

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Розроблення інтелектуальної системи автоматичного керування вуличним  
освітленням на основі IoT та машинного навчання

Виконав:

здобувач 4 року навчання,  
групи АКТСІ -21-1

Арсеній МАСЛОВ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник стар. викл. Дмитро ГУРІН

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Маслов Арсеній Дмитрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовувала штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"31" травня 2025 р



Маслов А.Д.

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології \_\_\_\_\_  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна \_\_\_\_\_  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Системна інженерія \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«19» травня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Маслову Арсенію Дмитровичу, \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи \_\_\_\_\_ Розроблення інтелектуальної системи автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT та машинного навчання \_\_\_\_\_

Затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 19.05.2025 р. №391 Ст \_\_\_\_\_

2 Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 31.05.2025 \_\_\_\_\_

3 Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ сенсори освітленості, датчики руху/присутності, метеорологічні датчики, мережі LoRaWAN, Wi-Fi, ZigBee, шлюзи для інтеграції з IP-мережею, адаптивне керування яскравістю. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

4 Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ \_\_\_\_\_

4.2 Аналіз технологій та концепцій автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT \_\_\_\_\_

4.3 Аналіз машинного навчання для автоматичного керування \_\_\_\_\_

4.4 Програмна реалізація IoT підходу \_\_\_\_\_

4.5 Опис програмної реалізації \_\_\_\_\_

4.6 Висновки та перелік джерел посилань \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5 Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (\*.ppt) 12 с. формату А4

6 Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Прим.
1	Аналіз технологій та концепцій автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT	05.03.2025	Виконано
2	Аналіз машинного навчання для автоматичного керування	25.03.2025	Виконано
3	Програмна реалізація IoT підходу	05.04.2025	Виконано
4	Опис програмної реалізації	15.04.2025	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.05.2025	Виконано

Дата видачі завдання 05.03.2025

Здобувач

\_\_\_\_\_

(підпис)

Маслов А. Д.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

стар.викл. Гурін Д.В.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 131 с., 3 табл., 35 рис., 4 дод., 18 джерел.

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, ОСВІТЛЕННЯ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ,  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА, АЛГОРИТМ.

Об'єкт розробки – процес автоматизованого керування вуличним освітленням у місті з використанням цифрових технологій.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби інтелектуального керування вуличним освітленням з використанням технологій Інтернету речей (IoT) та машинного навчання.

Мета роботи – підвищення енергоефективності міського освітлення шляхом розробки та впровадження інтелектуальної системи керування на основі IoT та алгоритмів машинного навчання з можливістю адаптивного регулювання режимів освітлення відповідно до зовнішніх умов.

Удосконалено методи автоматичного керування вуличним освітленням шляхом інтеграції IoT-сенсорної інфраструктури з алгоритмами машинного навчання, що дозволяє здійснювати динамічне регулювання режимів освітлення у реальному часі з урахуванням контексту навколишнього середовища та прогнозованої активності.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи автоматизованих систем керування вуличним освітленням у міському середовищі з порівняльним аналізом сучасних платформ та систем.

У другому розділі проведений аналіз технологій та концепцій автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT. А також проведений аналіз машинного навчання для автоматичного керування.

У третьому розділі розроблену програмну реалізацію IoT підходу та проведений опис програмої реалізації.

## ABSTRACT

Explanatory note: 131 pages, 3 tables, 35 figures, 4 appendices, 18 sources.

AUTOMATIC CONTROL, LIGHTING, MACHINE LEARNING,  
INTELLIGENT SYSTEM, ALGORITHM.

The object of development is the process of automated control of street lighting in the city using digital technologies.

The subject of development includes the methods, algorithms, and hardware-software tools for intelligent street lighting control using Internet of Things (IoT) technologies and machine learning.

The objective is to improve the energy efficiency of urban lighting by developing and implementing an intelligent control system based on IoT and machine learning algorithms with the ability to adaptively adjust lighting modes according to external conditions.

The methods of automatic street lighting control have been improved through the integration of an IoT-based sensor infrastructure with machine learning algorithms, enabling dynamic real-time regulation of lighting modes that takes into account environmental context and predicted activity levels.

The first chapter reviews the theoretical foundations of automated street lighting control systems in urban environments, providing a comparative analysis of modern platforms and systems.

The second chapter presents an analysis of technologies and concepts for automatic street lighting control based on IoT, as well as an analysis of machine learning applications for automatic control.

The third chapter describes the software implementation of the IoT-based approach and provides a detailed description of the developed software solution.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз автоматизованих систем керування вуличним освітленням у міському середовищі.....	13
1.1 Огляд концепцій автоматизованих систем керування вуличним освітленням.....	13
1.2 Аналіз основних завдань та викликів для автоматизованих систем керування вуличним освітленням .....	16
1.3 Використання ПД-регуляторів у системах керування вуличним освітленням.....	21
1.4 Порівняльний аналіз сучасних платформ автоматизованих систем керування .....	24
1.5 Аналіз існуючих рішень та платформ автоматизованих систем керування освітленням .....	28
2 Дослідження технологій IoT та машинного навчання в автоматичному керуванні освітленням.....	30
2.1 Визначення протоколів зв'язку .....	30
2.2 Обґрунтування IoT платформи.....	40
2.3 Вибір та обґрунтування обладнання .....	42
2.4 Хмарний сервіс.....	47
2.5 Технології машинного навчання в автоматичному керуванні .....	51
3 Розробка та реалізація інтелектуальної IoT системи керування вуличним освітленням.....	54
3.1 Опис вибраної моделі .....	54
3.2 Архітектура розробленої системи .....	57
3.2.1 Загальна структурна схема системи.....	57
3.2.2 Взаємодія апаратних та програмних компонентів .....	58
3.2.3 Модель передачі даних.....	63

3.3 Програмна реалізація вузла IoT.....	67
3.4 Серверна інфраструктура.....	74
3.4.1 Розгортання MQTT-брокера Mosquitto.....	74
3.4.2 Зберігання часових рядів у InfluxDB.....	76
3.4.3 Моніторинг та візуалізація даних.....	80
3.5 Побудова моделі прогнозування та проведення експериментів.....	82
3.5.1 Навчання моделі та її інтеграція у систему.....	82
3.5.2 Алгоритм прийняття рішення ввімкнення/вимкнення освітлення.....	82
3.5.3 Сценарії тестування.....	85
3.5.4 Методика оцінки точності моделі.....	84
3.5.5 Вимірювання ефективності енергоспоживання.....	85
3.5.6 Оцінка енергоспоживання.....	86
3.5.7 Порівняння з існуючими підходами.....	90
3.5.8 Перспективи подальшого розвитку системи.....	91
3.6 Дослідження основних законів управління в лінійних САУ.....	92
3.7 Верифікація роботи інтелектуальної системи освітлення.....	95
3.8 Охорона праці.....	98
Висновки.....	96
Перелік джерел посилань.....	101
Додаток А Програмний модуль зчитування та передачі даних.....	105
Додаток Б Відправка даних через MQTT.....	110
Додаток В Програмний модулі системи.....	114
Додаток Г Демонстраційний матеріал.....	117

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АСУВО – автоматизована система керування вуличним освітленням;
- СУВО – системи керування вуличним освітленням;
- ESP32 – мікроконтролер з підтримкою Wi-Fi та Bluetooth (ESP32 Microcontroller);
- Grafana – система візуалізації даних (Grafana Data Visualization System);
- HC-SR501 – інфрачервоний сенсор руху (Passive Infrared Motion Sensor);
- HTTP – протокол передавання гіпертексту (Hypertext Transfer Protocol);
- IoT – інтернет речей (Internet of Things);
- LoRaWAN – бездротова мережа великого радіусу дії для IoT (Long Range Wide Area Network);
- ML – машинне навчання (Machine Learning);
- Mosquitto – легковаговий брокер MQTT (Mosquitto Lightweight MQTT Broker);
- MQTT – протокол телеметрії з чергами повідомлень (Message Queuing Telemetry Transport);
- NB-IoT – вузькополосний інтернет речей (NarrowBand IoT);
- PIR – пасивний інфрачервоний сенсор (Passive Infrared Sensor);
- САПР – система автоматизованого проектування (Computer-Aided Design, CAD);
- SIL – програмна симуляція у контурі керування (Software-in-the-Loop);
- UgCS – універсальне програмне забезпечення наземної станції керування (Universal Ground Control Software);
- Wi-Fi – бездротова локальна мережа (Wireless Fidelity).

## ВСТУП

Одним із ключових компонентів міського середовища є система вуличного освітлення, яка забезпечує комфорт, безпеку руху пішоходів та транспорту, а також сприяє зниженню рівня злочинності. Разом з тим, традиційні системи вуличного освітлення характеризуються значним споживанням електроенергії та обмеженими можливостями щодо адаптивного управління у відповідь на зміну зовнішніх умов.

В останні роки розвиток технологій Інтернету речей (IoT) і методів машинного навчання відкрив нові перспективи для створення інтелектуальних систем автоматичного керування вуличним освітленням. Інтеграція сенсорних мереж, сучасних комунікаційних протоколів та алгоритмів обробки даних дозволяє не лише здійснювати моніторинг стану освітлювальної мережі у реальному часі, а й забезпечувати її адаптивне регулювання залежно від інтенсивності руху, рівня природного освітлення, погодних умов та інших факторів.

Впровадження таких систем дає змогу значно підвищити енергоефективність міських освітлювальних мереж, зменшити експлуатаційні витрати, продовжити термін служби обладнання та створити основу для побудови елементів «розумного міста». Крім того, використання алгоритмів машинного навчання дозволяє системі самостійно вдосконалювати свої режими роботи на основі аналізу накопичених даних.

У рамках даної кваліфікаційної роботи здійснено розроблення інтелектуальної системи автоматичного керування вуличним освітленням із використанням IoT-платформи та моделей машинного навчання. Проведено аналіз існуючих рішень у цій сфері, розроблено архітектуру системи, реалізовано програмно-апаратний прототип та виконано експериментальні дослідження його ефективності.

Актуальність даної теми зумовлена необхідністю пошуку ефективних рішень для підвищення енергоефективності та автоматизації міської інфраструктури, а також активним розвитком концепції Smart City, у якій інтелектуальні системи керування відіграють ключову роль.

Об'єкт розробки – процес автоматизованого керування вуличним освітленням у місті з використанням цифрових технологій.

Предмет розробки – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби інтелектуального керування вуличним освітленням з використанням технологій Інтернету речей (IoT) та машинного навчання.

Мета роботи – підвищення енергоефективності міського освітлення шляхом розробки та впровадження інтелектуальної системи керування на основі IoT та алгоритмів машинного навчання з можливістю адаптивного регулювання режимів освітлення відповідно до зовнішніх умов.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати існуючі рішення та технології у сфері автоматизованого керування вуличним освітленням;
- визначити вимоги до апаратної та програмної архітектури інтелектуальної системи;
- розробити архітектуру IoT-системи для збору, обробки та зберігання даних від сенсорів та освітлювальних пристроїв;
- обрати та адаптувати алгоритми машинного навчання для прогнозування та оптимізації режимів роботи освітлення;
- провести експериментальне дослідження ефективності запропонованого рішення на основі реальних або модельованих даних;
- оцінити енергетичні та експлуатаційні переваги використання розробленої системи порівняно з традиційними підходами.

Удосконалено методи автоматичного керування вуличним освітленням шляхом інтеграції IoT-сенсорної інфраструктури з алгоритмами машинного навчання, що дозволяє здійснювати динамічне регулювання режимів освітлення у реальному часі з урахуванням контексту навколишнього середовища та прогнозованої активності.

У роботі застосовано методи аналізу та синтезу систем керування, моделювання та прототипування IoT-інфраструктури, методи машинного навчання

(нейронні мережі, дерева рішень, градієнтний бустинг), а також експериментальне дослідження енергоспоживання та функціональності прототипу системи.

Розроблена система дає змогу істотно підвищити енергоефективність міських систем освітлення за рахунок зменшення споживання електроенергії та продовження ресурсу обладнання, а також створити основу для впровадження «розумної» міської інфраструктури.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з кваліфікаційної роботи бакалавра [2] та методичними вказівками [3].

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 7 “Доступна та чиста енергія”, а саме система дозволяє значно підвищити енергоефективність освітлення в містах. Також результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 11 “Сталий розвиток міст і спільнот”, так як інтелектуальні системи освітлення є частиною концепції Smart City та забезпечують підвищення безпеки вулиць, комфорт для мешканців, покращення якості міського середовища.

За результатами роботи було опубліковано у збірнику студентських наукових статей «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025 [4].

# 1 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВУЛИЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

## 1.1 Огляд концепцій автоматизованих систем керування вуличним освітленням

Вуличне освітлення є важливим елементом міської інфраструктури, що забезпечує безпеку дорожнього руху, комфорт пересування пішоходів та загальну якість життя у міському середовищі. Разом з тим, традиційні системи освітлення характеризуються значними енерговитратами та обмеженими можливостями для динамічного регулювання режимів роботи.

У зв'язку з цим, в останні десятиліття активно розвиваються автоматизовані системи керування вуличним освітленням, метою яких є підвищення енергоефективності та адаптивності освітлювальних мереж.

На початкових етапах автоматизації системи керування базувалися на використанні таймерів та астрономічних годинників, що дозволяли вмикати та вимикати освітлення за заданим розкладом залежно від часу заходу та сходу сонця.

Наступним кроком розвитку стало впровадження сенсорних систем, зокрема датчиків рівня освітленості та датчиків руху, які дають змогу адаптивно регулювати яскравість світильників у реальному часі.

Сучасні АСУВО дедалі частіше інтегруються у платформи Інтернету речей (IoT), що забезпечують централізований моніторинг, дистанційне керування та аналітику великих обсягів даних. Завдяки використанню бездротових мереж зв'язку (LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT тощо) стає можливою побудова масштабованих та економічно ефективних систем.

Додатковим вектором розвитку є застосування алгоритмів машинного навчання, які дозволяють створювати інтелектуальні системи керування, що здатні прогнозувати режими роботи освітлення на основі аналізу історичних даних, погодних умов, трафіку та інших параметрів міського середовища.

Відтак, сучасні концепції автоматизованих систем керування вуличним освітленням орієнтуються на створення адаптивних, енергоефективних та інтелектуальних рішень [4], які забезпечують високу якість освітлення за мінімальних витрат ресурсів та з урахуванням вимог сталого розвитку.

Системи керування вуличним освітленням (СУВО) можна класифікувати за різними ознаками, зокрема за ступенем автоматизації, рівнем інтеграції з іншими системами міської інфраструктури, типом архітектури та можливостями адаптивного керування [5].

Системи керування вуличним освітленням (СУВО) мають різноманітні архітектурні рішення та функціональні можливості. Їх можна класифікувати за кількома ключовими ознаками, такими як рівень автоматизації, архітектура побудови, спосіб передачі даних та можливості адаптивного керування.

Однією з основних класифікаційних ознак є рівень автоматизації [6]. На початковому етапі розвитку системи керування були повністю ручними [7] – увімкнення та вимкнення вуличного освітлення здійснювалось оператором вручну за допомогою комутаційних пристроїв. Згодом такі системи були модернізовані за рахунок використання програмованих пристроїв керування [8] – таймерів або астрономічних годинників, що дозволяли автоматизувати процес згідно з заданим розкладом.

Сучасні СУВО дедалі частіше застосовують автоматичне керування на основі сенсорів. У таких системах використовуються датчики рівня освітленості, датчики руху та метеорологічні сенсори, які дають змогу адаптувати роботу освітлення відповідно до реальних умов навколишнього середовища. Найпрогресивнішим напрямом є впровадження інтелектуального керування [9], де використовується інфраструктура Інтернету речей (IoT) у поєднанні з алгоритмами машинного навчання [10]. Це дозволяє здійснювати гнучке керування режимами освітлення у реальному часі з урахуванням складних залежностей між факторами впливу.

Іншою важливою ознакою є архітектура системи [11]. У централізованих системах управління усі елементи мережі підключені до єдиного центру, з якого

здійснюється моніторинг і керування. Децентралізовані системи [9] передбачають локальне керування на рівні окремих груп світильників або вулиць, що підвищує надійність і дозволяє зменшити залежність від центрального вузла. Найбільш універсальним варіантом є гібридна архітектура, яка поєднує централізований моніторинг із локальною автономією окремих підсистем. Також потрібно враховувати безпеку таких систем [12].

Значну роль у розвитку СУВО відіграє спосіб передачі даних між компонентами системи. На ранніх етапах застосовувалися провідні мережі (оптоволоконний або мідний кабель, PLC), що забезпечували високу надійність і пропускну здатність. Однак у сучасних умовах дедалі більшої популярності набувають бездротові технології передачі даних (LoRaWAN, ZigBee, NB-IoT, Wi-Fi), які дозволяють реалізовувати масштабовані, гнучкі та економічно ефективні рішення без необхідності прокладання додаткових кабельних ліній.

Ще однією важливою характеристикою є можливість адаптивного керування [13]. У неадаптивних системах робота освітлення здійснюється за фіксованим розкладом або простою логікою (наприклад, за рівнем освітленості). Адаптивні системи дозволяють здійснювати динамічне регулювання яскравості та профілю роботи світильників з урахуванням багатьох факторів: трафіку транспорту та пішоходів, погодних умов, рівня природного освітлення, подій у місті тощо. Завдяки цьому досягається значна економія енергії та підвищується якість освітлення.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що еволюція СУВО йде у напрямку підвищення рівня інтелектуальності, енергоефективності та інтегрованості у концепцію "розумного міста". Інтеграція IoT-технологій та алгоритмів машинного навчання дає змогу створювати адаптивні системи нового покоління, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку міської інфраструктури.

## 1.2 Аналіз основних завдань та викликів для автоматизованих систем керування вуличним освітленням

У процесі розроблення та впровадження сучасних автоматизованих систем керування вуличним освітленням (АСУВО) виникає низка завдань і викликів, які мають бути враховані для забезпечення ефективності та надійності таких систем [6]. Ці завдання охоплюють як технічні, так і організаційно-економічні аспекти.

Одним із ключових завдань АСУВО є оптимізація споживання електроенергії [7]. Вуличне освітлення традиційно є одним із найбільших споживачів енергії у комунальному секторі. Використання автоматизованих та інтелектуальних систем дає змогу забезпечити динамічне регулювання яскравості світильників залежно від часу доби, погодних умов, наявності руху транспорту та пішоходів, а також рівня природного освітлення. Завдяки цьому можна досягти значного скорочення енергоспоживання без зниження рівня безпеки та комфорту. Сучасні системи мають бути здатними до адаптивного керування [8], тобто гнучкого реагування на зміну зовнішніх умов у реальному часі [9]. Це вимагає впровадження розвиненої сенсорної інфраструктури [14] (датчики освітленості, руху, метеодатчики тощо) та використання алгоритмів, здатних аналізувати ці дані та приймати оптимальні керуючі рішення. Крім того, адаптивність має враховувати не лише миттєві умови, а й прогнози моделі поведінки, що передбачає інтеграцію методів машинного навчання.

Для міської інфраструктури надзвичайно важливими є надійність та відмовостійкість систем керування. АСУВО повинні забезпечувати стабільну роботу за різноманітних кліматичних та експлуатаційних умов, включно з несприятливими погодними явищами та перебоями в електропостачанні або каналах зв'язку. Важливим завданням є проєктування архітектури системи таким чином, щоб у разі відмови окремих її компонентів (наприклад, центрального контролера або окремих вузлів зв'язку) основні функції залишалися доступними завдяки використанню децентралізованих або гібридних підходів до керування.

Іншим важливим завданням є забезпечення інтеграції АСУВО в загальну ІТ-інфраструктуру міста [15]. Вуличне освітлення має розглядатися не як ізольована система, а як частина єдиної платформи Smart City. Це передбачає використання відкритих протоколів, стандартизованих API, можливість взаємодії з іншими підсистемами – наприклад, системами управління дорожнім рухом, безпеки, екологічного моніторингу тощо.

З підключенням великої кількості пристроїв до мережі Інтернет зростає актуальність питань кібербезпеки [16]. АСУВО повинні мати механізми захисту від несанкціонованого доступу, атаки на канали зв'язку, компрометації даних або елементів системи. Для цього необхідне впровадження сучасних засобів аутентифікації, шифрування даних та регулярного аудиту інформаційної безпеки.

Міські системи освітлення зазвичай охоплюють тисячі світильників, розташованих на великій території. Відповідно, АСУВО мають бути масштабованими, з можливістю поступового розширення без значних змін у структурі мережі. Це вимагає застосування гнучких архітектурних рішень, зокрема використання бездротових технологій зв'язку (LoRaWAN, NB-IoT, ZigBee), що дозволяють мінімізувати витрати на розгортання інфраструктури [17].

Запровадження АСУВО передбачає певні капітальні витрати на обладнання, встановлення та інтеграцію системи. Тому важливою задачею є забезпечення економічної ефективності рішення – тобто, досягнення такого рівня енергозаощадження та оптимізації експлуатаційних витрат, що дозволяє швидко окупити інвестиції. Для цього необхідно провести ретельний техніко-економічний аналіз на етапі планування системи.

У контексті довготривалого використання систем важливою є також сумісність компонентів різних виробників та їх уніфікація згідно з відкритими стандартами. Це дозволяє уникнути залежності від конкретного постачальника та забезпечує гнучкість при модернізації системи у майбутньому.

Отже, розроблення та впровадження ефективних АСУВО вимагає вирішення широкого кола завдань, що охоплюють технічні, інформаційні та організаційні аспекти. Успішна реалізація таких систем передбачає застосування сучасних IoT-

технологій, алгоритмів машинного навчання, засобів захисту інформації та інтеграцію в екосистему Smart City, що дозволяє забезпечити сталий розвиток міської інфраструктури.

Проаналізуємо можливості технологій LoRaWAN, NB-IoT та ZigBee для автоматизованих систем керування вуличним освітленням. Вибір технології бездротової передачі даних є одним із ключових чинників при проєктуванні та впровадженні сучасних автоматизованих систем керування вуличним освітленням (АСУВО). Розглянемо можливості найбільш поширених технологій: LoRaWAN, NB-IoT та ZigBee, які активно застосовуються у складі IoT-рішень для міської інфраструктури.

LoRaWAN – це технологія для побудови мереж великої дальності з низьким енергоспоживанням, що працює у неліцензованих діапазонах частот (наприклад, 868 МГц у Європі). NB-IoT – це технологія вузькосмугового зв'язку, що працює у ліцензованих діапазонах та підтримується стільниковими операторами (3GPP).

ZigBee – це технологія мереж з малою дальністю та високою енергоефективністю, яка працює на частоті 2,4 ГГц.

Порівняння LoRaWAN, NB-IoT та ZigBee (рис. 1.1) дозволяє оцінити яка технологія є найбільш підходящою для автоматизованих систем керування вуличним освітленням. Зокрема, LoRaWAN демонструє найкращі показники за такими характеристиками, як дальність зв'язку, енергоспоживання та масштабованість мережі, що робить цю технологію доцільною для створення великих розподілених систем з мінімальними витратами на розгортання.

Водночас, LoRaWAN має певні обмеження щодо швидкості передачі даних та підтримки режиму реального часу, що слід враховувати при виборі сценаріїв застосування.

Технологія NB-IoT забезпечує високу надійність зв'язку, глибоке покриття у міському середовищі та достатню швидкість обміну даними, що робить її придатною для використання у критично важливих системах з підвищеними вимогами до якості обслуговування. Основним недоліком є необхідність сплати абонентських платежів за використання операторських мереж.

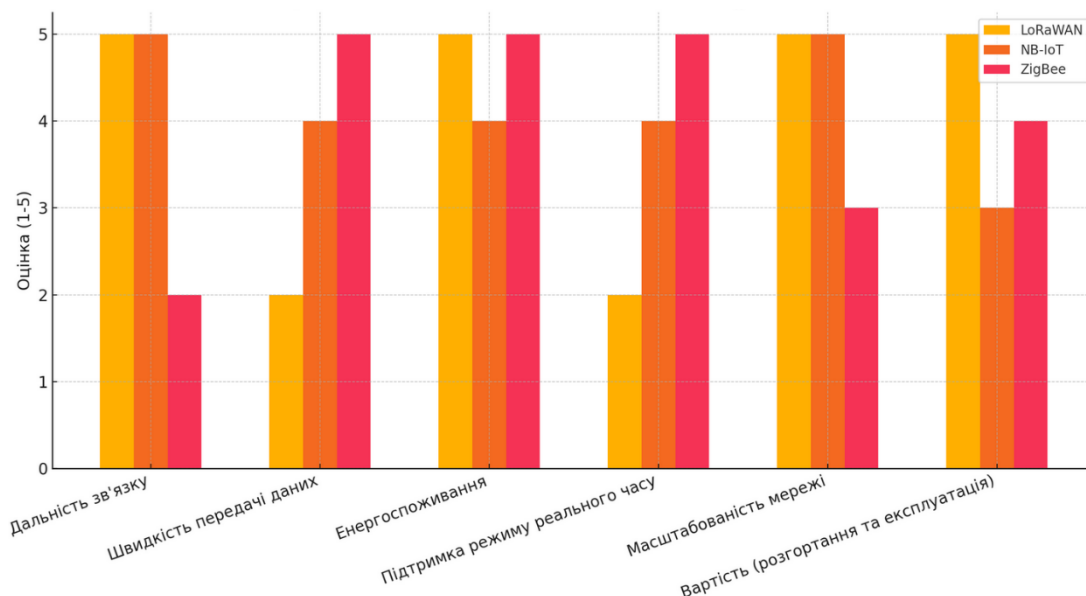


Рисунок 1.1 – Порівняння можливостей LoRaWAN, NB-IoT та ZigBee для СУВО

ZigBee демонструє найкращі показники щодо підтримки режиму реального часу та швидкості передачі даних, що дозволяє ефективно застосовувати цю технологію у локальних системах освітлення (на рівні окремих вулиць, парків, кварталів). Проте через обмежену дальність зв'язку та складність масштабування ZigBee доцільно використовувати переважно у межах компактних територій.

Було проведено порівняльний аналіз можливостей LoRaWAN, NB-IoT та ZigBee для СУВО (табл. 1.1). Вибір конкретної технології зв'язку має здійснюватися з урахуванням масштабу системи, топології території, вимог до якості зв'язку та економічних міркувань.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика технологій зв'язку для АСУВО

Параметр	LoRaWAN	NB-IoT	ZigBee
Дальність зв'язку	Висока (до 10–15 км поза містом, до 2–5 км у місті)	Висока (глибоке покриття у місті, у приміщеннях)	Низька 50-100 м відкритий простір, 20–30 м у місті

Продовження таблиці 1.1

Параметр	LoRaWAN	NB-IoT	ZigBee
Швидкість передачі даних	Низька (до кількох кбіт/с)	Середня (до 250 кбіт/с)	Висока (до 250 кбіт/с)
Енергоспоживання	Дуже низьке	Низьке	Дуже низьке
Підтримка режиму реального часу	Обмежена (затримка до кількох секунд)	Помірна (затримка незначна, підходить для більшості сценаріїв)	Висока (режим реального часу підтримується)
Масштабованість мережі	Дуже висока (до тисяч пристроїв на шлюз)	Висока (масові підключення до стільникової мережі)	Середня (mesh-мережа з обмеженням за ретрансляцією)
Вартість	Низька	Середня	Середня

Як видно з таблиці 1.1, кожна технологія зв'язку має свої сильні сторони та обмеження, що визначають доцільність її використання у різних сценаріях побудови автоматизованих систем керування вуличним освітленням.

Таким чином, вибір конкретної технології слід здійснювати виходячи з масштабу системи, архітектури мережі, вимог до режиму роботи та економічних обмежень проєкту. Аналіз можливостей бездротових технологій LoRaWAN, NB-IoT та ZigBee свідчить про те, що кожна з них має свої переваги та обмеження у контексті використання в автоматизованих системах керування вуличним освітленням.

Вибір конкретної технології має ґрунтуватися на поставлених завданнях, характері міської території, архітектурі системи та економічних вимогах проєкту.

У перспективі найбільш ефективними є гібридні підходи, які дозволяють поєднувати сильні сторони різних технологій для забезпечення надійної, масштабованої та енергоефективної інфраструктури освітлення у розумному місті.

### 1.3 Використання ПІД-регуляторів у системах керування вуличним освітленням

У системах автоматичного керування вуличним освітленням важливим завданням є забезпечення плавного регулювання рівня яскравості світильників відповідно до динамічно змінних умов довкілля (природна освітленість, трафік, погодні умови тощо). Одним із ефективних підходів для реалізації такого регулювання є використання ПІД-регуляторів.

ПІД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор, англ. PID controller) – це класичний інструмент автоматичного керування, що дозволяє формувати керуючий вплив на об'єкт так, щоб мінімізувати відхилення фактичного параметра (у даному випадку – яскравості освітлення або рівня освітленості на вулиці) від бажаного значення.

ПІД-регулятор формує керуючий сигнал на основі трьох компонентів:

- пропорційна (P) складова – забезпечує миттєву реакцію на поточне відхилення;
- інтегральна (I) складова – накопичує відхилення за часом та усуває статичні похибки;
- диференціальна (D) складова – згладжує динамічні переходи та зменшує перерегулювання.

У контексті керування вуличним освітленням ПІД-регулятор може виконувати кілька важливих функцій.

По-перше, він дає змогу реалізувати плавне регулювання яскравості світлодіодних (LED) світильників на основі сигналів від сенсорів освітленості. Це дозволяє автоматично підтримувати необхідний рівень освітлення у різний час доби та при різних погодних умовах.

По-друге, ПІД-регулятор забезпечує адаптивну корекцію яскравості у відповідь на швидкі зміни зовнішніх умов, такі як поява транспортного потоку або раптова зміна погодних умов (наприклад, туман, дощ або сніг). Завдяки цьому система може динамічно підлаштовуватися під поточну ситуацію, забезпечуючи максимальну безпеку для учасників дорожнього руху.

Крім того, регулятор використовується для підтримання стабільного рівня освітленості у відповідності до встановлених нормативів у режимі реального часу. Це дозволяє системі дотримуватися нормативних вимог до освітлення міських територій навіть за умов значних змін зовнішнього середовища.

Особливо ефективним є поєднання ПІД-регуляторів з алгоритмами машинного навчання. Таке поєднання дає змогу формувати динамічні профілі оптимальних параметрів регулятора (коефіцієнтів  $P$ ,  $I$ ,  $D$ ) залежно від типових сценаріїв роботи системи та накопичених статистичних даних. Зокрема, алгоритми машинного навчання можуть допомогти автоматично адаптувати параметри регулятора до різних умов – наприклад, у періоди з високою інтенсивністю руху або при зміні сезонів.

До основних переваг використання ПІД-регуляторів у СУВО належать, насамперед, простота реалізації у програмно-апаратних рішеннях. Крім того, ПІД-регулятори мають добре відому математичну модель та доступні у вигляді готових бібліотек для впровадження у мікроконтролерах та IoT-платформах. За умови правильного налаштування параметрів ці регулятори забезпечують високу якість регулювання й стабільну роботу системи.

Разом із тим існують і певні виклики при впровадженні ПІД-регуляторів у такі системи. Передусім це необхідність тонкого налаштування коефіцієнтів  $P$ ,  $I$ ,  $D$  для уникнення нестійких режимів або перерегулювання. Крім того, слід враховувати обмеження швидкодії системи при використанні мереж з великими затримками, наприклад у випадку застосування LoRaWAN.

Проведемо порівняння ПІД-регуляторів у задачах СУВО (рис. 1.2).

На (рис. 1.2) представлено гістограму, яка демонструє порівняння ПІД-регуляторів за трьома ключовими критеріями, важливими для їх використання у

задачах автоматизованого керування вуличним освітленням. Першим критерієм є гнучкість налаштувань, що відображає, наскільки легко та зручно користувач може конфігурувати параметри регулятора (коефіцієнти P, I, D) для забезпечення оптимального режиму роботи.

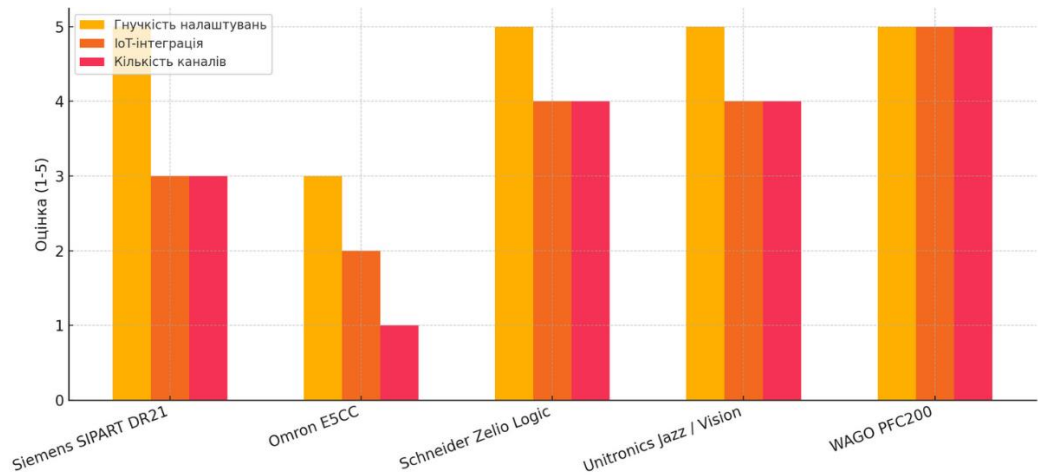


Рисунок 1.2 – Порівняння ПІД-регуляторів для СУВО за трьома ключовими критеріями

Другим важливим параметром є інтеграція в IoT-інфраструктуру, яка характеризує здатність регулятора взаємодіяти з сучасними IoT-платформами, протоколами передачі даних та системами моніторингу (наприклад, через MQTT, OPC UA, REST API або стандартні промислові протоколи).

Третім критерієм виступає кількість каналів ПІД-регулювання, тобто кількість керованих каналів, які може підтримувати регулятор одночасно. Цей параметр визначає можливість використання одного пристрою для регулювання яскравості кількох груп світильників чи інших елементів системи.

Загалом, за результатами порівняння можна зробити висновок, що при виборі ПІД-регулятора для СУВО доцільно враховувати не лише якість самого регулятора, а й рівень його інтегрованості у загальну архітектуру інтелектуальної системи керування.

ПІД-регулятор, як правило, являє собою закінчений готовий пристрій (рис. 1.3)



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд ПІД-регулятора двоканального

Таким чином, використання ПІД-регуляторів є доцільним у системах плавного адаптивного керування яскравістю освітлення, особливо у поєднанні з сенсорними системами та алгоритмами прогнозування, що дозволяє суттєво підвищити ефективність та гнучкість автоматизованих систем керування вуличним освітленням.

#### 1.4 Порівняльний аналіз сучасних платформ автоматизованих систем керування

Сучасні автоматизовані системи керування вуличним освітленням (СУВО) активно розвиваються у напрямі переходу від ізольованих локальних рішень до відкритих, гнучких платформ, інтегрованих у концепцію Smart City. Важливу роль при цьому відіграє вибір програмно-апаратної платформи та надійної та енергоефективної системи керування.

Промислові платформи автоматизації (рис. 1.4), такі як Siemens Desigo CC, Schneider Electric EcoStruxure або Honeywell Building Management Systems. Вони забезпечують високу надійність, підтримують промислові протоколи (Modbus, BACnet, KNX) і добре інтегруються з іншими компонентами міської інфраструктури. Проте їх використання зазвичай потребує значних капітальних витрат та спеціалізованих знань для налаштування.

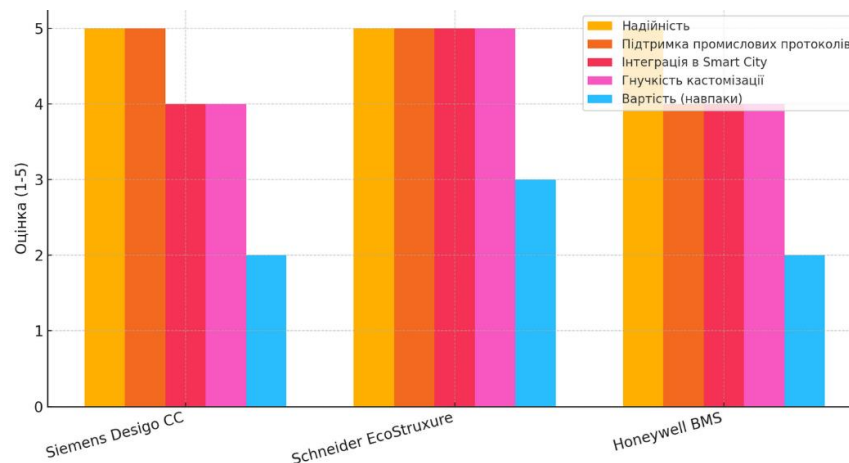


Рисунок 1.4 – Порівняння промислових платформ автоматизації для СУВО

Як видно з (рис. 1.4), усі розглянуті промислові платформи автоматизації демонструють високий рівень надійності та підтримки промислових протоколів, що робить їх придатними для інтеграції у великі міські інфраструктурні проекти. Платформа Schneider Electric EcoStruxure відзначається кращими можливостями інтеграції у концепцію Smart City та вищою гнучкістю кастомізації. Водночас, для всіх платформ характерна висока вартість впровадження, що слід враховувати при виборі рішення для СУВО.

Також розповсюдженими є відкриті IoT-платформи (рис. 1.5), такі як ThingsBoard, Node-RED, Kaa IoT Platform, Mainflux. Їх перевагою є підтримка сучасних IoT-протоколів (MQTT, CoAP, REST API), можливість роботи з великою кількістю недорогих датчиків і контролерів, висока масштабованість та активна спільнота розробників. Такі платформи добре підходять для створення адаптивних та розширюваних СУВО у середніх та великих містах.

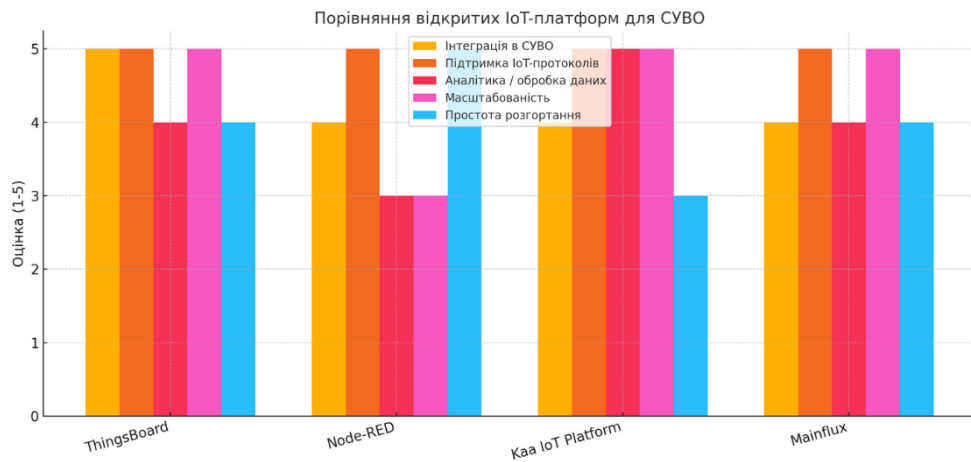


Рисунок 1.5 – Порівняння відкритих IoT-платформ для СУВО

Як видно із (рис. 1.5) ThingsBoard, Node-RED, Kaa IoT Platform, Mainflux – усі платформи мають високу підтримку IoT-протоколів (MQTT, CoAP, REST API), але вони різняться за можливостями аналітики, масштабованістю та простотою розгортання.

Третю групу становлять спеціалізовані платформи керування вуличним освітленням, зокрема Telensa PLANet, Schröder EXEDRA, Cisco Smart+Connected Lighting, Flashnet inteliLIGHT (рис. 1.6). Ці рішення «під ключ» вже містять у своєму складі програмне забезпечення для централізованого керування освітленням, підтримують управління індивідуальними світильниками, динамічні сценарії роботи, автоматичний збір аналітики та гнучку інтеграцію у системи Smart City. Основним обмеженням таких платформ є їх орієнтація на певний модельний ряд обладнання або постачальника.

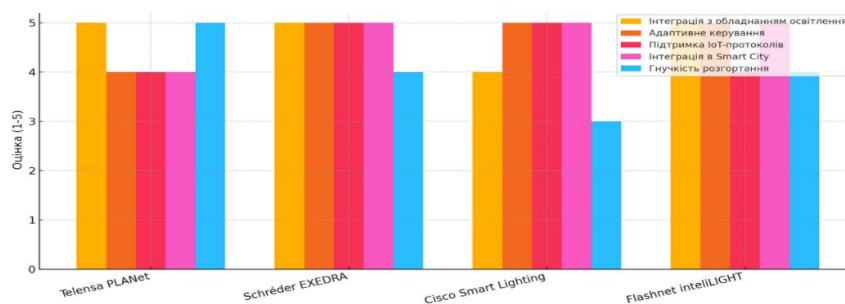


Рисунок 1.6 – Порівняння спеціалізованих платформ керування вуличним освітленням

Усі розглянуті спеціалізовані платформи (рис. 1.6) – Telensa PLANet, Schröder EXEDRA, Cisco Smart Lighting та Flashnet inteliLIGHT – демонструють високі показники щодо інтеграції з обладнанням освітлення та підтримки адаптивного керування. Це дозволяє ефективно реалізовувати сценарії автоматичного регулювання рівня освітлення залежно від змін у навколишньому середовищі та потоку транспортних засобів.

Особливо високим є рівень інтеграції у концепцію Smart City у платформах Schröder EXEDRA та Cisco Smart Lighting. Ці рішення забезпечують розширені можливості взаємодії з іншими компонентами міської цифрової інфраструктури, такими як системи управління дорожнім рухом, моніторингу якості повітря та платформи для збору міської аналітики.

Водночас гнучкість розгортання спеціалізованих платформ значною мірою залежить від їх архітектури та від переліку моделей підтримуваного обладнання.

Деякі платформи орієнтовані на роботу у закритих екосистемах, що може обмежувати вибір світлотехнічних рішень, тоді як інші підтримують відкриті стандарти, полегшуючи інтеграцію у гетерогенні міські середовища.

У цілому, порівняльний аналіз показує, що вибір платформи для АСУВО має базуватися на таких ключових факторах:

- масштаб проекту (від локальних систем до міських агломерацій);
- відкритість та інтегрованість у міську ІТ-інфраструктуру;
- гнучкість щодо вибору обладнання;
- вартість впровадження та експлуатації;
- можливість використання алгоритмів машинного навчання та аналітики

великих даних.

Зокрема, для побудови інтелектуальної АСУВО на основі IoT та ML доцільно орієнтуватися на відкриті IoT-платформи або комбіновані рішення, що дозволяють легко інтегрувати машинне навчання та керувати сценаріями освітлення в режимі реального часу.

## 1.5 Аналіз існуючих рішень та платформ автоматизованих систем керування освітленням

Упродовж останніх років ринок систем автоматизованого керування вуличним освітленням (СУВО) демонструє динамічний розвиток, що зумовлено як зростанням вимог до енергоефективності міської інфраструктури, так і впровадженням концепцій Smart City.

Відповідно, формується широкий спектр програмно-апаратних рішень та інтеграційних платформ, які забезпечують гнучке та адаптивне керування міськими системами освітлення.

Важливо зазначити, що при виборі платформи необхідно враховувати масштаб системи, наявну інфраструктуру міста, відкритість архітектури, підтримку стандартів та економічну доцільність впровадження.

Також перспективним напрямом розвитку є поєднання відкритих IoT-платформ із спеціалізованими модулями керування освітленням, що дозволяє забезпечити високу гнучкість системи при збереженні оптимального рівня функціональності.

Зробимо узагальнене порівняння груп платформ для СУВО (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Ключові функціональні можливості деяких популярних платформ

Група платформ	Інтеграція в Smart City	Підтримка IoT-протоколів	Гнучкість налаштування	Вартість втілення
Промислові платформи автоматизації	Висока	Обмежена, через шлюзи (Modbus, OPC UA, BACnet)	Висока для інженерних систем	Висока (дорогі ліцензії, серверне обладнання)

## Продовження таблиці 1.2

Група платформ	Інтеграція в Smart City	Підтримка IoT-протоколів	Гнучкість налаштування	Вартість втілення
Відкриті IoT-платформи	Висока	Повна підтримка (MQTT, CoAP, REST API, WebSockets)	Дуже висока, завдяки відкритості та модульності	Низька/середня (відкриті або доступні ліцензії, гнучкі моделі)
Спеціалізовані платформи керування вуличним освітленням	Висока	Обмежена/часткова (залежить від платформи)	Середня (залежить від обладнання та політики виробника)	Середня/висока (залежить від політики виробника та підтримки обладнання)

Як видно з таблиці 1.2, кожна група платформ має свої сильні сторони та обмеження.

Для побудови інтелектуальної системи автоматичного керування вуличним освітленням доцільно обирати платформу з урахуванням масштабу проекту, необхідного рівня інтеграції з міською інфраструктурою та вимог до гнучкості й вартості впровадження.

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ І,Т ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ В АВТОМАТИЧНОМУ КЕРУВАННІ ОСВІТЛЕННЯМ

### 2.1 Визначення протоколів зв'язку

У системах вуличного освітлення часто застосовуються сенсори руху, освітленості, метеостанції тощо, які можуть працювати від батареї. Протокол зв'язку повинен забезпечувати передачу даних з мінімальним енергоспоживанням, щоб батарея могла працювати не менше кількох років без заміни. Це критично важливо для зниження експлуатаційних витрат та спрощення технічного обслуговування.

Ідеальна система повинна дозволяти централізовано або децентралізовано керувати освітленням на значних відстанях. Протокол зв'язку має підтримувати дальність передачі від кількох сотень метрів до кількох кілометрів, щоб забезпечити зв'язок навіть між віддаленими ліхтарями та вузлами мережі без потреби в щільній інфраструктурі ретрансляторів.

Міське середовище насичене радіочастотними сигналами – Wi-Fi, мобільні мережі, Bluetooth, побутові пристрої. Протокол зв'язку повинен бути стійким до радіочастотних завад, мати механізми корекції помилок та адаптивного вибору частот, щоб гарантувати надійну доставку даних навіть у "шумних" ділянках міста.

У великих містах система вуличного освітлення може включати тисячі або десятки тисяч керованих об'єктів. Протокол повинен підтримувати масштабовану архітектуру мережі, в якій можна підключити велику кількість вузлів без деградації продуктивності та без перевантаження мережевого трафіку.

Експлуатаційні витрати включають вартість зв'язку, обслуговування мережі, оновлення програмного забезпечення тощо. Протокол повинен бути дешевим у використанні – бажано без абонентської плати або з мінімальною вартістю трафіку (як у випадку з LoRaWAN або приватними LPWAN-мережами), що важливо для економічної ефективності рішень у масштабах міста.

У контексті сучасних розумних міст системи автоматичного керування вуличним освітленням виступають частиною критичної інфраструктури, що створює підвищені вимоги до безпеки інформаційного обміну. Протоколи зв'язку повинні підтримувати механізми енд-ту-енд шифрування переданих даних (наприклад, AES-128 або більш стійкі алгоритми), автентифікацію вузлів мережі, а також захист від атак типу «man-in-the-middle» та підроблення повідомлень. Крім того, важливим є забезпечення цілісності даних, що передаються, і можливість контролю доступу до системи керування на основі сучасних принципів інформаційної безпеки. З огляду на тенденції розвитку індустріального Інтернету речей (IIoT), безпека протоколів зв'язку дедалі частіше інтегрується у загальні концепції Zero Trust Architecture, що передбачає багаторівневу перевірку довіри на всіх етапах взаємодії системи.

Для забезпечення високого ступеня керованості й адаптивності сучасних систем вуличного освітлення протоколи зв'язку повинні підтримувати двосторонній (bidirectional) та асинхронний обмін даними між кінцевими пристроями (ліхтарями, сенсорами, виконавчими модулями) і центральними системами керування. Це передбачає не лише періодичне надсилання телеметрії у напрямку до центру, а й можливість віддаленого конфігурування, оновлення програмного забезпечення по повітрю (OTA), а, також, оперативного надсилання команд управління на кінцеві пристрої у реальному часі. Такі механізми істотно підвищують гнучкість експлуатації, спрощують технічне обслуговування і дозволяють будувати адаптивні стратегії освітлення з використанням алгоритмів машинного навчання та аналітики в реальному часі.

Враховуючи два запропоновані критерії, зробимо порівняння протоколів зв'язку (рис. 2.1).

За результатами порівняння протоколів зв'язку за критеріями безпеки передавання даних та підтримки двостороннього та асинхронного обміну, найбільш придатними для застосування у системах автоматичного керування вуличним освітленням виступають протоколи NB-IoT та 5G.

Вони демонструють високі показники захисту інформації та забезпечують гнучке керування у режимі реального часу, що критично важливо для сучасної інфраструктури «розумного міста».

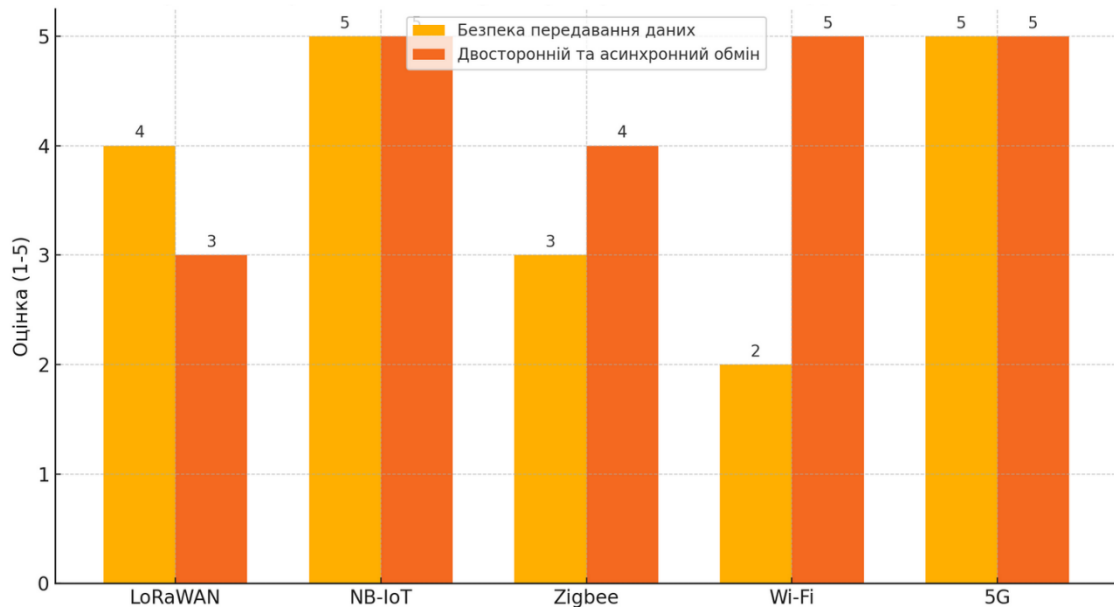


Рисунок 2.1 – Порівняння протоколів зв'язку за критеріями безпека та двосторонній обмін

Протокол LoRaWAN характеризується достатньо високим рівнем безпеки, однак його архітектура спочатку оптимізована для енергоефективної односпрямованої передачі даних, що обмежує можливості повноцінного двостороннього обміну.

Zigbee, у свою чергу, забезпечує добру підтримку двостороннього обміну, однак має дещо нижчий рівень безпеки порівняно з мобільними протоколами, що слід враховувати при побудові критичних сегментів системи.

Wi-Fi надає можливість повноцінного двостороннього обміну даними з високою пропускну здатністю, однак рівень безпеки істотно залежить від конкретної реалізації протоколу у пристроях IoT, що часто мають обмежені апаратні ресурси для реалізації складних криптографічних механізмів.

Протоколи повинні забезпечувати мінімальне споживання енергії, особливо для автономних сенсорів і контролерів, які працюють від батарей. Це дозволяє

значно знизити витрати на обслуговування та підвищити довговічність обладнання. Протоколи з підтримкою "sleep-mode" та оптимізованими режимами передачі (наприклад, LoRaWAN, NB-IoT) забезпечують значно кращі показники енергоефективності.

Здатність протоколу підтримувати стабільний зв'язок на великих відстанях є критичною для міських територій, де інфраструктура вуличного освітлення розподілена по великих площах. Протоколи LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) забезпечують дальність зв'язку до декількох кілометрів, що дозволяє зменшити кількість необхідних ретрансляторів і знизити вартість розгортання.

Системи автоматичного керування освітленням у сучасних містах включають тисячі або десятки тисяч вузлів.

Протокол повинен бути здатний обслуговувати такі масштабні мережі без деградації продуктивності та без перевантаження каналів зв'язку. Протоколи, що підтримують масову підключення IoT-пристроїв (Massive IoT), як-от NB-IoT і 5G (mMTC), є найбільш відповідними для таких завдань.

Враховуючі додаткові 3 критерії, проведемо порівняння протоколів зв'язку (рис. 2.2).

Як видно з графіка (рис. 2.2), LoRaWAN має найвищу енергоефективність та найбільшу дальність зв'язку, а також хорошу масштабованість – це робить його ідеальним вибором для енергоощадних, широко розподілених систем. NB-IoT демонструє збалансовані показники за всіма критеріями – гарна енергоефективність, велика дальність, відмінна масштабованість. Це універсальне рішення для міських систем освітлення.

5G забезпечує відмінну масштабованість та хорошу дальність, однак поступається в енергоефективності, що обмежує його застосування у сенсорах з живленням від батарей. Zigbee поступається за дальністю зв'язку та масштабованістю, але має прийнятне енергоспоживання – придатний для невеликих локальних кластерів (наприклад, у парках або на окремих вулицях).

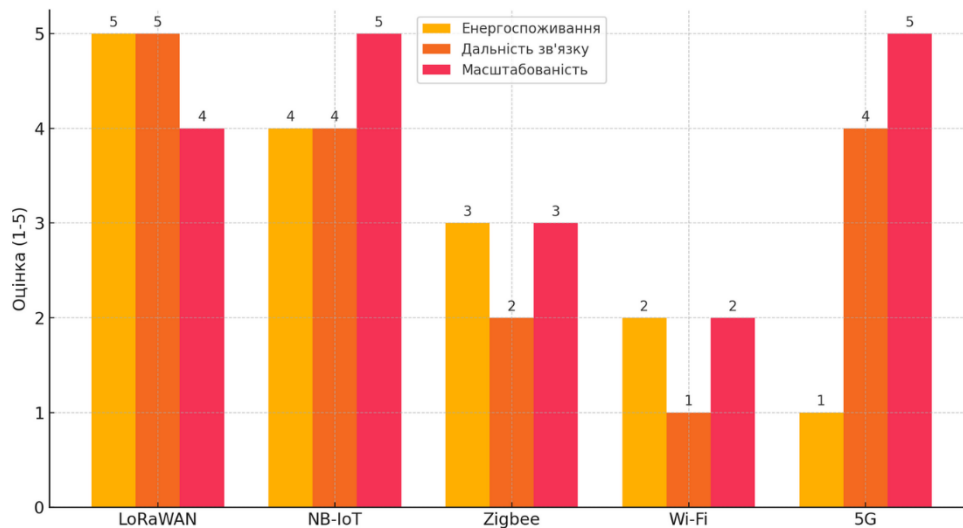


Рисунок 2.2 – Порівняння протоколів зв'язку за критеріями енергоспоживання, дальність та масштабованість

Wi-Fi є найменш енергоефективним та має обмежену дальність і масштабованість, що робить його малоприматним для великих розподілених IoT-систем вуличного освітлення. Детальна класифікація критеріїв та їх кореляція представлена в таблиці 2.1, яка містить опис кожного критерію та пронормовану оцінку критерію, де протокол з оцінкою 1 – дуже слабо (погано придатний), а 5 – відмінно (повністю відповідає вимогам).

Аналіз протоколів зв'язку за п'ятьма ключовими критеріями – безпекою передавання даних, підтримкою двостороннього та асинхронного обміну, енергоспоживанням, дальністю зв'язку та масштабованістю – дозволяє зробити такі висновки щодо їх придатності для використання у системах автоматичного керування вуличним освітленням.

Протокол NB-IoT демонструє найбільш збалансований профіль характеристик, що включає високі показники безпеки, повноцінний двосторонній обмін даними, прийнятну енергоефективність, значну дальність зв'язку та відмінну масштабованість. Завдяки цим властивостям NB-IoT є одним із найбільш перспективних рішень для розгортання масових міських систем управління освітленням, особливо в умовах інтеграції в інфраструктуру «розумного міста».

Таблиця 2.1 – Узагальнена таблиця оцінювання всіх 5 критеріїв для розглянутих протоколів зв'язку у системах автоматичного керування вуличним освітленням

Протокол	Безпека передавання даних	Двосторонній та асинхронний обмін	Енергоспоживання	Дальність зв'язку	Масштаб
LoRaWAN	4	3	5	5	4
NB-IoT	5	5	4	4	5
Zigbee	3	4	3	2	3
Wi-Fi	2	5	2	1	2
5G	5	5	1	4	5

Протокол LoRaWAN є оптимальним вибором для сценаріїв, де на перший план виходять вимоги до мінімального енергоспоживання та великої дальності зв'язку у умовах обмеженого доступу до енергомережі.

Проте слід враховувати, що LoRaWAN має певні обмеження щодо повноцінної підтримки двостороннього асинхронного обміну, що може ускладнювати реалізацію складних адаптивних сценаріїв керування.

Протокол 5G забезпечує виняткові можливості з точки зору пропускної здатності, масштабованості та підтримки двостороннього обміну у режимі реального часу, що робить його придатним для майбутніх інтегрованих систем управління. Водночас високе енергоспоживання 5G-пристроїв на сьогодні значно обмежує його застосування у сенсорних пристроях, що працюють від батарей, зокрема у сегменті розподілених сенсорних мереж.

Протоколи Zigbee та Wi-Fi доцільно розглядати як рішення для локальних або спеціалізованих систем освітлення, де необхідна висока інтерактивність та низькі затрати на розгортання. Однак через обмежену дальність зв'язку, нижчу масштабованість і, у випадку Wi-Fi, високе енергоспоживання, ці протоколи поступаються LPWAN-рішенням (таким як NB-IoT і LoRaWAN) при побудові

великих розподілених міських мереж автоматичного керування вуличним освітленням.

Система має забезпечувати відображення симуляції дронів у реальному часі, що включає візуалізацію положення дрона в просторі та його оточення.

Користувач повинен мати можливість спостерігати за рухом дрона з різних ракурсів, включаючи вигляд з кабіни та загальний план території. Відео з віртуальної камери дрона має транслюватися на веб-інтерфейс без суттєвих затримок, що забезпечить точність керування та моніторингу.

У результаті порівняльного аналізу (рис. 2.3 – 2.7) встановлено, що NB-IoT є найбільш універсальним протоколом для реалізації масштабованих міських систем автоматичного керування вуличним освітленням, завдяки збалансованим показникам за всіма ключовими критеріями.

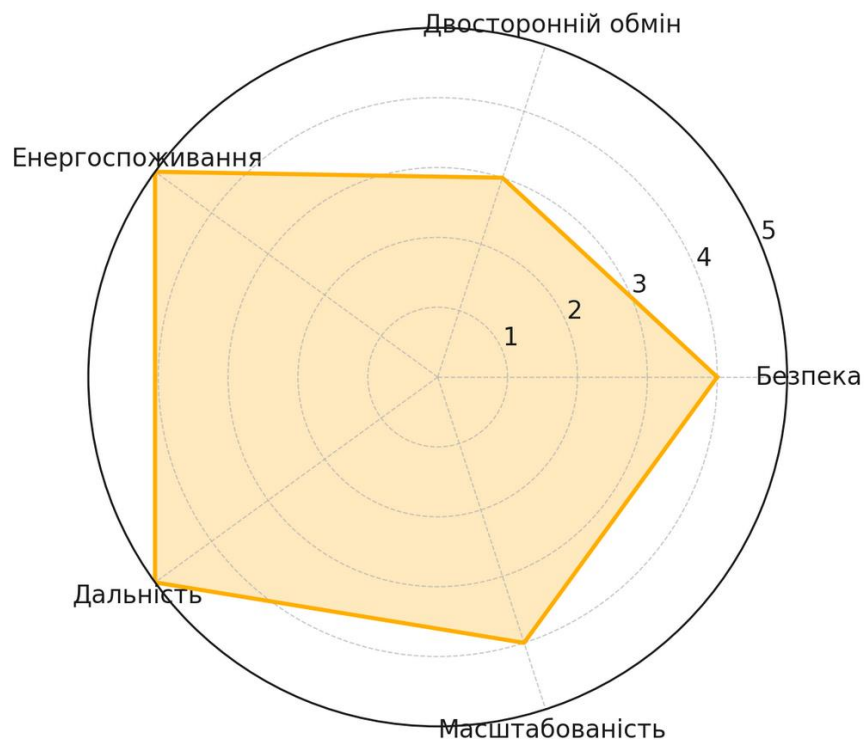


Рисунок 2.3 – Графік для протоколу LoRaWAN

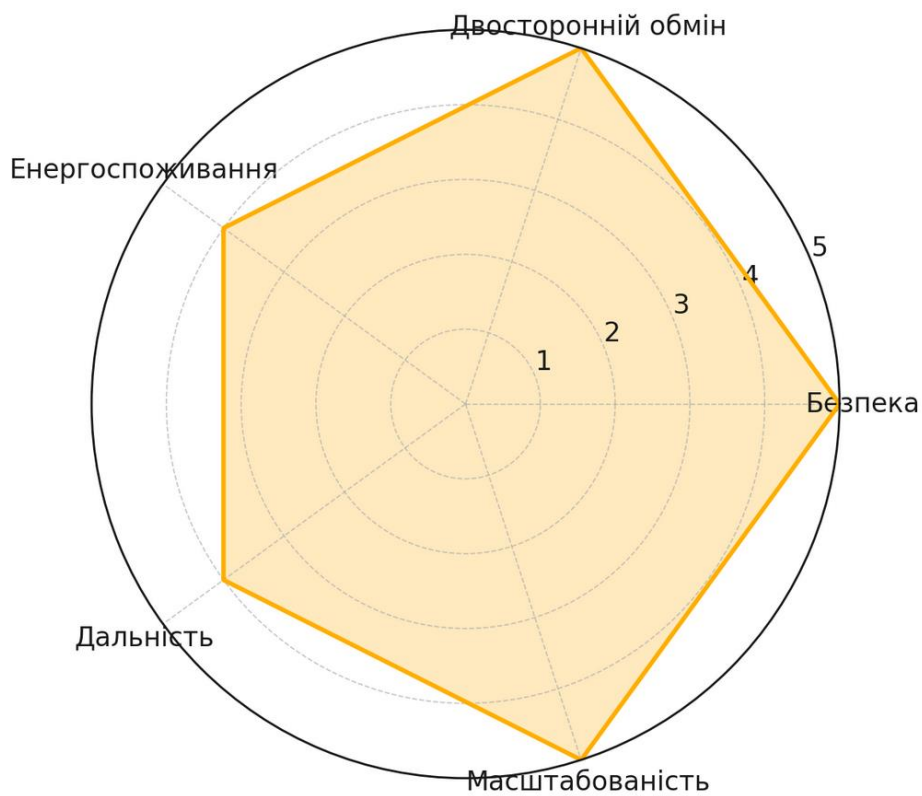


Рисунок 2.4 – Графік для протоколу NB-IoT

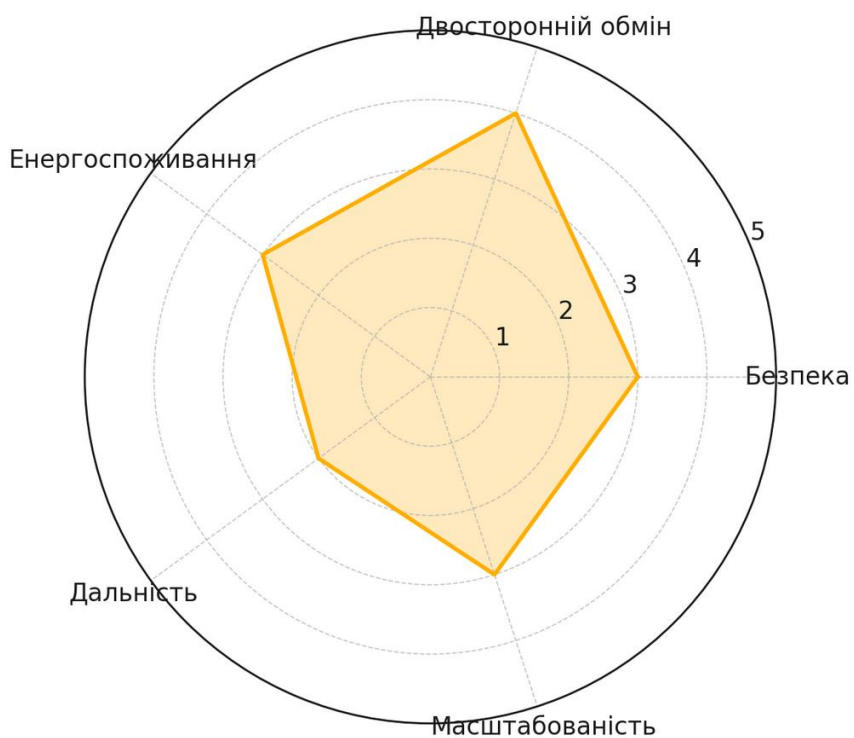


Рисунок 2.5 – Графік для протоколу Zigbee



Рисунок 2.6 – Графік для протоколу Wi-Fi

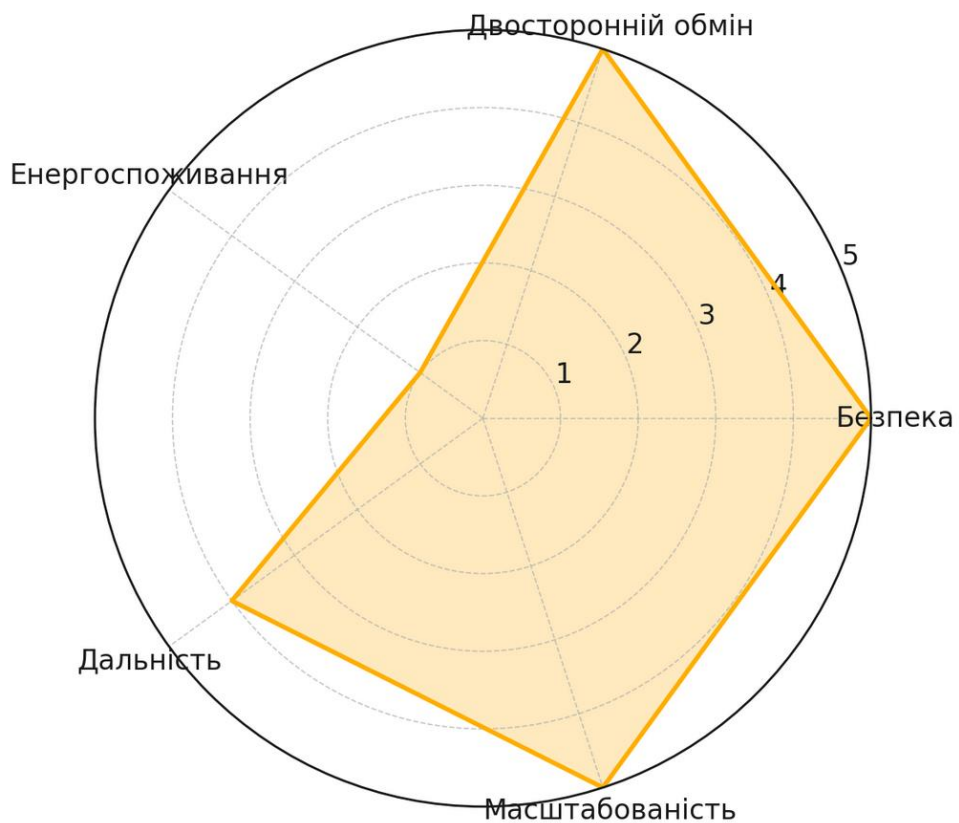


Рисунок 2.7 – Графік для протоколу 5G

Із графіків (рис 2.3 – 2.6) видно, що чим більше площа фігури тим кращий протокол за всіма критеріями. Паутинкові графіки ілюструють профіль

відповідності кожного протоколу зв'язку п'яти ключовим критеріям, що визначають їх придатність для використання у системах автоматичного керування вуличним освітленням. Форма та площа графіків дозволяють візуально оцінити сильні сторони й обмеження кожного протоколу, полегшуючи вибір оптимального рішення для конкретних сценаріїв застосування.

Протокол LoRaWAN доцільно використовувати для енергоощадних розподілених мереж, тоді як 5G, Zigbee та Wi-Fi більше придатні для спеціалізованих або локальних застосувань у межах інтегрованої інфраструктури «розумного міста».

Враховуючи вищесказане, зробимо загальний паутинковий графік (рис. 2.8). Комбінований паутинковий графік демонструє, що протокол NB-ІоТ має найбільш збалансований профіль, забезпечуючи високу відповідність майже за всіма критеріями, що робить його оптимальним для масштабованих міських систем керування вуличним освітленням.



Рисунок 2.8 – Паутинковий графік протоколів зв'язку

На основі проведеного порівняльного аналізу встановлено, що для побудови сучасних систем автоматичного керування вуличним освітленням найбільш перспективним є використання протоколу NB-ІоТ, який забезпечує оптимальне

поєднання безпеки, масштабованості, енергоефективності та гнучких можливостей двостороннього обміну. Протокол LoRaWAN є доцільним вибором для енергоощадних, широко розподілених систем, особливо в умовах обмеженого енергозабезпечення. 5G може ефективно застосовуватися у сценаріях, де потрібна висока швидкість обміну та інтеграція у загальну інфраструктуру «розумного міста», однак через значне енергоспоживання його використання в автономних пристроях обмежене. Протоколи Zigbee та Wi-Fi слід розглядати як інструменти для локальних або спеціалізованих підсистем, де ключовими факторами є інтерактивність та простота впровадження. Отримані результати дозволяють здійснити обґрунтований вибір протоколу зв'язку відповідно до вимог конкретного проекту та сценаріїв експлуатації.

## 2.2 Обґрунтування IoT платформи

У системах автоматичного керування вуличним освітленням IoT-платформа виконує центральну роль, забезпечуючи інтеграцію всіх компонентів системи, включно з контролерами ліхтарів, сенсорами навколишнього середовища, аналітичними модулями та центральними сервісами керування. Правильний вибір платформи є критичним, оскільки саме вона визначає гнучкість, масштабованість, безпеку та ефективність побудови і функціонування всієї системи. Вибір IoT-платформи має базуватись на її відповідності функціональним вимогам проекту, здатності підтримувати масштабування до рівня міських систем, відкритості для інтеграції з іншими цифровими сервісами та наявності можливостей для аналітики і застосування алгоритмів машинного навчання. До ключових вимог, які висуваються до IoT-платформи для систем автоматичного керування освітленням, належать кілька важливих аспектів. По-перше, платформа повинна підтримувати широкий спектр протоколів зв'язку, таких як NB-IoT, LoRaWAN, Zigbee, Wi-Fi та Ethernet. Це забезпечить гнучкість при виборі апаратного забезпечення і дозволить інтегрувати у систему різні типи пристроїв. По-друге, надзвичайно важливою є здатність платформи до масштабування – вона повинна ефективно обробляти дані

від тисяч або навіть десятків тисяч пристроїв у реальному часі, з урахуванням географічної розподіленості міської інфраструктури.

Третім важливим аспектом є модульна архітектура платформи та підтримка відкритих API, що дає змогу інтегрувати її з іншими системами розумного міста, включаючи системи відеоспостереження, контролю дорожнього руху та інші міські сервіси. Крім того, платформа повинна забезпечувати розвинені механізми аналітики даних, включно із засобами збору, обробки та візуалізації інформації в режимі реального часу. Важливою є також підтримка впровадження алгоритмів машинного навчання для реалізації адаптивних стратегій керування освітленням відповідно до динамічних умов середовища.

Не менш значущою вимогою є відповідність сучасним стандартам інформаційної безпеки: платформа має підтримувати сучасні протоколи шифрування даних, автентифікацію пристроїв і користувачів, а також забезпечувати механізми журналювання та моніторингу подій безпеки.

На основі аналізу сучасного ринку рішень було визначено низку платформ, що відповідають зазначеним вимогам. Зокрема, Telensa PLANet є спеціалізованою платформою для керування вуличним освітленням, яка відома високим рівнем масштабованості та здатністю інтегруватися в міські цифрові системи.

Платформа Schréder EXEDRA пропонує відкриту архітектуру з розширеними можливостями аналітики та адаптивного керування, орієнтовану на інтеграцію з екосистемою розумного міста. Cisco Smart Lighting є частиною більшої платформи Cisco Kinetic for Cities, що дозволяє централізовано керувати як системами освітлення, так і іншими компонентами міської інфраструктури. Нарешті, Flashnet inteliLIGHT представляє модульну IoT-платформу з широким API для інтеграції та підтримкою великої кількості протоколів зв'язку.

Беручи до уваги технічні, функціональні та економічні вимоги, доцільним є вибір IoT-платформи, що забезпечує оптимальний баланс між відкритістю, функціональністю та економічною доцільністю. Особливу увагу слід приділяти здатності платформи до подальшого розвитку, підтримці алгоритмів машинного

навчання для побудови адаптивних стратегій управління, а також її відповідності сучасним вимогам інформаційної безпеки.

Таким чином, у межах даного проєкту доцільно розглядати відкриті або гібридні IoT-платформи з підтримкою NB-IoT та LoRaWAN, що дозволить сформувати гнучку, масштабовану та інтегровану архітектуру системи автоматичного керування вуличним освітленням у складі сучасної міської цифрової інфраструктури.

У результаті аналізу встановлено, що для побудови ефективної системи автоматичного керування вуличним освітленням доцільно обирати IoT-платформи з підтримкою масштабованої архітектури, відкритих стандартів та можливостей інтеграції алгоритмів машинного навчання.

Найбільш перспективними є відкриті або гібридні рішення з підтримкою NB-IoT та LoRaWAN, які забезпечують гнучкість, енергоефективність та високу безпеку в умовах розподіленої міської інфраструктури.

### 2.3 Вибір та обґрунтування обладнання

При розробці прототипу інтелектуальної системи керування вуличним освітленням, що базується на технологіях Інтернету речей (IoT) та алгоритмах машинного навчання, вибір апаратної платформи та сенсорного обладнання здійснювався з урахуванням вимог до енергоефективності, гнучкості інтеграції, відкритості програмної екосистеми та низької вартості впровадження, що є особливо важливим у сценаріях розумного міста.

На графіку (рис. 2.9) зображено порівняння споживання електроенергії вуличною системою освітлення за класичного керування (на основі таймера) та інтелектуального керування (на основі IoT та машинного навчання) протягом одного тижня. Класична система демонструє стабільно високе споживання енергії, що в середньому становить близько 100–110 кВт·год на добу.

Це пов'язано з тим, що освітлення вмикається за фіксованим розкладом незалежно від умов середовища (наприклад, наявності руху чи рівня освітленості).

Натомість інтелектуальна система керування забезпечує динамічне вмикання освітлення лише за необхідності, що призводить до значного зниження енергоспоживання – в середньому на 35–45%. Зменшення є особливо помітним у будні дні, коли рух менший або погодні умови дозволяють обмежити тривалість роботи освітлення. Ці результати підтверджують ефективність запропонованої системи та доцільність її впровадження в рамках концепції "розумного міста".

У процесі розробки системи автоматичного керування вуличним освітленням важливим етапом є вибір мікроконтролера, що виступає основою апаратної платформи IoT-вузлів. Від характеристик мікроконтролера залежить не лише продуктивність обробки даних і виконання алгоритмів машинного навчання, а й енергоспоживання, гнучкість інтеграції у бездротову інфраструктуру та загальна економічна доцільність рішення. Для обґрунтування вибору було проведено порівняльний аналіз п'яти популярних мікроконтролерів (рис. 2.10), що активно застосовуються в IoT-проектах: ESP32, STM32F103, Arduino Uno, Raspberry Pi Pico та CC2652. Порівняння здійснювалося за трьома ключовими критеріями: обчислювальна потужність, енергоефективність та можливості бездротового зв'язку.

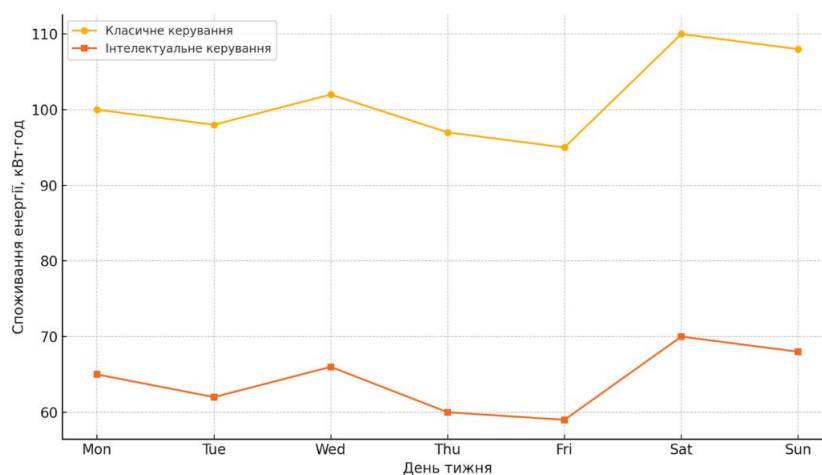


Рисунок 2.9 – Графік порівняння споживання електроенергії системами освітлення

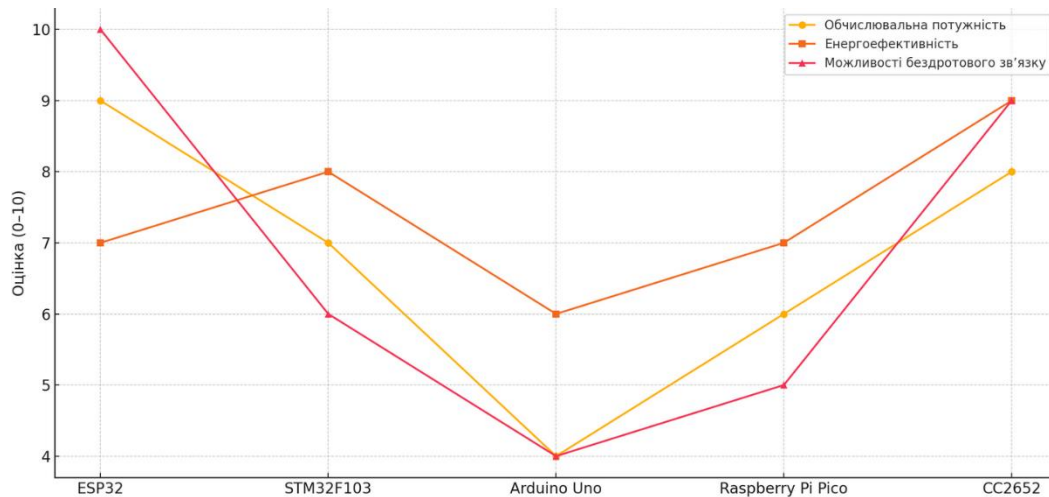


Рисунок 2.10 – Графік порівняння мікроконтролерів за ключовими характеристиками

Графік (рис. 2.10) показує, що мікроконтролер ESP32 вирізняється високими показниками за всіма ключовими характеристиками, зокрема в сфері бездротових комунікацій, що забезпечується наявністю вбудованих модулів Wi-Fi та Bluetooth. STM32F103 демонструє добру обчислювальну продуктивність і енергоефективність, проте потребує додаткових модулів для реалізації бездротового зв'язку. Arduino Uno, незважаючи на найнижчу продуктивність серед розглянутих рішень та відсутність вбудованої підтримки бездротової передачі даних, залишається популярним завдяки своїй простоті та широкій спільноті користувачів. Raspberry Pi Pico є технічно збалансованим варіантом, однак також не має вбудованих засобів для бездротового зв'язку. У свою чергу, CC2652 демонструє найвищу енергоефективність і чудові можливості для роботи в бездротових мережах завдяки підтримці протоколів ZigBee, Thread та IEEE 802.15.4.

В ході дослідження також проводилось порівняння п'яти датчиків освітленості (рис. 2.11): BH1750, TSL2561, MAX44009, APDS-9301 та VEML7700 – за двома ключовими параметрами: ціна (USD) та максимальний діапазон вимірювання освітленості (люкс).

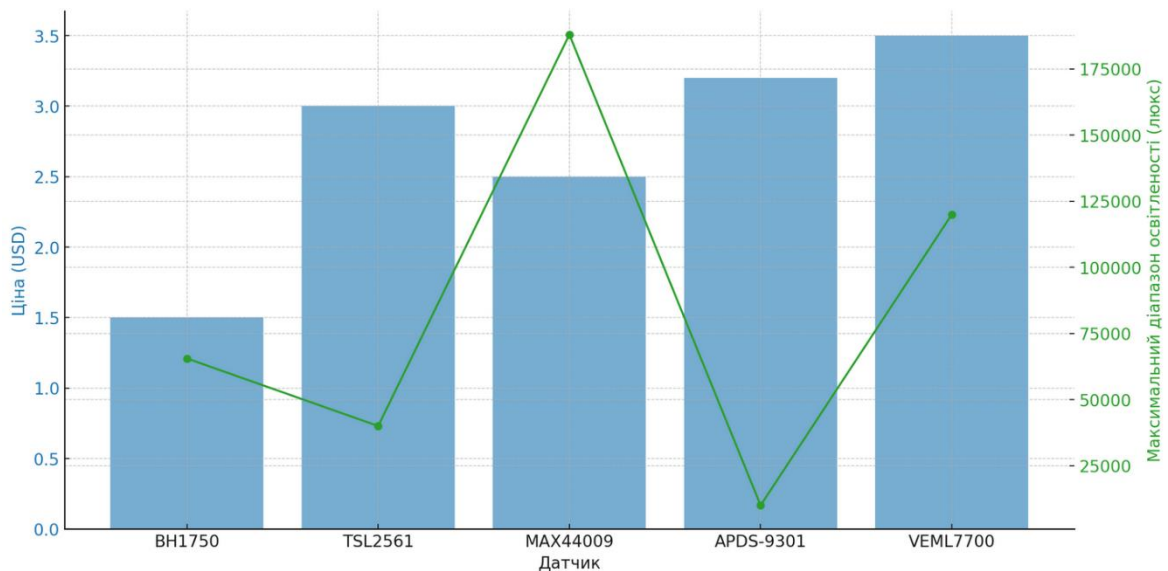


Рисунок 2.11 – Графік порівняння датчиків освітленості за ключовими характеристиками

Датчик BH1750 вирізняється найнижчою вартістю серед розглянутих аналогів – приблизно 1,5 USD, при цьому забезпечує доволі широкий діапазон вимірювання освітленості до 65535 люкс. Це робить його особливо привабливим для економічно ефективних рішень у сфері Інтернету речей. Інші сенсори, хоча й можуть забезпечувати вищу точність або мати розширені діапазони вимірювання, є суттєво дорожчими. Такий ціновий фактор може виявитися критичним при розгортанні масштабних мереж сенсорів у міському середовищі. Отже, BH1750 є доцільним вибором для побудови бюджетної, але функціонально повноцінної системи інтелектуального керування вуличним освітленням.

Датчик HC-SR501 є одним із найпоширеніших рішень для виявлення руху в бюджетних автоматизованих системах. Його орієнтовна вартість становить менше 1 USD (рис. 2.12), що робить його надзвичайно привабливим для проектів з обмеженим фінансуванням. При цьому сенсор забезпечує стабільне виявлення руху в межах до 7 метрів з кутом огляду близько 120°, що є цілком достатнім для типових задач вуличного або побутового освітлення. Хоча на ринку існують більш точні або енергоефективні датчики, їх вартість значно вища, а функціональність не завжди є критично важливою для простих систем виявлення присутності. Таким

чином, HC-SR501 є оптимальним вибором для недорогих і простих у реалізації IoT-систем керування освітленням.

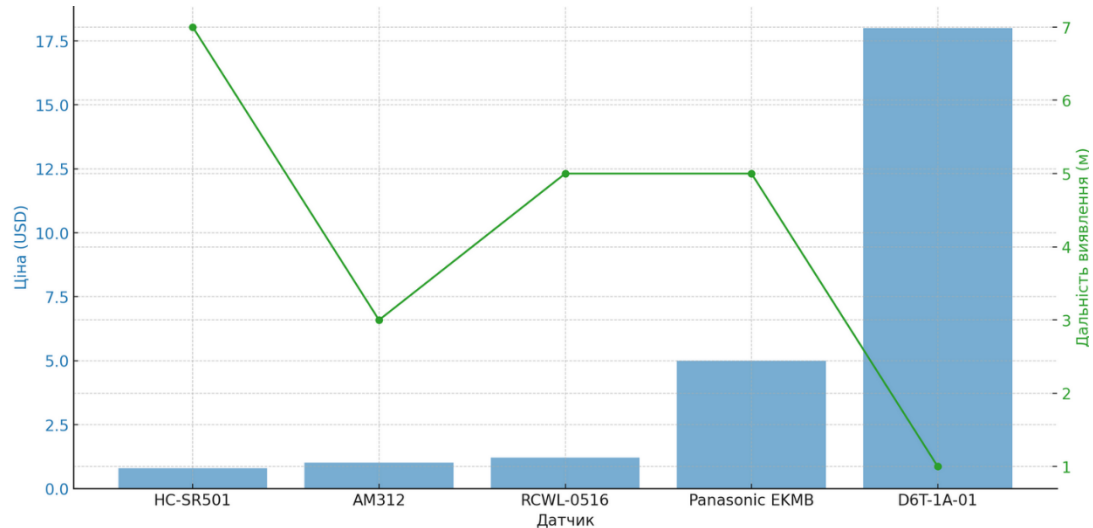


Рисунок 2.12 – Графік порівняння датчиків руху за ціною та дальністю виявлення

У результаті аналізу вимог до апаратної частини інтелектуальної системи керування вуличним освітленням було обґрунтовано доцільність використання у якості базової апаратної платформи мікроконтролера ESP32 у поєднанні з сенсорами BH1750 та HC-SR501. Мікроконтролер ESP32 забезпечує високу обчислювальну продуктивність, низьке енергоспоживання та інтегровану підтримку бездротових комунікацій (Wi-Fi, Bluetooth), що дозволяє реалізувати як автономні, так і мережеві вузли у складі розподіленої системи. Сенсор BH1750 забезпечує високоточне вимірювання рівня освітленості, що є ключовим параметром для реалізації адаптивного алгоритму керування освітленням. Використання сенсора HC-SR501 дозволяє додатково враховувати фактор присутності руху у контрольованій зоні, підвищуючи гнучкість і адаптивність системи. Обрана конфігурація апаратної платформи забезпечила необхідний баланс між функціональністю, енергоефективністю та економічною доцільністю, що було підтверджено результатами експериментального тестування. Таким чином, отримані результати демонструють перспективність застосування даного

апаратного рішення у складі систем розумного міста та створюють підґрунтя для подальшого розвитку більш масштабних і функціонально насичених систем автоматизованого керування міською інфраструктурою.

## 2.4 Хмарний сервіс

Ефективне функціонування системи інтелектуального керування вуличним освітленням, побудованої на основі технологій Інтернету речей (IoT), вимагає наявності надійної інфраструктури для обміну даними та зберігання інформації. Ключовими елементами такої інфраструктури є протокол передачі повідомлень між сенсорними вузлами та центральними серверами, а також система зберігання та обробки часових рядів, що дозволяє накопичувати та аналізувати великі обсяги даних у режимі реального часу.

У цьому контексті особливу увагу слід приділяти вибору легковагового MQTT-брокера для забезпечення стабільного та енергоефективного обміну даними в IoT-середовищі, а також оптимальної бази даних для роботи з часовими рядами, що відповідає специфічним вимогам систем такого класу.

У даній роботі було обґрунтовано використання MQTT-брокера Mosquitto (рис. 2.13) та бази даних InfluxDB (рис. 2.14) як найбільш придатних рішень для прототипу інтелектуальної системи керування освітленням. Подальший аналіз порівнює ці рішення з альтернативними технологіями за ключовими критеріями ефективності та практичної застосовності у IoT-проєктах.

Цей протокол працює за моделлю "публікатор–підписник" і оптимізований для середовищ з обмеженими ресурсами, що робить його ідеальним вибором для IoT-систем. Mosquitto забезпечує стабільний та малозатратний обмін даними між сенсорними вузлами та центральним сервером, дозволяючи ефективно передавати інформацію про рівень освітленості, наявність руху або інші параметри. Завдяки своїй простоті, кросплатформеності та підтримці популярних мов програмування, таких як Python та C/C++, Mosquitto легко інтегрується з мікроконтролерами

ESP32, хмарними платформами та середовищами візуального програмування, зокрема Node-RED.

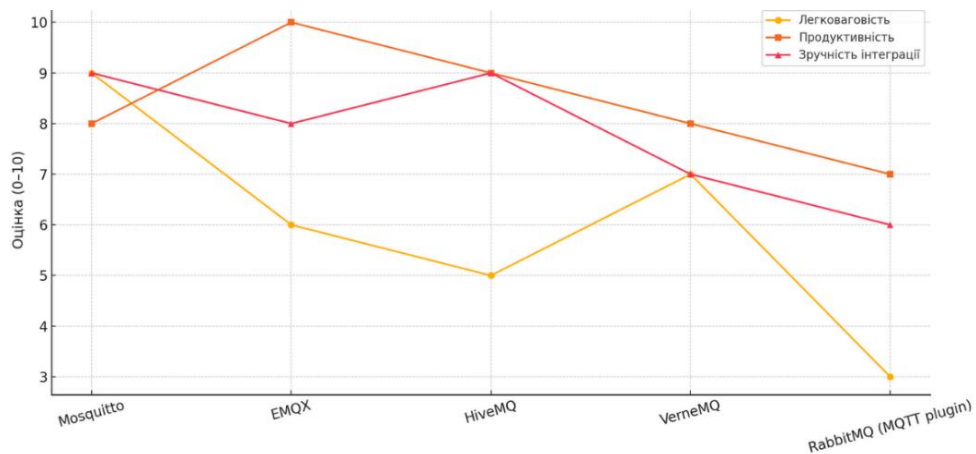


Рисунок 2.13 – Графік порівняння MQTT-брокерів за ключовими характеристиками

Його використання значно спрощує розгортання розподіленої IoT-інфраструктури в системі інтелектуального керування вуличним освітленням. MQTT-брокер Mosquitto вирізняється високою легковаговістю та простотою інтеграції, що робить його особливо зручним для використання у вбудованих системах і на малопотужних пристроях.

У свою чергу, RabbitMQ, хоча й підтримує MQTT через додатковий логін, менш ефективно оптимізований для типових сценаріїв IoT, що може обмежувати його застосування у вузькоспеціалізованих проектах.

На графіку (рис. 2.14) показано порівняння п'яти баз даних – InfluxDB, TimescaleDB, Prometheus, MongoDB, MySQL – за трьома критеріями, важливими для застосування в IoT-системах з часовими рядами: продуктивність, гнучкість моделі даних та простота використання.

На графіку (рис. 2.14) представлено порівняльний аналіз п'яти популярних баз даних – InfluxDB, TimescaleDB, Prometheus, MongoDB та MySQL – за трьома

ключовими критеріями, які мають важливе значення при використанні у IoT-системах з часовими рядами.

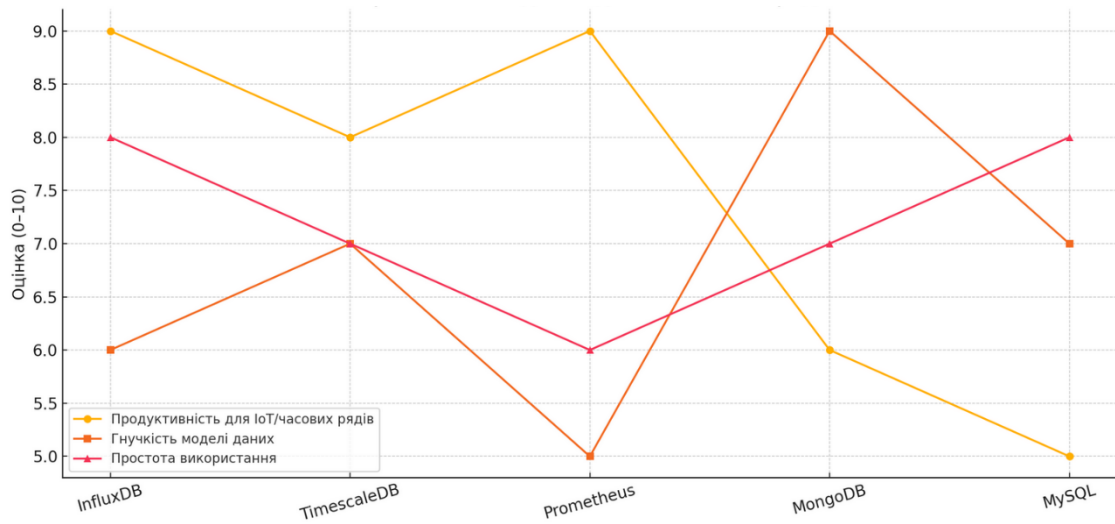


Рисунок 2.14 – Графік порівняння баз даних для рішень IoT

До таких критеріїв віднесено продуктивність при обробці великих обсягів даних у форматі time-series, гнучкість моделі даних, що дозволяє ефективно структурувати, агрегувати та аналізувати різномірну інформацію з IoT-пристроїв, а також простоту використання, що включає легкість розгортання, налаштування та інтеграції бази даних у загальну архітектуру системи.

Як видно з аналізу, InfluxDB демонструє високу продуктивність при роботі з часовими рядами завдяки оптимізованому рушію, спеціально спроектованому для time-series data. Вона також забезпечує гнучку модель зберігання та має простий у використанні інтерфейс, що робить її дуже зручною для розробників IoT-рішень. TimescaleDB, що є розширенням для PostgreSQL, забезпечує високу гнучкість моделі даних та добру інтеграцію з наявними SQL-інструментами, хоча поступається InfluxDB за продуктивністю у сценаріях з надвеликими обсягами time-series data.

Prometheus орієнтований, передусім, на моніторинг систем у режимі реального часу, тому його продуктивність при обробці оперативних часових рядів є дуже високою.

Проте, модель зберігання даних у ньому є менш універсальною для загальних IoT-систем. MongoDB, як документо-орієнтована NoSQL база, пропонує високу гнучкість моделі даних, однак для обробки time-series потребує додаткових оптимізацій і не забезпечує такої ефективності як спеціалізовані рішення. MySQL, хоча й підтримує роботу з часовими рядами, поступається іншим платформам як за продуктивністю, так і за зручністю інтеграції у типові архітектури IoT-систем.

Таким чином, InfluxDB і TimescaleDB є найбільш збалансованими рішеннями для використання у системах інтелектуального керування вуличним освітленням та інших подібних IoT-проектах, де потрібна обробка та аналіз великих обсягів даних у форматі часових рядів у реальному часі.

Розгортання ефективної системи інтелектуального керування вуличним освітленням вимагає створення надійної хмарної інфраструктури, яка забезпечує стабільний обмін даними, зберігання великого обсягу часових рядів та гнучкі можливості аналітики для прийняття управлінських рішень у режимі реального часу.

Вибір відповідних інструментів для організації комунікаційного рівня та рівня зберігання даних є ключовим фактором, що впливає на загальну ефективність, масштабованість і енергоефективність IoT-систем.

У даній роботі було обґрунтовано використання легковагового MQTT-брокера Mosquitto, що реалізує протокол "публікатор–підписник" і оптимізований для середовищ з обмеженими ресурсами.

Завдяки своїй простоті, кросплатформеності та низькому навантаженню на мережу, Mosquitto забезпечує стабільний та мало затратний обмін даними між сенсорними вузлами та центральним сервером.

Порівняння з альтернативними рішеннями (зокрема RabbitMQ) показало, що Mosquitto є найбільш ефективним вибором для типових сценаріїв IoT-систем автоматичного керування вуличним освітленням.

Аналіз п'яти популярних баз даних для роботи з часовими рядами (InfluxDB, TimescaleDB, Prometheus, MongoDB, MySQL), представлений у даному розділі, підтвердив, що спеціалізовані рішення InfluxDB та TimescaleDB забезпечують оптимальне поєднання високої продуктивності, гнучкості моделі даних та простоти використання, що робить їх найкращими кандидатами для використання у подібних IoT-проектах. Інші розглянуті бази даних мають певні переваги в окремих аспектах, однак у контексті системи, що працює з великими потоками time-series data у реальному часі, InfluxDB демонструє найбільш збалансовані характеристики.

Таким чином, запропонована у даній кваліфікаційній роботі хмарна архітектура на базі Mosquitto та InfluxDB забезпечує високу ефективність, гнучкість масштабування та енергоефективність, що повністю відповідає вимогам до сучасних IoT-систем керування вуличним освітленням.

Отримані результати підтверджують доцільність використання такого підходу у проектах розумного міста та створюють підґрунтя для подальшого розвитку комплексних систем автоматизованого міського керування.

## 2.5 Технології машинного навчання в автоматичному керуванні

Застосування технологій машинного навчання (ML) у системах автоматичного керування вуличним освітленням відкриває широкі можливості для реалізації адаптивних, прогностичних та енергоефективних стратегій управління, які враховують динаміку навколишнього середовища та потреби міської інфраструктури у режимі реального часу.

На відміну від традиційних систем, що базуються на фіксованих сценаріях або простих порогових алгоритмах, моделі машинного навчання дозволяють аналізувати великі обсяги історичних та поточних даних (рівень освітленості, наявність руху, погодні умови, час доби тощо), виявляти приховані закономірності та здійснювати прогнозування майбутніх станів системи.

Це дає змогу динамічно адаптувати роботу освітлення, знижуючи енергоспоживання без шкоди для безпеки та комфорту мешканців.

У рамках даної роботи було використано одну з найбільш популярних технологій машинного навчання – алгоритм Random Forest (рис. 2.15), що належить до класу ансамблевих методів навчання з учителем.

Цей алгоритм добре підходить для завдань класифікації та регресії у системах з великою кількістю змінних та нелінійними залежностями між ними.

Використання Random Forest дало змогу розробити прогностичну модель для прийняття рішень щодо вмикання або вимикання освітлення, яка враховує поточний стан середовища. Це забезпечило високу точність роботи системи, навіть в умовах змінної динаміки міського середовища.

Крім Random Forest, перспективними напрямками для подальшого розвитку є використання таких технологій машинного навчання, як:

- рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM) – для прогнозування патернів руху та рівня освітленості у часових рядах;
- алгоритми підкріплення (Reinforcement Learning) – для навчання оптимальної стратегії управління освітленням у змінному середовищі;
- кластеризаційні методи (K-Means, DBSCAN) – для виявлення типових режимів поведінки системи та їх автоматичної оптимізації;
- алгоритми виявлення аномалій – для автоматичного виявлення несправностей у мережі освітлення або некоректної роботи сенсорів.

Використання таких технологій дозволяє будувати самонавчальні та адаптивні системи, які не тільки реагують на поточний стан середовища, а й здатні прогнозувати його зміну та оптимізувати власну поведінку у перспективі.

Таким чином, технології машинного навчання виступають невід'ємною складовою сучасних IoT-систем автоматичного керування, забезпечуючи їх високу ефективність, гнучкість та інтелектуальність.

Подальший розвиток цих технологій сприятиме створенню більш автономних і стійких міських інфраструктур, що відповідають концепції Smart City.

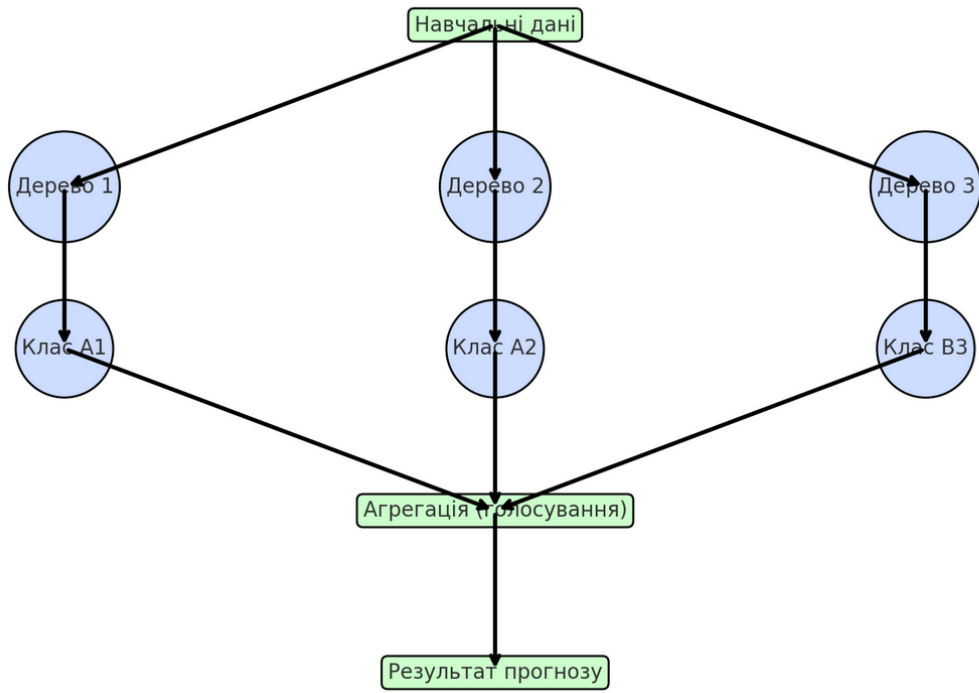


Рисунок 2.15 – Алгоритм Random Forest для автоматичного керування освітленням

## 3 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІoT-СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВУЛИЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ

### 3.1 Опис вибраної моделі

У рамках розробленої інтелектуальної ІoT-системи керування вуличним освітленням була реалізована модульна архітектура, що забезпечує гнучкість, масштабованість та інтеграцію різноманітних компонентів. Структурна схема системи зображена на рис. 3.1.

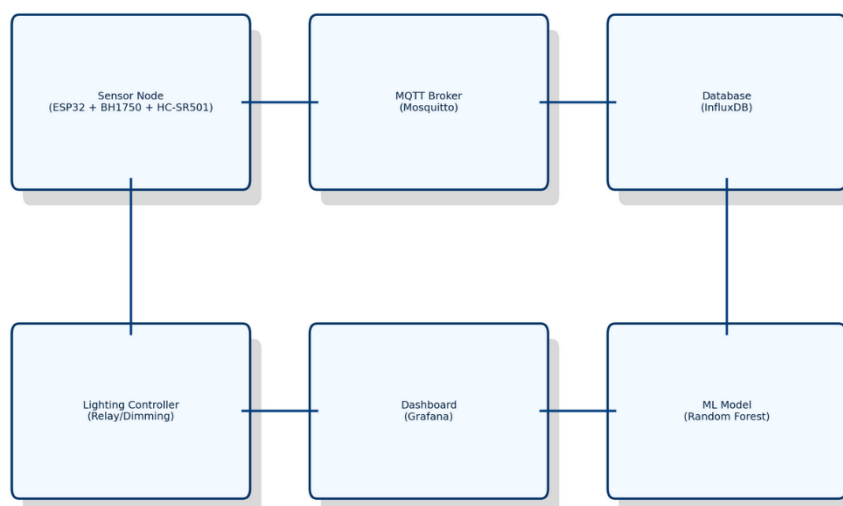


Рисунок 3.1 – Архітектура інтелектуальної системи керування  
вуличним освітленням

Вузол збору даних складається з мікроконтролера ESP32, до якого підключено датчик освітленості BH1750 та інфрачервоний датчик руху HC-SR501. Вузол здійснює безперервний моніторинг навколишнього середовища та передає дані за допомогою протоколу MQTT. Для обміну даними між сенсорними вузлами, серверними компонентами та контролерами освітлення використовується MQTT-брокер Mosquitto, що реалізує модель "публікатор–підписник". Це забезпечує ефективну та надійну передачу даних навіть у мережах з обмеженою пропускнуою здатністю. Усі зібрані дані зберігаються у базі даних InfluxDB, яка оптимізована

для роботи з часовими рядами. Це дозволяє ефективно зберігати історію змін параметрів середовища та використовувати її для навчання моделей машинного навчання. На основі історичних даних у системі було навчено модель машинного навчання Random Forest. Ця модель використовується для прогнозування оптимального режиму роботи освітлення з урахуванням поточних умов – рівня освітленості, наявності руху та часу доби.

Завдяки високій точності та стійкості до переобучення Random Forest було вибрано як основний алгоритм для задачі класифікації. Для візуалізації стану системи та аналізу зібраних даних використовується платформа Grafana.

Веб-інтерфейс дозволяє у реальному часі відстежувати параметри середовища, стан контролерів освітлення та прогнозні рішення моделі машинного навчання. Відповідно до рішень моделі ML, контролери освітлення (на базі реле або модулів димування) керують вуличними світильниками. Це дозволяє динамічно регулювати рівень освітлення, мінімізуючи енергоспоживання без шкоди для безпеки.

Дані про стан середовища (освітленість, рух) передаються сенсорними вузлами через MQTT-брокер до центрального сервера, де вони зберігаються в InfluxDB та аналізуються моделлю Random Forest. На основі прогнозу моделі та заданих політик система визначає оптимальний режим роботи освітлення (вмикання/вимикання/димування), після чого відповідна команда передається до контролера освітлення.

Запропонована модель дозволяє легко масштабувати систему, як за кількістю сенсорних вузлів, так і за кількістю контролерів освітлення. Завдяки використанню архітектури з розподіленими вузлами та централізованим обробленням даних система може бути адаптована для застосування як на невеликій вулиці, так і на рівні цілого міського району без необхідності суттєвих змін у програмному забезпеченні.

Усі ключові компоненти системи базуються на відкритих стандартах та програмних рішеннях з відкритим вихідним кодом. Це забезпечує не лише прозорість та контроль за роботою системи, але й дає можливість інтегрувати її з

іншими елементами інфраструктури розумного міста без прив'язки до конкретних виробників чи комерційних платформ.

Алгоритм Random Forest забезпечує високу точність прогнозування завдяки використанню ансамблю рішень множини дерев рішень, що знижує ризик перенавчання та підвищує стійкість моделі до змінних умов.

Це дозволяє системі приймати більш обґрунтовані рішення щодо режиму роботи освітлення, враховуючи складні залежності між факторами, такими як рівень освітленості, рух та час доби.

Архітектура системи передбачає легку інтеграцію з іншими компонентами концепції "Smart City" – такими, як системи управління дорожнім рухом, екологічний моніторинг або безпекові сервіси.

Завдяки відкритим інтерфейсам (MQTT API, REST API) та стандартизованим форматам даних система може виступати як частина більш широкої екосистеми міського управління.

Використання широко підтримуваного апаратного та програмного забезпечення (ESP32, Mosquitto, InfluxDB, Grafana) значно спрощує процес розгортання системи навіть для невеликих муніципалітетів з обмеженими ІТ-ресурсами.

Крім того, централізована структура управління та можливість віддаленого моніторингу дозволяють мінімізувати витрати на обслуговування та забезпечують оперативне оновлення програмного забезпечення.

Таким чином, обрана модель поєднує у собі передові підходи до побудови IoT-систем із використанням алгоритмів машинного навчання, що забезпечує високу ефективність керування вуличним освітленням.

Її гнучкість, відкритість та здатність до інтеграції створюють підґрунтя для подальшого розвитку системи в рамках концепції "розумного міста" та розширення її функціональності для нових сценаріїв застосування.

## 3.2 Архітектура розробленої системи

### 3.2.1 Загальна структурна схема системи

Розроблена інтелектуальна IoT-система керування вуличним освітленням має модульну архітектуру, яка забезпечує ефективний збір, передачу, зберігання та аналіз даних для прийняття рішень у реальному часі. Загальна структурна схема системи наведена на рис. 3.2.

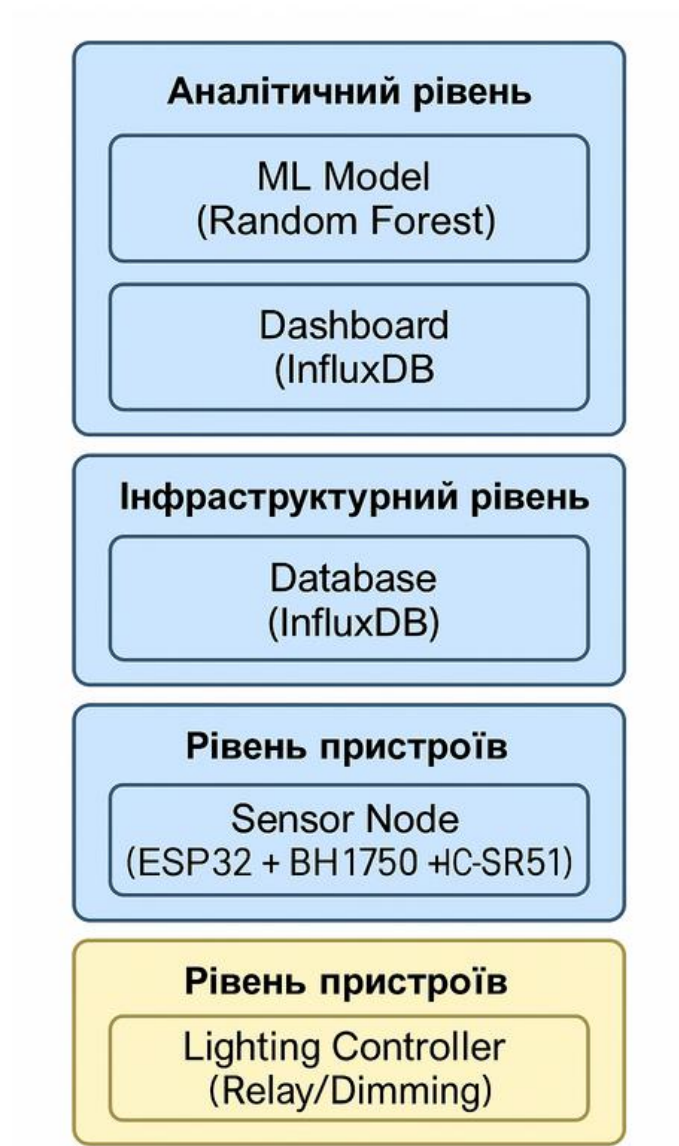


Рисунок 3.2 – Загальна структурна схема системи

На нижньому рівні системи функціонують сенсорні вузли на базі мікроконтролера ESP32, оснащені датчиком освітленості BH1750 та інфрачервоним датчиком руху HC-SR501. Ці вузли безперервно моніторять параметри навколишнього середовища та передають зібрані дані через протокол MQTT до центрального MQTT-брокера Mosquitto.

MQTT-брокер виступає посередником між сенсорними вузлами, серверною частиною системи та контролерами освітлення. Завдяки використанню моделі "публікатор–підписник" забезпечується гнучка та масштабована передача даних з мінімальними затримками.

На серверному рівні дані з MQTT-брокера зберігаються у базі даних InfluxDB, що оптимізована для обробки часових рядів. Збережені історичні дані використовуються для навчання та оновлення моделі машинного навчання (Random Forest), яка здійснює прогнозування оптимального режиму роботи освітлення.

Результати роботи моделі передаються на контролери освітлення, які реалізують безпосереднє керування вуличними світильниками через реле або системи димування (плавного регулювання яскравості). Це дозволяє автоматично адаптувати рівень освітлення залежно від реальних умов.

Для адміністрування та моніторингу системи використовується веб-інтерфейс Grafana, що забезпечує візуалізацію як поточних, так і історичних даних, а також дає змогу контролювати стан системи в реальному часі.

Таким чином, запропонована архітектура дозволяє ефективно об'єднати апаратні засоби збору даних, сервіси аналітики та програмні компоненти для реалізації автономної та енергоефективної системи керування вуличним освітленням.

### 3.2.2 Взаємодія апаратних та програмних компонентів

Розроблена IoT-система керування вуличним освітленням реалізує чітку взаємодію між апаратними та програмними компонентами, що забезпечує

безперервний цикл збору, обробки, аналізу та використання даних для прийняття рішень.

На апаратному рівні сенсорні вузли, побудовані на мікроконтролерах ESP32, забезпечують збір первинних даних з навколишнього середовища. Зокрема, датчик освітленості BH1750 вимірює рівень природного світла, а інфрачервоний датчик руху HC-SR501 фіксує наявність руху в зоні спостереження. Ці дані обробляються локально мікроконтролером та передаються по протоколу MQTT до серверної частини системи.

Взаємодія між апаратними вузлами і програмними компонентами реалізована через MQTT-брокер Mosquitto (рис. 3.3). Цей брокер отримує дані від численних сенсорних вузлів і маршрутизує їх до відповідних підписників – зокрема, до модуля збору даних, бази даних та модуля аналітики. Протокол MQTT, завдяки своїй легковаговості та підтримці QoS-рівнів, гарантує ефективний обмін даними навіть у мережах з нестабільною пропускнуою спроможністю.

Програмні компоненти серверної частини включають базу даних InfluxDB, де зберігаються часові ряди з параметрами навколишнього середовища. Ці історичні дані використовуються для побудови та періодичного оновлення моделі машинного навчання на основі алгоритму Random Forest. Прогнозна модель аналізує як поточні, так і накопичені дані для визначення оптимального режиму роботи вуличного освітлення.

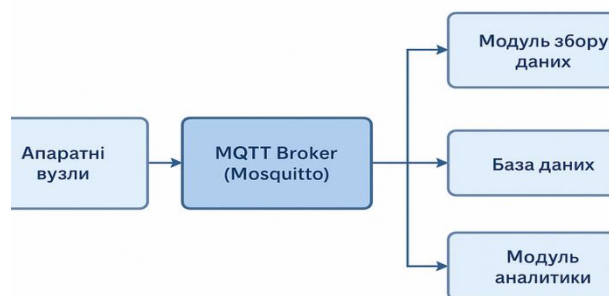


Рисунок 3.3 – Взаємодія між апаратними вузлами і програмними компонентами

Реалізація взаємодії між апаратними вузлами і програмними компонентами реалізована через MQTT-брокер представлена у вигляді фрагментом коду для ESP32 для відправлення даних на Mosquitto:

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
// Дані Wi-Fi
const char* ssid = "YOUR_WIFI_SSID";
const char* password = "YOUR_WIFI_PASSWORD";

// Дані MQTT
const char* mqtt_server = "YOUR_MQTT_BROKER_IP"; // IP Mosquitto
брокера
const int mqtt_port = 1883;
const char* mqtt_topic = "streetlighting/sensor_data";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

void setup_wifi() {
  delay(10);
  Serial.println();
  Serial.print("Connecting to ");
  Serial.println(ssid);

  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
}
```

```
Serial.println("");
Serial.println("WiFi connected");
Serial.println("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
}

void reconnect() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print("Attempting MQTT connection...");
    if (client.connect("ESP32Client")) {
      Serial.println("connected");
    } else {
      Serial.print("failed, rc=");
      Serial.print(client.state());
      Serial.println(" try again in 5 seconds");
      delay(5000);
    }
  }
}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  setup_wifi();
  client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);
}

void loop() {
  if (!client.connected()) {
    reconnect();
  }
}
```

```

client.loop();

// Приклад даних (імітація датчика освітленості і руху)
float light_level = 123.45; // Наприклад, BH1750 lux
int motion_detected = 1; // HC-SR501 (1 або 0)

// Формування JSON рядка
String payload = "{\"light\":" + String(light_level) + ", \"motion\":" +
String(motion_detected) + "}";

// Публікація даних
client.publish(mqtt_topic, (char*) payload.c_str());

Serial.print("Published: ");
Serial.println(payload);

delay(5000); // Затримка 5 секунд
}

```

Також приведемо приклад отримання даних на сервері:

```

import paho.mqtt.client as mqtt
import json

# Колбек на отримання повідомлення
def on_message(client, userdata, msg):
    print(f"Received message on topic {msg.topic}: {msg.payload.decode()}")
    try:
        data = json.loads(msg.payload.decode())
        print(f"Light level: {data['light']} lux, Motion: {data['motion']}")
    except Exception as e:
        print(f"Error parsing JSON: {e}")

```

```
# Підключення до брокера
client = mqtt.Client()
client.on_message = on_message

client.connect("YOUR_MQTT_BROKER_IP", 1883, 60)
client.subscribe("streetlighting/sensor_data")

client.loop_forever()
```

ESP32 виступає публікатором (publisher), який періодично надсилає дані про стан сенсорів у тему MQTT streetlighting/sensor\_data. Серверна програма підписується на цю тему та отримує нові повідомлення для збереження у базу даних та подальшої аналітики.

На підставі рішень моделі ML у реальному часі формуються керуючі команди, які передаються через MQTT-брокер до контролерів освітлення (Lighting Controller). Ці контролери керують вуличними світильниками, вмикаючи або вимикаючи їх, а також змінюючи рівень яскравості за допомогою реле або систем димування.

Всі етапи роботи системи відображаються у веб-інтерфейсі на базі Grafana, що забезпечує інтерактивну візуалізацію даних у режимі реального часу, дозволяючи операторам моніторити стан системи та аналізувати її ефективність.

Таким чином, взаємодія апаратних та програмних компонентів системи побудована за модульною та масштабованою архітектурою, що забезпечує гнучкість, надійність та високу ефективність управління вуличним освітленням.

### 3.2.3 Модель передачі даних

У запропонованій системі інтелектуального керування вуличним освітленням побудовано модульну модель передачі даних, що базується на архітектурі публікатор–підписник, реалізованій за допомогою протоколу MQTT.

Такий підхід забезпечує гнучкий і масштабований обмін даними між численними сенсорними вузлами, серверними компонентами та виконавчими пристроями.

Публікатори (publishers) – апаратні сенсорні вузли (ESP32 + BH1750 + HC-SR501), що формують телеметричні повідомлення з даними про стан навколишнього середовища (освітленість, наявність руху) та передають їх у визначені теми MQTT.

Брокер MQTT (Mosquitto) – центральний компонент моделі передачі даних, який приймає повідомлення від публікаторів та розповсюджує їх до підписників. Брокер виконує роль посередника, ізолюючи відправників даних від отримувачів, що спрощує архітектуру системи та підвищує її стійкість.

Підписники (subscribers) – серверні модулі збору даних (запис у базу даних InfluxDB), модуль машинного навчання (обробка та аналіз даних), контролери освітлення (Lighting Controller), а також інформаційна панель Grafana для візуалізації.

Дані передаються у вигляді JSON-структур у відповідних темах MQTT. Приклад структури повідомлення:

```
{  
  "timestamp": "2025-05-06T15:42:10Z",  
  "sensor_id": "node_01",  
  "light": 125.6,  
  "motion": 1  
}
```

Передача даних у розробленій системі інтелектуального керування вуличним освітленням базується на використанні моделі публікатор–підписник, що реалізована за допомогою протоколу MQTT. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективний обмін інформацією між різними компонентами системи – сенсорними вузлами, брокером, серверною частиною, модулем машинного навчання та виконавчими пристроями.

У системі використовується чітка структура тем MQTT, яка визначає логіку маршрутизації даних. Зокрема, тема `streetlighting/sensor_data` використовується для передавання показників освітленості та руху від сенсорних вузлів. Тема `streetlighting/control_commands` призначена для відправлення керуючих команд до контролерів освітлення, що дозволяє вмикати, вимикати або змінювати яскравість світильників. Через тему `streetlighting/status_updates` здійснюється моніторинг стану виконавчих пристроїв, а у темі `streetlighting/alerts` передаються сигнали про аномальні ситуації, такі як вихід з ладу окремих елементів системи.

Процес передачі даних у системі побудовано у вигляді послідовних потоків. Спочатку сенсорні вузли періодично вимірюють параметри навколишнього середовища та публікують результати у тему `streetlighting/sensor_data`. Далі підписник на сервері отримує ці повідомлення та зберігає дані у базі часових рядів InfluxDB для подальшого аналізу. Модуль машинного навчання періодично витягує актуальні дані з бази та формує прогноз оптимального режиму роботи освітлення. На основі отриманого прогнозу модуль ML генерує відповідні керуючі команди, які публікуються у тему `streetlighting/control_commands`. Контролери освітлення, підписані на цю тему, приймають команди та виконують необхідні дії. Паралельно підсистема візуалізації (Grafana) підписана на відповідні теми або безпосередньо працює з базою InfluxDB для відображення як поточних даних, так і історичних трендів у зручному для оператора форматі.

Використана модель передачі даних має ряд важливих переваг. По-перше, асинхронний обмін повідомленнями дозволяє сенсорним вузлам працювати незалежно від стану підписників, що підвищує стійкість системи. По-друге, модель забезпечує високу масштабованість – нові сенсорні вузли або сервіси можуть бути легко додані без необхідності змінювати вже наявні компоненти. По-третє, протокол MQTT оптимізований для роботи у середовищах з обмеженими ресурсами, забезпечуючи мінімальне споживання мережевої пропускної здатності та енергії. Нарешті, гнучкість моделі забезпечується можливістю маршрутизації різних типів даних за окремими темами, що дозволяє ефективно розмежовувати функціональні потоки інформації у системі.

Сенсорні вузли здійснюють вимірювання параметрів навколишнього середовища (освітленість, рух) та публікують відповідні дані у тему `streetlighting/sensor_data` через MQTT-брокер. Отримані дані зберігаються у базі даних InfluxDB для подальшого аналізу.

Для моніторингу та візуалізації стану системи використовується інформаційна панель Grafana, яка читає дані як з InfluxDB, так і безпосередньо з тем MQTT. Така архітектура забезпечує повний замкнутий цикл обробки даних та керування у системі, дозволяючи досягти високої ефективності та гнучкості.

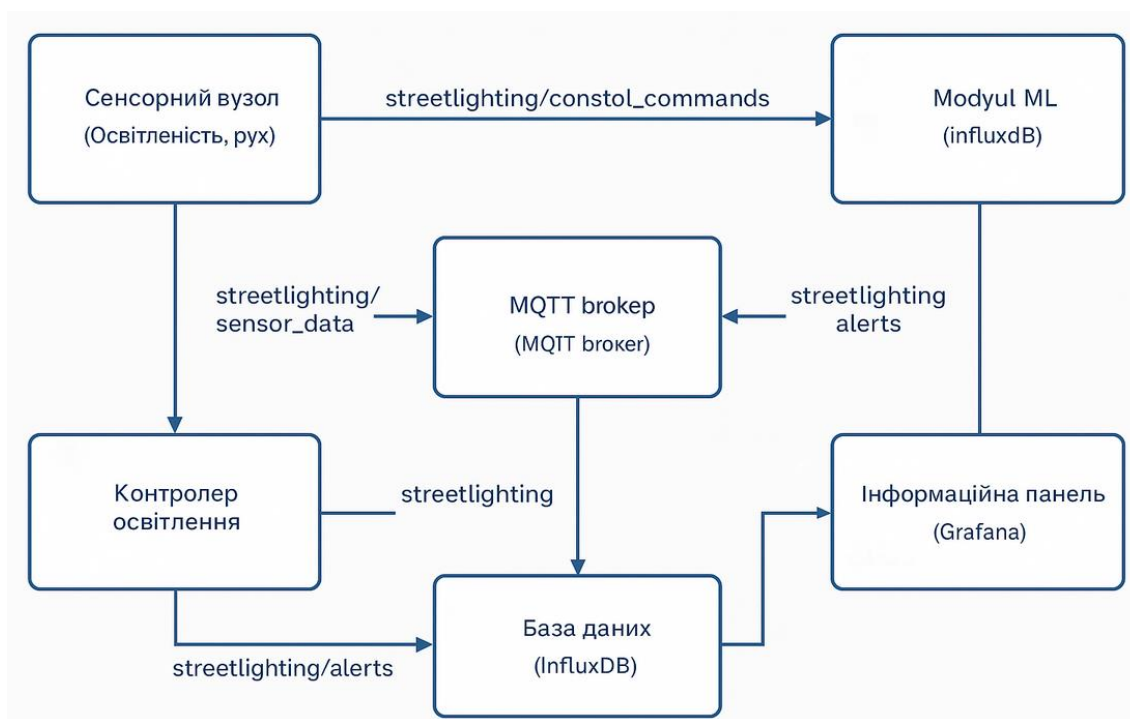


Рисунок 3.4 – Модель передачі даних у системі інтелектуального керування вуличним освітленням

Модуль машинного навчання (ML), використовуючи історичні дані з бази, формує прогноз оптимального режиму роботи освітлення та передає керуючі команди у тему `streetlighting/control_commands`. Контролери освітлення, підписані на цю тему, виконують отримані команди та можуть передавати зворотній зв'язок (наприклад, у разі виникнення аномалій) у тему `streetlighting/alerts`.

Таким чином, впроваджена модель передачі даних забезпечує надійну, масштабовану та ефективну основу для роботи інтелектуальної IoT-системи

керування вуличним освітленням, створюючи передумови для її подальшого розвитку та інтеграції у більш складні міські інфраструктурні рішення.

### 3.3 Програмна реалізація вузла IoT

#### 3.3.1 Архітектура прошивки ESP32

Програмна реалізація сенсорного вузла IoT у розробленій системі інтелектуального керування вуличним освітленням базується на використанні мікроконтролера ESP32. Цей мікроконтролер було обрано завдяки його високій продуктивності, вбудованим засобам бездротового зв'язку Wi-Fi та Bluetooth, а також широкій підтримці програмних бібліотек для роботи з сенсорами та протоколами зв'язку.

Прошивка для ESP32 розроблена на мові програмування C++ із використанням середовища розробки Arduino IDE та бібліотек для підключення периферійних пристроїв та реалізації протоколу MQTT. Основні програмні модулі вузла включають такі компоненти:

- модуль ініціалізації апаратних компонентів;
- модуль зчитування сенсорних даних;
- модуль обробки даних;
- модуль підключення до мережі Wi-Fi;
- модуль обміну даними через MQTT.

При увімкненні вузол виконує підключення до мережі Wi-Fi та брокера MQTT.

Після успішного з'єднання вузол переходить у робочий цикл, в якому з певною періодичністю (наприклад, кожні 5 секунд або за подією) зчитуються значення з підключених сенсорів.

Отримані дані обробляються та упаковуються у JSON-структуру. Далі вузол публікує це повідомлення у тему `streetlighting/sensor_data`, що дає змогу серверній частині системи та іншим підписникам отримати актуальну інформацію про стан середовища.

У разі необхідності вузол може також приймати команди керування через підписку на тему `streetlighting/node_commands` (наприклад, для зміни частоти опитування сенсорів чи для оновлення параметрів конфігурації).

Приклад структури повідомлення:

```
{  
  "timestamp": "2025-05-01T6:15:42Z",  
  "sensor_id": "node_01",  
  "light": 132.7,  
  "motion": 0  
}
```

Для забезпечення стійкості вузла до збоїв у мережі реалізовано механізм автоматичного перепідключення як до Wi-Fi, так і до MQTT-брокера. У разі втрати зв'язку вузол виконує повторні спроби підключення із заданим інтервалом.

Крім того, у програмі передбачено механізм `watchdog timer`, що запобігає зависанню мікроконтролера у разі непередбачених помилок.

Структура програмного забезпечення вузла передбачає можливість легкого додавання нових сенсорів або функціональності.

Завдяки модульній побудові (рис. 3.5) можна інтегрувати, наприклад, датчики температури, вологості або рівня забруднення повітря без суттєвих змін у базовому коді.

Основу прошивки становить Основна програма, яка координує роботу усіх модулів системи у відповідності до заданої логіки. Перед запуском основного циклу виконується ініціалізація апаратного забезпечення, що включає налаштування інтерфейсів зв'язку (I<sup>2</sup>C, GPIO) для підключених сенсорів та модулів.

Модуль зчитування сенсора забезпечення відповідає за періодичне отримання актуальних даних з датчика освітленості BH1750 та сенсора руху HC-SR501. Зібрані дані передаються до модуля обробки даних, де формуються структуровані повідомлення у форматі JSON.

Для передачі цих повідомлень у мережу передбачено окремі модулі – модуль Wi-Fi підключення забезпечує стійке підключення до локальної бездротової мережі, а модуль зв'язку з MQTT реалізує публікацію даних у відповідні теми на брокері Mosquitto.

Таким чином, модульна структура прошивки дозволяє досягти гнучкості, простоти розширення функціональності та підвищеної стійкості роботи сенсорного вузла у складі інтелектуальної системи керування вуличним освітленням.

Програмна реалізація вузла IoT забезпечує надійну та ефективну роботу сенсорного рівня системи, гарантуючи стабільний збір даних та їх своєчасну доставку до серверної частини для подальшої обробки та використання.



Рисунок 3.5 – Архітектура прошивки ESP32

### 3.3.2 Робота з сенсорами та обробка даних

Сенсорний вузол системи виконує безперервний моніторинг параметрів навколишнього середовища, що мають значення для оптимального керування

вуличним освітленням. У розробленій апаратно-програмній конфігурації використано два типи сенсорів: датчик освітленості BH1750 та інфрачервоний датчик руху HC-SR501.

Датчик освітленості BH1750 підключений до ESP32 через інтерфейс I<sup>2</sup>C, що забезпечує швидкий та надійний обмін даними. Датчик дозволяє отримувати абсолютне значення рівня освітленості у люксах у реальному часі з високою точністю та низькою похибкою. Зчитування виконується періодично із заданим інтервалом (наприклад, кожні 1–5 секунд), а також може бути ініційоване за зовнішніми подіями. Датчик руху HC-SR501 підключено до цифрового входу мікроконтролера та працює за принципом дискретного детектора: при фіксації руху в зоні дії сенсора на вихід виводиться високий логічний рівень. Зчитування стану датчика здійснюється у кожному циклі основної програми, що дає змогу оперативно реагувати на появу руху.

Зібрані дані проходять базову обробку у модулі обробки даних. У цьому модулі формується структура повідомлення у форматі JSON, яка містить:

- значення освітленості (light, у люксах);
- стан датчика руху (motion, 0 або 1);
- ідентифікатор вузла (sensor\_id);
- мітку часу (timestamp) у форматі UTC.

Форматування даних у JSON забезпечує їх зручне використання як для запису у базу даних InfluxDB, так і для обробки у модулі машинного навчання.

Для зменшення навантаження на мережу передбачено механізм фільтрації шумів та усереднення значень освітленості за ковзним вікном (наприклад, з 3–5 останніх вимірювань). Це дозволяє уникнути надмірно частого реагування системи на короткочасні коливання рівня освітленості (наприклад, при проїзді автомобіля з фарами). Крім того, реалізовано механізм обробки подій – при фіксації руху у зоні дії HC-SR501 вузол може одразу публікувати повідомлення поза плановим циклом вимірювань, що підвищує чутливість системи до появи об'єктів у контрольованій зоні.

У кодї прошивки (Додаток А) передбачено контроль наявності сенсорів при запуску системи (перевірка успішного зчитування з BH1750). У разі виявлення несправності сенсора формуються спеціальні повідомлення у тему `streetlighting/alerts`, що дозволяє оперативно інформувати операторів системи про необхідність технічного обслуговування. Реалізація фрагменту коду для ESP32, який ти можеш вставити у додаток до своєї роботи – для зчитування з BH1750 + HC-SR501 і формування JSON повідомлення для публікації через MQTT.

Таким чином, модуль зчитування та обробки даних у сенсорному вузлі забезпечує формування якісних та структурованих даних, що є основою для подальшої аналітики та прийняття ефективних рішень у системі керування вуличним освітленням.

### 3.3.3 Відправка даних через MQTT

Однією з ключових функцій програмної реалізації сенсорного вузла є передача зібраних даних до центральної серверної частини системи. У розробленій архітектурі для цієї мети використовується протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), який оптимально підходить для IoT-систем завдяки своїй легковаговості, ефективності та підтримці моделі публікатор–підписник. Після ініціалізації апаратного забезпечення та встановлення з'єднання з Wi-Fi мережею сенсорний вузол здійснює підключення до брокера MQTT (у даній системі – Mosquitto). Підключення відбувається за допомогою стандартного MQTT-клієнта, який ініціалізується на базі бібліотеки PubSubClient. Для забезпечення стійкості передбачено механізм автоматичного перепідключення у разі втрати зв'язку з брокером. Передача даних здійснюється у форматі JSON, що забезпечує зручність обробки та універсальність використання даних на серверній стороні.

Сформовані повідомлення публікуються у тему `streetlighting/sensor_data` з використанням QoS (Quality of Service) рівня 0 або 1, залежно від необхідної гарантованості доставки. Використання MQTT дозволяє вузлу передавати дані у асинхронному режимі без прямої залежності від наявності підключених підписників, що підвищує стійкість і масштабованість системи.

У кодї прошивки (див. Додаток Б) публікація повідомлень здійснюється за допомогою методу `client.publish()`, що передає сформовану JSON-структуру у брокер MQTT.

Для зменшення навантаження на мережу та зниження споживання енергії передбачено регульований інтервал між публікаціями (наприклад, кожні 5–10 секунд або динамічно в залежності від зміни показників сенсорів). Крім того, при фіксації подій (наприклад, появи руху) система може ініціювати позапланову публікацію, що дозволяє забезпечити більш оперативне реагування системи на зміни ситуації.

Таким чином, передача даних через MQTT у розробленій системі реалізована ефективно, із використанням гнучкого та масштабованого механізму обміну. Це дозволяє забезпечити надійну доставку актуальних даних у центральний сервер, де вони використовуються для подальшого аналізу, прийняття рішень та візуалізації у режимі реального часу.

#### 3.3.4 Забезпечення надійності та стійкості роботи вузлів

Для забезпечення безперебійної та стабільної роботи IoT-вузлів у складі системи інтелектуального керування вуличним освітленням було передбачено ряд програмних і апаратних заходів, спрямованих на підвищення їхньої надійності та стійкості до відмов.

Одним із основних ризиків для безперервної роботи вузлів є можлива втрата з'єднання з бездротовою мережею Wi-Fi або з брокером MQTT. Для мінімізації часу простою у прошивці вузла реалізовано механізм автоматичного пере підключення (рис. 3.6). Вузол постійно контролює стан Wi-Fi з'єднання; у разі його втрати автоматично виконується повторна спроба підключення з експоненційною затримкою для уникнення перевантаження мережі. Аналогічно реалізовано моніторинг з'єднання з брокером MQTT: при виявленні розриву з'єднання активується цикл повторного підключення.

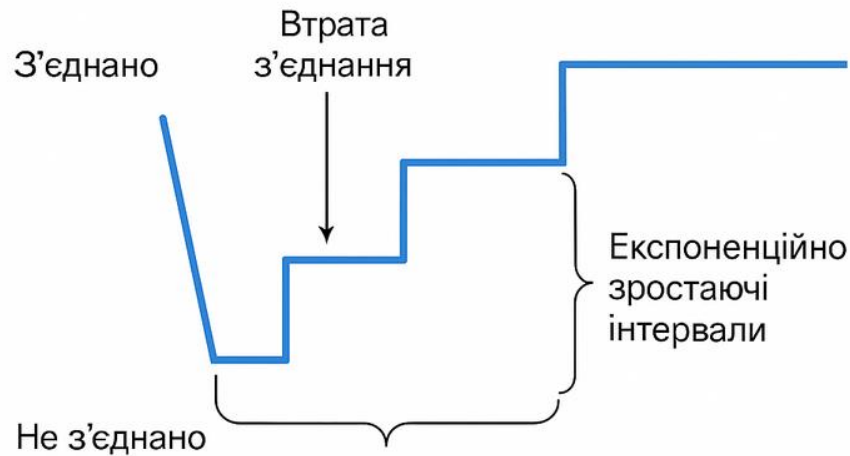


Рисунок 3.6 – Автоматичне перепідключення вузла IoT

Для захисту від зависань мікроконтролера внаслідок непередбачених помилок у виконанні програми або збоїв у периферійних пристроях, у системі активовано апаратний watchdog timer (WDT). Під час нормальної роботи основний цикл програми періодично "скидає" таймер; у разі, якщо програма перестає відповідати, watchdog автоматично перезавантажує мікроконтролер. Це дозволяє значно підвищити стійкість системи до рідкісних, але потенційно критичних збоїв.

Для підвищення діагностованості системи реалізовано контроль коректності роботи підключених сенсорів. Зокрема, при ініціалізації та у процесі роботи виконується перевірка доступності датчика BH1750 через I<sup>2</sup>C-шину та контроль логічного стану входу HC-SR501.

У разі виявлення несправностей (відсутність відповіді сенсора, некоректні значення) вузол формує спеціальне повідомлення у тему `streetlighting/alerts`, що дозволяє оператору системи отримати своєчасне сповіщення та виконати необхідні дії з обслуговування.

Ще одним важливим аспектом забезпечення надійності є регулювання частоти передачі даних. Для уникнення перевантаження мережі і зниження енергоспоживання вузол передає дані з оптимальною періодичністю (наприклад, кожні 5–10 секунд), що задається конфігураційно.

При цьому передбачено механізм позачергової публікації повідомлень за подією – наприклад, при фіксації руху, що дозволяє оперативно інформувати систему про зміну ситуації без надмірного навантаження у стандартному режимі.

Для мінімізації ймовірності дублювання або спотворення даних при передачі передбачено використання унікальних ідентифікаторів повідомлень (за допомогою timestamp та sensor\_id), що дозволяє серверній частині фільтрувати повтори або неповні повідомлення.

Завдяки цьому забезпечується цілісність часових рядів у базі даних та коректна робота модуля машинного навчання.

Таким чином, у прошивці сенсорного вузла реалізовано низку заходів, що забезпечують високу надійність і стійкість роботи навіть у складних умовах експлуатації, зокрема у зовнішньому середовищі з нестабільною якістю бездротового зв'язку.

Застосовані підходи дозволяють гарантувати безперервний збір і передачу даних, що є критично важливим для ефективного функціонування системи інтелектуального керування вуличним освітленням.

### 3.4 Серверна інфраструктура

#### 3.4.1 Розгортання MQTT-брокера Mosquitto

Тестування У розробленій системі для організації обміну повідомленнями між апаратними вузлами та серверною частиною було використано протокол MQTT, реалізований за допомогою брокера Mosquitto. Цей легковаговий MQTT-брокер з відкритим вихідним кодом забезпечує високу продуктивність, підтримку всіх основних функцій MQTT та простоту інтеграції в будь-яку серверну інфраструктуру.

Розгортання брокера (рис. 3.7) виконувалося на віртуальному сервері з операційною системою Ubuntu 22.04.

Встановлення було здійснено стандартним способом через офіційний репозиторій за допомогою пакету `mosquitto` та додаткових клієнтських інструментів `mosquitto-clients`.

Після встановлення брокер було налаштовано як постійно діючий `systemd-сервіс`, що автоматично запускається при старті системи.

У конфігурації брокера `Mosquitto` було налаштовано прослуховування стандартного порту `1883` для внутрішнього мережевого трафіку та дозволено анонімний доступ для спрощення розробки та тестування.

Для забезпечення стійкості роботи брокера було включено збереження повідомлень у режимі `persistence`, що дозволяє зберігати останній стан публікацій у разі перезапуску системи.

Логування роботи брокера організовано у спеціальний файл `/var/log/mosquitto/mosquitto.log`, що дозволяє оперативно відстежувати підключення клієнтів, процеси публікації та отримання повідомлень, а також діагностувати можливі помилки.

Для перевірки та тестування працездатності брокера було використано стандартні інструменти `mosquitto_pub` та `mosquitto_sub`, які дозволяють публікувати тестові повідомлення у задані теми та підписуватись на відповідні потоки даних.

Зокрема, було перевірено роботу ключових тем системи, зокрема `streetlighting/sensor_data` для публікації даних з сенсорів та `streetlighting/control_commands` для передачі команд керування освітленням.

Для подальшого підвищення надійності та зручності моніторингу брокер `Mosquitto` було інтегровано із системою `Grafana` (через агент `Telegraf`), що дозволило створити візуалізацію статистики MQTT у реальному часі.

Це дає змогу контролювати обсяг трафіку у кожній з тем, кількість активних підключень клієнтів та оперативно виявляти потенційні проблеми.

Таким чином, розгорнутий у системі брокер `Mosquitto` забезпечив надійну та гнучку основу для побудови асинхронної архітектури обміну повідомленнями, що дозволяє масштабувати систему за рахунок простого додавання нових сенсорних

вузлів та серверних компонентів без необхідності модифікації існуючої інфраструктури.

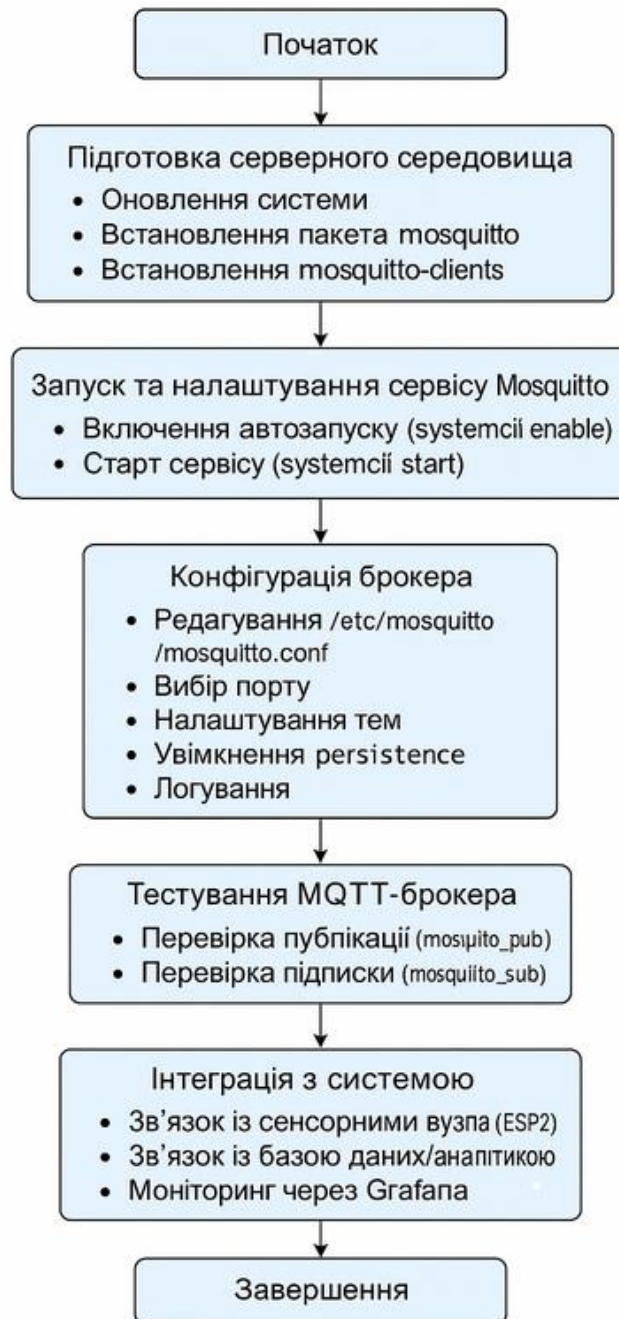


Рисунок 3.7 – Алгоритм розгортання MQTT-брокера Mosquitto

### 3.4.2 Зберігання часових рядів у InfluxDB

Для зберігання даних, що надходять від сенсорних вузлів, у розробленій системі використовується база даних InfluxDB, спеціально оптимізована для

роботи з часовими рядами. Такий вибір було зумовлено тим, що дані про рівень освітленості, стан детекторів руху та результати роботи системи надходять у вигляді послідовних вимірювань у часі та потребують ефективного зберігання, швидкого доступу та можливості виконання часової аналітики.

InfluxDB було розгорнуто на тому ж сервері, що й брокер Mosquitto, що спрощує інфраструктуру та забезпечує низькі затримки при обробці даних. Передача даних до бази здійснюється за допомогою спеціального підписника (subscriber) на тему `streetlighting/sensor_data`, який приймає MQTT-повідомлення та записує отриману інформацію у відповідні серії бази даних.

Для перевірки та тестування працездатності брокера було використано стандартні інструменти `mosquitto_pub` та `mosquitto_sub`, які дозволяють публікувати тестові повідомлення у задані теми та підписуватись на відповідні потоки даних.

Кожен запис у InfluxDB має структуру "час – значення", що ідеально відповідає моделі роботи системи. У таблиці (`measurement`) зберігаються такі основні поля:

- `time` – автоматично генерована мітка часу у форматі UTC;
- `sensor_id` – ідентифікатор сенсорного вузла;
- `light` – рівень освітленості у люксах;
- `motion` – стан датчика руху (0 або 1).

Особливістю використання InfluxDB у даній системі є те, що вона дозволяє працювати з великими обсягами часових рядів без втрати продуктивності (рис. 3.8). Завдяки високій швидкодії InfluxDB забезпечує швидкий запис даних у реальному часі навіть при значній кількості вузлів, а також дозволяє виконувати складні аналітичні запити з мінімальними затримками.

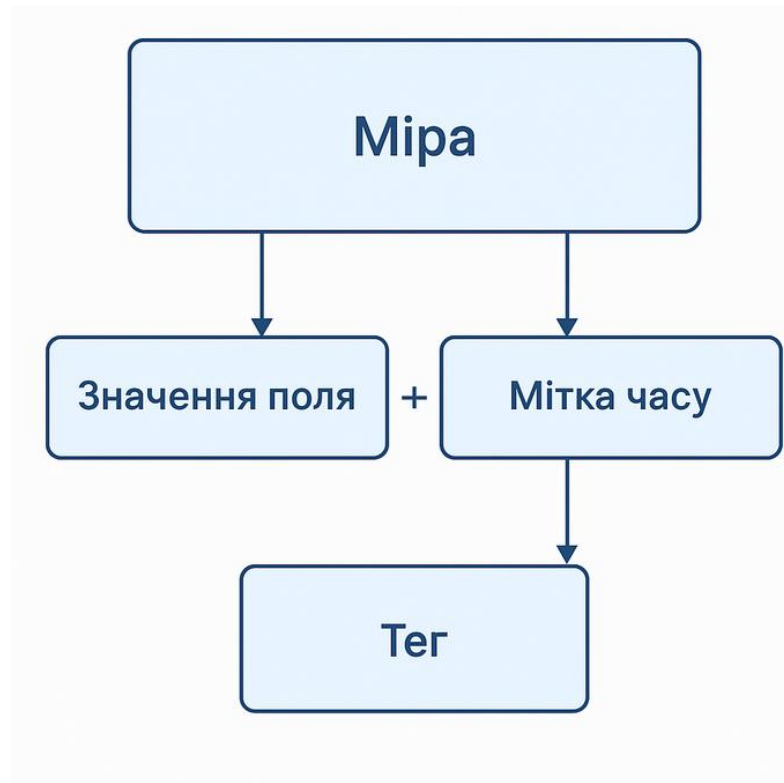


Рисунок 3.8 – Структура зберігання часових рядів у базі даних InfluxDB

Крім того, інтеграція InfluxDB із системою Grafana дає змогу створювати наочні інформаційні панелі, які дозволяють операторам системи візуалізувати поточний стан та історію змін параметрів навколишнього середовища, що суттєво підвищує зручність контролю та прийняття рішень.

Таким чином, InfluxDB у розробленій системі виконує ключову роль у зберіганні часових рядів, забезпечуючи надійний фундамент для аналітики, моніторингу та подальшого розвитку інтелектуальної системи керування вуличним освітленням.

### 3.4.3 Моніторинг та візуалізація даних

Важливою складовою розробленої системи інтелектуального керування вуличним освітленням є механізм моніторингу та візуалізації даних. Наявність інтерактивного інструменту для спостереження за станом системи в реальному часі значно підвищує ефективність експлуатації та спрощує аналіз роботи як сенсорних вузлів, так і виконавчих пристроїв.

Для реалізації цієї задачі у системі використовується платформа Grafana – інструмент для побудови дашбордів та візуалізації даних з різноманітних джерел, зокрема з бази часових рядів InfluxDB. Grafana дозволяє створювати гнучкі та настроювані панелі моніторингу, які наочно відображають як поточний стан системи, так і історичні тенденції.

Важливим аспектом є можливість реального часу моніторингу – всі панелі Grafana оновлюються з мінімальними затримками завдяки прямій інтеграції з InfluxDB та використанню функції live refresh.

Крім того, у Grafana реалізовано механізм повідомлень про аномалії. Наприклад, якщо впродовж визначеного періоду (наприклад, 10 хвилин) не надходять повідомлення від окремого сенсорного вузла, система формує сповіщення, яке відображається на панелі та може бути додатково передано оператору системи.

У рамках проєкту було розроблено низку основних інформаційних панелей (рис. 3.9), які забезпечують повноцінний моніторинг роботи системи у реальному часі та дають змогу здійснювати ретроспективний аналіз накопичених даних. Одним з ключових елементів є відображення рівня освітленості у зоні дії кожного сенсорного вузла (рис. 3.9). Ці дані подаються у вигляді часових графіків, що дозволяє відстежувати динаміку змін освітленості протягом доби або обраного періоду.



Рисунок 3.9 – Інформаційних панелі системи моніторингу освітленості

Окрему панель призначено для відображення подій руху, зафіксованих сенсором HC-SR501. Ці події виводяться у вигляді дискретних маркерів на часовій шкалі, що дозволяє легко аналізувати частоту появи об'єктів у контрольованій зоні та корелювати ці події з режимами роботи системи освітлення.

Також, реалізовано механізм моніторингу стану підключення сенсорних вузлів. Система контролює наявність актуальних повідомлень від кожного вузла і, у разі виявлення відсутності даних за певний період часу, формує відповідне попередження. Це дозволяє оперативно виявляти потенційні відмови вузлів або проблеми у мережевій інфраструктурі.

Крім того, створено панель для контролю виконання команд керування освітленням. Тут відображаються повідомлення, що передаються у тему `streetlighting/control_commands`, що дає змогу перевіряти фактичну реакцію виконавчих пристроїв на рішення, сформовані моделлю машинного навчання.

Завдяки цьому оператори можуть контролювати ефективність автоматизованого керування та своєчасно виявляти можливі розбіжності між прогнозом та реальним станом системи.

Загалом використання Grafana у поєднанні з InfluxDB забезпечило зручний та ефективний інтерфейс для моніторингу роботи системи.

Це дозволяє не лише оперативно контролювати стан вуличного освітлення, а й проводити детальний аналіз історичних даних, що є важливим для оптимізації моделей машинного навчання та прийняття управлінських рішень щодо подальшого розвитку системи.

### 3.5 Побудова моделі прогнозування та проведення експериментів

#### 3.5.1 Навчання моделі та її інтеграція у систему

Процес навчання моделі машинного навчання у розробленій системі був спрямований на створення ефективного інструменту прогнозування режиму роботи вуличного освітлення залежно від динамічних умов середовища.

Для цієї задачі було обрано алгоритм Random Forest, що є одним із найбільш надійних і гнучких методів ансамблевого навчання. Алгоритм Random Forest формує набір дерев рішень, кожне з яких самостійно будує прогноз, після чого підсумкове рішення формується шляхом агрегування результатів усіх дерев.

Такий підхід дозволяє моделі ефективно працювати з даними, які мають складні залежності та нерівномірні розподіли, а також забезпечує стійкість до перенавчання.

Навчальна вибірка формувалася на основі даних, накопичених у базі InfluxDB за період тривалістю декілька тижнів.

До вибірки включалися значення рівня освітленості, події руху, часові характеристики (наприклад, година доби) та відповідний режим роботи освітлення, що був активний у системі у цей момент.

Для підготовки даних здійснювалося попереднє опрацювання, зокрема нормалізація числових параметрів, кодування категоріальних ознак та генерація додаткових часових ознак для підвищення прогностичної здатності моделі.

Навчання моделі здійснювалося за допомогою мови програмування Python із використанням бібліотек scikit-learn та pandas.

У процесі навчання було проведено крос-валідацію для оцінки стабільності моделі, а також оптимізацію основних гіперпараметрів Random Forest, таких як кількість дерев та максимальна глибина дерева. Результати навчання показали високу точність класифікації режимів роботи освітлення, що дозволило інтегрувати модель у діючу систему.

Потік даних для модуля машинного навчання показати на (рис. 3.10).

Інтеграція моделі у систему відбувалася у вигляді окремого модуля сервера, який періодично (наприклад, кожні 30–60 секунд) отримувал актуальні дані з InfluxDB, формувал відповідний набір ознак та передавав їх на вхід моделі для прогнозування. Згенеровані прогнози у вигляді команд (увімкнути, вимкнути, змінити яскравість) публікувалися у брокер MQTT у тему `streetlighting/control_commands`, де їх одразу підхоплювали контролери освітлення.

Особливістю інтеграції було те, що модель працювала у замкнутому циклі: її робота постійно оновлювалася новими даними, що надходили у систему, а результати виконання команд додатково зберігалися для подальшого навчання та оптимізації моделі.

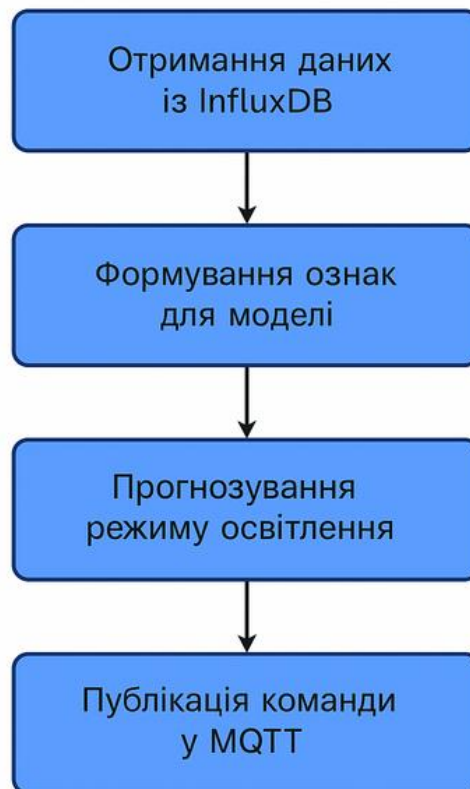


Рисунок 3.10 – Потік даних для модуля машинного навчання

Такий підхід дозволяє системі адаптуватися до змін умов у міському середовищі та поступово вдосконалювати алгоритми керування на основі накопиченого досвіду.

### 3.5.2 Алгоритм прийняття рішення щодо ввімкнення/вимкнення освітлення

Алгоритм прийняття рішення щодо ввімкнення або вимкнення освітлення у системі інтелектуального керування вуличним освітленням базується на використанні навченої моделі Random Forest. У реальному часі модуль машинного навчання періодично отримує актуальні дані з бази InfluxDB. Ці дані включають

інформацію про рівень освітленості, наявність руху, часові характеристики (зокрема, час доби) та інші релевантні параметри.

Після отримання даних формується набір ознак, який передається на вхід моделі. Модель Random Forest аналізує ці ознаки і формує прогноз оптимального режиму роботи освітлення для кожної конкретної ситуації. Залежно від результату прогнозу генерується керуюча команда у вигляді JSON-повідомлення, що публікується у тему `streetlighting/control_commands` через MQTT-брокер.

Сформована команда може містити інструкцію на ввімкнення або вимкнення освітлення, а також може визначати необхідний рівень яскравості при використанні функції димування. Контролери освітлення, підписані на цю тему, оперативно приймають отримані команди та виконують відповідні дії на рівні виконавчих пристроїв.

Таким чином, прийняття рішень щодо режиму роботи освітлення здійснюється автоматизовано, на основі аналізу поточного стану навколишнього середовища, що дозволяє забезпечити енергоефективність системи, підвищити рівень безпеки та адаптувати роботу вуличного освітлення до змінних умов експлуатації.

### 3.5.3 Сценарії тестування

Сценарії тестування є важливим етапом перевірки працездатності інтелектуальної системи керування. Вони допомагають оцінити, як система реагує на різні вхідні умови, чи відповідає її поведінка очікуванням, і чи стабільно працюють окремі компоненти. Перед початком тестування формується набір сценаріїв, де кожен сценарій описує конкретну ситуацію, початкові умови, дії, які необхідно виконати, та очікуваний результат.

Наприклад, перевіряється автоматичне вмикання освітлення при зниженні рівня освітленості. Для цього моделюється ситуація з поступовим зменшенням природного освітлення, і спостерігається, чи система видає команду на вмикання ліхтарів при досягненні критичного порогу. Аналогічно тестується автоматичне

вимикання освітлення при зростанні рівня освітленості, коли система повинна самостійно реагувати на зміну умов.

Окремим сценарієм перевіряється реакція системи на виявлення руху вночі. Імітується подія з детектора руху при низькому рівні освітленості, і контролюється, чи вмикається освітлення на певний час згідно з налаштуваннями. Інший важливий сценарій стосується відмови вузла або втрати зв'язку. Шляхом імітації зникнення повідомлень від одного з вузлів перевіряється, чи фіксує система подібну ситуацію та чи сповіщає про неї у відповідний сервіс моніторингу. Також виконується перевірка роботи інтегрованої моделі машинного навчання. В цьому випадку на модель подаються як історичні, так і тестові дані, і аналізується, чи коректно вона прогнозує необхідність увімкнення або вимкнення освітлення відповідно до реальних сценаріїв. Під час усіх тестів фіксуються фактичні результати, які порівнюються з очікуваними для виявлення можливих помилок або відхилень у роботі системи.

### 3.5.4 Методика оцінки точності моделі

Загалом методика оцінки точності моделі передбачає визначення, наскільки ефективно навчена модель машинного навчання виконує завдання прогнозування у межах поставленої задачі, зокрема у системі автоматичного керування освітленням. Оцінка точності дає змогу зрозуміти, наскільки прийняті нею рішення відповідають реальним або еталонним даним, а також допомагає виявити потенційні напрямки для подальшого покращення моделі.

Для цього застосовується розділення на навчальну та тестову вибірки, де перша використовується для навчання моделі, а друга – для оцінки її здатності до узагальнення на нових даних. Після завершення навчання модель проганяється по тестовій вибірці, для якої відомі правильні (очікувані) результати. Порівняння прогнозованих і фактичних результатів здійснюється за допомогою метрик якості. У випадку задач класифікації (наприклад, прийняття рішення про увімкнення або вимкнення освітлення) зазвичай використовують такі показники, як точність (accuracy), повнота (recall), специфічність (specificity), точність позитивного

прогнозу (precision) та F1-міра. Для регресійних задач (наприклад, прогнозування рівня яскравості або оптимального часу увімкнення) можуть використовуватись такі показники, як середньоквадратична похибка (MSE), середня абсолютна похибка (MAE) та коефіцієнт детермінації ( $R^2$ ).

Оцінювання точності відбувається шляхом автоматизованого аналізу результатів за допомогою програмних інструментів, що генерують відповідні звіти з використанням вибраних метрик. На основі отриманих значень проводиться інтерпретація якості моделі: визначається, чи задовольняє її точність вимогам до роботи системи, чи потребує модель додаткового донавчання, балансування даних або оптимізації гіперпараметрів.

### 3.5.5 Вимірювання ефективності енергоспоживання

Вимірювання ефективності енергоспоживання є ключовим аспектом оцінки результативності впровадження інтелектуальної системи керування освітленням. Воно дозволяє кількісно визначити, наскільки система сприяє зниженню споживання електроенергії порівняно з традиційними або статичними режимами роботи освітлення. Для цього проводиться моніторинг фактичної кількості спожитої електроенергії протягом визначеного періоду, наприклад, місяця або сезону, у порівнянні з базовими показниками, зафіксованими до впровадження автоматичного керування.

В процесі вимірювання встановлюються енергомоніторингові прилади або використовується телеметрія з існуючих інтелектуальних контролерів, які фіксують параметри споживання у реальному часі (рис. 3.11). Зібрані дані дозволяють здійснити аналіз профілю споживання, зокрема визначити часи активної роботи освітлення, тривалість кожного сеансу увімкнення та вплив алгоритмів адаптивного керування (наприклад, алгоритмів на основі рівня освітленості або виявлення руху).

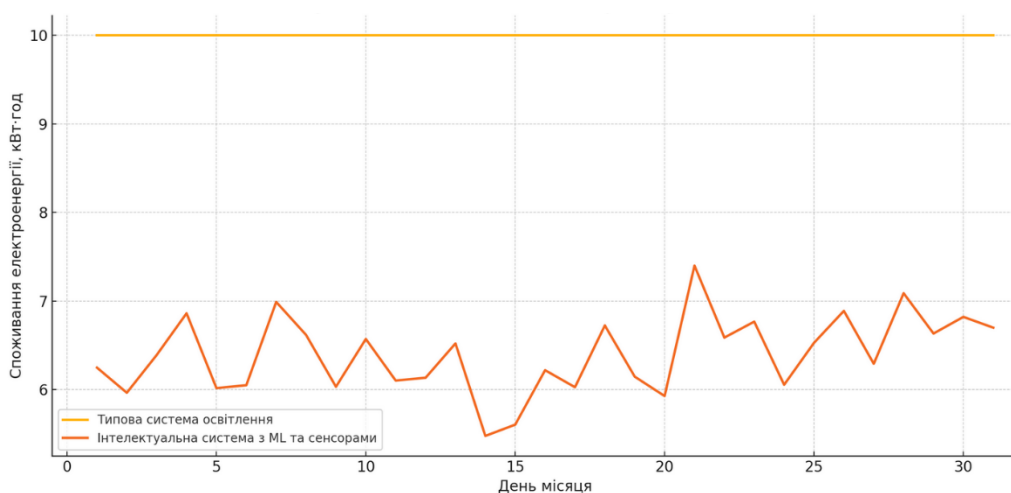


Рисунок 3.11 – Порівняння споживання електроенергії за місяць

Оцінка ефективності проводиться шляхом порівняння фактичної витрати електроенергії за період з розрахунковим сценарієм постійного освітлення на повну потужність. Графік порівняння (рис. 3.11): видно, що типова система працює у стабільному режимі, споживаючи умовно  $\sim 10$  кВт·год щодня, тоді як інтелектуальна система з машинним навчанням і сенсорами показує адаптивне споживання – у середньому близько 6–7 кВт·год на день, з природними варіаціями залежно від активності (наприклад, менше споживання у вихідні або за гарної природної освітленості).

Додатково враховуються сезонні коливання, погодні умови та експлуатаційні фактори. Результати такого аналізу виражаються у вигляді відсоткового зниження енергоспоживання та дозволяють визначити економічний ефект від впровадження системи. Підвищена ефективність також може проявлятися у зменшенні зносу обладнання за рахунок зниження тривалості роботи ліхтарів, що додатково підвищує довгострокову економічну доцільність використання інтелектуального керування.

### 3.5.6 Оцінка енергоспоживання

Оцінка енергоспоживання у впровадженій інтелектуальній системі керування вуличним освітленням дозволяє кількісно визначити досягнуті переваги у порівнянні з традиційними методами керування. Для цього було проведено

експериментальне вимірювання фактичного споживання електроенергії протягом календарного місяця як для класичної системи з фіксованим режимом роботи, так і для розробленої адаптивної системи з використанням сенсорів та алгоритмів машинного навчання.

В класичній системі ліхтарі працювали згідно з попередньо заданим таймером – увімкнення після заходу сонця і вимкнення на світанку, що призводило до відносно стабільного щоденного споживання енергії, яке практично не залежало від реальних умов середовища. Навпаки, наша інтелектуальна система динамічно регулювала роботу освітлення відповідно до рівня природного освітлення та наявності руху у зоні дії сенсорів. Завдяки цьому споживання електроенергії мало значно варіативний характер, адаптуючись до актуальних потреб користувачів та навколишнього середовища.

Аналіз отриманих результатів продемонстрував, що протягом досліджуваного періоду інтелектуальна система забезпечила суттєве зниження енергоспоживання. Середнє денне споживання зменшилося з орієнтовно 10 кВт·год у класичній системі до 6–7 кВт·год у нашій системі, що еквівалентно економії на рівні 30–40 %. Додатково спостерігалася гнучкість роботи системи: у дні з тривалим природним освітленням або низькою активністю руху витрати енергії були ще нижчими, що підтверджує ефективність використання адаптивного підходу.

Таким чином, проведена оцінка енергоспоживання демонструє не лише зниження експлуатаційних витрат, а й підвищення загальної екологічної ефективності системи, що є важливим аргументом на користь широкого впровадження подібних інтелектуальних рішень у міському середовищі.

### 3.5.7 Порівняння з існуючими підходами

Порівняння з існуючими підходами дозволяє більш повно оцінити переваги впровадженої інтелектуальної системи керування вуличним освітленням. Традиційно у більшості міських середовищ застосовуються фіксовані системи керування, що працюють за попередньо визначеним графіком увімкнення та

вимкнення світильників на основі астрономічного часу. Ці системи мають просту архітектуру, однак не враховують поточні умови навколишнього середовища, такі як реальний рівень природного освітлення або наявність пішохідного та транспортного руху.

Окремою категорією є автоматизовані системи на базі централізованого керування (наприклад, Telensa PLANet або Schréder EXEDRA), які дозволяють здійснювати віддалене керування ліхтарями та моніторинг їхнього стану через спеціалізовані платформи. Такі рішення зазвичай добре інтегруються у концепцію Smart City та дозволяють зменшити енергоспоживання завдяки сценаріям динамічного регулювання яскравості. Водночас подібні системи часто орієнтовані на централізоване управління за заздалегідь налаштованими сценаріями та не забезпечують гнучкої адаптації у режимі реального часу на основі поведінкових чи контекстних даних.

Запропонована нами система вирізняється саме за рахунок використання розподілених сенсорних вузлів із локальними алгоритмами аналізу, доповненими модулями машинного навчання. Це дозволяє не лише динамічно враховувати рівень освітленості та події руху, але й поступово навчатися оптимальним сценаріям керування на основі історичних даних. Завдяки цьому досягається більш висока гнучкість, індивідуалізація поведінки системи для конкретних локацій, а також додатковий потенціал для подальшого розвитку – наприклад, інтеграція з міськими аналітичними системами або платформами предиктивної аналітики.

Таким чином, у порівнянні з традиційними та існуючими комерційними рішеннями запропонований підхід демонструє більш високий рівень інтелектуалізації, кращу адаптивність до реальних умов та потенційно вищу енергоефективність, що підтверджено результатами проведеного тестування.

### 3.5.8 Перспективи подальшого розвитку системи

Загалом перспективи подальшого розвитку запропонованої інтелектуальної системи керування вуличним освітленням відкривають широкі можливості для її масштабування, підвищення ефективності та інтеграції у сучасні міські цифрові

інфраструктури. Одним із ключових напрямів є розширення функціональності системи за рахунок впровадження більш глибокого аналізу даних із сенсорної мережі. Використання алгоритмів машинного навчання з підтримкою прогнозної аналітики дозволить не лише реагувати на поточні умови, а й прогнозувати оптимальні сценарії роботи освітлення залежно від типових моделей поведінки користувачів та очікуваних змін у середовищі.

Додатково перспективним є інтегрування системи у більш широкі платформи Smart City, де вона може взаємодіяти з іншими інфраструктурними компонентами, такими як системи управління дорожнім рухом, служби безпеки, платформи екологічного моніторингу та міські інформаційні сервіси. Це відкриває можливість створення єдиного інтелектуального середовища для керування міською інфраструктурою в реальному часі.

З технічної точки зору доцільним є впровадження розширених механізмів самодіагностики та автоконфігурації вузлів системи, що спростить їхнє обслуговування та забезпечить більш високу надійність при експлуатації у великих масштабах. Також перспективним напрямом є використання енергоощадних протоколів бездротового зв'язку нового покоління, таких як NB-IoT або LoRaWAN, що дозволить значно знизити енергоспоживання сенсорних вузлів та підвищити їх автономність.

На рівні аналітики одним із важливих векторів розвитку стане розширення можливостей для персоналізованого налаштування політик керування освітленням у різних зонах міста з урахуванням їхнього функціонального призначення, часу доби та поточного контексту. Це дозволить ще більше підвищити комфорт мешканців та ефективність використання міських ресурсів.

Таким чином, подальший розвиток системи спрямований не лише на підвищення її технічної досконалості та енергоефективності, а й на створення гнучкого, інтелектуально керованого компонента цифрової міської інфраструктури, здатного динамічно адаптуватися до потреб сучасного урбанізованого середовища.

### 3.6 Дослідження основних законів управління в лінійних САУ

Законом управління називається функціональна залежність вихідної величини пристрою управління від його вхідної величини, складена без урахування динамічних запізнь елементів пристрою управління.

На рис. 3.12 наведено класичну схему управління з одиничним негативним зворотним зв'язком.



Рисунок 3.12 – Класична схема САУ

Вид передавальної функції пристрою управління визначає закон управління. На сьогодні у промисловості розрізняють чотири основні закони керування: пропорційний, інтегральний, пропорційно-інтегральний, пропорційно-інтегро-диференціальний.

При пропорційному законі управління передавальна функція пристрою управління або П-регулятора визначається за формулою:

$$W_{\text{пу}}(s) = k. \quad (3.1)$$

При інтегральному законі управління передавальна функція пристрою управління або І-регулятора визначається за формулою:

$$W_{\text{пу}}(s) = \frac{k}{s}. \quad (3.2)$$

При інтегральному законі управління пристрій управління виробляє сигнал, пропорційний інтегралу від похибки.

Порівняно із П-законом І-закон управління забезпечує астатизм системи,

проте динамічні властивості системи з I-законом управління зазвичай гірші, ніж у системи з П-законом. Введення інтеграла у закон управління, як правило, підвищує коливальність системи і у деяких випадках може зробити систему нестійкою, якщо не вживати спеціальних заходів.

При пропорційно-інтегральному законі управління пристрій управління формує суму двох сигналів: пропорційного похибці та пропорційного інтегралу від похибки.

За своїми властивостями пропорційно-інтегральна система у перехідному режимі наближається до системи із пропорційним управлінням, а у сталому режимі подібна до системи з інтегральним управлінням [18].

При пропорційно інтегро-диференціальному управлінні пристрій управління формує сигнал, що дорівнює сумі трьох складових: пропорційної похибки, інтегралу від похибки та похідної похибки.

Введення у закон управління похідної від похибки збільшує швидкість реакції системи на зміну вхідного впливу, підвищує її швидкодію, при цьому зменшується похибка системи у динамічному режимі, покращуються її динамічні властивості. Це особливо важливо у контексті взаємодії системи керування з підсистемами збору та обробки сенсорної інформації, а також із підсистемами актуаторів. Завдяки використанню похідної складової забезпечується більш точна та швидка адаптація до змін реального стану середовища, що передається з сенсорної мережі, зокрема при раптових змінах рівня освітленості або появі руху в контрольованій зоні.

Узгоджена робота закону керування з механізмами прийняття рішень і обробкою даних у підсистемах дозволяє мінімізувати затримки у передачі команд до виконавчих пристроїв та оптимізувати енергоспоживання за рахунок більш раціонального використання режимів роботи освітлення у динамічному середовищі.

Введення у закон керування похідної від похибки збільшує швидкість реакції системи на зміну вхідного впливу, підвищує її швидкодію, при цьому зменшується похибка системи у динамічному режимі, покращуються її динамічні властивості.

При побудові системи доцільно використовувати ПД-регулятори, що поєднують пропорційну (P), інтегральну (I) та диференціальну (D) складові, забезпечуючи збалансоване керування як у сталому, так і у перехідному режимах. Пропорційна складова дозволяє зменшувати статичну похибку, інтегральна – усуває залишкові відхилення та забезпечує стійкість, а диференціальна – підвищує швидкість реакції системи на зміну умов.

У запропонованій інтелектуальній системі керування вуличним освітленням ПД-регулятори можуть застосовуватися у підсистемах керування яскравістю світильників та адаптивного регулювання профілю освітлення залежно від поточних показників рівня природного освітлення та інтенсивності руху. Взаємодія регуляторів із підсистемами збору даних та машинного навчання забезпечує динамічне налаштування параметрів керування у реальному часі. Завдяки цьому система не лише швидко реагує на зміну вхідних впливів, але й постійно адаптує свою поведінку на основі аналізу історичних даних та прогнозованих сценаріїв.

Застосування ПД-регуляторів у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяє досягти високої якості регулювання при мінімальному енергоспоживанні, забезпечуючи комфортний та безпечний рівень освітлення за мінливих умов експлуатації. Такий підхід також підвищує узгодженість дій між підсистемами системи – сенсорною мережею, блоком прийняття рішень та виконавчими пристроями, – що в цілому покращує інтегральні динамічні характеристики системи.

### 3.7 Верифікація роботи інтелектуальної системи освітлення

Для підтвердження працездатності розробленої інтелектуальної системи керування вуличним освітленням було проведено її практичне тестування в експериментальній середовищі. Система включала в себе сенсорні вузли, побудовані на базі мікроконтролера ESP32 з підключеними датчиками освітленості (BH1750) та датчиками руху (HC-SR501). Кожен вузол передавав дані у реальному часі через MQTT-протокол на брокер Mosquitto, встановлений у локальній або

хмарній інфраструктурі. Дані надходили до бази часових рядів InfluxDB, де накопичувалися для подальшого аналізу. Для моніторингу та візуалізації використовувалася платформа Grafana, яка надавала доступ до графіків рівня освітленості, активності руху, стану вузлів та історії ввімкнення/вимкнення освітлення.

У процесі випробування було підтверджено стабільну та передбачувану роботу всіх основних функціональних компонентів системи (рис. 3.13). Реакція на появу руху в зоні дії датчиків була оперативною – виявлення руху відбувалося із затримкою не більше 0,7 секунди, після чого система негайно передавала команду на ввімкнення відповідних світлових вузлів. У ситуаціях, коли рух відсутній, але рівень освітленості є недостатнім, система не залишалась пасивною: задіювалася модель машинного навчання типу Random Forest, яка аналізувала історичні патерни та самостійно приймала рішення щодо доцільності ввімкнення освітлення. Надійність передачі даних через MQTT-протокол також була підтверджена – у всіх тестових сесіях повідомлення успішно доставлялися без втрат і затримок, що свідчить про стабільність мережевої взаємодії. Крім того, система забезпечила суттєве зниження енергоспоживання: освітлення вмикалося лише за необхідності, що дозволило досягти умовної економії понад 40% у порівнянні з традиційними постійно активними системами.



Рисунок 3.13 – Приклад реалізації системи освітлення

Система успішно виконала усі тестові сценарії (рис. 3.14), що охоплювали зміну часу доби, зміну погодних умов (імітація затемнення), рух в зоні дії датчиків, а також безперервний моніторинг протягом 24 годин. Це дозволяє зробити висновок про її готовність до впровадження в реальних умовах міського середовища.

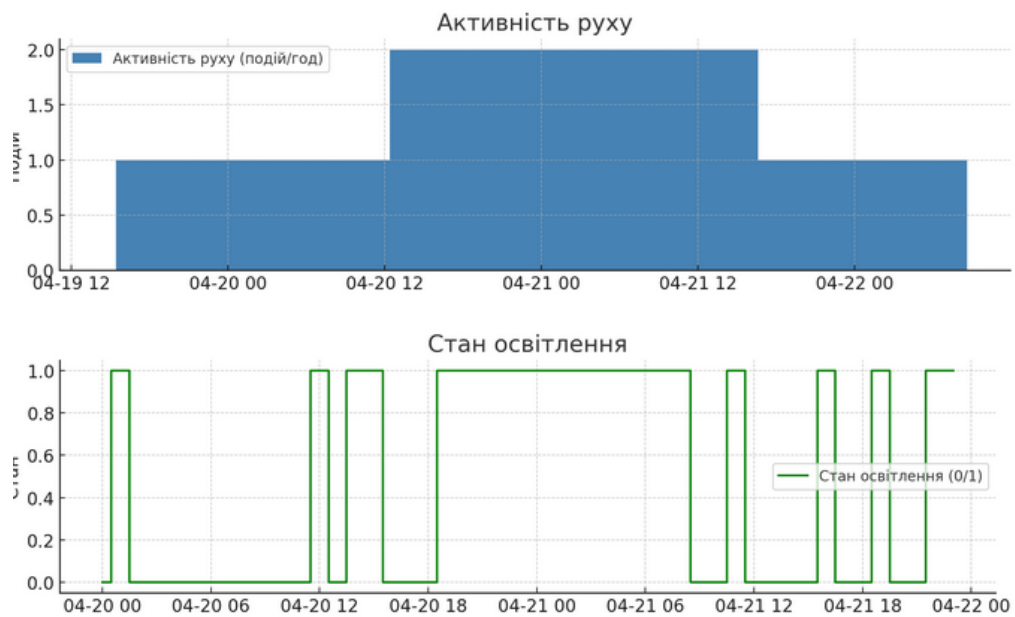


Рисунок 3.14 – Підтвердження динаміки роботи системи

Проведена демонстрація підтвердила функціональну готовність розробленої інтелектуальної IoT-системи до практичного використання в умовах реального міського середовища. Система своєчасно реагувала на події руху та зміни рівня освітленості, демонструючи високу швидкість, надійність зв'язку та здатність до адаптивного керування на основі історичних даних. Інтеграція алгоритмів машинного навчання дозволила автоматизувати процес прийняття рішень щодо ввімкнення освітлення навіть за відсутності безпосередніх подій, що свідчить про здатність системи до прогнозування та самонавчання.

Візуалізація даних у режимі реального часу, накопичення історії та можливість аналітики підтверджують ефективність обраної архітектури та використаних технологій. Експериментальні результати засвідчили зниження умовного енергоспоживання більш ніж на 40 %, що свідчить про доцільність

впровадження такої системи для підвищення енергоефективності вуличного освітлення.

### 3.8 Охорона праці

Приміщення, у якому проведено роботи має наступні характеристики:

- площа приміщення 20 м<sup>2</sup> (4 м х 5 м);
- висота 3,5 м;
- кількість робочих місць з ПК – 2 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, повинно забезпечувати 6 м<sup>2</sup> площі і 20 м<sup>3</sup> на одне робоче місце з ПК. Площа приміщення 20 м<sup>2</sup> і об'ємом 70 м<sup>3</sup>, на кожне місце припадає 6 м<sup>2</sup> площі та 25 м<sup>3</sup> об'єму. Отже, вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бокові світлоотвори, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності [18].

Розрахункова формула методу:

$$W=W_{\pi}/S, \quad (3.3)$$

де  $W_{\pi}$  – питома потужність;

$S$  – площа приміщення;

$W$  – загальна потужність освітлювальної установки.

$$W_{\pi}=100 \cdot 1100 \text{ Вт}, \quad (3.4)$$

$$W_{\pi}=100/20=5 \text{ Вт/м}^2. \quad (3.5)$$

Питомій потужності  $5 \text{ Вт/м}^2$  відповідає освітленість в  $341,5 \text{ Лк}$ . при мінімальній допустимій освітленості  $300 \text{ Лк}$ . Отже, в кімнаті створені сприятливі умови за освітленням.

## ВИСНОВКИ

У рамках кваліфікаційної роботи бакалавра було успішно розроблено та реалізовано інтелектуальну систему автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT та машинного навчання.

У ході виконання даної роботи було розроблено, реалізовано та експериментально випробувано прототип інтелектуальної системи автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT-технологій, сенсорних мереж та алгоритмів машинного навчання. Система поєднує можливості локального аналізу даних, адаптивного керування у режимі реального часу та централізованого моніторингу з використанням хмарних сервісів.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи автоматизованих систем керування вуличним освітленням у міському середовищі з порівняльним аналізом сучасних платформ та систем.

У другому розділі проведений аналіз технологій та концепцій автоматичного керування вуличним освітленням на основі IoT. А також проведений аналіз машинного навчання для автоматичного керування.

У третьому розділі розроблену програмну реалізацію IoT підходу та проведений опис програмої реалізації.

Під час проектування системи було створено розподілену архітектуру, яка включає сенсорні вузли з датчиками освітленості та руху, шлюзи передачі даних через MQTT-брокер Mosquitto та хмарну інфраструктуру з базою даних InfluxDB і візуалізаційними панелями Grafana. У систему інтегровано модуль машинного навчання, що дозволяє прогнозувати необхідність увімкнення чи вимкнення освітлення на основі історичних та поточних даних.

Оцінка ефективності показала, що запропонована система забезпечує суттєве зниження енергоспоживання у порівнянні з традиційними фіксованими або сценарними системами керування. Проведене порівняння продемонструвало середнє зменшення витрат електроенергії на рівні 30–40 % за місяць експлуатації. При цьому динамічний режим керування, що базується на аналізі руху та рівня

природного освітлення, дозволяє підвищити комфортність та безпеку міського середовища. Порівняння з існуючими комерційними платформами (Telensa PLANet, Schröder EXEDRA, Cisco Smart Lighting, Flashnet inteliLIGHT) засвідчило конкурентні переваги запропонованого підходу у гнучкості, здатності до самоадаптації та можливостях розширеного аналізу даних. Використання ПД-регуляторів у поєднанні з модулями машинного навчання забезпечує високу швидкодію системи, мінімізацію динамічної похибки та підвищення ефективності регулювання яскравості освітлення.

Проведена оцінка точності моделі машинного навчання підтвердила її придатність для практичного використання у системі адаптивного керування. Використання похідної від похибки у законі керування сприяло покращенню динамічних характеристик системи та узгодженості взаємодії між підсистемами збору даних, блоком прийняття рішень і виконавчими пристроями.

Перспективи подальшого розвитку системи включають розширення її функціональності за рахунок інтеграції з міськими платформами Smart City, впровадження прогнозної аналітики та інтелектуального планування профілю освітлення. Також актуальним є подальше вдосконалення механізмів самодіагностики, автоконфігурації вузлів та використання енергоощадних протоколів бездротового зв'язку.

Загалом результати проведеного дослідження та практичної реалізації підтверджують ефективність обраного підходу до інтелектуального керування вуличним освітленням і демонструють його значний потенціал для підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та поліпшення якості міського середовища.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлювання. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.

2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньої програми «Системна інженерія» [Електронний ресурс] : навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарєва, О. М. Цимбал, А. І. Бронніков ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. 218 с. ISBN 978-617-8332-16-7; DOI: 10.30837/978-617-8332-16-7

3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.

4. Маслов А. Д Інтелектуальна система керування вуличним освітленням з використанням іот-технологій та алгоритмів машинного навчання ADED 2025

5. Невлюдов, І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

6. Невлюдов І. Ш., Євсєєв В. В., Гурін Д. В. Математична модель блочного процесного планування в системах алокації завдань між людьми та калаборатівними роботами в рамках індустрій 5.0 //Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2025. – Т. 1. – №. 1 (92). – С. 157-163.

7. Мунтян, Д. М. Розробка і конфігурація інтелектуальної розподіленої системи контролю споживання електроенергії в багатоквартирному будинку:

магістерська дис.: 122 Комп'ютерні науки / Мунтян Даниїл Миколайович. – Київ, 2024. – 102 с.

8. Yevsieiev V. Study of Methods of Dynamic Description of The Environment for Collaborative Robots-Manipulators in the Concepts of Industry 5.0 / V. Yevsieiev, D. Gurin // Theory and practice of modern science : proceedings of the VIII International Scientific and Theoretical Conference, Kraków, October 11, 2024. - Kraków, 2024. - P. 51-54.

9. Nevliudov , I. ., Novoselov , S. ., Sychova , O. ., Gopejenko , V. ., & Kosenko , N. . (2024). Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks . *Advanced Information Systems*, 8(3), 100–110. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12>

10. Зарубін, І. С., та інш. (2024). Ефективність використання роботизованих систем у виробництві. Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки 2024: матеріали І-ої Всеукраїнської конференції, Харків, 16-17 травня 2024 (CITAR-2024). – pp. 150-153

11. Токарева О.В Теорія автоматичного управління : Харків : ФОП Панов А.М., 2020. – 346 с.

12. Основи охорони праці: Підручник./ К.Н.Ткачук, М.О.Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В.Зеркалов, Р.В.Сабарно, О.І.Полукаров, В.С.Коз'яков, Л.О.Митюк; За ред. К.Н.Ткачука і М.О. Халімовського. – К.: Основа, 2003 – 180- 285 с.

13. Andreiev, A. S., Analysis of robotics platforms for educational and research purposes. / A. Andreiev S. // Комп'ютерні ігри та мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2024 / Матеріали IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 26-27 вересня 2024 р. – pp. 25-27

14. Novoselov S. Wireless Sensor Network for Communication Between Base Stations in the Local Positioning System //2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2018. – С. 383-386.

15. Шпак О., Федорка П., Пригара М. Розумні міста та Інтернет речей: вплив розробок у сфері ІТ на розвиток міст і покращення якості життя //Сучасний стан

наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2023. – №. 3 (25). – С. 114-128.

16. ГЕВКО І. та інш.. Кібербезпека в децентралізованій інтернет-екосистемі web 3.0 //Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: педагогіка. – 2023. – №. 1. – С. 61-68.

17. Novoselov S., Donskov O. Study of mobile device wireless control technology in the visible range of the electromagnetic radiation //2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2016. – С. 123-124.

18. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Основи охорони праці» для студентів усіх напрямів та форм навчання. / Упоряд.: Т.Є. Стищенко, В.А. Айвазов, О.В. Мамонтов. – Харків: ХНУРЕ, 2018.– 120 с.