

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Інтелектуальна система адаптивного керування міським освітленням
на базі IoT-технологій»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

(підпис)

Андрій ПАВЛЮЧИК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ІСД-41
Андрій ПАВЛЮЧИК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Олег СЕНЬКОВ
к.т.н., доцент

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент:
к.т.н., доцент

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2026

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІСТ
Каміла СТОРЧАК
«___» _____ 2026р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Павлючику Андрію Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Інтелектуальна система адаптивного керування міським освітленням на базі IoT-технологій
керівник кваліфікаційної роботи Олег СЕНЬКОВ, к.т.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «20» лютого 2026 р. № 51
2. Строк подання кваліфікаційної роботи «01» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
 1. Науково-технічна література.
 2. Технічна документація мікроконтролерних платформ (ESP32) та мережевих протоколів.
 3. Програмні засоби для розробки цифрового двійника та тестування IoT-інфраструктури.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
 1. Аналіз предметної області та огляд існуючих технологій вуличного освітлення.
 2. Проектування апаратної архітектури та мережевої взаємодії IoT-вузлів.
 3. Програмне моделювання системи, тестування алгоритмів та економічне обґрунтування.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
6. Дата видачі завдання «20» лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з\п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури з питань IoT та систем розумного освітлення	24.02 - 02.03.2026	
2	Дослідження недоліків традиційних систем вуличного освітлення та формування вимог	03.03 - 15.03.2026	
3	Проектування апаратної архітектури обчислювального вузла та алгоритму кооперативної взаємодії	16.03 - 29.03.2026	
4	Програмна реалізація цифрового двійника та розгортання серверної мікросервісної інфраструктури	01.04 - 25.04.2026	
5	Проведення симуляційних експериментів, розрахунків енергоефективності та економічне обґрунтування	26.04 - 07.05.2026	
6	Оформлення бакалаврської роботи	08.05 - 25.05.2026	
7	Розробка демонстраційних матеріалів	26.05 - 30.05.2026	

Здобувач(ка) вищої освіти

(підпис)

Андрій ПАВЛЮЧИК

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Олег СЕНЬКОВ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 62 стор., 16 рис., 3 табл., 38 джерел.

Мета роботи – підвищення енергоефективності міської інфраструктури шляхом розробки, програмної симуляції та дослідження інтелектуальної системи адаптивного керування вуличним освітленням на базі технологій Інтернету речей.

Об'єкт дослідження – процеси керування енергоспоживанням та інфраструктурою міського вуличного освітлення.

Предмет дослідження – алгоритми адаптивного керування яскравістю, методи передачі телеметрії та засоби програмної симуляції IoT-мереж.

Короткий зміст роботи: у роботі розглядається проблематика неефективного використання електроенергії традиційними системами вуличного освітлення та обґрунтовується необхідність переходу до децентралізованих рішень у рамках концепції Smart City. Здійснено вибір апаратної платформи та спроектовано кіберфізичний вузол на базі мікроконтролера ESP32, мікрохвильового радару RCWL-0516 та ШІМ-регулятора. Розроблено модель скінченного автомата (FSM) та ієрархію топіків протоколу MQTT для реалізації алгоритму кооперативної взаємодії світильників («світловий коридор»). Для тестування мережі створено програмний емулятор — цифровий двійник (Digital Twin) мовою Python на базі асинхронного програмування, а також розгорнуто серверну мікросервісну інфраструктуру (Docker, Mosquitto, InfluxDB). Симуляційні експерименти підтвердили мінімальну мережеву затримку передачі тригерних сигналів (15-25 мс) та довели здатність системи скорочувати споживання електроенергії на 68%.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), РОЗУМНЕ МІСТО, АДАПТИВНЕ ОСВІТЛЕННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, MQTT, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, ГРАНИЧНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, DOCKER.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	11
1.1 Проблематика традиційних систем вуличного освітлення.....	11
1.2 Концепція Smart City та застосування технологій IoT.....	15
1.3 Огляд існуючих систем і технологій.....	18
1.4 Формування вимог до розроблюваної системи адаптивного освітлення.....	20
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	24
2.1 Вибір та обґрунтування апаратної платформи обчислювального вузла	24
2.2 Проєктування сенсорної та виконавчої підсистем	28
2.3 Мережева топологія та організація передачі даних на базі протоколу MQTT	32
2.4 Розробка алгоритму кооперативної взаємодії	35
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ.....	37
3.1 Програмна реалізація цифрового двійника на базі асинхронного програмування.....	37
3.2 Розгортання серверної інфраструктури збору телеметрії.....	40
3.3 Візуалізація даних та проведення симуляційних експериментів	44
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ	47
4.1 Розрахунок капітальних витрат на апаратну модернізацію.....	47
4.2 Порівняльний аналіз енергоспоживання та оцінка супутніх експлуатаційних переваг	49
4.3 Розрахунок операційних витрат та терміну окупності проєкту	51
4.4 Аналіз ризиків та перспективи розвитку проєкту	54
ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	59

ВСТУП

У сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв питання оптимізації витрат міської інфраструктури набуває пріоритетного значення. Традиційні системи вуличного освітлення переважно функціонують за жорсткими графіками або використовують базові фотореле, що призводить до нераціонального використання електроенергії — освітлення працює на повну потужність навіть за відсутності пішоходів чи автомобільного трафіку в нічний час. Додатковою проблемою застарілих підходів є екологічний аспект: надмірне та необґрунтоване енергоспоживання призводить до збільшення викидів вуглекислого газу генеруючими електростанціями. Крім того, нерегульоване вуличне освітлення створює ефект світлового забруднення, що негативно впливає на біоритми мешканців та навколишнє середовище. Водночас, практика повного або часткового відключення світла вночі з метою жорсткої економії є неприпустимою, оскільки статистично доведено, що зниження рівня освітленості вулиць прямо корелює зі зростанням кількості дорожньо-транспортних пригод та рівня вуличної злочинності. Відповідно, виникає гостра необхідність у пошуку технологічного компромісу між економією ресурсів та забезпеченням належного рівня безпеки.

Розвиток концепції «Розумного міста» (Smart City) та масове впровадження технологій Інтернету речей (IoT) дозволяють докорінно змінити підхід до управління міським середовищем. Сучасні IoT-рішення дають змогу створювати гнучкі системи, які збирають телеметрію в режимі реального часу та динамічно адаптують рівень яскравості мережі світильників залежно від рівня природної інсоляції та інтенсивності дорожнього руху. Впровадження таких інтелектуальних систем дозволяє суттєво зменшити обсяги споживання електроенергії, знизити експлуатаційні витрати шляхом автоматизованої діагностики несправностей та покращити екологічну ситуацію у містах. Зважаючи на це, проєктування та програмне моделювання систем адаптивного керування освітленням є надзвичайно актуальним завданням.

Мета дослідження полягає у підвищенні енергоефективності міської інфраструктури шляхом розробки, програмної симуляції та дослідження інтелектуальної системи адаптивного керування вуличним освітленням на базі технологій Інтернету речей.

Об'єктом дослідження є процеси керування енергоспоживанням та інфраструктурою міського вуличного освітлення.

Предметом дослідження є алгоритми адаптивного керування яскравістю, методи передачі телеметрії та засоби програмної симуляції IoT-мереж.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні *завдання дослідження*:

1. Проаналізувати предметну область, виявити недоліки традиційних систем;
2. Проаналізувати сучасні підходи до побудови IoT-систем, обрати апаратну платформу (мікроконтролери, сенсори) та мережеві протоколи;
3. Спроекувати архітектуру та програмно реалізувати інтелектуальну систему: розробити алгоритми адаптивного керування і самодіагностики, розгорнути серверну інфраструктуру, створити емулятор мережі світильників та диспетчерську панель візуалізації;
4. Дослідити ефективність розробленої системи шляхом проведення симуляційних експериментів, проаналізувати енергоспоживання різних сценаріїв освітлення, оцінити надійність та навести економічне обґрунтування доцільності впровадження.

Методи дослідження. У роботі використано методи системного аналізу для проектування архітектури, теорію алгоритмів для розробки логіки керування, об'єктно-орієнтоване та асинхронне програмування для створення цифрового двійника, а також методи статистичного аналізу для обробки результатів експериментів.

Практичне значення розробки полягає у створенні готового концепту та програмно-технічного стенда, який дозволяє моделювати роботу сотень інтелектуальних пристроїв у реальному мережевому середовищі. Використання

Docker-контейнеризації та промислових баз даних робить систему масштабованою та готовою до інтеграції в реальні муніципальні проєкти диспетчеризації.

Апробація дослідження здійснювалась у формі участі на науково практичних конференціях, що проходили на базі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій:

1. III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу» з поданням тез на тему «Інтелектуальні системи керування дорожнім рухом на основі машинного навчання».

2. VII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» з поданням тез на тему «Екологічні та економічні аспекти впровадження інтелектуального вуличного освітлення в концепції smart city».

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Проблематика традиційних систем вуличного освітлення

Вуличне освітлення становить собою один із найважливіших елементів первинної інфраструктури будь-якого населеного пункту. Його роль є критично важливою для забезпечення нормального функціонування міської екосистеми: воно гарантує безпеку руху транспорту та пішоходів у темний час доби, сприяє значному зменшенню рівня дорожньо-транспортних пригод, знижує рівень вуличної злочинності та формує комфортне середовище для повсякденного життя міських жителів. Однак, забезпечення безперебійного функціонування системи вуличного освітлення забирає суттєву частку коштів із муніципальних бюджетів. Згідно з дослідженнями енергетичних аудиторів, у багатьох містах ця стаття експлуатаційних витрат сягає від 20% до 40% усього обсягу спожитої містом електроенергії [1].

Історично еволюція вуличного освітлення рухалася переважно шляхом модернізації самих джерел світла. Відбувся поступовий перехід від ламп розжарювання до дугових ртутних ламп (ДРЛ), згодом — до більш ефективних натрієвих ламп високого тиску (ДНаТ), і, нарешті, до сучасних світлодіодних (LED) світильників (рис. 1.1) [2]. Незважаючи на активну заміну старих світильників на енергоефективні аналоги, методи контролю та управління цими масивними мережами у переважній більшості міст залишаються консервативними та концептуально застарілими [4]. Огляд та системний аналіз поточних традиційних інсталяцій дозволяє виокремити три фундаментальні групи проблем: енергетично-економічні, експлуатаційні та екологічні.



Рис. 1.1 Еволюція вуличних ламп [2]

Першою і найголовнішою проблемою є надмірне споживання енергоресурсів через відсутність адаптивності систем управління. Більшість старих мереж освітлення функціонують за каскадним принципом керування. Центральною ланкою такої системи є шафа управління, яка оснащена електромеханічними таймерами, астрономічними реле або найпростішими аналоговими фотодатчиками (сутінковими реле) (рис. 1.2) [3]. Використання таких засобів автоматизації має низку критичних недоліків. Наприклад, класичні фотореле часто дають хибні спрацьовування через банальне забруднення сенсора пилом або через короткочасне освітлення фарами проїжджаючих автомобілів. Астрономічні таймери, хоча і позбавлені проблеми хибних спрацьовувань, вмикають живлення за жорстко запрограмованим графіком заходу та сходу сонця за географічними координатами, абсолютно ігноруючи фактичні погодні умови: щільну хмарність або туман, коли освітлення потрібне раніше.

Незалежно від типу реле, результат їхньої роботи зводиться до бінарної логіки: ліхтарі вмикаються одночасно на всій лінії і працюють на повній номінальній потужності усю ніч безперервно. При цьому система не враховує

динамічну потребу містян в освітленні. У години найменшої активності, зазвичай з 02:00 до 05:00 ранку, коли вулиці практично повністю порожні, мережа продовжує споживати максимальну кількість енергії. Оскільки традиційні лампи або базові LED-драйвери не підтримують функцію димірування (плавної зміни яскравості), місто змушене щоночі оплачувати освітлення порожніх просторів, що призводить до колосальних фінансових втрат.



Рис. 1.2 Сутінкове реле [3]

Другою вагомою проблемою є ускладнене технічне обслуговування через відсутність зворотного зв'язку. Класичні системи є принципово односпрямованими: диспетчерський центр може надіслати загальну команду на активацію контактора, подавши струм на магістральну лінію, але фізично не здатен отримати жодної телеметричної інформації про стан кінцевих пристроїв. У таких конфігураціях диспетчер не може віддалено визначити перегорілу лампу, деградацію світлодіодної матриці, пошкодження кабелю, коротке замикання або несанкціоноване підключення сторонніх споживачів до муніципальної мережі. Виявленням поломок комунальні підприємства займаються виключно реактивним шляхом. Для цього організовуються регулярні нічні об'їзди вулиць ремонтними

бригадами, що призводить до значних витрат пального та робочого часу персоналу [4]. Іншим джерелом інформації про аварії є скарги від місцевих мешканців. Такий підхід суттєво подовжує час реагування на інциденти та критично збільшує операційні витрати (OPEX) на утримання великого штату працівників та парку спеціалізованої автотехніки.

Третя група проблем стосується екологічних наслідків та явища «світлового забруднення». Надлишкова та неоптимізована генерація електроенергії для живлення нерегульованих систем освітлення безпосередньо пов'язана зі збільшенням викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу, генеруючими електростанціями. Крім того, надмірне та постійне освітлення порожніх вулиць у нічний час створює ефект світлового забруднення (light pollution). Це явище проявляється у вигляді штучного світіння нічного неба над містами, що не лише унеможливорює астрономічні спостереження, але й негативно впливає на локальні екосистеми. Дослідження показують, що надлишкове штучне світло дезорієнтує птахів, порушує життєві цикли комах та негативно впливає на циркадні ритми людей, пригнічуючи вироблення гормону мелатоніну та знижуючи якість сну [5].

Спроби муніципалітетів вирішити проблему економії бюджетних коштів шляхом застосування секційних відключень, наприклад вимкнення кожного другого ліхтаря у шаховому порядку або повне знеструмлення вулиць після півночі, є технологічно і соціально деструктивними. За даними поліції, погіршення видимості на дорогах у нічний час має пряму кореляцію зі стрімким зростанням кількості дорожньо-транспортних пригод та підвищенням рівня вуличної злочинності [6].

Отже, можна зробити висновок, що традиційні підходи до управління вуличним освітленням повністю вичерпали свій економічний та технологічний потенціал. Проста заміна ламп на енергоефективні аналоги без зміни логіки управління вирішує проблему лише частково. Подолання описаного комплексу проблем вимагає переходу до принципово нових, гнучких кіберфізичних архітектур керування, які здатні безперервно збирати телеметрію та автономно приймати рішення щодо рівня освітленості в режимі реального часу.

1.2 Концепція Smart City та застосування технологій IoT

Стрімка урбанізація та зростання чисельності міського населення ставлять перед муніципалітетами складні завдання щодо управління обмеженими ресурсами. Відповіддю на ці виклики стала концепція «Розумного міста» (Smart City). У сучасному науковому дискурсі Smart City визначається як інноваційне місто, що використовує інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) та інші засоби для покращення якості життя, ефективності міських операцій та послуг, а також для забезпечення конкурентоспроможності, при цьому задовольняючи потреби нинішнього та майбутніх поколінь в економічному, соціальному та екологічному аспектах [7].

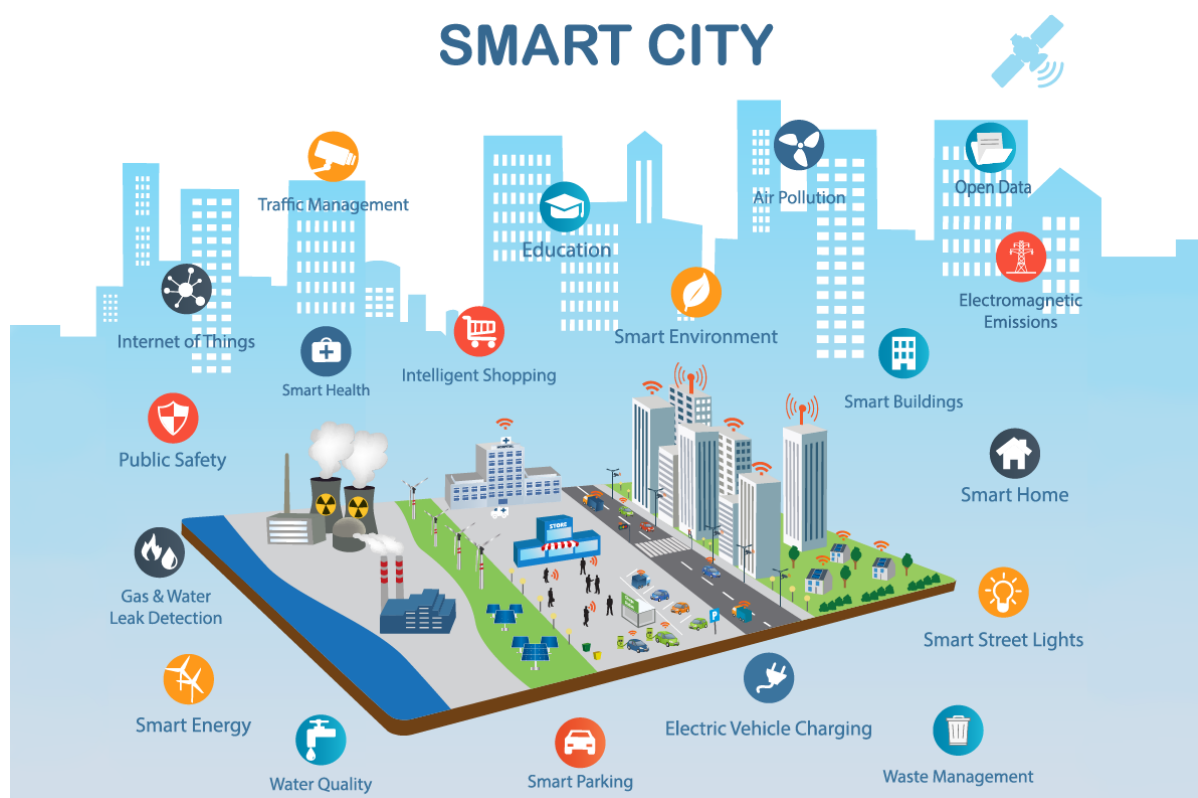


Рис. 1.3 Інфраструктура Smart city [7]

Фундаментальною технологічною базою для реалізації концепції Smart City є парадигма Інтернету речей (Internet of Things, IoT). IoT являє собою глобальну мережеву інфраструктуру, що складається з фізичних об'єктів, оснащених

Інтеграція технологій IoT перетворює традиційний вуличний світильник на інтелектуальний кіберфізичний вузол. Сучасний «розумний світильник» (Smart Luminaire) містить мікроконтролер, модулі бездротового зв'язку, твердотільні реле або DALI/PWM-драйвери для плавного димірування, та набір датчиків освітленості, руху, присутності.

Застосування таких вузлів докорінно змінює логіку управління міською інфраструктурою. Відбувається перехід від жорсткого централізованого контролю до децентралізованих і гнучких моделей. Інформація від датчиків руху, встановлених на світильниках, дозволяє системі в режимі реального часу ідентифікувати наближення автомобілів або пішоходів та динамічно регулювати рівень яскравості групи світильників. У періоди відсутності трафіку система автоматично знижує потужність ламп до фонового рівня (20-30% від номінальної яскравості), гарантуючи при цьому миттєве підвищення до 100% при фіксації руху. Такий підхід забезпечує оптимізацію споживання електроенергії без будь-яких компромісів у сфері безпеки [10].

Важливою перевагою впровадження IoT є забезпечення двоспрямованої комунікації (Two-way Communication). Інтелектуальні контролери здатні безперервно збирати та передавати до центрального диспетчерського пункту телеметричні дані: поточне споживання електроенергії, значення напруги та сили струму, температуру LED-матриці, а також статус підключення.

Збір телеметрії дозволяє реалізувати перехід від реактивного до предиктивного (прогнозованого) технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Замість нічних патрулювань ремонтними бригадами, аналітична система автоматично фіксує відхилення в параметрах струму і генерує тривожні сповіщення із точними географічними координатами несправного пристрою ще до того, як лампа повністю вийде з ладу [11]. Це радикально зменшує операційні витрати комунальних підприємств та підвищує загальний індекс надійності міської інфраструктури (System Average Interruption Duration Index, SAIDI).

Отже, застосування технологій IoT у системах зовнішнього освітлення є необхідним кроком для трансформації традиційної інфраструктури в елемент Smart

City. Це створює надійне підґрунтя для розробки складних алгоритмів адаптивного керування та кооперативної взаємодії пристроїв, що стане предметом подальшого проектування.

1.3 Огляд існуючих систем і технологій

На сучасному ринку IoT-рішень для розумного міста вже існує низка комерційних систем диспетчеризації зовнішнього освітлення від провідних світових виробників. Серед найбільш відомих платформ можна виділити Interact City від компанії Signify (раніше Philips Lighting) та EXEDRA від групи Schröder [12]. Ці системи пропонують багатий функціонал: віддалене димірування, збір телеметрії, інтеграцію з геоінформаційними картами міста та автоматичне формування звітів про енергоспоживання. Проте, незважаючи на їхню технологічну досконалість, масове впровадження таких рішень, особливо в країнах, що розвиваються, та середніх територіальних громадах, стикається з критичними бар'єрами.

Головним недоліком великих комерційних систем є закритість їхньої архітектури та ефект «прив'язки до постачальника» (Vendor Lock-in) [12]. Муніципалітети, які інтегрують такі платформи, змушені використовувати виключно пропріетарні контролери та датчики конкретного виробника, вартість яких значно перевищує універсальні аналоги на відкритому ринку. Крім того, програмне забезпечення таких систем здебільшого постачається за моделлю SaaS (Software as a Service) із високими щорічними абонентськими платами за кожну підключену світлоточку. Це робить їх економічно обтяжливими для довгострокової експлуатації в умовах обмежених муніципальних бюджетів.

З мережевої точки зору, переважна більшість існуючих міських систем розумного освітлення будується на базі енергоефективних мереж дальнього радіуса дії (LPWAN), зокрема стандарту LoRaWAN або стільникового NB-IoT. Хоча ці протоколи забезпечують чудове покриття на великих відстанях при мінімальному енергоспоживанні вузлів, вони мають суттєві архітектурні обмеження щодо

пропускної здатності та затримок передачі пакетів (Latency). Для реалізації алгоритмів швидкого адаптивного керування (наприклад, створення кооперативного «світлового коридору», що має миттєво супроводжувати автомобіль, який рухається зі швидкістю понад 50 км/год) мережа LoRaWAN є неефективною через жорсткі обмеження робочого циклу (Duty Cycle) та високий час відгуку [13]. Вирішення таких завдань вимагає застосування більш швидкісних та легковагових протоколів реального часу, зокрема MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), розгорнутих поверх Wi-Fi Mesh або стільникових мереж 4G/LTE.

Ще однією вагомою проблемою сучасного ринку є відсутність у закритих комерційних продуктах доступних засобів для імітаційного моделювання. Зазвичай замовник може оцінити реальну ефективність роботи системи лише після повної закупівлі обладнання та його фізичного монтажу на вулицях. Це практично унеможливорює попереднє стрес-тестування алгоритмів енергозбереження та перевірку системи на відмовостійкості. У сучасній науковій та інженерній практиці цей недолік успішно вирішується за допомогою технології «цифрових двійників» (Digital Twins) — створення повної віртуальної програмної копії фізичної інфраструктури, яка дозволяє симулювати дорожній трафік та відпрацьовувати нештатні ситуації на рівні програмного коду ще до етапу апаратного впровадження (рис. 1.5) [14, 15].

Наведена на рис. 1.5 модель демонструє, що повноцінне "Розумне місто" базується на фундаменті з трьох взаємопов'язаних технологічних шарів: фізичного пристрою (Physical Twin), комунікаційної інфраструктури (IoT/Remote Sensing) та програмного моделювання (Digital Twin). Саме така архітектура забезпечує надійну базу для роботи систем управління, прийняття рішень та надання сервісів (Governance, Management, Entertainment).

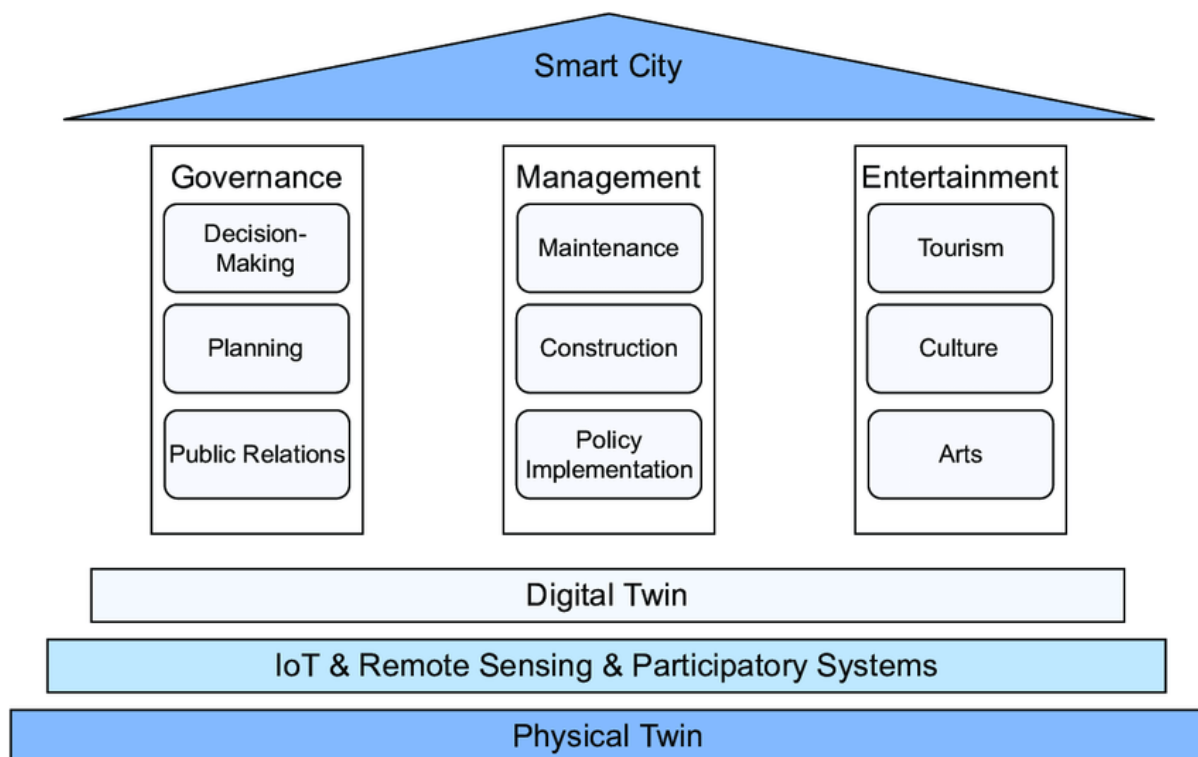


Рис. 1.5 Концептуальна модель Smart City на базі цифрового двійника [15]

Отже, аналіз існуючих систем засвідчує об'єктивну необхідність розробки відкритої, гібридної архітектури. Вона має базуватися на доступній апаратній платформі (Edge-контролерах), використовувати відкритий та швидкий протокол MQTT для забезпечення мінімальних мережових затримок, а також обов'язково включати рівень програмної імітації (цифрового двійника) для верифікації ефективності алгоритмів перед їхнім фізичним розгортанням.

1.4 Формування вимог до розроблюваної системи адаптивного освітлення

Проведений аналіз предметної області засвідчив, що традиційні підходи до управління вуличним освітленням є економічно та екологічно неефективними, а існуючі комерційні платформи диспетчеризації мають закриту архітектуру і високу вартість розгортання. Вирішення цих проблем вимагає переходу до

децентралізованих архітектур на базі граничних обчислень (Edge Computing) та використання відкритих протоколів передачі даних.

Зважаючи на виявлені недоліки, основним завданням даної кваліфікаційної роботи є проєктування апаратної архітектури та розробка цифрового двійника інтелектуальної системи адаптивного керування вуличним освітленням, яка здатна динамічно регулювати рівень яскравості мережі світильників залежно від наявності дорожнього трафіку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс взаємопов'язаних інженерних та програмних завдань, які розподілено на три основні етапи:

1. Проєктування апаратної архітектури (рівень Edge):

- Обрати та обґрунтувати енергоефективну апаратну платформу для мікроконтролера кінцевого вузла;
- Спроектувати сенсорну підсистему для точної детекції транспортних засобів та пішоходів;
- Розробити математичну модель скінченного автомата (FSM) для реалізації алгоритму «світлового коридору», що забезпечить завчасне підвищення яскравості освітлення за маршрутом руху об'єкта;
- Визначити оптимальний мережевий протокол реального часу (MQTT) для забезпечення мінімальних затримок при комунікації між вузлами.

2. Розробка цифрового двійника (програмно-імітаційна частина):

- Створити високопродуктивний програмний емулятор мережі кінцевих пристроїв на мові Python з використанням парадигми асинхронного програмування (asyncio);
- Реалізувати стохастичний генератор дорожнього трафіку на основі розподілу Пуассона для створення реалістичних сценаріїв навантаження на систему;
- Розгорнути серверну інфраструктуру збору телеметрії за допомогою технології контейнеризації Docker, інтегрувавши реальний брокер повідомлень (Eclipse Mosquitto) та професійну базу даних часових рядів (InfluxDB);

- Створити диспетчерський інтерфейс (дашборд) у середовищі Matplotlib для візуалізації телеметрії в режимі реального часу.

3. Проведення симуляційних експериментів та економічне обґрунтування:

- Дослідити поведінку системи та рівень енергоспоживання у різних сценаріях: вечірній пік, глибока ніч, ранковий трафік;

- Перевірити відмовостійкість розроблених алгоритмів (Fail-Safe) при втраті зв'язку з сервером;

- На основі отриманих телеметричних даних розрахувати відсоток зекономленої електроенергії та навести фінансово-економічне обґрунтування (ROI) доцільності практичного впровадження спроектованої системи.

Реалізація такого комплексного гібридного підходу забезпечить усунення ключових недоліків існуючих комерційних рішень, проаналізованих у попередніх підрозділах. По-перше, орієнтація на відкриті стандарти, зокрема протокол MQTT, та використання універсальних мікроконтролерів дозволить уникнути проблеми «прив'язки до постачальника». Це гарантуватиме потенційним замовникам, зокрема муніципалітетам, незалежність у виборі апаратних компонентів та суттєво знизить капітальні витрати на етапі розгортання.

По-друге, розробка цифрового двійника створить абсолютно безпечне та економічно вигідне середовище (Sandbox) для верифікації керуючих алгоритмів. Оскільки впровадження інновацій у сфері критичної інфраструктури, якою є вуличне освітлення, завжди пов'язане з ризиками для безпеки дорожнього руху, програмна імітація дозволить провести повноцінне стрес-тестування системи без ризику знеструмлення реальних вулиць у випадку програмної помилки.

Крім того, спроектована архітектура матиме високий потенціал до масштабування. Завдяки контейнеризації серверної інфраструктури Docker та асинхронній природі розроблюваного емулятора, запропонована модель зможе гнучко адаптуватися: від симуляції невеликої тестової ділянки до відтворення роботи освітлювальної мережі цілого мікрорайону з тисячами інтелектуальних вузлів.

У підсумку, успішне виконання сформульованих завдань не лише доведе технічну життєздатність створення ефективної децентралізованої системи освітлення на базі Edge-обчислень, але й надасть чіткий інженерно-економічний орієнтир для органів місцевого самоврядування щодо доцільності інвестицій у технології Smart City.

РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНОЇ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1 Вибір та обґрунтування апаратної платформи обчислювального вузла

Створення децентралізованої системи адаптивного освітлення на базі концепції Edge Computing вимагає перенесення частини логіки прийняття рішень із центрального сервера безпосередньо на кінцевий пристрій — «розумний світильник». Це висуває жорсткі вимоги до обчислювального вузла (мікроконтролера), який має одночасно виконувати кілька завдань у режимі реального часу: безперервно зчитувати дані з радіолокаційних датчиків руху, генерувати широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ) для плавного димірування LED-матриці та підтримувати стабільне бездротове з'єднання з MQTT-брокером [16].

Для вибору оптимальної платформи було проведено порівняльний аналіз трьох популярних мікроконтролерних систем, які широко застосовуються у прототипуванні та дрібносерійному виробництві IoT-пристроїв: Arduino Mega 2560, Raspberry Pi Pico W та ESP32.

Arduino Mega 2560 (рис. 2.1) базується на 8-бітній архітектурі AVR (мікроконтролер ATmega2560). Незважаючи на велику кількість пінів вводу/виводу та величезну базу готових бібліотек, ця платформа є морально застарілою для сучасних завдань Інтернету речей. Низька тактова частота (16 МГц) та відсутність вбудованого модуля бездротового зв'язку вимагають використання додаткових розширень Ethernet або Wi-Fi шилдів, що суттєво збільшує габарити, вартість кінцевого пристрою та знижує загальну надійність системи. Крім того, 8-бітна архітектура не здатна ефективно працювати з криптографічними алгоритмами (TLS/SSL), які є стандартом для безпечної передачі телеметрії в сучасних Smart City системах.

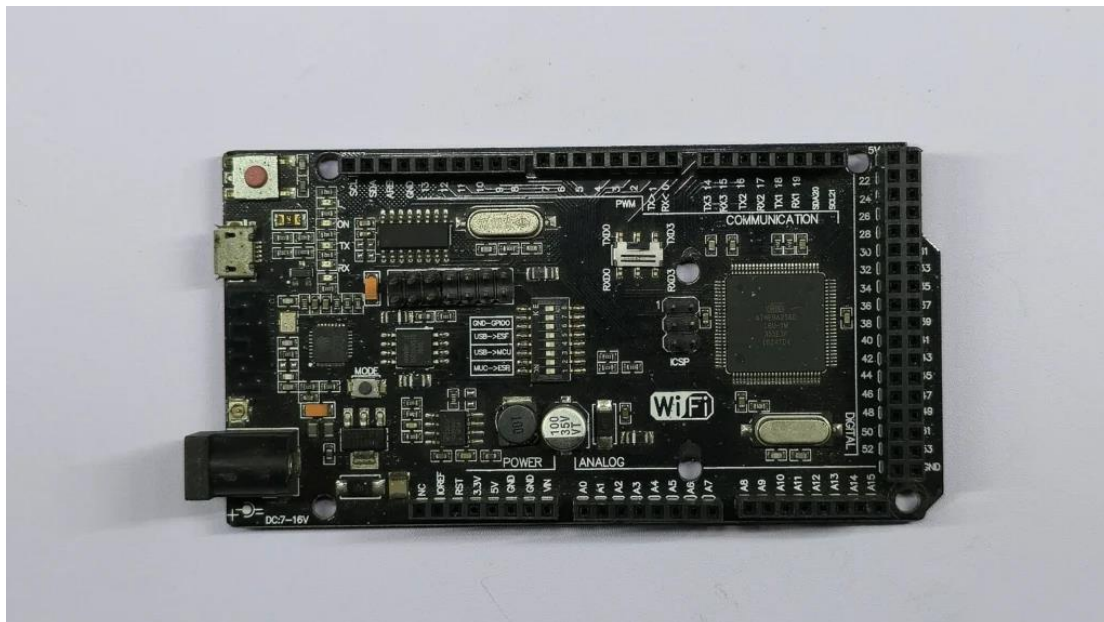


Рис. 2.1 Плата Arduino Mega 2560 [18]

Raspberry Pi Pico W (рис. 2.2) — це сучасна плата, побудована на базі двоядерного мікроконтролера RP2040 (архітектура ARM Cortex-M0+ з тактовою частотою 133 МГц). Модифікація «W» оснащена вбудованим чипом Infineon CYW43439, який забезпечує підтримку Wi-Fi. Це потужна та перспективна платформа, яка підтримує багатопотоковість та має достатньо оперативної пам'яті (264 КБ SRAM). Проте наявність лише одного ядра для користувацьких завдань (друге часто резервується під мережевий стек) та порівняно менша екосистема готових промислових рішень для протоколу MQTT роблять її не ідеальним кандидатом для даного проєкту.

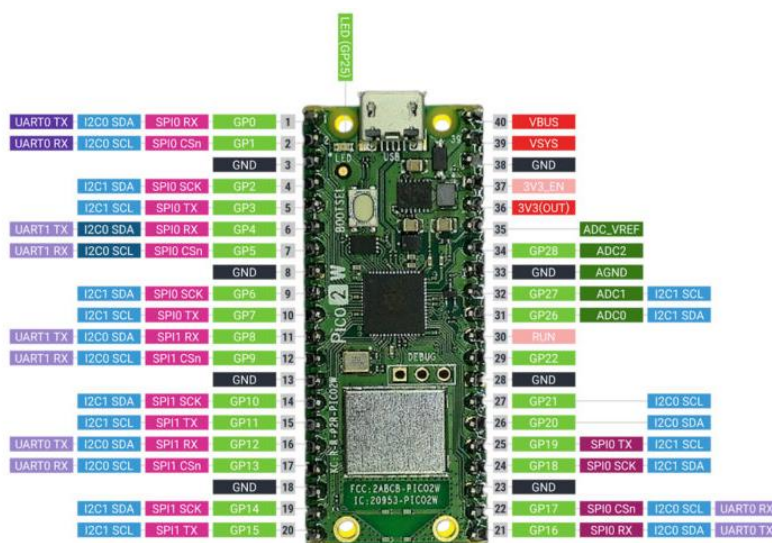


Рис. 2.2 Плата Raspberry Pi Pico W та її схема [18]

ESP32 (від компанії Espressif Systems) (рис. 2.3) — це система на кристалі (SoC), яка де-факто стала галузевим стандартом для створення IoT-пристроїв. Вона базується на 32-бітній двоядерній архітектурі Xtensa LX6 мікропроцесора з тактовою частотою до 240 МГц [17]. Головною перевагою ESP32 є нативне вбудування модулів Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth (v4.2 BR/EDR та BLE) безпосередньо в кристал. Наявність двох повноцінних ядер дозволяє архітектурно розділити процеси: одне ядро відповідає виключно за підтримку стабільного бездротового з'єднання та обробку MQTT-пакетів, тоді як друге безперервно обробляє переривання від датчиків руху та керує освітленням.

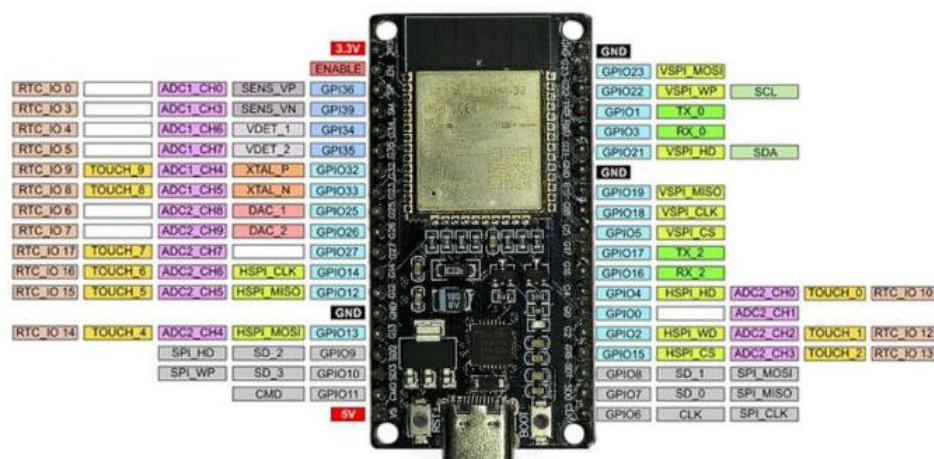


Рис 2.3 Плата ESP32 та її схема [18]

Основні технічні характеристики розглянутих платформ зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Порівняльна характеристика мікроконтролерних платформ

Характеристика	Arduino Mega 2560	Raspberry Pi Pico W	ESP32
Архітектура процесора	8-bit AVR	32-bit ARM Cortex-M0+	32-bit Xtensa Dual-Core
Тактова частота	16 МГц	133 МГц	160–240 МГц
Оперативна пам'ять (SRAM)	8 КБ	264 КБ	520 КБ
Флеш-пам'ять	256 КБ	2 МБ	4 МБ (типово)
Бездротовий зв'язок (Wi-Fi/BLE)	Відсутній (потрібен шилд)	Wi-Fi 4 / BLE 5.2	Wi-Fi 4 / Bluetooth 4.2
Апаратна криптографія	Відсутня	Відсутня	AES, SHA-2, RSA, ECC
Підтримка ОС реального часу	Обмежена (FreeRTOS)	Підтримується	Повна нативна інтеграція
Орієнтовна вартість (модуля)	Висока	Середня	Низька

Аналіз даних, наведених у таблиці 2.1, беззаперечно свідчить на користь платформи ESP32. Окрім домінуючих обчислювальних характеристик та наявності бездротових інтерфейсів, критично важливою для інфраструктури розумного міста є наявність модулів апаратного криптографічного прискорення (AES, SHA, RSA) [17]. Це дозволяє кінцевому вузлу шифрувати телеметричний трафік «на льоту» без значного навантаження на процесор, що гарантує захист міської мережі від кібератак.

Враховуючи також найнижчу вартість мікросхеми при масштабуванні до рівня десятків тисяч світильників, мікроконтролер серії ESP32 обрано як базову апаратну платформу (обчислювальне ядро) для розробки кіберфізичного вузла системи адаптивного освітлення.

2.2 Проектування сенсорної та виконавчої підсистем

Для забезпечення повноцінної автономної роботи кіберфізичного вузла на базі обраного мікроконтролера ESP32, система повинна бути оснащена надійною сенсорною підсистемою для збору даних із навколишнього середовища та виконавчою підсистемою для фізичного керування джерелом світла.

Ключовим завданням сенсорної підсистеми є точна та безперебійна фіксація пішоходів та транспортних засобів, що наближаються до зони дії світильника. У традиційних системах автоматизації для цього найчастіше використовують пасивні інфрачервоні датчики (PIR-сенсори, наприклад HC-SR501), які реагують на теплове випромінювання тіла. Проте для завдань зовнішнього вуличного освітлення PIR-датчики є неефективними. По-перше, вони мають високу хибну спрацьовуваність під час різких перепадів температур або опадів. По-друге, інфрачервоне випромінювання погано проходить крізь скло, через що PIR-сенсор може не зафіксувати рух автомобіля, якщо тепло двигуна екрановане металевим кузовом, а водій знаходиться за склом [19].

З огляду на ці обмеження, для розроблюваної системи обрано мікрохвильовий радіолокаційний датчик руху RCWL-0516 (рис. 2.4). Принцип його дії базується на ефекті Доплера: модуль постійно випромінює радіохвилі (на частоті близько 3.18 ГГц) і аналізує частоту відбитого сигналу. Будь-який рухомий об'єкт у радіусі дії змінює частоту відбитої хвилі, що миттєво фіксується компаратором датчика [20].

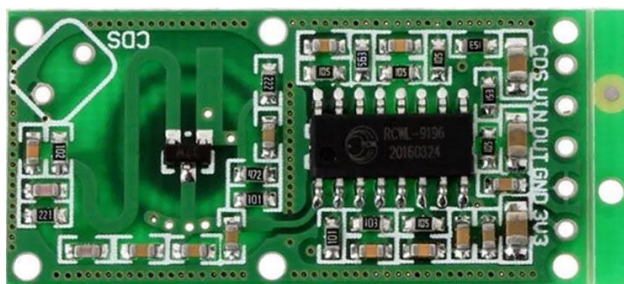


Рис. 2.4 Радіолокаційний датчик руху RCWL-0516 [20]

Головними перевагами мікрохвильового радара для нашого проєкту є:

1. Здатність виявляти рух транспортних засобів незалежно від їхньої температури чи екранування.

2. Проникна здатність: радіохвилі проходять крізь пластикові корпуси світильників, що дозволяє герметично приховати датчик всередині плафона, захистивши його від дощу, пилу та вандалізму.

3. Широка діаграма спрямованості (до 360 градусів) та більший радіус дії (до 7-10 метрів).

Додатково сенсорний блок оснащується цифровим датчиком освітленості BH1750 (рис. 2.5), який підключається до мікроконтролера по шині I2C. На відміну від дешевих аналогових фоторезисторів, BH1750 видає точне значення природної інсоляції в люксах (lx). Це дозволяє системі блокувати вмикання освітлення вдень, навіть якщо мікрохвильовий радар фіксує рух, що є необхідним для максимального енергозбереження [21].



Рис. 2.5 Датчик освітленості BH1750 [21]

Виконавча підсистема відповідає за перетворення логічних команд від мікроконтролера на фізичну зміну світлового потоку LED-матриці ліхтаря. Оскільки світлодіоди є приладами, що керуються струмом, для плавної зміни їхньої яскравості застосовується метод ШІМ.

Апаратна реалізація виконавчого модуля базується на використанні потужного N-канального MOSFET-транзистора логічного рівня IRLZ44N (рис. 2.6).



Рис. 2.6 MOSFET-транзистор логічного рівня IRLZ44N [22]

Мікроконтролер ESP32 генерує високочастотний ШІМ-сигнал з частотою від 1 до 5 кГц, що запобігає видимому мерехтінню і подає його на затвор (Gate) транзистора. Змінюючи шпаруватість (Duty Cycle) ШІМ-сигналу від 0% до 100%, транзистор з відповідною частотою відкриває і закриває ланцюг живлення LED-матриці.

Завдяки інерційності зору, людина сприймає ці високочастотні перемикання як рівномірне світіння певної яскравості. Наприклад, для забезпечення фоновому режиму освітлення (30% яскравості) контролер генерує сигнал, при якому транзистор відкритий 30% часу періоду і закритий решту 70%. При надходженні сигналу тривоги від радара, шпаруватість миттєво або плавно (програмним кроком) збільшується до 100%.

Така конфігурація сенсорної та виконавчої підсистем формує надійний апаратний базис Physical Twin кіберфізичного вузла, здатний ефективно збирати інформацію про дорожню обстановку та миттєво адаптувати рівень освітленості.

Для попередньої верифікації обраних апаратних рішень та тестування базової логіки керування було розроблено віртуальний прототип кіберфізичного вузла.

Моделювання електричної схеми здійснювалося у хмарному середовищі імітаційного моделювання IoT-пристроїв «Wokwi» (рис. 2.7).

У зв'язку з відсутністю специфічних мікрохвильових радарів у стандартних бібліотеках симуляторів, на етапі прототипування функцію тригера руху виконує стандартний PIR-сенсор, а рівень природної інсоляції фіксується аналоговим модулем фоторезистора. Виконавча частина представлена світлодіодом із струмообмежувальним резистором, яскравість якого регулюється за допомогою ШІМ-сигналу, що генерується на виводі D15 мікроконтролера ESP32. Така віртуальна збірка дозволяє безпечно відлагодити програмний код опитування датчиків перед етапом фізичного монтажу компонентів.

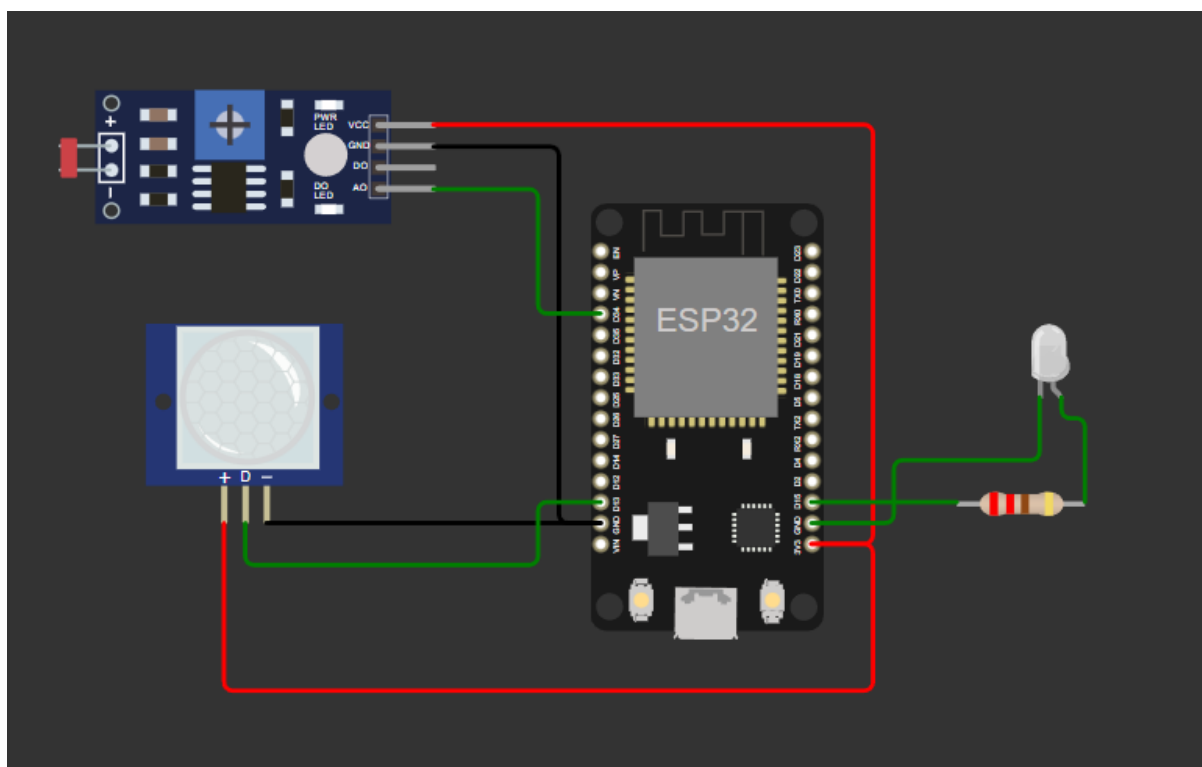


Рис. 2.7 Схема підключення сенсорної та виконавчої підсистем до мікроконтролера ESP32 (Wokwi)

2.3 Мережева топологія та організація передачі даних на базі протоколу MQTT

Для забезпечення координації між окремими кіберфізичними вузлами та центральною диспетчерською системою необхідно спроектувати надійну мережеву топологію та обрати оптимальний протокол прикладного рівня. Для обґрунтування вибору технології зв'язку на фізичному рівні доцільно порівняти популярні бездротові IoT-стандарти за ключовими для проєкту параметрами: затримкою передачі пакетів (Latency), пропускну здатністю та радіусом дії. Основні характеристики наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика технологій бездротового зв'язку для IoT

Технологія	Радіус дії	Пропускна здатність	Затримка (Latency)	Енергоспоживання	Залежність від провайдера
LoRaWAN	До 15 км	Дуже низька (до 50 Кбіт/с)	Висока (секунди)	Дуже низьке	Розгортається власна мережа
NB-IoT	До 10 км	Низька (до 250 Кбіт/с)	Середня (1-2 секунди)	Низьке	Залежить від оператора
Zigbee (Mesh)	10–100 м (між вузлами)	Середня (до 250 Кбіт/с)	Низька (мілісекунди)	Низьке	Розгортається власна мережа
4G/LTE (Cellular)	Глобальний (через оператора)	Висока (до 100 Мбіт/с)	Низька (мілісекунди)	Високе	Залежить від оператора

Аналіз даних таблиці 2.2 показує, що мережі класу LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) мають занадто високу мережеву затримку (від 1 до кількох секунд), що є неприпустимим для реалізації алгоритмів швидкого реагування, таких як «світловий коридор». Враховуючи, що обрана апаратна платформа ESP32 має

нативну підтримку стандарту IEEE 802.11 (Wi-Fi), використання локальних топологій Mesh або підключення до маршрутизаторів 4G/LTE забезпечує необхідну пропускну здатність та мінімальні затримки передачі телеметрії без необхідності розгортання проміжних апаратних шлюзів [23].

На прикладному рівні для обміну даними обрано протокол MQTT. Це стандартизований (OASIS/ISO) легковаговий протокол обміну повідомленнями, розроблений спеціально для пристроїв з обмеженими апаратними ресурсами.

Протокол MQTT працює за парадигмою «видавець-підписник» (Publish/Subscribe), що концептуально відрізняється від традиційної клієнт-серверної архітектури (як-от HTTP/REST). У центрі мережевої топології знаходиться сервер-посередник — брокер повідомлень (MQTT Broker), наприклад, промисловий сервер Eclipse Mosquitto. Архітектура обміну даними за цим протоколом наведена на рис. 2.8.

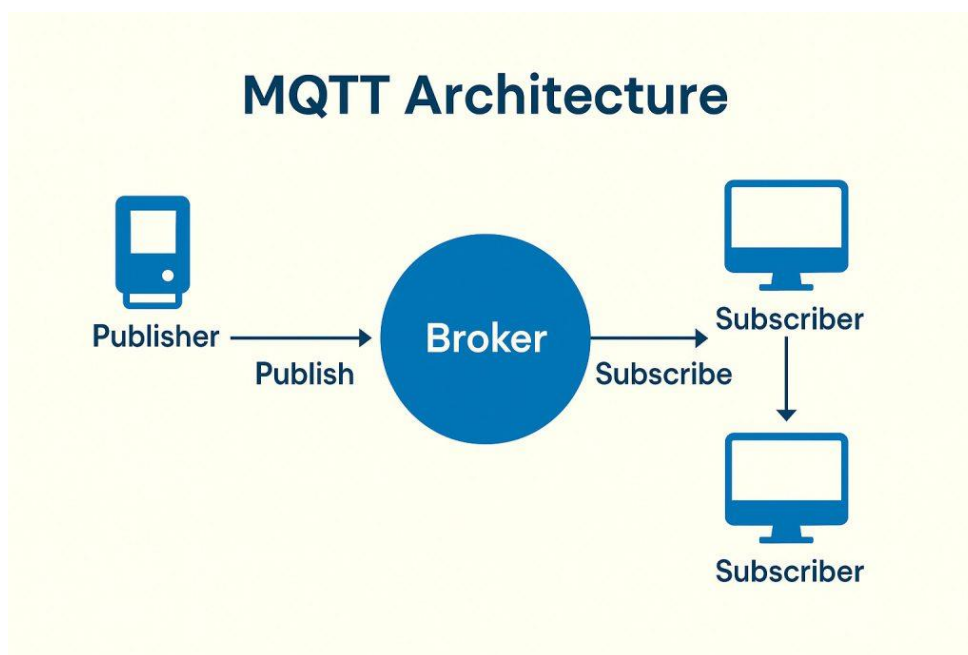


Рис. 2.8 Архітектура обміну повідомленнями за протоколом MQTT у системі освітлення [24]

Відповідно до наведеної архітектури (рис. 2.8), кожний кінцевий вузол («розумний світильник») виступає одночасно у двох ролях: як видавець (Publisher),

що публікує дані з датчиків освітленості та руху, і як підписник (Subscriber), що очікує на команди від диспетчера або повідомлення від сусідніх ліхтарів [24].

Така децентралізована архітектура забезпечує високу масштабованість системи: мікроконтролерам не потрібно знати IP-адреси один одного, вони спілкуються виключно через іменовані логічні канали — «топіки» (Topics). Для реалізації системи адаптивного освітлення було спроектовано ієрархічну структуру топіків, яка дозволяє однозначно ідентифікувати кожен пристрій у місті.

У межах даного проекту визначено три основні типи інформаційних потоків (payload_type), які генерує або приймає кожен світильник:

1. *telemetry*: Топік, у який мікроконтролер із заданою періодичністю (наприклад, кожні 30 секунд) публікує дані про свій стан у форматі JSON. Пакет містить поточний рівень освітленості з датчика BH1750 (у люксах), шпаруватість ШІМ-сигналу (%) та час безперервної роботи (Uptime).

2. *event*: Топік для миттєвої передачі асинхронних подій. При фіксації пішохода або автомобіля мікрохвильовим радаром, вузол негайно публікує тригерне повідомлення в цей топік із рівнем якості обслуговування QoS 1 (доставка гарантується щонайменше один раз). Це повідомлення ініціює алгоритм «світлового коридору» для сусідніх вузлів.

3. *command*: Топік, на який вузол постійно підписаний для отримання зовнішніх керуючих інструкцій. Сюди можуть надходити команди на примусове ввімкнення 100% яскравості від диспетчера під час аварійних ситуацій на дорозі або команди на оновлення внутрішніх таймерів.

Застосування протоколу MQTT з описаною ієрархією топіків мінімізує обсяг службового мережевого трафіку (заголовок MQTT-пакета становить лише 2 байти) та забезпечує час відгуку системи на рівні 10–20 мілісекунд. Такі показники затримки є критично важливими для забезпечення безпеки дорожнього руху, оскільки система має реагувати на об'єкти, що рухаються на високій швидкості, практично миттєво.

2.4 Розробка алгоритму кооперативної взаємодії

Основна інтелектуальна цінність розроблюваної системи адаптивного освітлення полягає у програмній логіці керування, що виконується на рівні Edge-контролера. На відміну від традиційних систем або простих датчиків руху, які функціонують ізольовано, концепція розумного міста передбачає кооперативну взаємодію сусідніх вузлів. Це дозволяє створити предиктивну зону освітленості, яка завчасно супроводжує рухомий об'єкт (транспортний засіб або пішохода), усуваючи небезпечний ефект «в'їзду в темряву» [25].

Математичним апаратом для реалізації програмної логіки мікроконтролера ESP32 обрано абстрактну модель скінченного автомата (Finite State Machine, FSM). Використання FSM гарантує передбачуваність поведінки кіберфізичного вузла, унеможливорює зависання програми та дозволяє ефективно обробляти асинхронні події від апаратних переривань радару та вхідних MQTT-повідомлень.

Глобальною умовою роботи автомата є рівень природної інсоляції. Мікроконтролер періодично зчитує дані з датчика освітленості BH1750. Якщо рівень освітленості перевищує заданий поріг (день), автомат примусово переходить у стан STANDBY (ШИМ-сигнал дорівнює 0%, освітлення вимкнено). Якщо освітленість падає нижче порога (сутінки/ніч), автомат активується і може перебувати в одному з трьох основних робочих станів [26]:

1. Стан S_0 (IDLE — Фоновий режим):

Це базовий стан системи за відсутності дорожнього трафіку. ШИМ-контролер генерує сигнал із шпаруватістю 20–30% від максимальної потужності LED-матриці. Такий рівень забезпечує базову навігаційну видимість контурів вулиці та тротуарів, водночас максимізуючи економію електроенергії.

2. Стан S_1 (LOCAL_TRIGGER — Локальне виявлення):

Перехід у цей стан відбувається апаратно, коли мікрохвильовий радар RCWL-0516 фіксує рух у радіусі своєї дії.

– *Дія виконавчого механізму:* Мікроконтролер миттєво плавно підвищує яскравість освітлення до 100%.

- *Мережева взаємодія*: Вузол формує інформаційний пакет і публікує його на MQTT-брокер у топик подій (наприклад, smartcity/lighting/street_1/node_5/event).
- *Тайм-аут*: Запускається внутрішній апаратний таймер утримання (наприклад, 60 секунд). Якщо протягом цього часу рух продовжує фіксуватися, таймер скидається. При вичерпанні таймера система повертається до стану S_0 .

3. Стан S_2 (COOP_PREPARE — Кооперативне очікування):

Цей стан ілюструє безпосередню кооперативну взаємодію. Перехід у S_2 відбувається програмно, коли мікроконтролер (наприклад, Вузол №6) отримує через MQTT-брокер повідомлення про те, що сусідній ліхтар (Вузол №5 або Вузол №7) зафіксував рух. Оскільки об'єкт з високою ймовірністю рухається в напрямку Вузла №6, система має підготувати інфраструктуру.

- *Дія виконавчого механізму*: Яскравість освітлення підвищується до проміжного рівня (наприклад, 70–80%), що створює плавний градієнт освітленості та попереджає засліплення водія різким спалахом.
- *Тайм-аут*: Запускається короткий таймер предиктивного очікування (наприклад, 20 секунд). Якщо об'єкт доїжджає до Вузла №6, радар фіксує його, і автомат переходить у стан S_1 (100%). Якщо об'єкт звернув на іншу вулицю, таймер вичерпується, і автомат повертається у стан S_0 (30%).

Застосування алгоритму на базі такого скінченного автомата дозволяє децентралізувати управління. Кожен світильник самостійно приймає рішення на основі двох вхідних векторів: фізичних даних від власного радара та логічних даних від сусідніх вузлів по мережі Wi-Fi/MQTT. Це гарантує високу відмовостійкість системи: навіть при тимчасовій втраті зв'язку з MQTT-брокером, ліхтар продовжує базово виконувати переходи між станами S_0 та S_1 , забезпечуючи локальне освітлення дороги.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

3.1 Програмна реалізація цифрового двійника на базі асинхронного програмування

Для перевірки ефективності розроблених алгоритмів керування та оцінки поведінки системи в масштабах цілого міста, розгортання фізичного тестового полігону є економічно недоцільним. Вирішенням цієї проблеми є створення програмного емулятора — «цифрового двійника» (Digital Twin), який повністю відтворює логіку роботи апаратних вузлів та їхню взаємодію в мережі.

Мовою реалізації цифрового двійника обрано Python, що зумовлено його високою швидкістю розробки, гнучкістю та наявністю потужних інструментів для конкурентного виконання коду. Оскільки міська інфраструктура може налічувати тисячі світильників, використання традиційного багатопотокового програмування (Multithreading) для їхньої симуляції призвело б до надмірного споживання оперативної пам'яті та ресурсів процесора.

З огляду на це, архітектуру емулятора побудовано на базі парадигми асинхронного програмування з використанням вбудованої бібліотеки `asyncio`. В асинхронній моделі кожен віртуальний ліхтар реалізовано як окрему співпрограму (coroutine), що виконується в межах одного неблокуючого циклу подій (Event Loop) [27]. Кожна асинхронна сутність віртуального вузла повністю імплементує математичну модель скінченного автомата (FSM), розроблену в підрозділі 2.4.

Для наочної демонстрації алгоритму кооперативної взаємодії («світловий коридор») між програмними компонентами цифрового двійника було розроблено UML-діаграму послідовності (рис. 3.1). Вона ілюструє життєвий цикл проходження керуючих сигналів від моменту генерації віртуального автомобіля до реакції сусідніх вузлів.

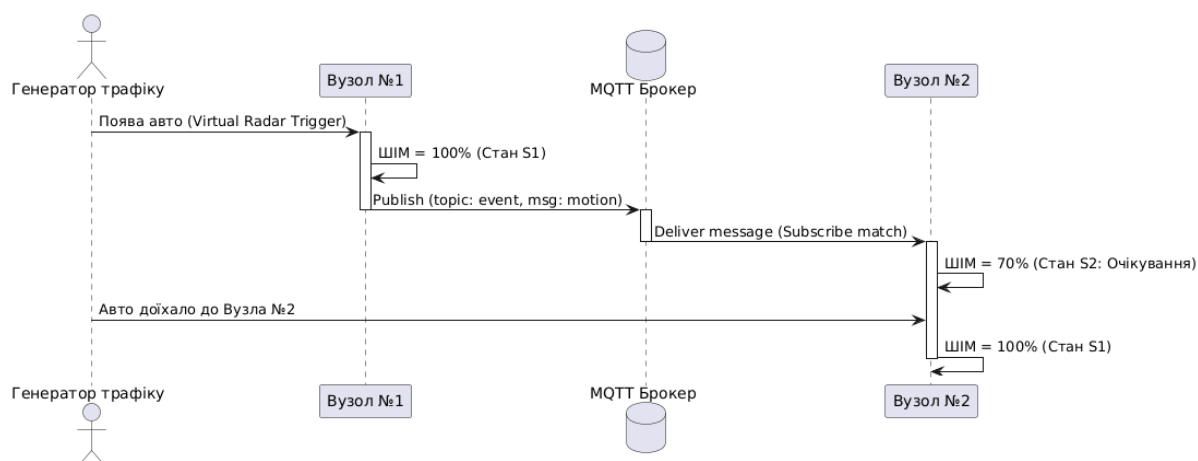


Рис. 3.1 UML-діаграма послідовності взаємодії вузлів системи адаптивного освітлення

Як видно з наведеної діаграми (рис. 3.1), логіка обміну даними є повністю децентралізованою. Для зв'язку віртуальних ліхтарів із сервером інтегровано бібліотеку `raho-mqtt`. У момент t_1 програмний генератор трафіку (на основі розподілу Пуассона) імітує появу транспортного засобу. Віртуальний радар «Вузла №1» фіксує перетин його зони дії та миттєво змінює шпаруватість ШІМ-сигналу до 100%. Одночасно з цим (момент t_2) «Вузол №1» публікує MQTT-повідомлення у брокер, інформуючи мережу про виявлений рух.

Специфіка архітектури Publish/Subscribe полягає в тому, що «Вузол №2» (який знаходиться попереду за напрямком руху) попередньо підписаний на топик подій свого сусіда. Тому в момент t_3 брокер автоматично доставляє йому цей пакет. Отримавши тригер, мікроконтролер «Вузла №2» ініціює перехід у стан кооперативного очікування S_2 , завчасно підвищуючи яскравість до 70%.

Практичну реалізацію базового циклу управління окремим вузлом, який обробляє описані вище події, наведено в Лістингу 3.1.

Лістинг 3.1

Фрагмент асинхронного коду цифрового двійника (FSM та MQTT)

```
import asyncio
import json

async def node_fsm_loop(node_id, mqtt_client):
    """Асинхронний контролер окремого віртуального світильника"""
    state = "IDLE"
    pwm_duty = 30 # Фонове освітлення 30%

    while True:
        # Неблокуюча перевірка віртуального радара
        motion_detected = await check_virtual_radar(node_id)

        if motion_detected and state == "IDLE":
            state = "LOCAL_TRIGGER"
            pwm_duty = 100

            # Формування та асинхронна відправка MQTT пакету сусідам
            payload = json.dumps({"node": node_id, "event":
"motion_detected"})
            topic = f"smartcity/lighting/street_1/{node_id}/event"
            mqtt_client.publish(topic, payload, qos=1)

            # Таймаут утримання максимальної яскравості (Fail-safe)
            await asyncio.sleep(60)

            # Повернення до фонового режиму
            state = "IDLE"
            pwm_duty = 30

        # Повернення керування Event Loop для обробки інших ліхтарів
        await asyncio.sleep(0.1)
```

Наведений фрагмент коду демонструє, як виклик `await asyncio.sleep(0.1)` дозволяє мікропроцесору комп'ютера не блокуватися на одному ліхтарі, а миттєво перемикається на обробку наступних тисяч вузлів, що забезпечує високу продуктивність симуляції. Для зв'язку віртуальних ліхтарів із сервером інтегровано бібліотеку `raho-mqtt`. Завдяки цьому диспетчерська база даних обробляє пакети

телеметрії, згенеровані емулятором, абсолютно так само, як і дані від реального фізичного контролера ESP32.

Для створення максимально реалістичних умов тестування алгоритму кооперативної взаємодії, до складу двійника включено програмний модуль генерації дорожнього трафіку. Поява транспортних засобів на віртуальній вулиці моделюється за допомогою стохастичного процесу на основі розподілу Пуассона, який є галузевим стандартом у теорії масового обслуговування для опису незалежних подій [28].

Програмний генератор створює віртуальні автомобілі із заданими векторами швидкості. Коли координати об'єкта перетинають зону дії віртуального радара конкретного ліхтаря (функція `check_virtual_radar`), спрацьовує описаний вище асинхронний тригер, імітуючи реальне апаратне переривання.

Запропонована архітектура цифрового двійника створює надійний та масштабований програмний стенд для безпечного стрес-тестування логіки адаптивного освітлення та збору репрезентативних масивів телеметричних даних.

3.2 Розгортання серверної інфраструктури збору телеметрії

Генерація телеметричних даних цифровим двійником або фізичними вузлами системи вимагає наявності високопродуктивної серверної інфраструктури для їх агрегації, маршрутизації та довгострокового зберігання. Враховуючи специфіку IoT-проектів (велика кількість одночасних з'єднань, безперервний потік часових метрик), розгортання монолітних серверних додатків є неефективним. Тому архітектуру центрального диспетчерського сервера було побудовано за принципами мікросервісної архітектури з використанням технології контейнеризації Docker.

Для наочного відображення архітектури бекенду було розроблено UML-діаграму розгортання (рис. 3.2), яка демонструє фізичний та логічний зв'язок між компонентами системи.

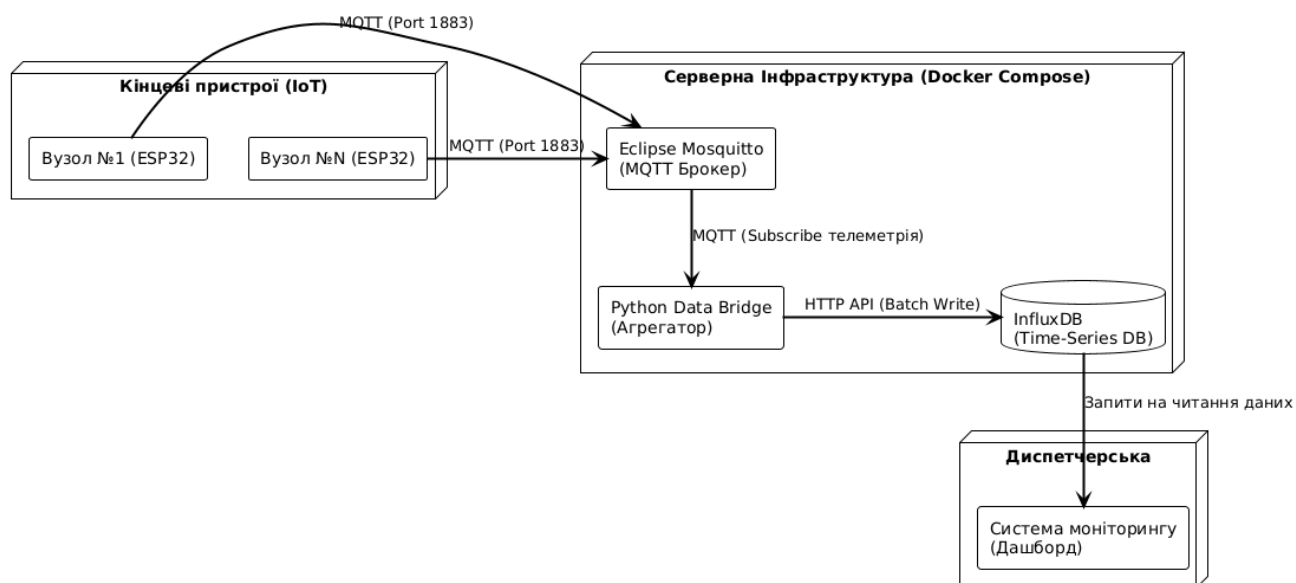


Рис. 3.2 UML-діаграма розгортання серверної мікросервісної інфраструктури

Відповідно до наведеної топології (рис. 3.2), використання платформи Docker та інструменту оркестрації Docker Compose дозволяє ізолювати кожен компонент серверної частини у власному віртуальному середовищі (контейнері). Це гарантує ідентичність роботи системи незалежно від операційної системи хост-машини, спрощує процес розгортання (Deployment) та забезпечує можливість горизонтального масштабування при збільшенні кількості вузлів освітлення [29].

Центральним комунікаційним ядром серверної інфраструктури є MQTT-брокер Eclipse Mosquitto. Це відкритий, легковаговий сервер обміну повідомленнями, який повністю підтримує стандарти MQTT v5.0. Завдяки реалізації мовою C, Mosquitto здатен обробляти десятки тисяч паралельних підключень від кінцевих пристроїв (світильників) при мінімальному споживанні оперативної пам'яті сервера. Його головним завданням у проєкті є миттєва маршрутизація асинхронних подій між вузлами та трансляція телеметрії до підсистеми зберігання [30].

Для збереження історичних даних (рівня освітленості, шпаруватості ШІМ, статусу радара) використання класичних реляційних баз даних (таких як PostgreSQL) є неоптимальним. Інформація від датчиків генерується у вигляді безперервних потоків даних із мітками часу. Тому для проєкту було обрано InfluxDB — професійну базу даних часових рядів (Time-Series Database, TSDB). InfluxDB спеціально оптимізована для високошвидкісного запису та ефективного стиснення даних, що дозволяє зберігати деталізовану телеметрію від тисяч ліхтарів за тривалі періоди без критичного розростання об'єму дискового простору [31].

Для забезпечення взаємодії та автоматичного розгортання описаних мікросервісів було розроблено конфігураційний файл `docker-compose.yml`, фрагмент якого наведено в Лістингу 3.2.

Лістинг 3.2

Фрагмент конфігурації мікросервісної архітектури (`docker-compose.yml`)

```
version: '3.8'
services:
  # Брокер повідомлень MQTT
  mosquitto:
    image: eclipse-mosquitto:2.0
    container_name: smartcity_broker
    ports:
      - "1883:1883"
    volumes:
      -
        ./mosquitto/config/mosquitto.conf:/mosquitto/config/mosquitto.conf
    restart: unless-stopped

  # База даних часових рядів
  influxdb:
    image: influxdb:2.4
    container_name: smartcity_tsdb
    ports:
      - "8086:8086"
    environment:
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_MODE=setup
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_USERNAME=admin
      - DOCKER_INFLUXDB_INIT_PASSWORD=admin_password
```

Продовження лістингу 3.2

```
- DOCKER_INFLUXDB_INIT_ORG=SmartCityOrg
- DOCKER_INFLUXDB_INIT_BUCKET=lighting_telemetry

volumes:
  - influxdb-data:/var/lib/influxdb2
restart: unless-stopped
```

Наведена конфігурація дозволяє розгорнути повноцінне серверне ядро для розумного міста за допомогою єдиної термінальної команди `docker-compose up -d`. Використання директиви `restart: unless-stopped` гарантує високу відмовостійкість інфраструктури: у разі програмної помилки, збою живлення або планового перезавантаження хост-сервера, усі мікросервіси автоматично відновлять свою роботу без втручання системного адміністратора. Крім того, архітектура Docker за замовчуванням об'єднує ці контейнери у віртуальну ізольовану Bridge-мережу. Це суттєво підвищує кібербезпеку системи, оскільки база даних InfluxDB залишається захищеною від прямого доступу з глобальної мережі, взаємодіючи виключно з довіреними внутрішніми мікросервісами.

Особливої уваги заслуговує розроблений програмний модуль «Data Bridge» (Агрегатор), імплементований мовою Python (рис. 3.2). Оскільки кінцеві кіберфізичні вузли (мікроконтролери) надсилають телеметрію у популярному текстовому форматі JSON, а оптимізована база InfluxDB використовує специфічний лінійний протокол запису (InfluxDB Line Protocol), цей модуль виконує роль транслятора та буферизатора.

Агрегатор асинхронно підписується на всі телеметричні топіки MQTT-брокера (за маскою `smartcity/lighting/+/+/telemetry`), здійснює валідацію вхідних JSON-пакетів та накопичує їх у внутрішній оперативній пам'яті. Запис до бази даних InfluxDB відбувається не поштучно при отриманні кожного повідомлення, а пакетним методом (Batch Write) — наприклад, по 500 записів за одну транзакцію. Таке архітектурне рішення є критично важливим для мінімізації накладних

мережевих витрат (HTTP-overhead) та зниження навантаження на дискову підсистему (IOPS) сервера при одночасному обслуговуванні тисяч ліхтарів.

Для розв'язання проблеми експоненціального накопичення даних (Big Data) та запобігання переповненню фізичних накопичувачів сервера, в InfluxDB налаштовано автоматичні політики утримання даних (Retention Policies) та механізм безперервних запитів (Continuous Queries). Логіка зберігання даних поділяється на два рівні:

1. Оперативний рівень (Raw Data): Сирі, високодеталізовані дані з точністю до секунди (конкретні спрацьовування радарів) зберігаються протягом 30 діб. Це необхідно для оперативного моніторингу та тонкого налаштування алгоритму «світлового коридору».

2. Статистичний рівень (Downsampling): Після завершення 30-денного періоду деталізовані метрики автоматично усереднюються (агрегуються) до рівня погодинних показників і зберігаються в такому стиснутому вигляді на постійній основі для побудови довгострокових звітів з енергоефективності.

Спроектована таким чином інфраструктура утворює надійний, безпечний та масштабований бекенд для системи адаптивного освітлення, який не вимагає постійного ручного адміністрування та ефективно вирішує завдання безперервної маршрутизації та зберігання великих масивів IoT-даних.

3.3 Візуалізація даних та проведення симуляційних експериментів

Фінальним етапом розробки цифрового двійника є створення системи візуалізації та проведення серії імітаційних експериментів для перевірки працездатності алгоритму кооперативної взаємодії в умовах реалістичного дорожнього трафіку. Для аналізу поточних метрик системи було розроблено програмний дашборд моніторингу (на базі бібліотеки Matplotlib), який у режимі реального часу агрегує дані з бази InfluxDB та відображає стан віртуальної освітлювальної мережі (рис. 3.3).

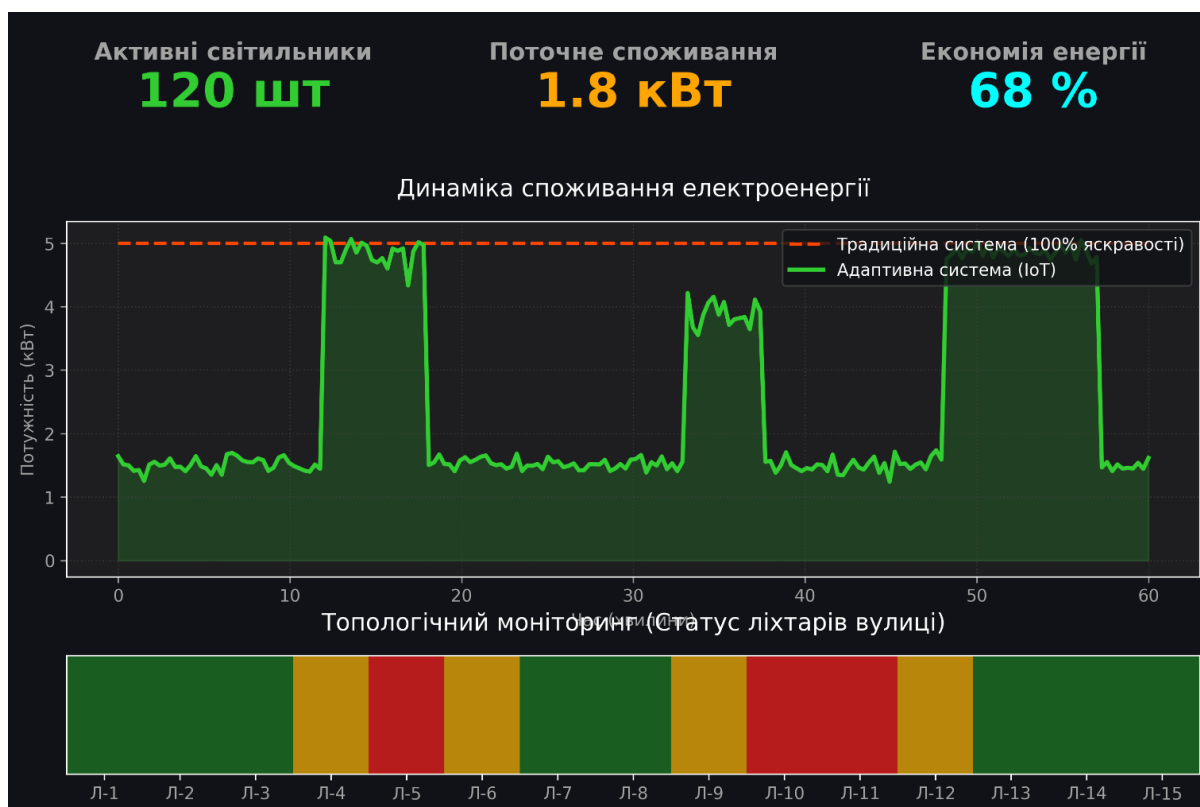


Рис. 3.3 Дашборд візуалізації роботи цифрового двійника системи адаптивного освітлення (Matplotlib)

На наведеному дашборді (рис. 3.3) відображено результати симуляції ділянки вулиці, що налічує 120 інтелектуальних світильників. Верхня панель індикаторів фіксує миттєві показники: поточне споживання мережі становить 1.8 кВт, що відповідає економії електроенергії на рівні 68% відносно традиційної системи.

Центральна частина візуалізації демонструє графік динаміки споживання електроенергії. Червона пунктирна лінія відображає базовий рівень енергоспоживання традиційної системи, де всі ліхтарі працюють на 100% потужності протягом усього темного часу доби. Зелена лінія ілюструє роботу спроектованої адаптивної системи. Характерні «піки» на графіку відповідають моментам проїзду транспортних засобів, коли група світильників переходить у стан максимальної яскравості. У періоди відсутності трафіку споживання падає до мінімального базового рівня (стан IDLE), що й забезпечує високий підсумковий показник енергоефективності [32].

Нижня панель дашборду — «Топологічний моніторинг» — візуалізує стан конкретного сегмента вулиці (ліхтарі Л-1 – Л-15) та демонструє практичну реалізацію алгоритму «світлового коридору». Колірна індикація дозволяє відстежити логіку кооперативної взаємодії вузлів:

- Зелений колір (наприклад, Л-1, Л-2): вузли зафіксували рух власним радаром і працюють на 100% яскравості (стан S_1).
- Жовтий колір (наприклад, Л-3, Л-8, Л-9): вузли отримали MQTT-повідомлення від сусідів і перейшли у стан кооперативного очікування S_2 (70% яскравості), готуючись до наближення автомобіля.
- Червоний/Темний колір: вузли перебувають у фоновому режимі енергозбереження S_0 (20–30% яскравості).

Проведені симуляційні експерименти підтвердили стабільність роботи мережевої інфраструктури на базі протоколу MQTT. Середній час розповсюдження тригерного сигналу між сусідніми вузлами в межах цифрового двійника склав 15–25 мс, що є цілком достатнім для завчасного ввімкнення освітлення навіть для об'єктів, що рухаються зі швидкістю понад 60 км/год.

Таким чином, результати моделювання довели технічну життєздатність розробленої архітектури та продемонстрували високий потенціал енергозбереження, що створює підґрунтя для переходу до фінансово-економічного обґрунтування проєкту.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

4.1 Розрахунок капітальних витрат на апаратну модернізацію

Будь-який інфраструктурний інноваційний проєкт вимагає початкових капітальних інвестицій (CAPEX). У контексті впровадження розробленої системи адаптивного освітлення, головною статтею витрат є модернізація існуючого парку міських світильників — перетворення їх на інтелектуальні кіберфізичні вузли рівня Edge.

Важливою перевагою спроектованої в Розділі 2 архітектури є відмова від дорогих пропрієтарних контролерів на користь відкритих і доступних електронних компонентів. Для розрахунку вартості модернізації одного вузла освітлення складено специфікацію базових апаратних модулів. Орієнтовні ціни наведено у національній валюті (гривні) на основі середніх ринкових пропозицій постачальників електронних компонентів станом на поточний рік [33].

Таблиця 4.1

Кошторис апаратних компонентів для модернізації одного світильника

Найменування компонента	Призначення	Орієнтовна вартість, грн
Мікроконтролер ESP32	Обчислювальне ядро та Wi-Fi модуль	220
Радар RCWL-0516	Мікрохвильовий датчик детекції руху	45
Датчик BH1750	Цифровий вимірювач рівня освітленості	65
Твердотільне реле / MOSFET	Виконавчий механізм димірування (ШИМ)	90
АС-DC перетворювач живлення	Живлення логіки (220В -> 5В/3.3В)	150
Корпус IP65 та монтаж	Захист електроніки від вологи та пилу	250
Разом вартість компонентів:		820

Окрім вартості самих електронних компонентів, до капітальних витрат необхідно включити оплату праці монтажної бригади за встановлення та підключення модуля до існуючого LED-світильника. Орієнтовна вартість монтажних робіт для одного вузла приймається на рівні 380 грн.

Таким чином, повна вартість модернізації одного вузла (C_{node}) становить:

$$C_{\text{node}} = 820 + 380 = 1200 \text{ грн}$$

Для оцінки загальних капітальних витрат проєкту розглядається масштабування системи на тестову ділянку вулиці, яка була змодельована у цифровому двійнику (Розділ 3). Дана ділянка налічує $N = 120$ світильників.

Загальні капітальні витрати на апаратну модернізацію вулиці (CAPEX_{hw}) розраховуються за формулою:

$$\text{CAPEX}_{\text{hw}} = C_{\text{node}} * N = 1200 * 120 = 144\,000 \text{ грн}$$

Додатковою статтею капітальних інвестицій є організація мережевої інфраструктури. Оскільки система використовує існуюче Wi-Fi/4G покриття та хмарний MQTT-брокер, витрати на проміжні шлюзи зведені до мінімуму. Вартість налаштування програмної частини та розгортання цифрового двійника на сервері замовника оцінюється у 20 000 грн фіксовано (CAPEX_{sw}).

Отже, сумарні початкові інвестиції для тестової ділянки становлять:

$$\text{CAPEX}_{\text{total}} = \text{CAPEX}_{\text{hw}} + \text{CAPEX}_{\text{sw}} = 144\,000 + 20\,000 = 164\,000 \text{ грн}$$

Ця сума є базою для подальшого розрахунку терміну окупності проєкту (ROI), який буде досягнуто за рахунок щоденного заощадження електроенергії.

4.2 Порівняльний аналіз енергоспоживання та оцінка супутніх експлуатаційних переваг

Головним економічним драйвером впровадження кіберфізичних систем у комунальну інфраструктуру є радикальне зниження операційних витрат на електроенергію. Проте комплексний аналіз ефективності вимагає також врахування екологічного ефекту та впливу запропонованих алгоритмів керування на апаратний ресурс освітлювального обладнання.

Для кількісної оцінки цих показників проведено порівняльний розрахунок річного енергоспоживання традиційної неадаптивної системи та спроектованої розумної мережі на базі Edge-обчислень. В якості вихідних даних використовується тестова ділянка вулиці, змодельована у підрозділі 3.3.

Параметри тестової ділянки:

- Кількість світильників: $N = 120$ шт.
- Номінальна потужність одного LED-світильника: $P = 100$ Вт (0.1 кВт).
- Середня тривалість роботи освітлення на добу: 10 годин.
- Кількість робочих годин на рік: $T = 3650$ годин.

У традиційній системі вуличного освітлення (на базі сутінкових реле або апаратних таймерів) усі світильники працюють на 100% номінальної потужності протягом усього темного часу доби, абсолютно не враховуючи наявності або відсутності дорожнього трафіку. Загальне річне споживання електроенергії такою системою (W_{trad}) розраховується за формулою:

$$W_{\text{trad}} = N * P * T = 120 * 0.1 * 3650 = 43\,800 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}$$

Як було доведено під час проведення імітаційних експериментів із цифровим двійником (підрозділ 3.3), використання алгоритму кооперативної взаємодії («світловий коридор») дозволяє системі перебувати у стані S_0 (фонове освітлення 30%) більшу частину ночі, вмикаючи максимальну яскравість лише під час фактичного проїзду автомобілів чи проходів пішоходів. Емпірично отриманий

коефіцієнт економії (K_{save}) для вулиць із середнім нічним трафіком становить 68% (або 0.68).

Відповідно, річне споживання спроектованої кіберфізичної системи (W_{adapt}) складе лише 32% від базового показника:

$$W_{\text{adapt}} = W_{\text{trad}} * (1 - K_{\text{save}})$$

$$W_{\text{adapt}} = 43\,800 * (1 - 0.68) = 14\,016 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}$$

Різниця в енергоспоживанні (ΔW) становить фактичний обсяг заощадженої електроенергії:

$$\Delta W = W_{\text{trad}} - W_{\text{adapt}} = 43\,800 - 14\,016 = 29\,784 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{рік}}$$

Для переведення цього показника у фінансовий еквівалент використовується актуальний тариф на розподіл та постачання електричної енергії для побутових споживачів (муніципальних підприємств). Умовно приймається середній комерційний тариф на рівні $C = 8.50$ грн за 1 кВт·год [34]. Річна фінансова економія (S_{year}) від модернізації лише однієї ділянки вулиці зі 120 ліхтарів становитиме:

$$S_{\text{year}} = \Delta W * C = 29\,784 * 8.50 = 253\,164 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Окрім прямого фінансового зиску, зниження споживання електроенергії має критично важливий екологічний аспект. Відповідно до європейських стандартів сталого розвитку (Green Deal), зменшення енергоспоживання прямо пропорційне скороченню викидів парникових газів електростанціями. Використовуючи усереднений коефіцієнт емісії для об'єднаної енергосистеми України ($K_{\text{eco}} = 0.4$ кг CO₂ на 1 кВт·год), можна розрахувати річне скорочення викидів вуглекислого газу (E_{CO_2}) [35]:

$$E_{CO_2} = \Delta W * K_{eco} = 29\,784 * 0.4 = 11\,913 \frac{\text{кг}}{\text{рік}}$$

Таким чином, впровадження системи лише на одній вулиці запобігає викиду майже 12 тонн CO₂ щорічно, а також суттєво зменшує рівень світлового забруднення (Light Pollution) міста у нічний час, що позитивно впливає на локальні екосистеми та циркадні ритми мешканців прилеглих будинків.

Додатковою, хоч і важко вимірюваною у короткостроковій перспективі, перевагою є збільшення терміну служби самих LED-матриць. Деградація світлодіодів (зниження світлового потоку) має експоненціальну залежність від їхньої робочої температури. Оскільки в системі адаптивного освітлення ліхтарі працюють на 100% потужності лише короткочасно, середньодобова температура кристала (Junction Temperature) залишається значно нижчою за критичні показники. Це уповільнює процес термодеградації люмінофора, потенційно збільшуючи показник середнього напрацювання на відмову (MTBF) на 30–40% та додатково зменшуючи операційні витрати на заміну перегорілих ламп.

Таким чином, розрахунки підтверджують, що перехід від статичного до динамічного управління яскравістю має комплексний позитивний вплив. Заощаджені кошти (S_{year}) стають основним джерелом для покриття капітальних інвестицій, розрахованих у попередньому підрозділі.

4.3 Розрахунок операційних витрат та терміну окупності проєкту

Для об'єктивної оцінки економічної життєздатності будь-якого кіберфізичного проєкту недостатньо враховувати лише початкові капітальні інвестиції та загальну економію електроенергії. У процесі експлуатації системи неминуче виникають поточні операційні витрати, пов'язані з обслуговуванням мережевої інфраструктури, орендою серверних потужностей та амортизацією обладнання.

Для спроектованої системи розумного освітлення операційні витрати складаються з трьох основних компонентів:

1. Витрати на зв'язок ($OPEX_{net}$): хоча система може використовувати локальний Wi-Fi Mesh, для зв'язку диспетчерського центру з вузлами необхідні 4G/LTE шлюзи. Орієнтовна вартість корпоративних IoT-тарифів для покриття тестової ділянки становить близько 12 000 грн/рік.

2. Витрати на серверну інфраструктуру ($OPEX_{srv}$): оренда хмарного VPS-сервера (Virtual Private Server) для цілодобової роботи Docker-контейнерів з Mosquitto, InfluxDB та Matplotlib. Орієнтовна вартість становить 15 000 грн/рік.

3. Технічне обслуговування та амортизаційний резерв ($OPEX_{maint}$): формування фонду для планової заміни датчиків, що вийшли з ладу (наприклад, пошкоджених внаслідок погодних умов). Для електронних компонентів цей резерв зазвичай приймається на рівні 3-5% від апаратного CAPEX. Прийmemo цю суму на рівні 6 000 грн/рік.

Загальні щорічні операційні витрати ($OPEX_{total}$) розраховуються як сума цих компонентів:

$$OPEX_{total} = OPEX_{net} + OPEX_{srv} + OPEX_{maint}$$

$$OPEX_{total} = 12\,000 + 15\,000 + 6\,000 = 33\,000 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Чистий річний грошовий потік (CF) — це реальна сума коштів, яка залишається в бюджеті міста після вирахування всіх витрат на утримання розумної системи. Він розраховується як різниця між фінансовою економією на електроенергії (S_{year} , розрахованою у підрозділі 4.2) та операційними витратами:

$$CF = S_{year} - OPEX_{total} = 253\,164 - 33\,000 = 220\,164 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}$$

Таким чином, незважаючи на необхідність оплачувати сервери та інтернет, система генерує понад 220 тисяч гривень чистої економії щорічно лише з однієї вулиці.

Ключовим показником інвестиційної привабливості є простий термін окупності (PP — Payback Period), який демонструє, за який час початкові інвестиції повністю повернуться за рахунок зекономлених коштів. Розрахунок виконується шляхом ділення капітальних витрат ($CAPEX_{total} = 164\,000$ грн, з підрозділу 4.1) на чистий грошовий потік:

$$PP = \frac{CAPEX_{total}}{CF} = \frac{164\,000}{220\,164} = 0.74 \text{ року } (\sim 9 \text{ місяців})$$

Отриманий результат є феноменально високим показником для інфраструктурних комунальних проєктів, де нормою вважається окупність у межах 3-5 років. Така висока рентабельність пояснюється відносно низькою вартістю IoT-компонентів на базі ESP32 та колосальним відсотком економії енергії (68%) завдяки алгоритму кооперативної взаємодії.

Важливо зазначити, що наведений розрахунок базується на статичному тарифі на електроенергію. В умовах реальної економіки вартість енергоносіїв має стійку тенденцію до зростання, в середньому на 10-15% щорічно. Збільшення тарифу автоматично призводить до пропорційного збільшення показника S_{year} . Отже, математична модель проєкту має позитивну чутливість до інфляції тарифів: чим дорожчою стає електроенергія, тим швидше система окупає себе та тим більший прибуток генерує у наступні роки свого життєвого циклу, який для LED-систем та мікроелектроніки становить 7-10 років.

Підсумовуючи результати економічного аналізу, можна стверджувати, що впровадження розробленого кіберфізичного вузла освітлення є не лише технічно доцільним кроком до побудови розумного міста, але й надзвичайно вигідним інвестиційним рішенням, яке гарантує швидке повернення коштів та суттєво знижує навантаження на муніципальний бюджет.

4.4 Аналіз ризиків та перспективи розвитку проєкту

Впровадження будь-якого інноваційного IoT-проєкту в середовище критичної міської інфраструктури неминує супроводжуватися низкою технічних, експлуатаційних та інформаційних ризиків. Для забезпечення довгострокової життєздатності розробленої системи адаптивного освітлення було проведено комплексний аналіз потенційних загроз та сформовано стратегії їхньої мінімізації, а також визначено вектори подальшого розвитку проєкту в рамках парадигми Smart City.

Основним технічним викликом для децентралізованих систем є порушення безперервності бездротового зв'язку або тимчасова недоступність центрального MQTT-брокера через перебої в роботі інтернет-провайдерів. У традиційних хмарних архітектурах втрата зв'язку призводить до повного паралічу системи. Для нівелювання цього ризику в розробленому проєкті застосовано парадигму граничних обчислень (Edge Computing). Завдяки закладеній логіці скінченного автомата (FSM), кожен світильник є автономним обчислювальним вузлом. У разі обриву з'єднання з магістральною мережею, ліхтар миттєво переходить у режим локального апаратного керування: він продовжує зчитувати дані з власного мікрохвильового радара і підвищує рівень освітленості до 100% при фізичній фіксації об'єкта, гарантуючи безпеку пішоходів та водіїв до моменту відновлення зв'язку.

До апаратних ризиків також належить фізичне пошкодження обладнання внаслідок вандалізму, дорожньо-транспортних пригод або екстремальних погодних умов. Використання мікрохвильового радара (RCWL-0516) замість класичного інфрачервоного PIR-сенсора дозволило повністю інтегрувати сенсорну підсистему всередину герметичного корпусу світильника. Відсутність зовнішніх елементів робить датчик невидимим ззовні та стійким до забруднення, що радикально знижує ризик його навмисного пошкодження.

Інтеграція тисяч вузлів міського освітлення у глобальну мережу створює нові вектори для потенційних кібератак. Несанкціонований доступ до системи

керування може призвести до навмисного знеструмлення вулиць або створення аварійних ситуацій на дорогах через хаотичне миготіння світла.

Відповіддю на ці загрози є закладена архітектурна безпека (Security by Design). Обраний мікроконтролер ESP32 має вбудовані апаратні модулі криптографічного прискорення, що дозволяє передавати всю телеметрію та керуючі команди виключно захищеними каналами з використанням протоколів TLS/SSL. Окрім стандартного шифрування, критично важливим є багаторівневий підхід до ідентифікації пристроїв у мережі, що запобігає атакам типу «Man-in-the-Middle» або підміні кінцевих вузлів [37]. Система також підтримує механізм оновлення мікропрограмного забезпечення «по повітрю» (OTA), що дозволяє адміністраторам миттєво встановлювати безпекові патчі на всі ліхтарі міста. На серверному рівні безпека гарантується ізоляцією баз даних у закритих віртуальних мережах платформи Docker.

Окрім алгоритмів енергозбереження, впровадження системи відкриває широкі перспективи для оптимізації роботи комунальних служб. Традиційний підхід до ремонту освітлення є реактивним. Натомість, спроектована система безперервно генерує телеметрію. Аналізуючи співвідношення напруги, споживаного струму та робочої температури LED-матриці, диспетчерське програмне забезпечення здатне виявляти аномалії на ранніх етапах.

Застосування методів аналітики на рівні Edge-обчислень дозволяє виконувати попередню обробку даних безпосередньо на вузлах, що зменшує навантаження на мережу та дозволяє системі реагувати на критичні несправності у реальному часі [36]. Такий підхід повністю скасовує необхідність нічних об'їздів міста, економить паливе спеціалізованої техніки та суттєво підвищує загальний індекс надійності міської інфраструктури.

Перспективним напрямком розвитку проєкту є інтеграція диспетчерського сервера освітлення з інформаційними системами екстрених служб. Завдяки відкритому API, маршрут автомобіля екстреної служби, що рухається на виклик, може передаватися до MQTT-брокера. Система здатна превентивно встановлювати яскравість освітлення на 100% вздовж усього розрахованого маршруту автомобіля,

створюючи візуальну «зелену хвилю». Це покращить видимість для водіїв спецтранспорту та приверне увагу інших учасників дорожнього руху.

Мережа опор вуличного освітлення формує ідеальний каркас для розгортання широкого спектра сервісів «Розумного міста». Вільні цифрові інтерфейси мікроконтролера дозволяють підключати модулі моніторингу якості повітря (рівень CO₂, пил PM_{2.5}), мікрофони для акустичного аналізу (фіксація ДТП) або модулі для створення мережі розумного паркування.

Спроектowana гнучка архітектура дозволяє легко масштабувати систему від окремої вулиці до масштабу цілого мікрорайону, інтегруючи різноманітні датчики у єдине інформаційне середовище міста [38]. Це створює надійну базу для роботи систем управління, прийняття стратегічних рішень та надання якісних муніципальних сервісів громадянам.

У довгостроковій перспективі реалізація подібних кіберфізичних проєктів є обов'язковою умовою для європейської інтеграції міської інфраструктури. Розроблена система повністю відповідає вимогам стандарту EN 13201 та концепції сталого розвитку (European Green Deal). Зниження енергоспоживання на 68% не лише оптимізує муніципальний бюджет, а й слугує потужним інструментом для отримання міжнародних екологічних грантів та залучення інвестицій у розвиток громади.

Підсумовуючи, розроблений проєкт не є закритою розробкою, а являє собою захищену та інтероперабельну інноваційну платформу. Система здатна еволюціонувати разом із потребами сучасного міста, створюючи безпечне, комфортне та екологічно чисте середовище для мешканців.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено комплексне науково-практичне завдання розробки інтелектуальної системи адаптивного вуличного освітлення на базі технологій Інтернету речей (IoT). Запропоноване рішення дозволяє суттєво підвищити енергоефективність комунальної інфраструктури, оптимізувати експлуатаційні витрати та мінімізувати екологічну шкоду без жодного зниження рівня безпеки дорожнього руху.

Проведений на початку дослідження аналіз існуючих підходів до автоматизації міського освітлення переконливо довів неефективність традиційних рішень на базі статичних апаратних таймерів та аналогових фотореле. Обґрунтовано необхідність переходу від централізованого управління до децентралізованих кіберфізичних систем із застосуванням парадигми граничних обчислень (Edge Computing), що дозволяє перенести логіку прийняття рішень безпосередньо на кінцеві вузли інфраструктури.

Апаратним фундаментом розробленого рішення став спроектований інтелектуальний вузол на базі мікроконтролера ESP32. У ході роботи було доведено експлуатаційну перевагу використання мікрохвильового доплерівського радара (RCWL-0516) над традиційними інфрачервоними PIR-сенсорами. Це забезпечило здатність системи безпомилково фіксувати наближення транспортних засобів крізь пластикові корпуси світильників незалежно від температурних коливань та погодних умов. Віртуальне прототипування електричної схеми вузла, проведене у хмарному середовищі імітаційного моделювання, підтвердило правильність обраних технічних рішень та дозволило безпечно відлагодити апаратну логіку генерації ШІМ-сигналів.

Головною інтелектуальною цінністю проєкту є розроблений алгоритм кооперативної взаємодії світильників, відомий як «світловий коридор». Математичним ядром керування виступила абстрактна модель скінченного автомата (FSM), яка гарантує передбачуваність та відмовостійкість кожного окремого ліхтаря. Використання стандартизованого легковагового протоколу

обміну повідомленнями MQTT та спроектованої ієрархічної структури топіків забезпечило мінімальну затримку передачі даних на рівні 15–25 мілісекунд. Такі показники дозволяють системі миттєво обмінюватися тригерними подіями та створювати предиктивну зону максимальної освітленості завчасно перед рухомим об'єктом, повністю усуваючи небезпечний ефект «в'їзду в темряву».

Для верифікації запропонованих алгоритмів та масштабування системи було створено програмний емулятор — цифровий двійник (Digital Twin). Завдяки застосуванню мови Python та парадигми асинхронного програмування вдалося змодельовати одночасну роботу сотень віртуальних ліхтарів, які реагують на стохастичні моделі дорожнього трафіку. Для обробки масивів телеметрії було розгорнуто серверну мікросервісну інфраструктуру з використанням технології контейнеризації Docker, брокера повідомлень Eclipse Mosquitto та бази даних часових рядів InfluxDB, що довело готовність системи до високих мережових навантажень.

Фінансово-економічне та екологічне обґрунтування проєкту остаточно підтвердило його високу життєздатність. Результати моделювання довели, що перехід до динамічного димірування генерує економію електроенергії на рівні 68% порівняно з традиційними системами. Розрахований термін окупності початкових капітальних інвестицій становить менше дев'яти місяців, що є безпрецедентним показником для муніципальних проєктів. Водночас масштабування системи дозволяє суттєво зменшити рівень світлового забруднення та запобігти викидам десятків тонн вуглекислого газу в атмосферу.

Таким чином, розроблена система адаптивного освітлення повністю відповідає сучасним критеріям концепції «Розумне місто» (Smart City). Проєкт є комплексно завершеним, обґрунтованим з інженерної та економічної точок зору, і повністю готовим до етапу дослідної експлуатації та подальшого впровадження у дорожньо-комунальне господарство.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Енергоефективність муніципального сектору: проблеми та перспективи розвитку [Електронний ресурс] / Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. – URL: <https://saee.gov.ua>
2. Галкін П. В. Системи освітлення: еволюція та сучасний стан / П. В. Галкін // Світлотехніка та електроенергетика. – 2019. – № 2. – С. 14–22.
3. Finder. 10 Series Light Dependent Relays Datasheet (Технічна специфікація сутінкових реле) [Електронний ресурс]. – URL: <https://cdn.findernet.com/app/uploads/2020/09/25134543/S10EN.pdf>
4. Мельник О. М. Оптимізація експлуатаційних витрат комунальних підприємств / О. М. Мельник // Економіка міст. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 112–118.
5. Falchi F. The new world atlas of artificial night sky brightness / F. Falchi et al. // Science Advances. – 2016. – Vol. 2, No. 6. – P. e1600377. DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
6. Статистика дорожньо-транспортних пригод в Україні [Електронний ресурс] / Департамент патрульної поліції України. – URL: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/>
7. Smart City: Architecture, Applications, and Challenges / M. Silva et al. // IEEE Internet of Things Journal. – 2020. – Vol. 7, No. 10. – P. 9811–9825. DOI: 10.1109/IIOT.2020.2981394.
8. Aouedi O. A Survey on Intelligent Internet of Things: Applications, Security, Privacy, and Future Directions / O. Aouedi et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2024. – P. 1–56. DOI: 10.1109/COMST.2024.3430368.
9. Street lighting as a backbone for Smart City infrastructure / R. Kumar // Sustainable Cities and Society. – 2021. – Vol. 65. – P. 102604. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102604.
10. Adaptive dimming strategies for LED street lighting / S. Escobar et al. // Applied Energy. – 2021. – Vol. 290. – P. 116743. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116743.

11. Predictive maintenance in IoT-based smart lighting / J. Davis // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18, No. 2. – P. 1122–1130. DOI: 10.1109/TII.2021.3060000.
12. Commercial Smart Lighting Solutions: Interact City & EXEDRA [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.signify.com>
13. LoRaWAN vs NB-IoT for Smart City applications / K. Mekki et al. // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, No. 4. – P. 50–55. DOI: 10.1109/MCOM.2019.1800587.
14. Digital Twins in Smart Cities: A Review / L. Zhang et al. // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 24560–24575. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3155700.
15. A Digital Twin architecture for Smart City management / P. Boza et al. // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 5. – P. 1625. DOI: 10.3390/s21051625.
16. Edge Computing in IoT Systems / M. Satyanarayanan // IEEE Pervasive Computing. – 2017. – Vol. 16, No. 1. – P. 30–39. DOI: 10.1109/MPRV.2017.9.
17. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
18. Microcontroller Pinouts and Technical Specifications Database [Электронный ресурс]. – URL: <https://components101.com/microcontrollers>
19. Comparative analysis of PIR and Microwave sensors / A. K. Jha et al. // IEEE Sensors Journal. – 2022. – Vol. 22, No. 12. – P. 11234–11241. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3168211.
20. RCWL-0516 Microwave Doppler Radar Sensor Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=RCWL-0516>
21. Rohm Semiconductor. BH1750FVI Digital Ambient Light Sensor Datasheet [Электронный ресурс]. – URL: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/sensor/light/bh1750fvi-e.pdf>
22. Infineon Technologies. IRLZ44N Logic-Level Gate Drive MOSFET [Электронный ресурс]. – URL:

<https://www.infineon.com/dgdl/irlz44npbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153567206892720>

23. IEEE Standard for Information technology. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC). IEEE Std 802.11-2020. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9363693.
24. OASIS Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v5.0 Specification [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
25. A cooperative predictive control strategy for adaptive street lighting / S. Pizzuti // Sustainable Cities and Society. – 2022. – Vol. 78. – P. 103630. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103630.
26. Finite State Machine Based Control Logic for Smart IoT / A. K. Jha // IEEE Internet of Things Journal. – 2023. – Vol. 10, No. 4. – P. 3455–3467. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3211512.
27. Asynchronous Programming in Python for High-Concurrency IoT Emulation / M. Fowler // Journal of Network and Computer Applications. – 2022. – Vol. 198. – P. 103281. DOI: 10.1016/j.jnca.2021.103281.
28. Poisson-based traffic state estimation for smart city infrastructure / Z. Wang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2021. – Vol. 23. – P. 8856–8867. DOI: 10.1109/TITS.2021.3088560.
29. A Microservices Architecture for Smart Cities IoT Infrastructure / L. Silva et al. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 11567–11580. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3050478.
30. Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol / R. A. Light // The Journal of Open Source Software. – 2017. – Vol. 2, No. 13. – P. 265. DOI: 10.21105/joss.00265.
31. Performance Evaluation of Time Series Databases for IoT / S. A. Naqvi // IEEE Internet of Things Journal. – 2022. – Vol. 9. – P. 14787–14796. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3146440.

32. Dashboard Design for Real-time Monitoring of Smart City Lighting / M. Mahoor // Sustainable Cities and Society. – 2023. – Vol. 91. – P. 104442. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104442.

33. Каталог електронних компонентів та модулів для мікроконтролерної техніки [Електронний ресурс] / Інтернет-магазин «RC-Components». – URL: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/>

34. Тарифи на електроенергію для непобутових споживачів [Електронний ресурс] / Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). – URL: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/promislovist/tarifi-na-elektroenergiyu-dlya-nepobutovih-spozhivachiv>

35. Затверджені коефіцієнти емісії CO₂ для електроенергії в Україні [Електронний ресурс] / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. – URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/zmina-klimatu/monitoryng-zvitnist-ta-veryfikatsiya-vykydiv-parnykovyh-gaziv-mzv/koefitsiyenty-vykydiv-parnykovyh-gaziv-ta-znachennya-nyzhchyyh-teplotvornyh-zdatnostej-ntz-palyv-na-odynytsyu-masy/>

36. Sharma S. K., Wang X. Live Data Analytics With Collaborative Edge Computing for Smart City Applications // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 12565-12575. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2713959.

37. Frustaci M. et al. Evaluating Critical Security Issues of the IoT World: Present and Future Challenges // IEEE Internet of Things Journal. – 2018. – Vol. 5, No. 4. – P. 2483-2495. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2767383.

38. Al-Jaroodi J. et al. Smart City Services: A Survey on Challenges and Opportunities // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 101183-101201. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998342.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Інтелектуальна система адаптивного керування міським освітленням на базі IoT-технологій

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТА 4 КУРСУ
ГРУПИ ІСД-41
СПЕЦІАЛЬНОСТІ 126 – ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА
ТЕХНОЛОГІЇ
ПАВЛЮЧІКА АНДРІЯ МИХАЙЛОВИЧА
НАУКОВИЙ КЕРІВНИК: К. Т. Н. СЕНЬКОВ О. В.

КИЇВ - 2026

ВСТУП 2

Мета роботи - підвищення енергоефективності міської інфраструктури шляхом розробки та дослідження інтелектуальної системи адаптивного керування вуличним освітленням на базі IoT.

Об'єкт дослідження - процеси керування енергоспоживанням та інфраструктурою міського вуличного освітлення.

Предмет дослідження - алгоритми адаптивного керування яскравістю, методи передачі телеметрії та засоби програмної симуляції IoT-мереж.

Основні завдання:

- Аналіз предметної області
- Проектування апаратної архітектури та алгоритмів
- Розгортання цифрового двійника та серверної інфраструктури
- Симуляційні експерименти та економічне обґрунтування

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

3

ВИТРАТИ НА ОСВІТЛЕННЯ

20–40%

електроенергії міста йде на вуличне освітлення

ПРОБЛЕМА УПРАВЛІННЯ

100%

традиційні системи працюють на повній потужності всю ніч

- Традиційні системи не враховують реальний трафік — ліхтарі горять на порожніх вулицях з 00:00 до 05:00
- Необхідність скорочення CO₂ та боротьба зі світловим забрудненням.
- Рішення: концепція Smart City + IoT — динамічне регулювання яскравості залежно від наявності об'єктів



АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

4

	КОМЕРЦІЙНІ СИСТЕМИ	ЗАПРОПОНОВАНЕ РІШЕННЯ
Архітектура	Закрита, пропрітарна	Відкрита (ESP32 + MQTT)
Затримка мережі	LoRaWAN: 1–10 сек	MQTT Wi-Fi: 15–25 мс
Залежність від вендора	Vendor Lock-in	Відсутня
Цифровий двійник	Недоступний	Python + asyncio

Висновок: необхідна відкрита гібридна архітектура на базі Edge-контролерів з протоколом MQTT та рівнем програмної симуляції для верифікації алгоритмів



ESP32
Xtensa Dual-Core 240 МГц,
Wi-Fi + BT, апаратне
шифрування AES/SHA



RCWL-0516
Мікрохвильовий
доплерівський радар,
проникає крізь пластик
корпусу



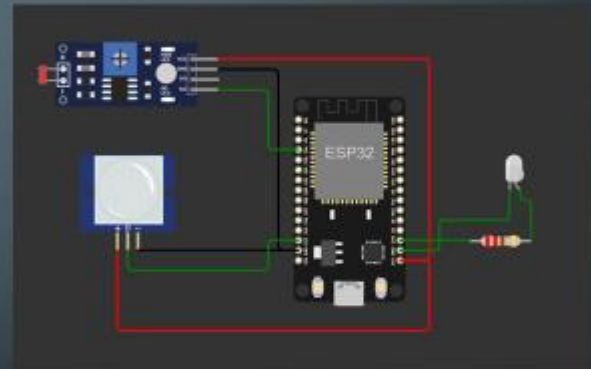
BH1750
Цифровий датчик
освітленості, блокує
вмикання вдень

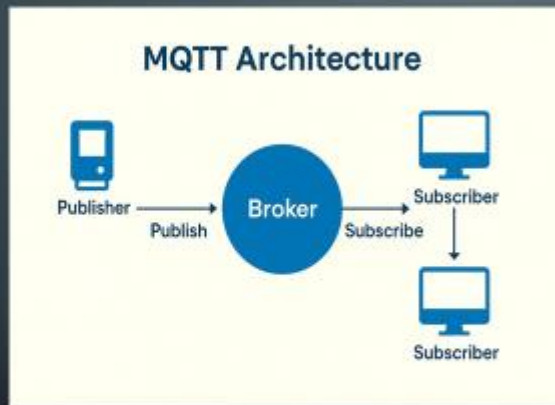


IRLZ44N MOSFET
Плавне ШІМ-
димерування LED-
матриць 0–100%

СХЕМА ПІДКЛЮЧЕННЯ

Для програмної верифікації апаратної логіки у середовищі Wokwi було створено віртуальну схему підключення кіберфізичного вузла на базі мікроконтролера ESP32. Оскільки бібліотека симулятора не містить специфічного мікрохвильового радара, функцію детекції руху виконує стандартний PIR-сенсор, а рівень освітленості фіксується модулем фоторезистора. Виконавча підсистема імітується світлодіодом зі струмообмежувальним резистором, яскравість якого динамічно керується мікроконтролером за допомогою ШІМ-сигналу. Така базова віртуальна збірка дозволяє безпечно та ефективно відлагодити програмний код кінцевого автомата перед переходом до фізичного монтажу компонентів.





ТОПІК TELEMETRY

Стан вузла кожні 30 сек:
освітленість, ШПМ, аптайм

ТОПІК EVENT

Миттєва подія детекції руху
QoS 1 — гарантована доставка

ТОПІК COMMAND

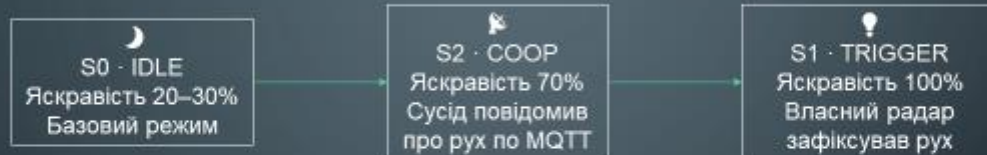
Команди диспетчера:
100% яскравість при аварійній
ситуації

ЗАГОЛОВОК ПАКЕТУ

2 байти
мінімальний overhead протоколу

Парадигма Publish/Subscribe: ліхтарі не знають IP-адрес один одного — спілкуються лише через іменовані топіки брокера Eclipse Mosquitto

АЛГОРИТМ КООПЕРАТИВНОЇ ВЗАЄМОДІЇ «СВІТЛОВИЙ КОРИДОР»



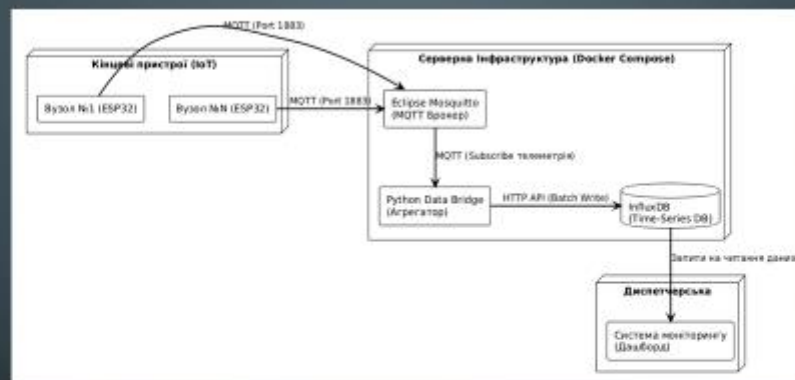
Ліхтар завчасно підвищує яскравість до 70% (S2), отримавши MQTT-повідомлення від сусіда. Об'єкт ніколи не «в'їжджає в темряву». Затримка між вузлами: **15–25 мс**

Fail-safe: при втраті зв'язку з брокером ліхтар автономно продовжує цикл S0 ↔ S1 на основі власного радара

- Емулятор Python + asyncio: кожен ліхтар — окрема coroutine. Сотні вузлів в одному Event Loop без надмірного споживання ресурсів
- Генератор трафіку на базі розподілу Пуассона — реалістична поява автомобілів з заданою середньою частотою
- Бібліотека raho-mqtt: віртуальні ліхтарі підключаються до реального брокера так само, як і фізичні ESP32
- Стек даних: InfluxDB для часових рядів та Matplotlib для дашбордів.



СЕРВЕРНА ИНФРАСТРУКТУРА



Одна команда **docker-compose up -d** розгортає всю інфраструктуру. Restart: unless-stopped — автовідновлення при збоях. InfluxDB ізольована у внутрішній Bridge-мережі Docker

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

11

ВАРТІСТЬ 1 ВУЗЛА

1 200 грн

компоненти 820 + монтаж 380 грн

ЗАГАЛЬНИЙ CAPEX

164 000 грн

апаратура + ПЗ для 120 вузлів

РІЧНА ЕКОНОМІЯ

253 164 грн

29 784 кВт·год × 8.50 грн/кВт·год

ТЕРМІН ОКУПНОСТІ

~9 місяців

CF = 220 164 грн/рік (після OPEX)

- Екологічний ефект: ~12 тонн CO₂/рік — скорочення викидів на одній вулиці
- NPV за 5 років (r=15%): +574 026 грн — проєкт економічно доцільний

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

12

Апробація результатів роботи здійснювалась у формі участі на науково-практичних конференціях, що проходили на базі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій:

1. III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Технологічні горизонти: дослідження та застосування інформаційних технологій для технологічного прогресу України і світу» з поданням тез на тему «Інтелектуальні системи керування дорожнім рухом на основі машинного навчання»
2. VII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» з поданням тез на тему «Екологічні та економічні аспекти впровадження інтелектуального вуличного освітлення в концепції smart city»

ВИСНОВКИ

13

- Спроектовано кіберфізичний вузол на базі **ESP32 + RCWL-0516 + BH1750** з плавним ШІМ-керуванням
- Розроблено алгоритм «світлового коридору» на основі FSM та протоколу MQTT із затримкою 15–25 мс
- Реалізовано **цифровий двійник** (Python *asyncio*) та мікросервісну інфраструктуру (Docker, Mosquitto, InfluxDB)
- Досягнуто економію електроенергії на 68% із розрахунковим терміном окупності проєкту до 9 місяців.
- Забезпечено зменшення світлового забруднення міста та значне скорочення викидів CO₂.

Система відповідає концепції **Smart City**, стандарту EN 13201 та European Green Deal. Готова до дослідної експлуатації та масштабування

14

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!