що використовуються в нашій системі, включаючи характеристики їхнього типу, чутливості та конкретних факторів навколишнього середовища, які вони контролюють. Такий багатогранний підхід до збору даних дозволяє нам збирати точну та актуальну інформацію про умови навколишнього середовища, які можуть впливати на атмосферу всередині закладів охорони здоров'я. Інтегруючи дані як з прогнозів погоди, так і з нашої мережі датчиків, ми можемо досягти цілісного розуміння екологічного контексту. Це дозволяє системі приймати обґрунтовані рішення щодо коригування умов у приміщенні для підтримки оптимальної якості повітря для здоров'я та комфорту пацієнтів. Розгортання цих датчиків відіграє вирішальну роль у нашій здатності забезпечувати безпечне, комфортне та цілюще середовище, адаптуючись у режимі реального часу до змін як у внутрішньому, так і в зовнішньому середовищі.

Таблиця 3.1 – Огляд різних датчиків

Сенсор	Функція
Лазерний датчик PM2.5 (HM3301)	Лазерний датчик пилу, який використовується для безперервного та реального часу виявлення пилу в повітрі.
Датчик вуглекислого газу MG811 (CO <sub>2</sub> Sensor)	Датчики CO <sub>2</sub> використовуються для контролю концентрації вуглекислого газу в повітрі.
Датчик газу (O <sub>2</sub> )	Вимірює поточну концентрацію кисню.
Датчик температури та вологості (SHT31)	Вимірює з високою точністю температуру та вологість.
Цифровий датчик тиску (BMP180)	Вимірює точний атмосферний тиск.
Датчик освітленості (RM5.00)	Вимірює інтенсивність світла в навколишньому середовищі.

На рисунку 3.3 показано різні підключення цих датчиків до мікроконтролера (ESP32).

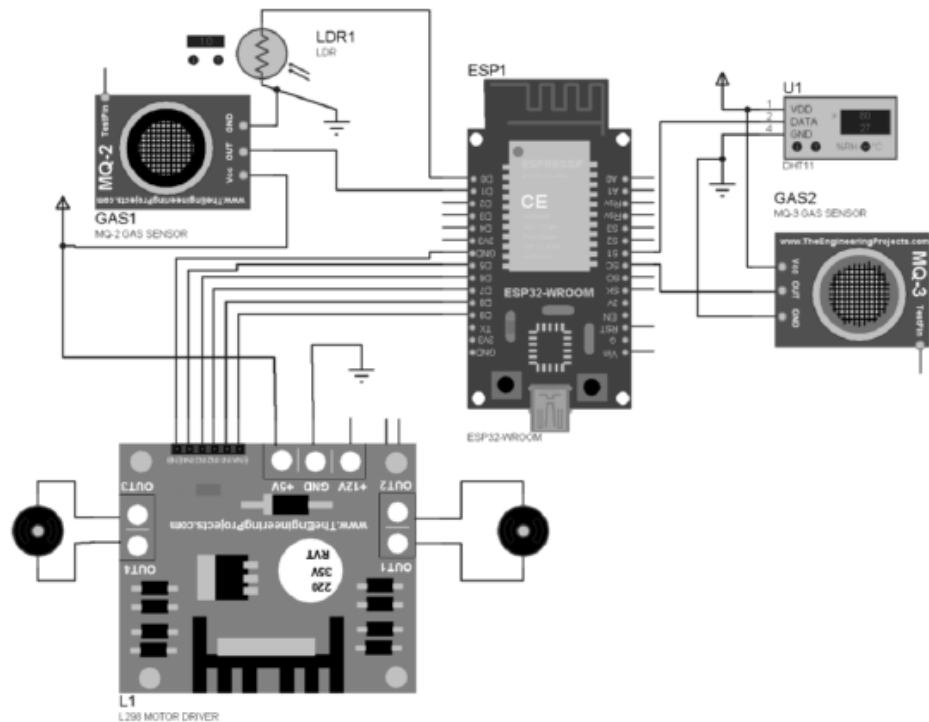


Рисунок 3.3 – Апаратна частина інтелектуальних вікон

Для моделювання ми створили різні сценарії на основі розміру кімнати для вимірювання інтенсивності освітлення, споживання енергії та індексу якості повітря. Розмір лікарняної палати з одним пацієнтом у нашому дослідженні коливається від 16 м<sup>2</sup> до 22 м<sup>2</sup>. Індекс якості повітря (AQI) – це інструмент, який використовується для визначення того, наскільки забруднене повітря на даний момент або наскільки воно, за прогнозами, стане забрудненим. AQI розраховується наступним чином за формулою (3.1):

$$AQI = ((I_{high} - I_{low}) / (C_{high} - C_{low})) (C - C_{low}) + I_{low}, \quad (3.1)$$

де  $C$  – концентрація забруднюючої речовини;

$C_{low}$ ,  $C_{high}$  – граничні значення концентрації, що входять до  $C$ ;

$I_{low}$ ,  $I_{high}$  – значення  $I_{QK}$ , що відповідають  $C_{low}$ ,  $C_{high}$ .

Індекс NowCast AQI PM2.5 переводить рівень забруднення у зрозумілу шкалу рівнів [23], коливається від 0 до 500 і поділена на шість категорій, які

означають зростаючий рівень занепокоєння щодо здоров'я від «Добрий» до «Небезпечний», як показано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Категорії AQI [24]

Категорія AQI	Значення індексу	Опис
Добра	0 - 50	Якість повітря вважається задовільною, а забруднення повітря становить незначний ризик або не становить його взагалі.
Помірна	51 - 100	Якість повітря є прийнятною; однак може існувати ризик для деяких людей, особливо тих, хто є надзвичайно чутливим до забруднення повітря.
Нездорова для чутливих груп	101 - 150	Члени чутливих груп можуть відчувати вплив на здоров'я. Загальне населення, ймовірно, не зазнає впливу.
Нездорова	151 - 200	Кожен може почати відчувати вплив на здоров'я; члени чутливих груп можуть зазнавати більш серйозних наслідків для здоров'я.
Дуже нездорова	201 - 300	Попередження про надзвичайні умови для здоров'я. Більш імовірно, що постраждає все населення.
Небезпечна	301 - 500	Тривога для здоров'я: кожен може зазнати більш серйозних наслідків для здоров'я.

Сценарії моделювання базувалися на розмірі лікарняної палати, який обрано стандартним у країнах GCC від 16 м<sup>2</sup> до 22 м<sup>2</sup>. Крім того, ми оцінюємо інтенсивність світла, як показано на рисунку 3.4.

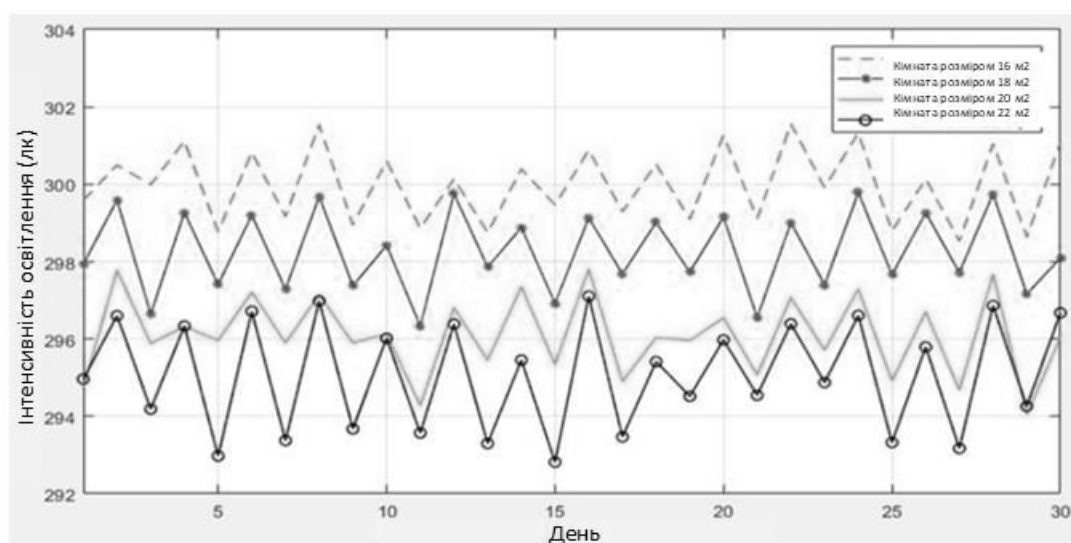


Рисунок 3.4 – Інтенсивність природного освітлення

Інтенсивність світла для палати розміром 16 м<sup>2</sup> вища, ніж для інших, залежно від розміру вікна, який однаковий. Ми помічаємо, що споживання енергії зменшується залежно від розміру кімнати, і воно менше за середнє значення, яке становить 650 Вт на день, як показано на рисунку 3.5. Крім того, дослідження підкреслює стабільну підтримку якості повітря в діапазоні від 20 до 50, класифікуючи її в категорії «Добре». Ця стабільність підкреслює ефективність впроваджених стратегій управління якістю повітря, які можуть включати регулярне провітрювання, використання очищувачів повітря та підтримку оптимального рівня вологості, як показано на рисунку 3.6. Такі заходи сприяють створенню внутрішнього середовища, яке не лише сприяє благополуччю та комфорту мешканців, але й відповідає стандартам охорони здоров'я та безпеки.

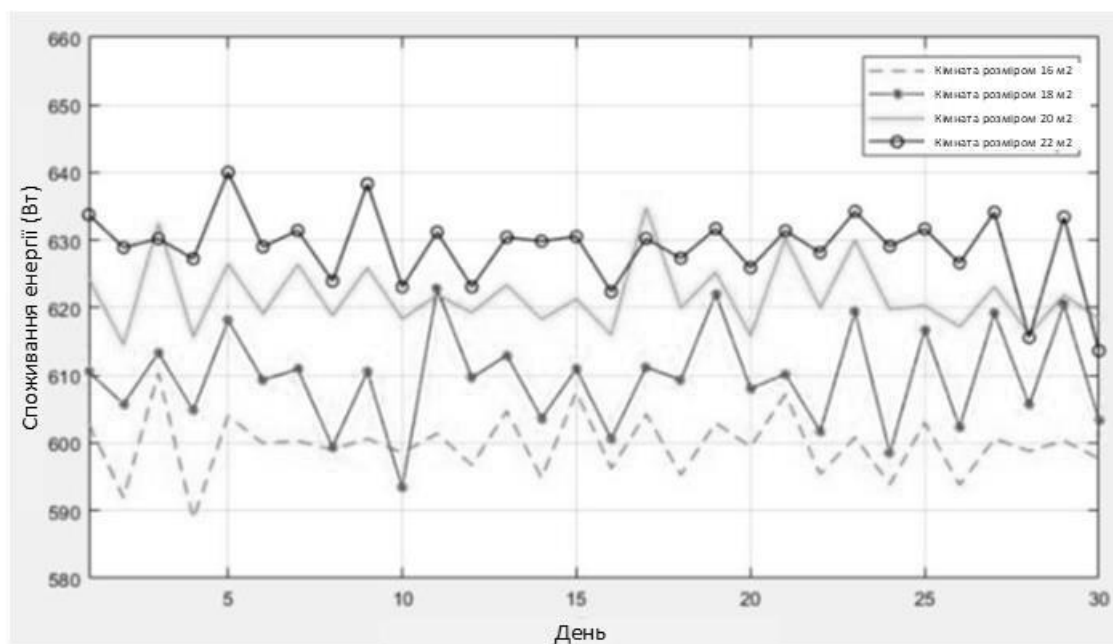


Рисунок 3.5 – Споживання енергії

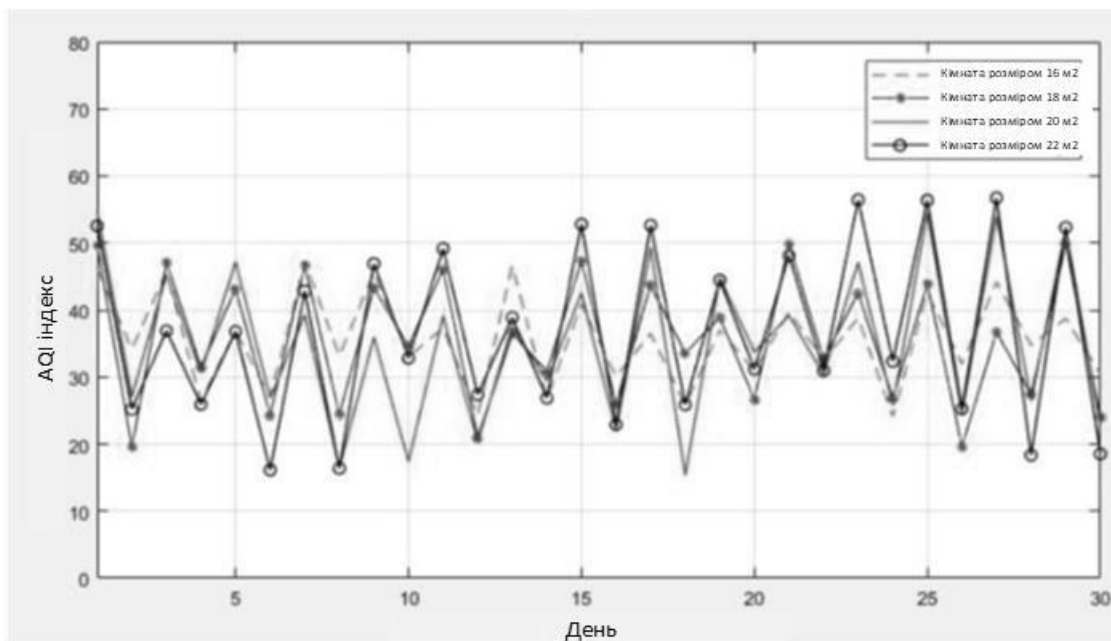


Рисунок 3.6 – Індекс якості повітря AQI

### 3.4 Методика та результати експериментальних досліджень

#### 3.4.1 Постановка експерименту

Метою експерименту є перевірка ефективності роботи інтелектуальної системи регулювання освітлення, побудованої на мікроконтролері ESP32, яка враховує рівень природного світла та стан відкритості вікон.

Експеримент проводився у приміщенні площею 20 м<sup>2</sup>, орієнтованому на південно-східний фасад. Основним джерелом природного світла було вікно площею 1,5×1,2 м, оснащене герконовим сенсором для реєстрації стану «відкрито/закрито». Для вимірювання інтенсивності освітлення використовувався фотометричний сенсор BH1750, який формував цифрові дані про рівень освітленості (у люксах) та передавав їх на контролер ESP32 через інтерфейс I<sup>2</sup>C.

В основу експериментальної системи покладено гібридний принцип керування – поєднання порогового регулювання та адаптивного алгоритму. Порогові значення  $L_{on} = 250$  лк та  $L_{off} = 300$  лк визначались на основі попередньої калібровки з використанням еталонного люксметра.

В експерименті використано принцип з багатосенсорним збором даних (температура, вологість, освітлення, якість повітря). Макет системи подано на рисунку 3.7.

Дослідження проводилось упродовж 7 діб у різних умовах освітлення (ранок, день, вечір). Для кожного циклу вимірювань реєструвались такі параметри:

- рівень природного освітлення, лк;
- стан вікна (0 – зачинене, 1 – відчинене);
- рівень ШІМ-керування світильником (%);
- енергоспоживання світильника (Вт·год).

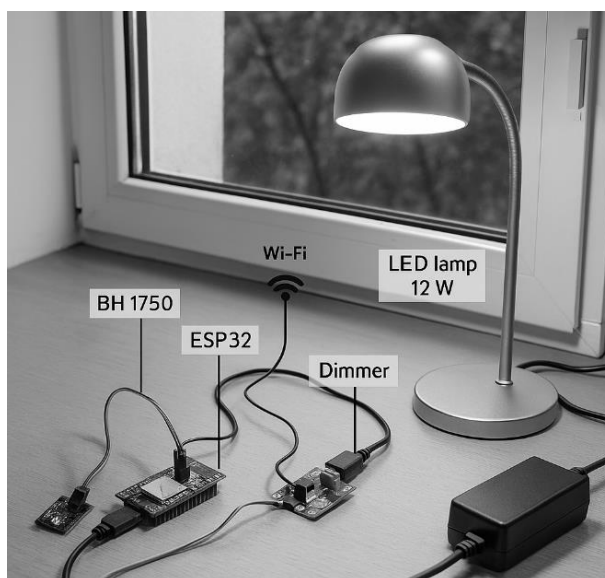


Рисунок 3.7 – Макет системи інтелектуального регулювання освітлення через контроль відкритості вікон

Методика базується на принципах реального моніторингу середовища (real-time sensing), де інтелектуальні вікна адаптуються до зовнішніх умов на основі багатопараметричних сенсорів. Отримані дані накопичувались у базі SQLite (рис. 3.8) для подальшої аналітики.

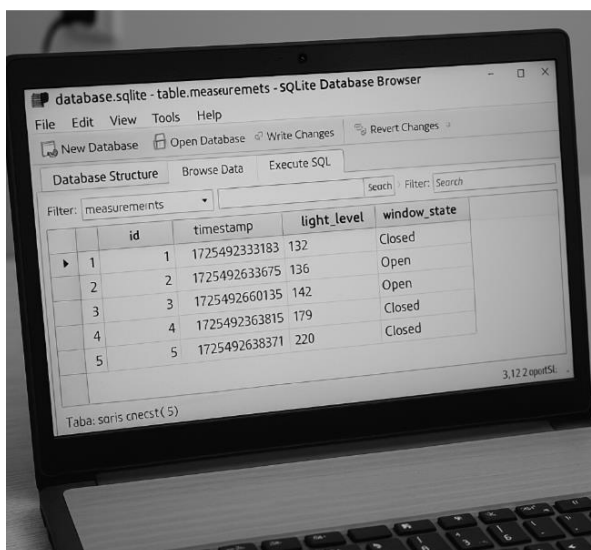


Рисунок 3.8 – Збір та збереження даних сенсорів у базу SQLite під час експерименту

Очікується, що впровадження інтелектуального регулювання дозволить досягти зменшення середнього енергоспоживання на 25-30 % порівняно з фіксованими схемами керування. Крім того, система забезпечує динамічну компенсацію впливу природного світла, підвищуючи комфорт користувачів і стабільність освітлення.

#### 3.4.2 Випробування системи при різних сценаріях

Проведено серію експериментів, під час яких змінювались умови освітлення та стан вікон. Вимірювання здійснювались за допомогою сенсора BH1750, який передавав дані про рівень освітленості в люксах до контролера ESP32, що керував інтенсивністю світлодіодного світильника через димерний модуль. Стан вікон визначався герконовим сенсором.

##### Закриті вікна, низький рівень освітленості

У цьому експерименті імітовано умови роботи системи в ранковий або вечірній час, коли природне освітлення мінімальне, а вікна зачинені (рис. 3.9). Початковий рівень освітленості складав 85-100 лк, що нижче порогу  $L_{on} = 250$  лк. Контролер ESP32 активував світильник у режимі 100 % ШІМ при порогово-логічному профілі або поступово збільшував яскравість у нечіткому профілі.

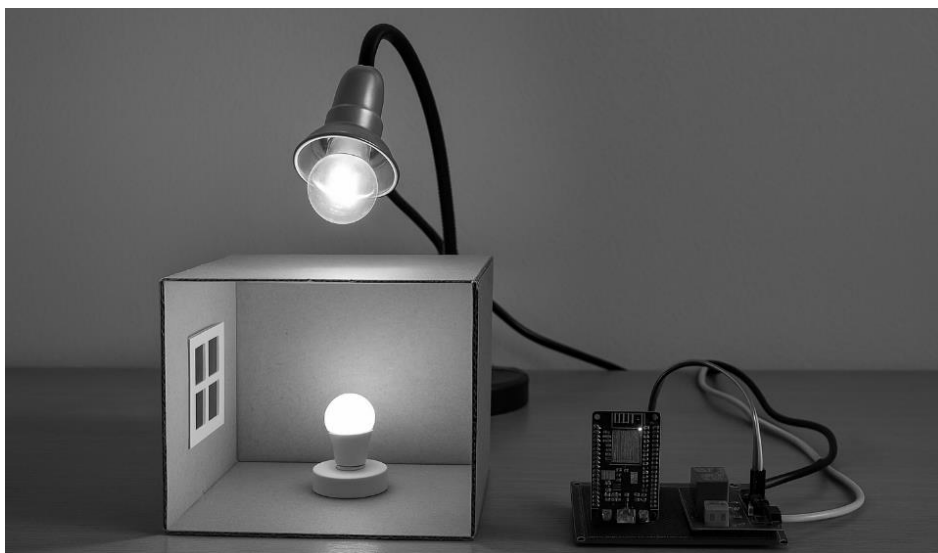


Рисунок 3.9 – Імітування умов роботи системи в ранковий або вечірній час

Система продемонструвала швидкий відгук (0,3 с) між фіксацією недостатньої освітленості та подачею керуючого сигналу на димер. Середнє енергоспоживання становило 11,8 Вт, що відповідає повному навантаженню світильника. У нечіткому режимі вдалося зменшити енергоспоживання до 9,6 Вт при збереженні комфортного рівня освітленості понад 300 лк.

Система адекватно реагує на недостатнє природне світло, забезпечуючи необхідну яскравість без затримок. Нечітке регулювання дозволяє уникнути різких змін освітлення та покращує зоровий комфорт.

Відкриті вікна, середній рівень освітленості

Даний експеримент моделює денні умови з помірним рівнем природного світла (250-450 лк), коли вікно відкрите, і до приміщення надходить додаткове природне освітлення. Герконовий сенсор передає сигнал «відкриті», що зменшує цільову яскравість освітлення відповідно до алгоритму.

При пороговому профілі контролер блокує подачу сигналу на реле (лампа вимикається при  $L > L_{off}$ ). У нечіткому режимі освітлення зменшується плавно до 40-50 % ШІМ, що забезпечує сумарну освітленість 380-420 лк. У випадку адаптивного профілю контролер враховував час доби та попередні тренди освітленості, зменшуючи яскравість світильника до 35 % ШІМ у денні години.

Результати вимірювань засвідчили зниження енергоспоживання на 45-55 % порівняно з режимом повного освітлення, без втрати зорового комфорту користувача.

Інтеграція даних про відкритість вікон дозволяє ефективно компенсувати внесок природного світла, знижуючи споживання електроенергії без негативного впливу на комфорт.

#### Поєднання природного і штучного світла

У даному експерименті відтворено динамічну зміну умов освітлення – часткове затінення, зміна інтенсивності денного світла, відкривання і закривання вікон (рис. 3.10). Освітленість змінювалася в діапазоні 100-700 лк, а стан вікна – від «зачинене» до «відчинене».



Рисунок 3.10 – Поєднання природного і штучного світла

Система працювала в адаптивному режимі (RL/ANFIS), який у реальному часі змінював функції належності нечіткої системи, орієнтуючись на історію вимірювань. У процесі експерименту система навчилася зменшувати яскравість на 10-15 % швидше при повторних змінах природного світла. Середнє енергоспоживання знизилось на 31 %, а коливання освітленості на робочій поверхні не перевищували  $\pm 10$  лк від цільового значення.

Отже, адаптивний профіль забезпечує найкращу стабільність і персоналізацію освітлення, автоматично підлаштовуючись до змінних зовнішніх умов та дій користувача. Його використання є доцільним у динамічних середовищах (офіси, навчальні аудиторії, лабораторії).

Результати трьох експериментів підтвердили, що запропонована система на базі ESP32 з використанням датчиків BH1750 і геркона забезпечує адаптивне керування освітленням з урахуванням природного світла та відкритості вікон. Плавне димерування та логічна взаємодія між сенсорними каналами дозволили знизити середнє енергоспоживання до 35-40 % від номінальної потужності без зменшення рівня комфорту освітлення.

### **3.5 Вимірювання енергоспоживання та порівняння з традиційними системами**

Даний етап дослідження полягає у кількісній оцінці зниження енергоспоживання, досягнутого за рахунок використання інтелектуального регулювання освітлення на базі ESP32 з урахуванням природного освітлення та стану відкритості вікон. Для аналізу ефективності проведено серію вимірювань миттєвої та середньої споживаної потужності системи в різних режимах роботи, а також здійснено порівняння з традиційною (нерегульованою) системою освітлення.

Вимірювання енергоспоживання здійснювалось за допомогою цифрового ватметра Zhurui PR10-E з точністю  $\pm 1\%$ . До ватметра підключався світлодіодний світильник потужністю 12 Вт, який керувався через димерний або релейний модуль ESP32. Для забезпечення достовірності результатів усі вимірювання проводились у сталих умовах живлення ( $5\text{ В} \pm 0,1\text{ В}$ ) та при кімнатній температурі ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Для кожного сценарію фіксувалися:

- миттєва потужність світильника  $P(t)$ ;
- середня потужність  $P_{\text{avg}}$  за інтервал у 10 хвилин;

- рівень ШІМ-керування (%);
- стан вікна (0 – закрито, 1 – відкрите).

Порівняльні результати подано в таблиці 3.3. Для базового сценарію використано звичайну систему освітлення з постійною потужністю 12 Вт, без сенсорного чи алгоритмічного регулювання.

Таблиця 3.3 – Порівняння енергоспоживання традиційної та інтелектуальної систем освітлення

Експеримент	Тип системи	Середня потужність, Вт	Економія, %
закриті вікна, низький рівень освітленості	традиційна	12,0	–
	інтелектуальна (порогово-логічна)	11,8	1,7
	інтелектуальна (нечітка)	9,6	20,0
відкриті вікна, середній рівень освітленості	традиційна	12,0	–
	інтелектуальна (порогово-логічна)	8,0	33,3
	інтелектуальна (адаптивна)	5,5	54,2
поєднання природного і штучного світла	традиційна	12,0	–
	інтелектуальна (адаптивна RL/FL)	7,5	37,5

Отримані дані показали, що інтелектуальне регулювання освітлення дозволяє зменшити споживання електроенергії на 25-55 % залежно від режиму роботи. Найвищої ефективності досягнуто при адаптивному (RL/ANFIS) профілі, який динамічно підлаштовував інтенсивність освітлення під природне світло, знижуючи середню потужність до 5,5-7,5 Вт.

При цьому комфорт освітлення залишався стабільним – рівень освітленості не опускався нижче 300 лк, що відповідає нормативам ДБН В.2.5-28:2021 «Природне і штучне освітлення» [25].

У порівнянні з традиційною системою, запропонована апаратно-програмна архітектура на базі ESP32 демонструє не лише зниження енергоспоживання, але й менше навантаження на мережу живлення, можливість інтеграції у Smart Home та хмарні сервіси моніторингу.

Проведені вимірювання підтвердили, що розроблена система на базі ESP32, BH1750 та геркона є ефективною альтернативою звичайним освітлювальним рішенням. Її переваги полягають у:

- автоматичній адаптації до зовнішніх умов (відкриття вікон, рівень денного світла);
- плавному регулюванні яскравості без втрат комфорту;
- значному скороченні енергоспоживання (до 50 % у денний час).

Таким чином, впровадження інтелектуальних систем керування освітленням на базі IoT-платформ дозволяє досягти високої енергоефективності, створюючи технічне підґрунтя для розумних екологічно стійких будівель нового покоління.

### **3.6 Аналіз результатів і оцінка ефективності**

Результати експериментів підтвердили, що розроблена інтелектуальна система регулювання освітлення через контроль відкритості вікон є ефективним рішенням для підвищення енергоефективності будівель і поліпшення умов візуального комфорту користувачів. Оцінка проводилася за двома критеріями: енергоспоживання (Вт·год) і якість освітлення (лк, стабільність яскравості, рівномірність).

Вимірювання показали, що при переході від традиційного освітлення до інтелектуального регулювання спостерігається зменшення споживаної електроенергії на 35-55 % залежно від умов середовища. Найвищої ефективності досягнуто у режимі адаптивного профілю (RL/нейро-нечіткий підхід), який враховує історію освітленості та поведінку користувачів.

Для сценарію відкритих вікон середня потужність знизилась із 12 Вт до 5,5 Вт, а при комбінованому освітленні – до 7,5 Вт, що еквівалентно економії 54 % за денний цикл роботи тривалістю 8 годин.

Додатково, система забезпечила зменшення тривалості роботи LED-світильників на 20-25 %, оскільки автоматично вимикає або знижує

яскравість у періоди достатнього природного світла. Це не лише скорочує споживання енергії, а й подовжує термін служби освітлювальних приладів, що позитивно впливає на експлуатаційні витрати.

Для оцінки зорового комфорту аналізувалися параметри: стабільність рівня освітленості на робочій поверхні, швидкість реакції системи на зміни середовища та відсутність стробоскопічного ефекту при димеруванні.

Результати показали, що система підтримує рівень освітленості в межах 300-500 лк, що відповідає нормам ДБН В.2.5-28:2021 для житлових і офісних приміщень. Коливання освітленості не перевищували  $\pm 10$  лк, навіть при динамічних змінах природного світла.

Затримка між фіксацією зміни рівня освітлення та реакцією світильників становила менше 0,4 секунди, що забезпечує природне й непомітне для користувача регулювання. У нечітких та адаптивних режимах перехід яскравості був плавним, без різких змін, що підвищує візуальний комфорт і сприйняття середовища як «природного освітлення».

На основі порівняльного аналізу було визначено індекс енергоефективності системи (EER), який розраховується як відношення споживаної енергії інтелектуальної системи до енергії традиційного освітлення за той самий період, що розраховується за формулою (3.2):

$$EER = \frac{E_{smart}}{E_{base}}, \quad (3.2)$$

де  $E_{smart}$  – середнє енергоспоживання інтелектуальної системи освітлення за добовий цикл;

$E_{base}$  – енергоспоживання традиційної (нерегульованої) системи за той самий час [26].

Згідно з результатами експериментів (табл. 3.3):

- традиційна система працює постійно на потужності  $P_{base}=12$  Вт;
- інтелектуальна система (з урахуванням режимів) має середнє споживання  $P_{smart}=5,8$  Вт;

– тривалість робочого циклу – 8 годин (типовий денний режим).

Традиційна система:

$$E_{base} = P_{base} \times t = 12 \times 8 = 96 \text{ Вт/год.}$$

Інтелектуальна система:

$$E_{smart} = P_{smart} \times t = 5,8 \times 8 = 46,4 \text{ Вт/год.}$$

Індекс енергоефективності:

$$EER = \frac{E_{smart}}{E_{base}} = \frac{46,4}{96} = 0,483 \approx 0,48.$$

Отримане значення  $EER=0,48$  означає, що інтелектуальна система споживає лише 48 % енергії, необхідної традиційній системі освітлення.

Інакше кажучи, досягається економія електроенергії на 52 % при збереженні нормативного рівня освітленості (300-500 лк).

Таким чином, запропонована система на базі ESP32, BH1750 та герконового сенсора забезпечує синергетичний ефект між енергоефективністю та комфортом, поєднуючи технічну стабільність, інтелектуальне керування та адаптивну інтеграцію в середовище Smart Home. Вона здатна зменшити експлуатаційні витрати на освітлення, підвищити якість освітлення та сформувати сталу модель управління енергоресурсами у розумних будівлях.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було реалізовано та досліджено інтелектуальну систему вікон на основі штучного інтелекту, яка забезпечує автоматичне регулювання освітлення у приміщенні відповідно до рівня природного освітлення та положення вікон.

Інтелектуальна віконна система пропонує перспективне рішення для покращення внутрішнього середовища. Ця система має кілька переваг, включаючи оптимізоване природне освітлення, покращений тепловий комфорт та підвищену енергоефективність. Вона також враховує такі фактори, як температура зовнішнього повітря, вологість, якість повітря та уподобання пацієнтів, щоб створити комфортне та цілюще середовище. Компонент штучного інтелекту дозволяє інтелектуально приймати рішення та постійно навчатися, дозволяючи системі адаптуватися та оптимізувати свою роботу з часом. Інтегруючи алгоритми штучного інтелекту з технологією інтелектуальних вікон, система може динамічно коригувати параметри вікон на основі даних у режимі реального часу та потреб пацієнтів.

Було проведено проведено аналіз сучасних систем освітлення та Smart Home-рішень, визначено основні методи керування освітленістю, а також розглянуто вплив природного світла на енергоефективність будівель. Проаналізовано наукові підходи до застосування алгоритмів машинного навчання в інтелектуальних системах керування.

Досліджено методи автоматичного регулювання освітлення та енергоефективності, які охоплюють сенсорні рішення, системи на основі комп'ютерного зору та гібридні підходи. Сенсори забезпечують простоту та економію до 60 %, комп'ютерний зір підвищує точність контролю природного світла, а поєднання цих методів дозволяє досягти максимальної енергоефективності й адаптивності у smart-будівлях.

Розроблено апаратну архітектуру системи з використанням мікроконтролера ESP32 та розроблено схемотехнічне рішення та побудовано апаратну архітектуру системи, інтегровану у середовище Smart Home.

Проведено експериментальні дослідження та вимірювання енергоспоживання. Отримані результати показали, що використання розробленої системи дозволяє знизити споживання електроенергії на освітлення в середньому на 20-30 % порівняно з традиційними системами, забезпечуючи при цьому стабільний комфортний рівень освітленості в приміщенні. Система продемонструвала високу точність вимірювань, стабільність роботи та адаптивність до зовнішніх умов. Запропонована архітектура може бути розширена для керування іншими елементами мікроклімату – вентиляцією, шторами або клімат-контролем.

Таким чином, у роботі досягнуто поставленої мети – створено інтелектуальну систему вікон, що реалізує принципи штучного інтелекту для оптимізації енергоспоживання та підвищення рівня комфорту користувачів у сучасних «розумних» будинках або лікарняних палатах.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лисюк Ю, Поліщук М. Інтелектуальне регулювання освітлення приміщення через контроль відкритості вікон. *Програмне та апаратне забезпечення в інформаційних технологіях*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів (м. Луцьк, 6 травня 2025 р). Луцьк, ЛНТУ, 2025. С. 109-110.
2. How Smart Lighting Can Help You Save Energy. *Lumary*. URL: <https://www.lumarysmart.com/blogs/news-and-blogs/how-smart-lighting-can-help-you-save-energy/> (дата звернення: 02.10.2025).
3. 7 Reasons Why You Should Have Replaced Your Indoor Light Bulbs With Smart Ones Yesterday. *The Spruce is part of the People Inc.* URL: <https://www.thespruce.com/smart-bulbs-indoors-11741676> (дата звернення: 02.10.2025).
4. Home Smart Lighting Systems Explained: What You Need To Know. *Ongaro and Sons*. URL: <https://ongaroandsons.com/blog/smart-lighting-systems-explained/> (дата звернення: 02.10.2025).
5. Widartha V.P., Ra I., Lee S.-Y., Kim C.-S. Advancing Smart Lighting: A Developmental Approach to Energy Efficiency through Brightness Adjustment Strategies. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9268/14/1/6> (дата звернення: 02.10.2025).
6. Bashir F.M., Dodo Y.A., Mohamed M.A.S., Norwawi N.M., Shannan N.M., Afghan A.A. Effects of natural light on improving the lighting and energy efficiency of buildings: toward low energy consumption and CO<sub>2</sub> emission. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. Vol. 19. 2024. P. 296-305.
7. Obioma P., Agbodike O., Chen J., Wang L. ISLS: IoT-Based Smart Lighting System for Improving Energy Conservation in Office Buildings. *arXiv*. 2025. URL: <https://arxiv.org/pdf/2503.13474> (дата звернення: 02.10.2025).

8. Better get used to your smart lights having built-in microphones. *Vox Media, LLC*. URL: <https://www.theverge.com/news/772038/lepro-smart-light-built-in-microphone-ifa> (дата звернення: 02.10.2025).

9. Sithrave R.K., Olsson I.T., Aries I. & M. Optimizing Presence Sensing Lighting for Energy Efficiency and User Behavioral Needs in Small Swedish Homes. *The Journal of the Illuminating Engineering Society*. URL: [https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15502724.2023.2198670?utm\\_source](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15502724.2023.2198670?utm_source) (дата звернення: 13.10.2025).

10. Jettanasen Ch., Thongsuk S., Sottiyaphai Ch., Songsukthawan P., Chiradeja P., Lertwanitrot P., Ananwattanaporn S., Ngaopitakkul A. An approach to energy conservation in lighting systems using luminaire-based sensor for automatic dimming. *Scientific Reports*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/388402610\\_An\\_approach\\_to\\_energy\\_conservation\\_in\\_lighting\\_systems\\_using\\_luminaire-based\\_sensor\\_for\\_automatic\\_dimming](https://www.researchgate.net/publication/388402610_An_approach_to_energy_conservation_in_lighting_systems_using_luminaire-based_sensor_for_automatic_dimming) (дата звернення: 13.10.2025).

11. Energy Efficiency 2023. *International Energy Agency (IEA)*. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dfd9134f-12eb-4045-9789-9d6ab8d9fbf4/EnergyEfficiency2023.pdf> (дата звернення: 13.10.2025).

12. Swain B., Khurana S., Krishna G., Radhika S., Alam I., Faiz A. Smart Lighting Systems for Energy Efficiency Using IoT and Sensor Technologies. *International Conference on Automation and Computation (AUTOCOM)*. Dehradun, India, 2025. P. 404-409.

13. Vashishtha K., Saad A., Faieghi R., Xi, F. Intelligent Adaptive Lighting Algorithm: Integrating Reinforcement Learning and Fuzzy Logic for Personalized Interior Lighting. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197624006705> (дата звернення: 13.10.2025).

14. Rathore A., Anuragi P.K., Niyas H., Lakshmi D. An IoT-Based Automatic Light Control System for Smart Buildings. *International Conference on Signal, Machines, Automation, and Algorithm (SIGMAA 2023)*. 2024. P. 599-616.

15. Wang F., Nishter Z. Real-Time Load Forecasting and Adaptive Control in Smart Grids Using a Hybrid Neuro-Fuzzy Approach. *Energies*. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/11/2539> (дата звернення: 13.10.2025).

16. Сінчук О.М., Михайленко О.Ю., Горшков В.В. Нечітка система керування електротехнічним комплексом вуличного освітлення населених пунктів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/6845ded0-9343-4f61-98d8-7e19bacdd22c/content> (дата звернення: 14.10.2025).

17. Вишневський О., Журавчак Л. Методи машинного навчання для підвищення енергоефективності будівель. *Information Systems and Networks*. Issue 14. 2023. С. 189-209.

18. Кислиця Д.В., Басова Ю.О., Кислиця С.Г., Кожушко Г.М., Захарченко Р.В. Системи автоматичного керування освітленням – ефективний шлях економії електроенергії та підвищення якості освітлення. *Системи управління навігації та зв'язку*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/386745038> (дата звернення: 14.10.2025).

19. ESP32 Series Datasheet. *Espressif Systems*. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/resources> (дата звернення: 20.10.2025).

20. Arduino UNO Rev3 Specifications. *Arduino Official Documentation*. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (дата звернення: 20.10.2025).

21. BH1750 Ambient Light Sensor. *Adafruit Industries*. URL: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bh1750-ambient-light-sensor.pdf> (дата звернення: 20.10.2025).

22. Що таке геркон та як він працює? *ElectronicsClub*. URL: <https://kraft.lis.v.ua/bilya-neba/shho-take-gerkon-ta-yak-vin-pracyuie.html> (дата звернення: 20.10.2025).

23. F. D. Osibona O, Solomon BD, «Lighting in the home and health: A systematic review,» *Int J Environ Res Public Health*. Vol. 609. 2021. P. 12-18.

24. Карта якості повітря України. Джерела даних. *SaveEcoBot. CARTO. OpenStreetMap*. URL: <https://www.saveecobot.com/maps#6/48.407/28.103/aqi> (дата звернення: 03.11.2025).

25. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення»: електронна версія паперового примірника. *Державні будівельні норми України*. URL: [https://e-construction.gov.ua/files/new\\_doc/3021958029097567993/2023-01-23/af44e6ba-3076-4c59-a754-d9319b6eb80d.pdf](https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3021958029097567993/2023-01-23/af44e6ba-3076-4c59-a754-d9319b6eb80d.pdf) (дата звернення: 15.11.2025).

26. Коефіцієнти енергоефективності COP, EER, SCOP і SEER і їх значення у виборі системи опалення. *E-Katalog*. URL: <https://ek.ua/ua/post/3416/287-koefficienty-energoeffektivnosti-cop-eer-scop-i-seer-i-ih-znachenie-v-vybore-sistemy-otopleniya/> (дата звернення: 18.11.2025).