

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху

Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 220046.22.02.78 ПЗ


Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-2

  
Підпис

Євгеній КУДИРКО

Ініціали, прізвище


Керівник канд.фіз.-мат.наук, доц.  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд.фіз.-мат.наук, доц.  
Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

«01» червня 2026 р.

дата

Хмельницький 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Кудирку Євгенію Романовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху

Керівник проекту (роботи) Кисіль Тетяна Миколаївна, канд.фіз.-мат.наук, доц.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Аналіз предметної області та постановка задачі на розробку кіберфізичної системи керування освітленням

Проектування апаратно-програмного комплексу кіберфізичної системи керування освітленням

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи моніторингу та керування вуличним освітленням

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Архітектура ПЗ проекту

Схема електрична принципова та блок-схема алгоритму

Програмна реалізація клієнт-серверної інфраструктури

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Тетяна КИСІЛЬ, доцент кафедри КП С		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КПС		

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз предметної області та постановка задачі на розробку кіберфізичної системи керування освітленням	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – проектування апаратно-програмного комплексу кіберфізичної системи керування освітленням	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи моніторингу та керування вуличним освітленням	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач

Підпис

Свгеній КУДИРКО

Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Тетяна КИСІЛЬ

Імя, ПРІЗВИЩЕ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху».

Автор роботи: Євгеній КУДИРКО.

Керівник роботи: Тетяна Кисіль.


Пояснювальна записка: 56с., 28 рис., 1 табл., 3 дод., 47 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ВУЛИЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, МОНІТОРИНГ, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню програмно-апаратної системи моніторингу параметрів комп'ютерного обладнання та навколишнього середовища на базі мікроконтролерної платформи. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до надійності, енергоефективності та безперервності функціонування комп'ютерних систем, серверного обладнання, вбудованих пристроїв і елементів інфокомунікаційної інфраструктури. Своєчасний контроль температури, вологості, енергоспоживання та інших параметрів дає змогу попереджати аварійні ситуації, знижувати ризики відмов і підвищувати ефективність експлуатації технічних засобів.

Метою роботи є проєктування, реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу для збору, передавання, оброблення й візуалізації даних з датчиків у реальному часі. Для досягнення поставленої мети було виконано аналіз сучасних підходів до побудови систем моніторингу, обрано елементну базу, розроблено структурну та функціональну схеми пристрою, спроектовано програмне забезпечення мікроконтролера і користувацький інтерфейс для перегляду результатів вимірювань.




  
Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Аналіз предметної області та постановка задачі на розробку кіберфізичної системи керування освітленням .....	6
1.1 Оцінка стану та проблематика енергозбереження в традиційних мережах зовнішнього освітлення .....	6
1.2 Сучасні технології та апаратно-програмні засоби реалізації систем інтелектуального освітлення.....	11
1.3 Особливості архітектурної організації та побудови розподілених кіберфізичних систем.....	17
1.4 Формулювання вимог та загальна постановка задачі дослідження.....	20
1.5 Висновки до першого розділу.....	22
2 Проектування апаратно-програмного комплексу кіберфізичної системи керування освітленням.....	24
2.1 Архітектура та взаємодія підсистем розроблюваного програмно-технічного засобу .....	24
2.2 Обґрунтування вибору елементної бази та проектування апаратної частини крайового вузла .....	28
2.3 Розробка алгоритмічного забезпечення мікроконтролера для адаптивного ШІМ-керування.....	31
2.4 Проектування серверної частини на базі Node-RED та інтерфейсу веб-застосунку .....	35
2.5 Висновки до другого розділу .....	38
3 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи моніторингу та керування вуличним освітленням .....	40
3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу .....	40

КвРКІ.220046.22.02.78 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Виконав		Світлана КУДИРКО		
Перевір.		Гетяна КИСИЛЬ		
Н.контр.		Гетяна КИСИЛЬ		
Затвер.		Ольга НАВЛОВА		
Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху				
Пояснювальна записка				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		v	2	72
ХНУ КІ2-22-2				

3.2	Опис процесу створення баз даних та серверної інфраструктури .....	43
3.3	Створення користувацького інтерфейсу.....	47
3.4	Опис виробу та результати його тестування .....	51
3.5.	Висновки до третього розділу.....	57
Висновки .....		59
Додаток А Архітектура ПЗ проекту .....		66
Додаток Б Схема електрична принципова та блок-схема алгоритму .....		67
Додаток В Програмна реалізація клієнт-серверної інфраструктури .....		68

## ВСТУП

Впровадження концепції розумного міста вимагає глибокої інтеграції інформаційних технологій у базові процеси життєзабезпечення урбанізованих територій. Важливою складовою такої трансформації є кіберфізичні системи, які забезпечують безперервну взаємодію між обчислювальними алгоритмами та фізичними процесами у середовищі експлуатації. Серед усього спектра міської інфраструктури мережі зовнішнього освітлення залишаються одними з найбільших споживачів електричної енергії. Традиційні підходи до керування ліхтарями базуються на жорстких хронологічних розкладах, що неминуче призводить до явища тривалого переосвітлення простору. Робота освітлювальних приладів на максимальній номінальній потужності у періоди відсутності пішохідного чи автомобільного трафіку є економічно нераціональною та створює надмірне навантаження на генеруючі потужності.

Враховуючи глобальні тенденції до оптимізації ресурсів та наявні дефіцити в енергосистемах, перехід від статичних архітектур до динамічних алгоритмів адаптивного керування стає необхідністю. Синтез мікропроцесорної техніки, прецизійних мікрохвильових сенсорів руху та цифрових модулів вимірювання рівня природної освітленості відкриває шляхи для створення децентралізованих автономних вузлів. Такі крайові пристрої здатні локально аналізувати зміни навколишнього середовища, миттєво коригувати інтенсивність випромінюваного світлового потоку та забезпечувати плавне широтно-імпульсне регулювання потужності без зниження рівня візуального комфорту мешканців. Водночас ізольоване функціонування окремих ліхтарів позбавляє операторів можливості контролювати стан мережі. Проектування комплексів із впровадженням сучасних протоколів бездротового зв'язку дозволяє об'єднати фізичні пристрої у єдиний інформаційний простір. Організація двостороннього обміну даними, збору телеметрії у реальному часі та

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

віддаленої диспетчеризації формує потужний інструмент для моніторингу працездатності інфраструктури.

Метою дипломної роботи є визначення умов та системних особливостей застосування сучасної апаратної елементної бази, а також проектування алгоритмічних механізмів обробки інформації у кіберфізичній системі адаптивного керування вуличним освітленням. Досягнення поставленої мети спрямоване на забезпечення високого рівня енергозбереження при безумовному збереженні безпеки руху об'єктів інфраструктури шляхом інтеграції локальної сенсорної аналітики та мережевих технологій диспетчеризації.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування, інформаційної взаємодії та динамічного керування потужністю в інтелектуальних системах вуличного освітлення в умовах мінливої міської інфраструктури.

Предметом дослідження є апаратно-програмні засоби, протоколи обміну даними та алгоритмічне забезпечення реалізації адаптивного регулювання і віддаленого моніторингу крайових вузлів зовнішнього освітлення.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ НА РОЗРОБКУ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

## 1.1 Оцінка стану та проблематика енергозбереження в традиційних мережах зовнішнього освітлення

Зростання рівня урбанізації та розширення меж населених пунктів безперервно призводять до збільшення навантаження на муніципальні електромережі. Забезпечення якісного зовнішнього освітлення вулиць, автомагістралей, паркових зон та прибудинкових територій є однією з базових потреб для підтримання безпеки життєдіяльності міст [2, 4]. Разом з тим, витрати на електроенергію для живлення вуличних ліхтарів становлять значну, а іноді й найбільшу частку в структурі комунальних платежів місцевих бюджетів.

Дослідження статистики енергоспоживання європейських та українських міст показують, що на зовнішнє освітлення може припадати до третини всіх муніципальних витрат на електроенергію [6, 26]. Детальну структуру розподілу енергоспоживання типового муніципалітету наведено на рисунку 1.1.

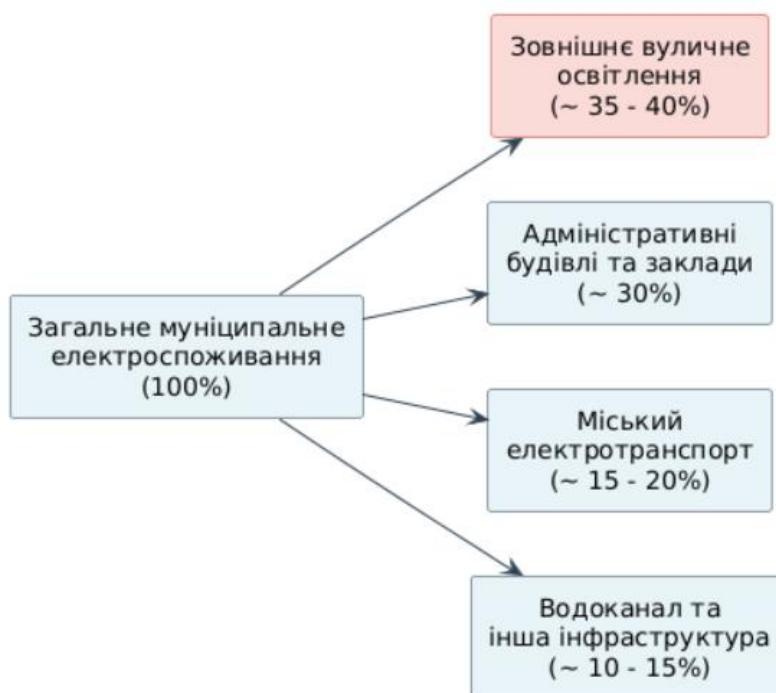


Рисунок 1.1 - Розподіл витрат муніципального електроспоживання за галузями.

Проблема низької енергоефективності існуючих систем полягає у використанні застарілих джерел світла та примітивних алгоритмів керування ними. На переважній більшості вітчизняних об'єктів інфраструктури досі експлуатуються газорозрядні лампи, зокрема дугові ртутні та натрієві лампи високого тиску. Фізичний принцип роботи таких ламп зумовлює їхні вкрай низькі експлуатаційні характеристики в контексті енергозбереження. Значна частина спожитої ними електричної енергії перетворюється не на видимий світловий потік, а розсіюється у вигляді теплового випромінювання [5, 9]. Крім того, газорозрядні джерела світла характеризуються тривалим періодом розігріву до виходу на номінальну потужність і повною відсутністю технічної можливості плавного регулювання яскравості світіння.

Відсутність можливості зміни інтенсивності світлового потоку робить неможливим впровадження будь-яких адаптивних алгоритмів. Традиційна система керування зовнішнім освітленням працює за жорстким бінарним принципом – лінія або повністю увімкнена, або повністю вимкнена. Керуючий вплив зазвичай формується на основі показань централізованих фотореле, які реагують на загальний рівень природної освітленості, або за допомогою електромеханічних чи електронних таймерів. Використання таймерів вимагає постійного ручного коригування графіків увімкнення та вимкнення персоналом залежно від пори року та тривалості світлового дня, що вносить значну похибку через людський фактор.

Наслідком такого підходу є виникнення явища так званого хронологічного переосвітлення [14, 26]. Ліхтарі працюють на сто відсотків своєї потужності впродовж усієї темної пори доби, включаючи період глибокої ночі з другої до п'ятої години ранку. У цей часовий проміжок інтенсивність дорожнього руху та пішохідний трафік у спальних районах або на другорядних вулицях наближаються до нуля. Система витрачає кіловати енергії на освітлення абсолютно порожнього простору, не виконуючи при цьому своєї головної функції - забезпечення комфорту та безпеки реальних учасників руху.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Співвідношення між реальною потребою в освітленні та фактичними витратами енергії традиційною системою демонструє графік на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Профіль споживання електроенергії нерегульованою системою освітлення протягом доби

Окремим аспектом проблеми є економічні втрати, пов'язані з обслуговуванням та експлуатацією неінтелектуальних мереж. Традиційна інфраструктура позбавлена будь-яких каналів зворотного зв'язку між кінцевим світильником та диспетчерським пунктом. Обслуговуюча організація не має об'єктивних даних про поточний стан кожної конкретної лампи, параметри електромережі на віддалених ділянках або фактичний обсяг спожитої потужності. Виявлення несправностей, таких як перегорання лампи, пошкодження кабелю або вихід з ладу пускорегулюючої апаратури, відбувається виключно реактивним методом [15, 20]. Диспетчери фіксують аварії на основі звернень громадян або під час дорогих планових об'їздів територій спеціальними бригадами у нічний час.

Такий реактивний підхід до технічного обслуговування суттєво збільшує час простою несправних ділянок мережі та підвищує загальні експлуатаційні витрати підприємств. Неможливість прогнозування виходу обладнання з ладу призводить до нераціонального використання людських ресурсів та транспортних засобів спеціального призначення. Аналіз структури фінансових втрат підприємств зовнішнього освітлення підтверджує, що витрати на логістику та пошук несправностей часто перевищують вартість самих замінних компонентів. Порівняння ефективності різних підходів до організації технічного обслуговування відображено на рисунку 1.3.

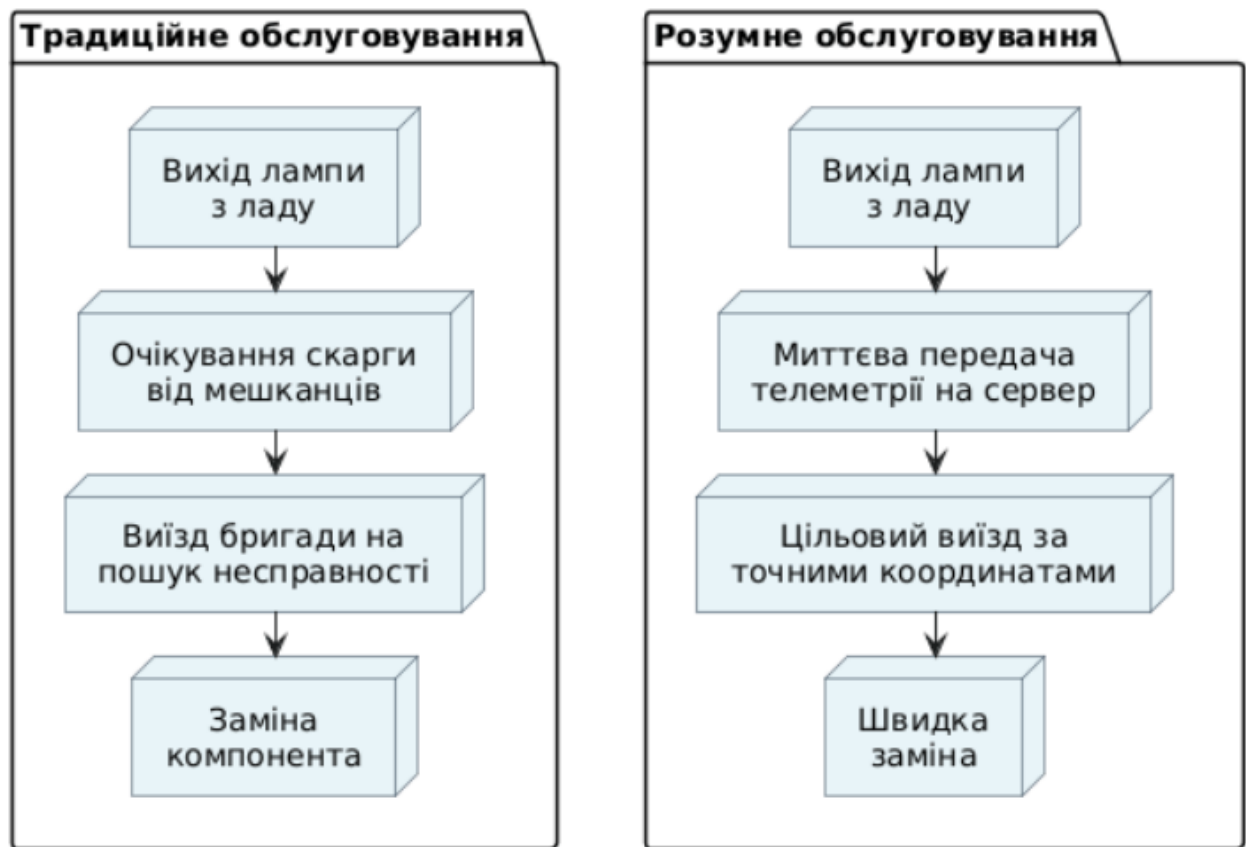


Рисунок 1.3 - Структура експлуатаційних витрат при реактивному та проактивному обслуговуванні

Окрім прямого економічного збитку, неефективне використання електроенергії має серйозні екологічні наслідки. Надмірне споживання енергії

ліхтарями пропорційно збільшує навантаження на електростанції, що, в свою чергу, призводить до збільшення обсягів спалювання викопного палива та викидів парникових газів в атмосферу. Також застарілі конструкції плафонів часто розсіюють світловий потік не лише на дорожнє полотно, а й у верхню півсферу, створюючи ефект світлового забруднення. Це явище негативно впливає на біоритми людей, що проживають поблизу, порушує екосистеми міської фауни та ускладнює астрономічні спостереження [19].

Вирішення описаного комплексу проблем вимагає переходу від статичних систем освітлення до динамічних. Базовою передумовою для цього є повна заміна газорозрядних ламп на твердотільні джерела світла – світлодіоди [8, 14]. Проте сама по собі заміна ламп вирішує лише частину проблеми, знижуючи номінальну потужність споживання. Для досягнення максимального рівня енергоефективності необхідно забезпечити світильники інструментами для оцінки навколишньої обстановки та алгоритмами прийняття рішень. Комплексний розподіл факторів, що призводять до втрат ефективності, показано на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Діаграма причинно-наслідкових зв'язків неефективності традиційних систем вуличного освітлення

Створення архітектури, яка б дозволила ліхтарю автоматично зменшувати яскравість за відсутності людей та миттєво повертати її до номінального рівня при появі пішохода чи автомобіля, є головним завданням сучасної міської інженерії. Реалізація такого підходу можлива лише шляхом розробки спеціалізованої кіберфізичної системи, яка об'єднає сенсори руху, датчики освітленості, мікропроцесорні блоки керування та модулі бездротової передачі даних у єдиний інтерактивний комплекс.

## 1.2 Сучасні технології та апаратно-програмні засоби реалізації систем інтелектуального освітлення

Проектування сучасної кіберфізичної системи управління зовнішнім освітленням вимагає комплексного підходу до вибору апаратної бази. Технологічний стек такого рішення складається з кількох взаємопов'язаних рівнів: виконавчих механізмів, сенсорної підсистеми, обчислювального ядра та комунікаційних модулів. Базовою умовою для розгортання будь-яких адаптивних алгоритмів є використання світлодіодних джерел світла. На відміну від традиційних газорозрядних ламп, світлодіодні матриці підтримують технологію широтно-імпульсної модуляції. Цей метод дозволяє керувати яскравістю світіння шляхом зміни шпаруватості електричних імпульсів, що подаються на драйвер живлення. Завдяки високій частоті імпульсів людське око не помічає мерехтіння, сприймаючи лише загальне зниження інтенсивності світлового потоку [14, 33]. Використання ШІМ-контролерів дає змогу реалізувати плавне розгоряння та затухання ліхтарів, що мінімізує пускові струми та значно подовжує термін служби кристалів.

Для того, щоб система могла динамічно реагувати на зміни навколишнього середовища, вона повинна бути оснащена надійною сенсорною мережею. Основним джерелом даних для прийняття рішень є датчики виявлення об'єктів. У практиці побудови систем розумного міста найчастіше застосовуються два типи таких сенсорів: пасивні інфрачервоні та мікрохвильові. Пасивні

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

інфрачервоні датчики функціонують за принципом фіксації теплового випромінювання, яке генерує тіло людини або двигун транспортного засобу. Коли об'єкт, температура якого відрізняється від фонові, перетинає сегментовану зону видимості лінзи Френеля, датчик генерує електричний сигнал. Головними перевагами PIR-сенсорів є їхня низька вартість та мінімальне енергоспоживання, проте вони чутливі до теплових перешкод [11, 13], таких як пориви гарячого вітру влітку або нагрівання корпусу ліхтаря під прямими сонячними променями.

Альтернативним рішенням є використання мікрохвильових датчиків, які працюють на основі ефекту Доплера. Такий сенсор постійно випромінює високочастотні електромагнітні хвилі і аналізує частоту відбитого сигналу. Якщо в зоні дії з'являється рухомий об'єкт, частота відбитої хвилі змінюється, що безпомилково фіксується приймачем. Мікрохвильова технологія забезпечує значно вищу чутливість і здатна виявляти рух навіть через неметалеві перешкоди, наприклад, через пластиковий плафон світильника [10, 12]. Це дозволяє приховати датчик всередині корпусу, захистивши його від вандалізму та атмосферних опадів. Водночас мікрохвильові радары є більш енергоємними і можуть давати хибні спрацювання від руху гілок дерев або сильного дощу, що вимагає програмного фільтрування сигналів. Детальне порівняння технічних характеристик обох типів датчиків наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз датчиків руху для систем зовнішнього освітлення

Характеристика	Пасивний інфрачервоний датчик	Мікрохвильовий датчик
Принцип дії	Фіксація теплового випромінювання від рухомого об'єкта	Випромінювання та аналіз відбитої радіохвилі високої частоти



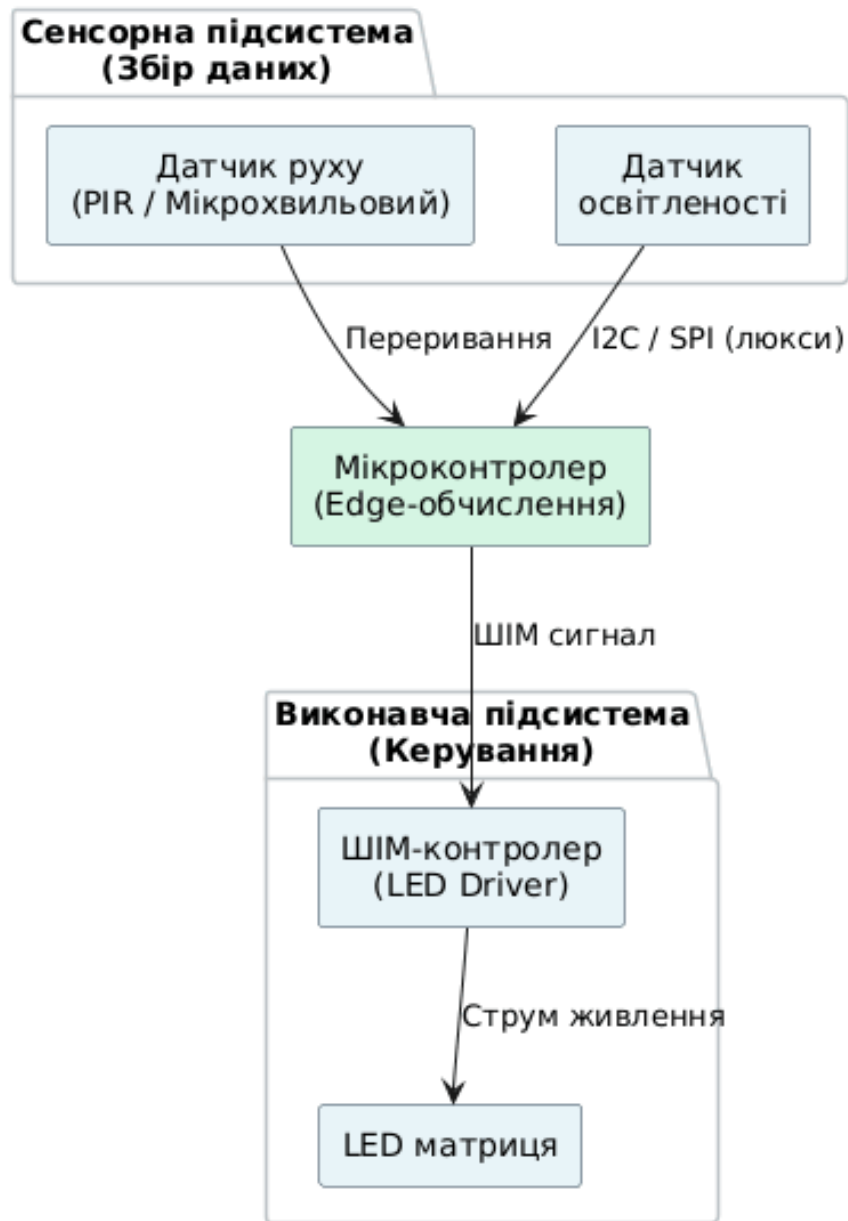


Рисунок 1.5 – Схема збору даних сенсорною підсистемою вузла освітлення

Обробка сигналів від сенсорів та формування керуючих впливів покладається на локальний мікроконтролер, який встановлюється в кожен світильник або шафу керування лінією. В контексті кіберфізичних систем цей підхід реалізує парадигму периферійних обчислень [27, 35]. Мікроконтролер повинен мати достатню кількість портів вводу-виводу для підключення датчиків, підтримку апаратного генерування ШІМ-сигналу та інтерфейси для зв'язку з комунікаційним модулем. Архітектурно важливо, щоб базовий алгоритм адаптивного освітлення виконувався саме на локальному контролері. Якщо

виявлення пішохода буде оброблятися на віддаленому хмарному сервері, мережева затримка може призвести до того, що світло увімкнеться занадто пізно. Периферійні обчислення гарантують миттєву реакцію ліхтаря (мілісекунди) та забезпечують працездатність системи навіть при тимчасовій втраті зв'язку з центральним диспетчерським пунктом.

Організація обміну даними між окремими ліхтарями та сервером вимагає вибору оптимального бездротового протоколу передачі даних. У щільній міській забудові високу ефективність показує стандарти сітчастих мереж (Mesh-мереж), такі як Zigbee [37]. У такій топології кожен ліхтар виступає не лише приймачем і передавачем власних даних, але й маршрутизатором для сусідніх вузлів. Це дозволяє передавати пакети телеметрії по ланцюжку до найближчого інтернет-шлюзу, оминаючи перешкоди у вигляді висотних будівель. Якщо один з ліхтарів виходить з ладу, мережа автоматично перебудовує маршрут передачі даних, що забезпечує високу відмовостійкість інфраструктури.

Для об'єктів, де опори освітлення рознесені на великі відстані (наприклад, заміські автомагістралі), доцільно використовувати технології глобальних мереж з низьким енергоспоживанням. Одним з найбільш перспективних стандартів у цьому сегменті є LoRaWAN [3, 24, 40]. Ця технологія дозволяє передавати невеликі пакети даних на відстані до кількох кілометрів в умовах міста та до десятків кілометрів на відкритій місцевості, використовуючи базові станції. Хоча пропускна здатність LoRaWAN не дозволяє передавати потокове відео, її повністю достатньо для передачі телеметрії про стан світильника, рівень напруги, температуру матриці та факт спрацювання датчика руху. Варіанти топології комунікаційних мереж для розумного освітлення проілюстровано на рисунку 1.6.

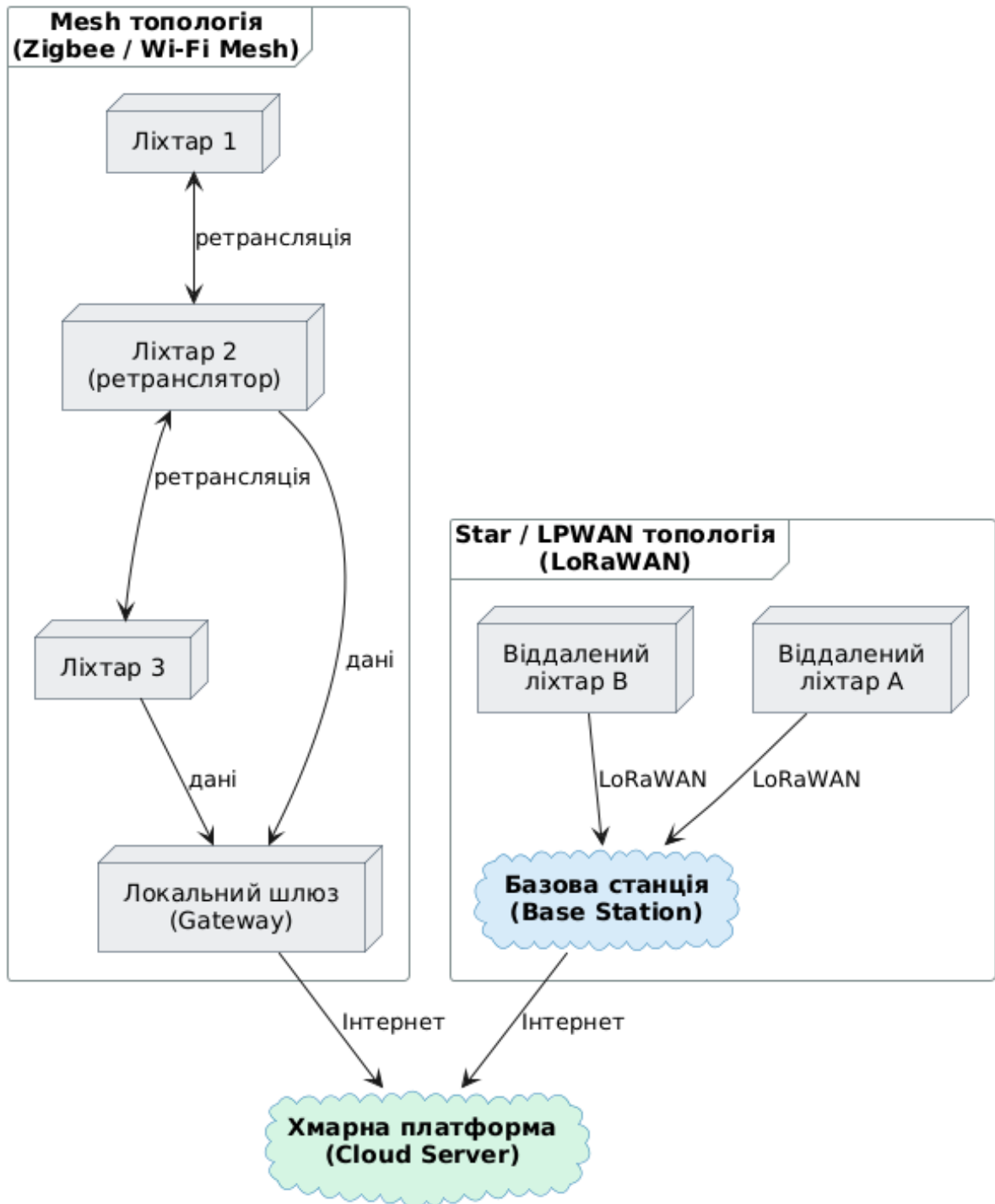


Рисунок 1.6 – Топології бездротових мереж у системах міського освітлення

Підсумовуючи огляд технологічних рішень, можна стверджувати, що створення ефективної системи моніторингу та керування не обмежується простою заміною ламп. Вона вимагає глибокої інтеграції мікропроцесорної техніки з цифровими сенсорами на апаратному рівні та застосування надійних

протоколів маршрутизації даних на мережевому рівні. Саме такий синергетичний підхід дозволяє перетворити звичайний вуличний ліхтар на повноцінний вузол кіберфізичної системи, здатний до автономної адаптації та віддаленої діагностики.

### 1.3 Особливості архітектурної організації та побудови розподілених кіберфізичних систем

Проектування сучасних систем моніторингу та управління вуличним освітленням вимагає застосування методології побудови розподілених кіберфізичних систем. Головною відмінністю таких систем від класичних автоматизованих систем керування технологічними процесами є глибока інтеграція обчислювальних ресурсів у фізичні процеси та наявність глобальної мережевої взаємодії. Аналіз існуючих підходів до архітектури CPS дозволяє виділити трирівневу ієрархічну модель, яка є стандартом де-факто для Інтернету речей [1, 22]. Ця модель включає рівень сприйняття та виконання, мережевий рівень та прикладний рівень. Така стратифікація дозволяє чітко розмежувати зони відповідальності компонентів системи та забезпечити її масштабованість при збільшенні кількості підключених ліхтарів. Загальну схему ієрархічної архітектури проектованої системи наведено на рисунку 1.7.

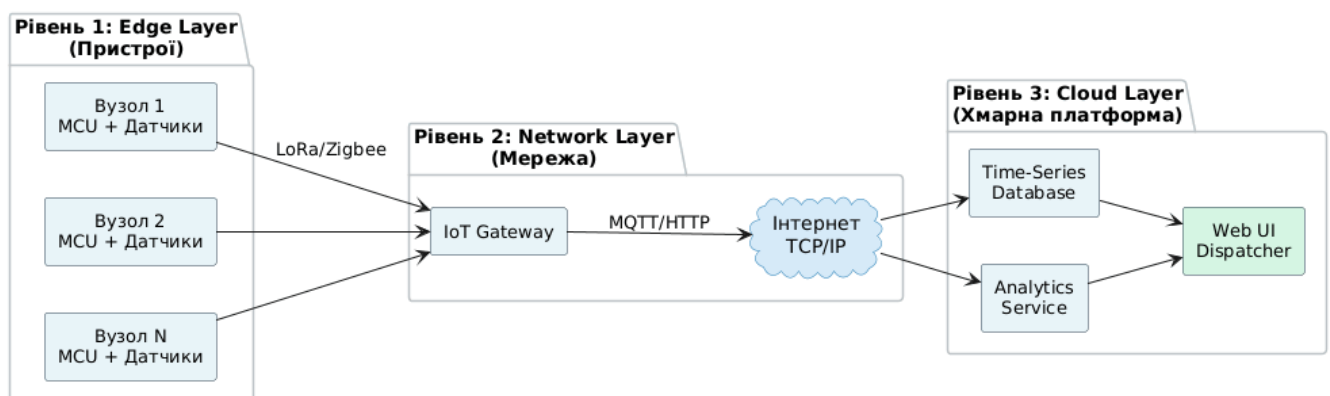


Рисунок 1.7 – Трирівнева архітектура кіберфізичної системи управління освітленням

На найнижчому рівні архітектури, який часто називають рівнем крайових пристроїв, знаходяться інтелектуальні вузли освітлення. З точки зору системної архітектури, кожен такий вузол є автономним агентом, здатним функціонувати незалежно від центрального сервера. Важливою вимогою до цього рівня є мінімізація затримок при обробці сигналів. У системах реального часу, до яких належить вуличне освітлення, рішення про зміну яскравості при виявленні рухомого об'єкта повинно прийматися безпосередньо на мікроконтролері світильника. Передача «сирих» даних з датчиків на хмарний сервер для аналізу і очікування зворотної команди є неприпустимою через нестабільність бездротових каналів зв'язку та немінучі мережеві затримки. Тому архітектура будується за принципом децентралізації логіки: «мозок» системи виноситься на периферію, а центр отримує лише агреговану статистику та статуси станів.

Мережевий рівень забезпечує транспортну інфраструктуру для двостороннього обміну даними між польовими пристроями та сервером. Враховуючи гетерогенність сучасних комунікаційних протоколів, основним елементом тут виступають шлюзи. Архітектурне завдання шлюзу полягає в трансляції протоколів, наприклад, перетворенні пакетів локальної енергоефективної мережі Zigbee або LoRaWAN у стандартні пакети протоколу TCP/IP для передачі через глобальну мережу Інтернет. Окрім маршрутизації, на цьому рівні реалізуються механізми забезпечення цілісності даних та базової кібербезпеки. Оскільки вуличні мережі фізично доступні для зловмисників, архітектура повинна передбачати шифрування трафіку [17, 30] та автентифікацію кожного пристрою перед наданням йому доступу до загальної шини обміну даними.

Верхній рівень архітектури представлений серверною програмною платформою, яка може бути розгорнута як на фізичному обладнанні підприємства, так і в хмарному середовищі. На цьому етапі відбувається збір, збереження та аналітика великих даних. Архітектура серверної частини зазвичай будується на базі мікросервісів, що дозволяє незалежно масштабувати модулі

збору телеметрії, бази даних та веб-інтерфейсу користувача. Для збереження часових рядів (показників споживання енергії, спрацювань датчиків за певні періоди) доцільно використовувати спеціалізовані Time Series бази даних [7, 38], які забезпечують швидку вибірку інформації для побудови графіків та звітів. Прикладний рівень також відповідає за стратегічне управління: формування глобальних розкладів роботи освітлення, оновлення прошивок мікроконтролерів «по повітрю» та інтеграцію з іншими системами розумного міста через API.

Окрему увагу при проектуванні архітектури слід приділити надійності та відмовостійкості. Розподілена природа системи створює ризики втрати зв'язку між рівнями. Тому архітектурний патерн повинен передбачати режим «ізолюваного функціонування». Це означає, що при втраті з'єднання зі шлюзом або сервером, вуличний ліхтар автоматично переходить на роботу за внутрішнім аварійним розкладом, збереженим у незалежній пам'яті EEPROM, або продовжує працювати виключно за даними власних сенсорів. Після відновлення зв'язку пристрій повинен мати можливість синхронізувати свій внутрішній годинник та передати накопичений у буфері журнал подій на сервер. Така поведінка системи гарантує безпеку дорожнього руху за будь-яких умов функціонування телекомунікаційної інфраструктури.

Іншим важливим архітектурним аспектом є вибір протоколу прикладного рівня для обміну повідомленнями. Для Інтернету речей стандартом стає протокол MQTT, який працює за моделлю «видавець-підписник» [25, 36]. На відміну від класичного HTTP, який вимагає встановлення важкого з'єднання для кожного запиту, MQTT дозволяє підтримувати постійний легкий канал зв'язку та миттєво доставляти команди керування на тисячі пристроїв одночасно. Використання брокера повідомлень у центрі архітектури спрощує додавання нових сервісів: наприклад, сервіс аналітики може просто «підписатися» на потік даних від ліхтарів, не вимагаючи внесення змін у програмне забезпечення самих світильників. Схему потоків даних в архітектурі на основі брокера повідомлень зображено на рисунку 1.8.

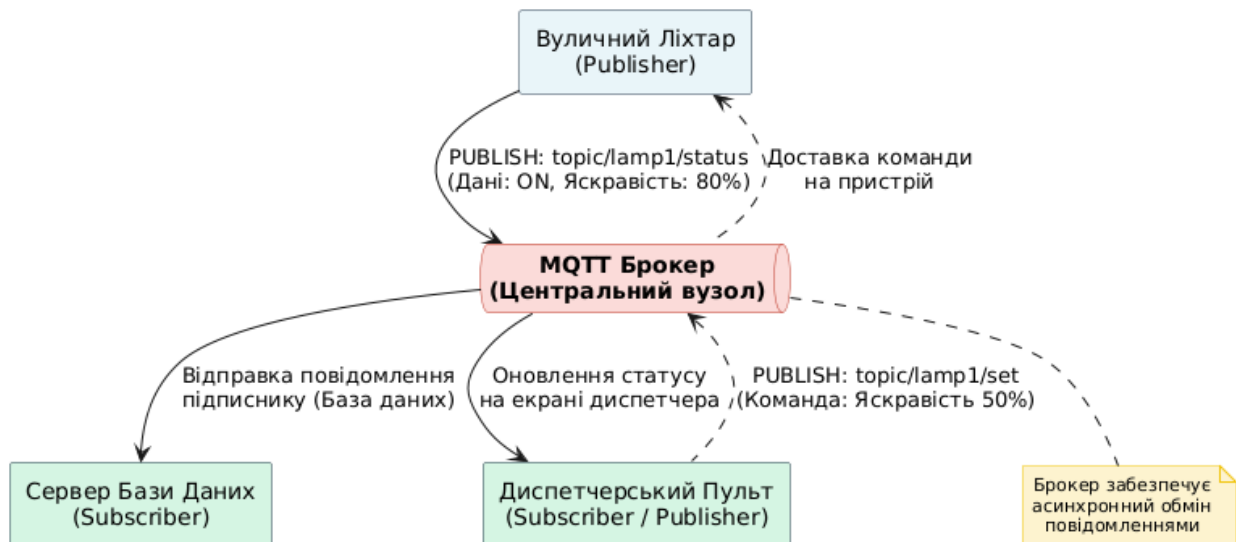


Рисунок 1.8 – Діаграма потоків даних в архітектурі Publish/Subscribe

Таким чином, проєктована архітектура поєднує в собі елементи крайових обчислень для забезпечення реактивності системи та хмарних технологій для глобального моніторингу та стратегічного планування. Такий гібридний підхід дозволяє досягти балансу між швидкодією, надійністю та гнучкістю налаштування, що є важливим для об'єктів міської інфраструктури.

#### 1.4 Формулювання вимог та загальна постановка задачі дослідження

Узагальнюючи результати проведеного аналізу проблем енергоефективності існуючих мереж зовнішнього освітлення та огляду сучасних технологічних рішень для побудови кіберфізичних систем, можна сформулювати основні напрямки подальшого проєктування у рамках даної роботи. Головною метою є розробка комплексної системи моніторингу та адаптивного керування вуличним освітленням [6, 26, 37], яка дозволить мінімізувати споживання електроенергії без зниження рівня безпеки для пішоходів та водіїв. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку

взаємопов'язаних науково-технічних завдань, що охоплюють як апаратну, так і програмну складові системи.

Першочерговим завданням є обґрунтування вибору та розробка апаратної архітектури кінцевого вузла керування. Необхідно спроектувати електричну схему, яка забезпечить інтеграцію енергоефективного мікроконтролера, цифрових датчиків освітленості та сенсорів виявлення руху. Важливим етапом є вибір елементної бази, що задовольняє вимогам щодо швидкодії, енергоспоживання та вартості, а також розробка схеми драйвера для керування потужним світлодіодним навантаженням за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Також слід передбачити надійний канал зв'язку для передачі телеметричних даних на верхній рівень системи, обравши оптимальний бездротовий протокол з урахуванням специфіки міської забудови.

Наступним завданням виступає проектування алгоритмічного та програмного забезпечення для локального мікроконтролера. Потрібно реалізувати логіку адаптивного керування, яка забезпечить плавну зміну яскравості ліхтаря залежно від присутності рухомих об'єктів та поточного рівня природного світла. Алгоритм повинен передбачати різні режими роботи, включаючи черговий режим зі зниженою яскравістю та режим активного освітлення, а також мати механізми захисту від хибних спрацювань датчиків. Окрему увагу слід приділити реалізації протоколів обміну даними, зокрема MQTT, для забезпечення двосторонньої комунікації з сервером, що дозволить не лише передавати статус пристрою, але й отримувати команди дистанційного керування.

Завершальним етапом роботи має стати розробка або налаштування серверної частини системи для збору, збереження та візуалізації даних. Необхідно створити інформаційну панель диспетчера, яка відображатиме поточний стан мережі освітлення, графіки енергоспоживання та журнал подій у реальному часі. Результатом виконання поставлених завдань повинна стати реалізація діючого прототипу кіберфізичної системи, який на практиці

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

продемонструє працездатність запропонованих алгоритмів енергозбереження та надійність архітектурних рішень.

### 1.5 Висновки до першого розділу

У межах першого розділу було проведено детальний аналіз сучасного стану систем вуличного освітлення та виявлено їх основні недоліки. Дослідження показало, що традиційні підходи до керування ліхтарями за допомогою жорстких розкладів та застарілих газорозрядних ламп призводять до значних перевитрат електроенергії. Робота освітлювальних приладів на повну потужність у періоди відсутності руху на вулицях є економічно недоцільною та екологічно шкідливою. Вирішення цієї проблеми вимагає переходу від статичного освітлення до адаптивних систем, здатних динамічно реагувати на зміни навколишнього середовища.

Огляд існуючих технологічних рішень підтвердив, що базовою умовою для побудови такої системи є використання світлодіодних джерел світла з апаратною підтримкою плавного регулювання яскравості. Для збору даних про поточну ситуацію оптимально застосовувати комбінацію цифрових датчиків освітленості та мікрохвильових сенсорів руху. Такі компоненти забезпечують високу точність спрацювання та дозволяють мікроконтролеру автоматично знижувати потужність ліхтаря за відсутності об'єктів та миттєво підвищувати її при появі пішоходів або транспортних засобів.

Аналіз архітектурних підходів продемонстрував необхідність застосування трирівневої ієрархічної моделі розподілених кіберфізичних систем. Для гарантування миттєвої реакції на рух та високої відмовостійкості первинна обробка сигналів від датчиків має виконуватися локально на крайовому пристрої. Глобальна мережева взаємодія, передача телеметричних даних та отримання команд від диспетчера ефективно реалізуються за допомогою бездротових технологій зв'язку та спеціалізованих протоколів обміну повідомленнями.

На основі проведеного теоретичного аналізу було сформульовано комплексну постановку задачі дослідження. Подальші кроки передбачають практичну реалізацію розробленої концепції, а саме створення електричної схеми вузла керування, розробку програмного забезпечення для мікроконтролера та налаштування серверної панелі моніторингу. Впровадження такого комплексу дозволить мінімізувати споживання електричної енергії без зниження рівня комфорту та безпеки мешканців міста.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ

2.1 Архітектура та взаємодія підсистем розроблюваного програмно-технічного засобу

Проектування сучасної системи інтелектуального вуличного освітлення базується на ієрархічній архітектурі розподілених кіберфізичних систем. Розроблений програмно-технічний комплекс логічно поділяється на три взаємопов'язані рівні, а саме крайовий, мережевий та прикладний. Кожен із цих рівнів виконує вузькоспеціалізовані задачі, забезпечуючи загальну надійність, масштабованість та швидкодію системи в цілому.

Нижній крайовий рівень представлений безпосередньо апаратною частиною розумного вуличного ліхтаря. Головним обчислювальним ядром цього вузла виступає високопродуктивний мікроконтролер ESP32, який виконує роль локального центру прийняття рішень. Мікроконтролер відповідає за безперервний збір інформації з цифрового датчика рівня освітленості та мікрохвильового радара виявлення руху. На основі отриманих даних мікроконтролер локально реалізує алгоритм адаптивного керування виконавчим механізмом. Завдяки використанню технології широтно-імпульсної модуляції система здатна плавно регулювати яскравість світлодіодного джерела світла.

Таке перенесення базової логіки безпосередньо на крайовий пристрій має критичне значення для безпеки дорожнього руху [21, 23]. Це гарантує миттєву реакцію ліхтаря на появу пішохода чи автомобіля незалежно від якості зв'язку з центральним сервером. У разі виникнення проблем із мережевим покриттям локальний вузол переходить у повністю автономний режим функціонування, продовжуючи керувати яскравістю виключно на базі показань власних сенсорів. Після відновлення зв'язку накопичений пакет телеметричної інформації автоматично відправляється на сервер.

					КвРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зв'язок між апаратним вузлом та сервером забезпечується мережевим рівнем інфраструктури за допомогою бездротового стандарту глобальних мереж LoRaWAN [3, 38]. Вибір цієї технології зумовлений її високою енергоефективністю та здатністю передавати дані на великі відстані в умовах щільної міської забудови чи на заміських автомагістралях. Мережевий рівень відповідає за двосторонню комунікацію, дозволяючи відправляти невеликі пакети телеметрії про стан ліхтаря до найближчого шлюзу та отримувати у відповідь глобальні налаштування. До таких налаштувань належать зміна порогових значень освітленості або команди примусового переходу в заданий режим.

Верхній прикладний рівень системи об'єднує серверну логіку та диспетчерський інтерфейс взаємодії з користувачем. Роль серверного ядра виконує середовище візуального програмування Node-RED, яке функціонує на базі подійно-орієнтованої архітектури [7, 36]. Використання цієї платформи значно спрощує процес налаштування обміну даними завдяки потоковому підходу до маршрутизації повідомлень. Ця гнучка платформа здійснює безперервний прийом вхідних пакетів даних від шлюзів радіомережі. Далі відбувається процес автоматичного парсингу, під час якого система декодує інформацію та витягує корисне навантаження, таке як поточний рівень яскравості конкретного ліхтаря, показники напруги та факти спрацювання радарів руху. Наступним кроком є симуляція централізованої обробки отриманих результатів та їх маршрутизація до спеціалізованої бази даних. Збереження історії зміни параметрів формує надійну структуровану базу для подальшого глибокого аналізу енергоефективності та побудови статистичних звітів. Завдяки вбудованим програмним інструментам середовище дозволяє легко налаштувати складну логіку автоматичних сповіщень. Наприклад, у разі тривалої втрати зв'язку з певним крайовим вузлом або при виявленні аномального енергоспоживання система здатна миттєво генерувати тривожні сигнали для ремонтних бригад. Крім того, платформа забезпечує високий рівень



переглядати поточний статус зовнішнього освітлення у реальному часі. Диспетчер може аналізувати графіки споживання електричної енергії, відслідковувати частоту спрацювання датчиків руху та за потреби здійснювати ручне перехоплення управління окремими вузлами для проведення технічного обслуговування.

Тісна взаємодія описаних підсистем утворює замкнений цикл керування об'єктом. Сенсори первинно оцифровують дані про фізичне середовище, після чого мікроконтролер миттєво адаптує рівень випромінюваного світла та формує телеметричний звіт. Далі цей звіт через радіомережу надходить до серверної частини, де інформація зберігається і візуалізується для оператора. Послідовність етапів передачі інформації від моменту фіксації руху до відображення події на екрані монітора комп'ютера відображено на рисунку 2.2.

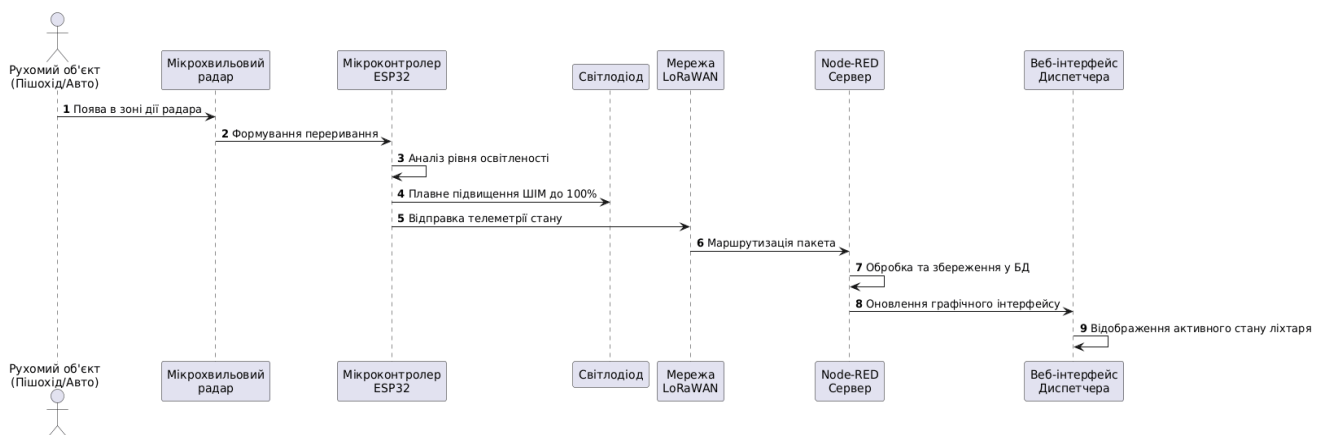


Рисунок 2.2 – Діаграма послідовності інформаційної взаємодії підсистем

Такий комплексний підхід до проектування повністю задовольняє актуальні вимоги до створення сучасних енергоефективних систем. Розділення відповідальності між мікропроцесором ліхтаря та віддаленим сервером дозволяє досягти оптимального балансу між швидкістю прийняття рішень на місцях та можливостями глобальної аналітики.

## 2.2 Обґрунтування вибору елементної бази та проектування апаратної частини крайового вузла

Проектування апаратної частини крайового вузла вимагає ретельного підбору елементної бази, яка здатна забезпечити надійну роботу системи у складних умовах зовнішнього середовища. Основним обчислювальним елементом розумного ліхтаря було обрано відлагоджувальну плату на базі мікроконтролера архітектури ESP32 [35, 37]. Вибір цього чипа обґрунтовується його високою продуктивністю, наявністю великої кількості портів вводу та виводу, а також вбудованою підтримкою апаратного генерування сигналів широтно-імпульсної модуляції. Ця функція є важливою для забезпечення плавного регулювання яскравості освітлення без ефекту видимого мерехтіння. Крім того, мікроконтролер підтримує всі необхідні цифрові інтерфейси зв'язку, що дозволяє безпроблемно підключати до нього як сенсорну периферію, так і зовнішні модулі бездротової передачі даних.

Для виявлення рухомих об'єктів у зоні дії вуличного ліхтаря було прийнято рішення відмовитися від класичних пасивних інфрачервоних датчиків на користь сучасного мікрохвильового модуля RCWL-0516. Такий вибір зумовлений фізичним принципом дії мікрохвильового сенсора, який базується на ефекті Доплера [10, 12]. На відміну від інфрачервоних аналогів, радар не фіксує теплове випромінювання, а отже не має хибних спрацювань через потоки теплого повітря чи нагрівання корпусу світильника від прямих сонячних променів у літній період. важливою архітектурною перевагою є здатність мікрохвильового випромінювання безперешкодно проходити крізь пластикові чи скляні матеріали. Це дає змогу повністю приховати датчик всередині герметичного плафона вуличного ліхтаря, надійно захистивши крихку електроніку від атмосферних опадів, пилу та потенційного вандалізму. Зв'язок модуля з мікроконтролером забезпечується через дискретний цифровий вхід з підтримкою переривань.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримання достовірної інформації про поточний рівень природного освітлення забезпечується спеціалізованим цифровим датчиком ВН1750 [10, 34]. Використання сучасного сенсора з інтегральною шиною зв'язку є значно ефективнішим інженерним рішенням порівняно з дешевими аналоговими фоторезисторами. Обраний цифровий датчик має вбудовані оптичні фільтри та заводське калібрування, що дозволяє йому видавати готовий результат вимірювання безпосередньо у фізичних величинах люксах. Висока точність такого підходу гарантує коректну та стабільну роботу системи на межі вечірніх сутіноків та дозволяє уникнути явища багаторазового хибного вмикання і вимикання світла при тимчасовому затемненні неба хмарами. Для забезпечення стабільної передачі даних по послідовній шині у схему додатково інтегровано підтягуючі резистори номіналом чотири цілих сім десятих кілоома.

Виконавча частина апаратного комплексу складається з силового транзисторного N-MOSFET модуля та безпосередньо світлодіодної стрічки підвищеної яскравості. Модуль підключається до відповідного виводу мікроконтролера та отримує згенерований керуючий сигнал. Завдяки такому підключенню реалізується можливість миттєвого реагування на алгоритмічні команди від мікропроцесора та ідеально плавної зміни інтенсивності світлового потоку. З метою забезпечення інтеграції у глобальну мережу до контактів апаратного інтерфейсу мікроконтролера підключається радіомодуль зв'язку LoRa-02. Обов'язковою умовою стабільного функціонування даного трансивера є наявність зовнішньої антени, підключеної через високочастотний роз'єм на платі. Додатково для локальної візуальної індикації станів системи передбачено використання адресного світлодіодного кільця NeoPixel, сигнал до якого подається через захисний струмообмежувальний резистор. Усі обрані компоненти об'єднуються у єдину електричну принципову схему, яка формує повноцінний автономний крайовий пристрій збору даних та виконання команд. Графічне відображення підключення сенсорних модулів та виконавчих механізмів до портів головного мікроконтролера наведено на рисунку 2.3.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

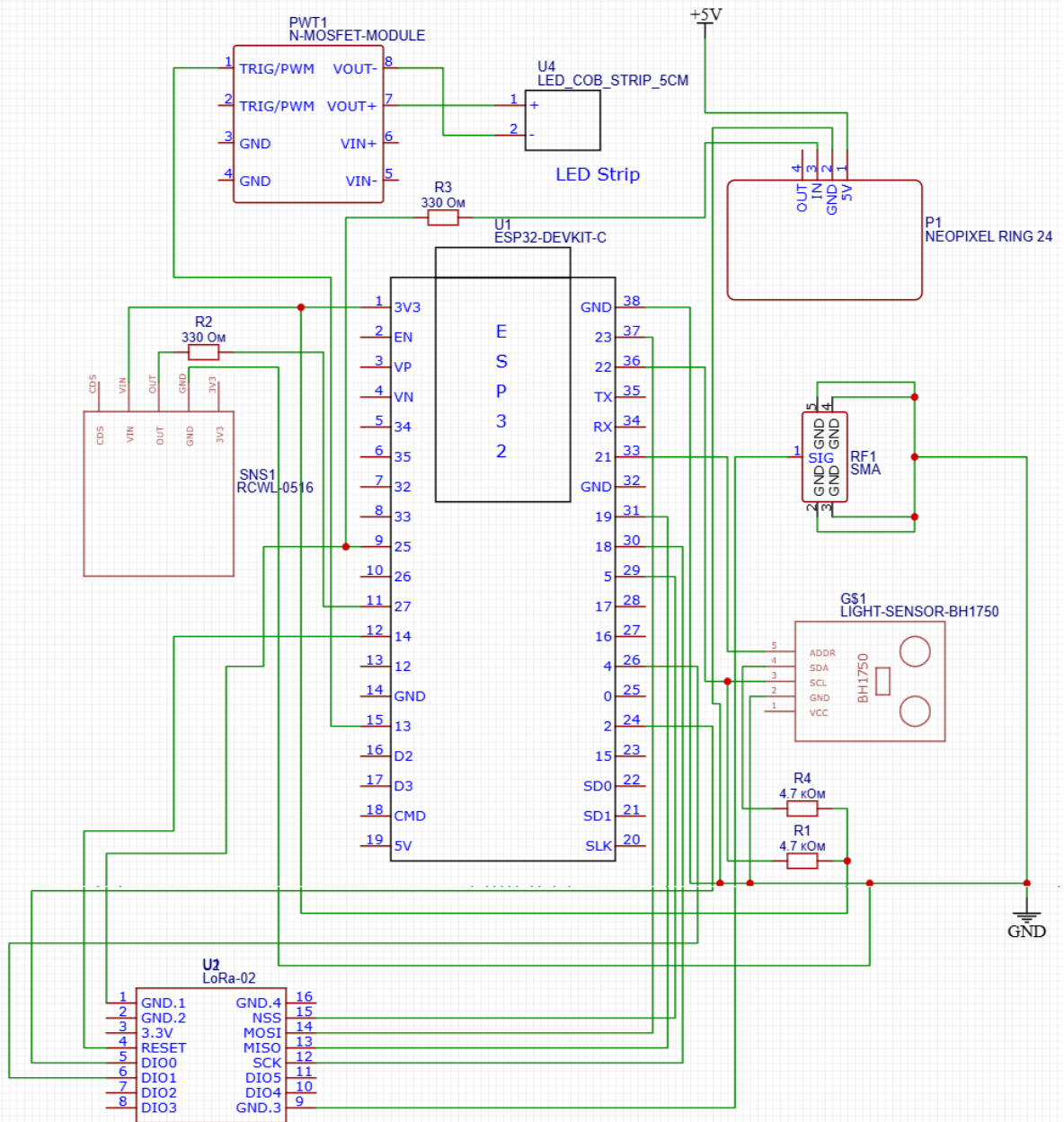


Рисунок 2.3 – Електрична принципова схема підключення компонентів крайового вузла

Спроектована апаратна платформа відрізняється високим рівнем модульності та енергоефективності. Застосований підхід до вибору компонентів та розподілу рівнів живлення дозволяє мінімізувати апаратні витрати на етапі створення прототипу та одночасно гарантує достатній запас обчислювальної потужності для можливого розширення функціоналу системи у майбутньому.

## 2.3 Розробка алгоритмічного забезпечення мікроконтролера для адаптивного ШІМ-керування

Алгоритмічне забезпечення мікроконтролера є ядром розроблюваної кіберфізичної системи, оскільки саме програмний код визначає ступінь адаптивності та енергоефективності кінцевого пристрою. Процес розробки керуючої програми для архітектури обраного мікропроцесора розпочинається з етапу конфігурування апаратної абстракції та ініціалізації периферійних інтерфейсів. На стадії початкового завантаження система налаштовує частоту тактування послідовної шини даних для комунікації з цифровим датчиком освітленості та встановлює параметри високошвидкісного інтерфейсу обміну для взаємодії з радіомодулем трансивера. Особливої уваги вимагає конфігурація апаратного таймера мікроконтролера, який відповідає за генерування сигналу широтно-імпульсної модуляції. Для забезпечення максимально плавного регулювання яскравості світлодіодної стрічки без візуального мерехтіння таймер налаштовується на високу частоту та високу розрядність, що дозволяє отримати кілька тисяч градацій потужності керуючого імпульсу.

Отримання інформації від навколишнього середовища супроводжується обов'язковою цифровою обробкою сигналів. Оскільки вуличний ліхтар експлуатується у динамічних умовах, показники датчика освітленості можуть різко змінюватися через короткочасне освітлення фарами проїжджаючих автомобілів. Для уникнення хибних перемикань режимів розроблений алгоритм включає програмний фільтр ковзного середнього [8, 33]. Цей математичний механізм накопичує масив останніх вимірювань рівня природного світла та обчислює усереднене значення, відкидаючи аномальні піки. Зчитування дискретних сигналів від мікрохвильового радара реалізується за допомогою механізму апаратних переривань. Такий підхід гарантує миттєву реакцію мікроконтролера на появу рухомого об'єкта навіть у ті моменти, коли процесор зайнятий виконанням інших підпрограм чи підготовкою мережових пакетів.

Архітектурно логіка прийняття рішень реалізована у вигляді скінченного автомата станів, який має три базові режими функціонування [25]. Першим є режим денного очікування, коли усереднений рівень природного освітлення перевищує заданий поріг. У цьому стані силове навантаження повністю знеструмлене, а мікроконтролер переходить у режим зниженого енергоспоживання. З настанням сутінків автомат перемикається у нічний черговий режим, активуючи освітлення на рівні тридцяти відсотків від номінальної потужності. Третім станом є активний режим повної потужності, перехід до якого ініціюється виключно спрацюванням радара виявлення руху. Візуалізацію переходів між описаними станами автомата та умови їх зміни наведено на рисунку 2.4.

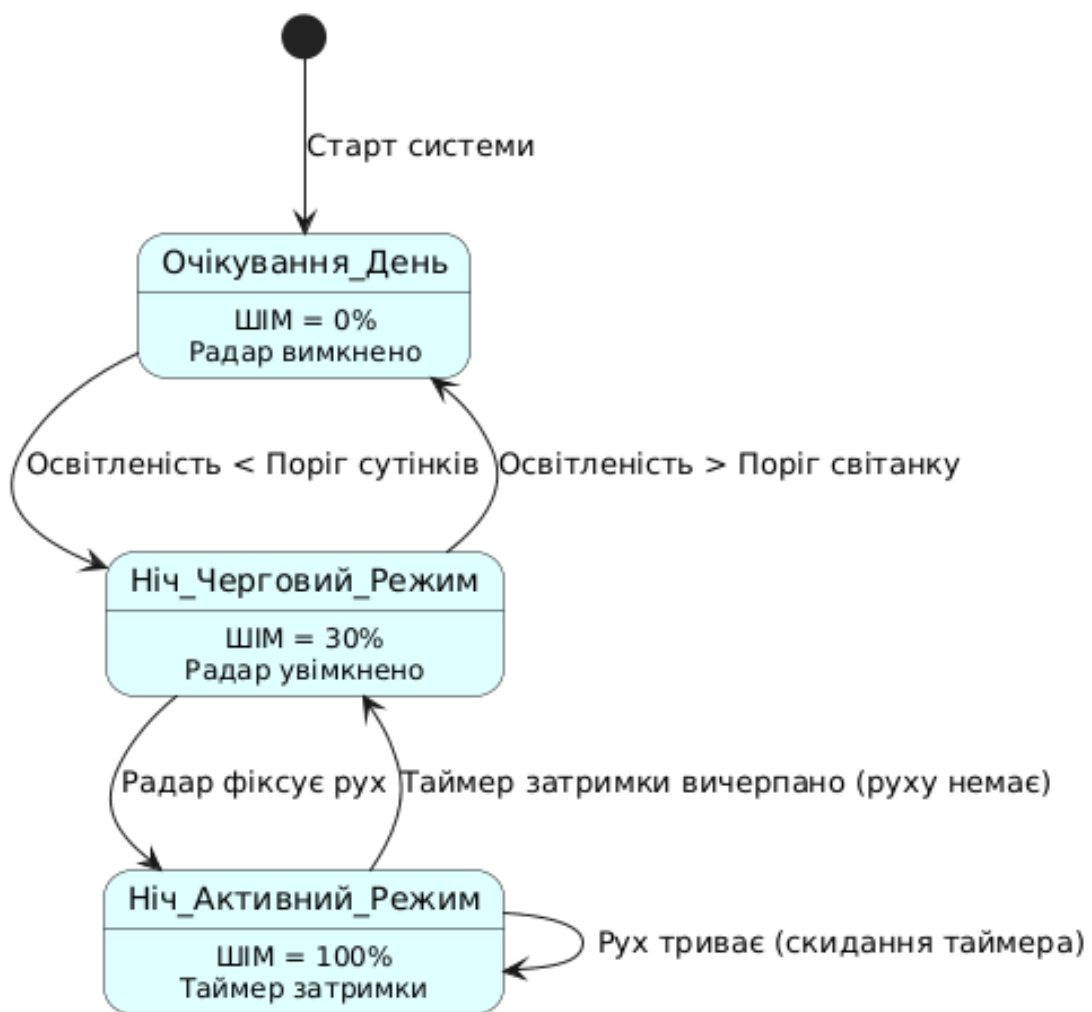


Рисунок 2.4 – Діаграма станів скінченного автомата керування освітленням

Перемикання між черговим та активним режимами супроводжується спеціальною підпрограмою плавного нарощування та зниження потужності. Алгоритм генерування керуючого сигналу використовує нелінійну математичну функцію для імітації природного розгоряння лампи, що є комфортним для людського ока [14]. При фіксації руху програма поступово збільшує шпаруватість імпульсів до максимального значення протягом декількох секунд. Після зникнення об'єкта із зони видимості радар запускається таймер утримання яскравості, який запобігає передчасному згасанню світла. Лише після вичерпання цього ліміту часу потужність плавно повертається до базового рівня економії. Динаміку зміни рівня яскравості освітлювального приладу у часі відповідно до активності радару проілюстровано на рисунку 2.5.

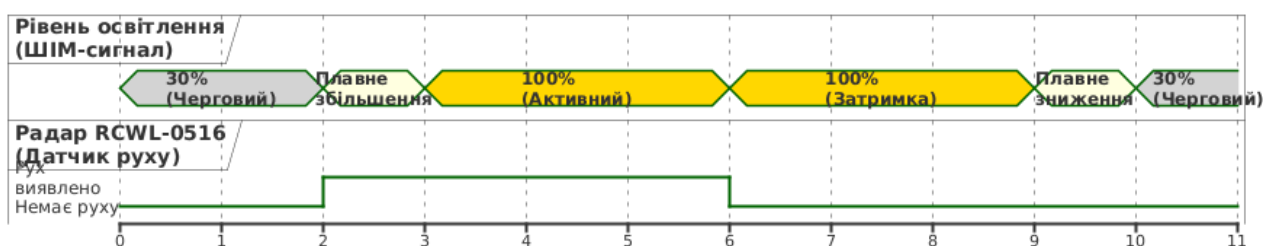


Рисунок 2.5 – Часова діаграма зміни потужності керуючого сигналу

Важливою частиною алгоритму є забезпечення мережевої взаємодії та інтеграції у глобальну інфраструктуру моніторингу. Для цього реалізовано окремий програмний таймер, який періодично ініціює збір накопиченої телеметричної інформації. Програма формує структурований пакет даних, який містить поточний рівень освітленості у люксах, статус активності радару, відсоток потужності силового виходу та загальний час роботи у різних режимах. Сформований пакет передається через радіомережу на сервер диспетчеризації. Для зручності діагностики та локального контролю працездатності системи розроблено логіку управління адресним світлодіодним кільцем. Кожна зміна стану автомата чи успішна відправка радіопакета супроводжується відповідною

кольоровою індикацією. Загальну послідовність виконання всіх описаних етапів розробленого програмного забезпечення відображено на рисунку 2.6.

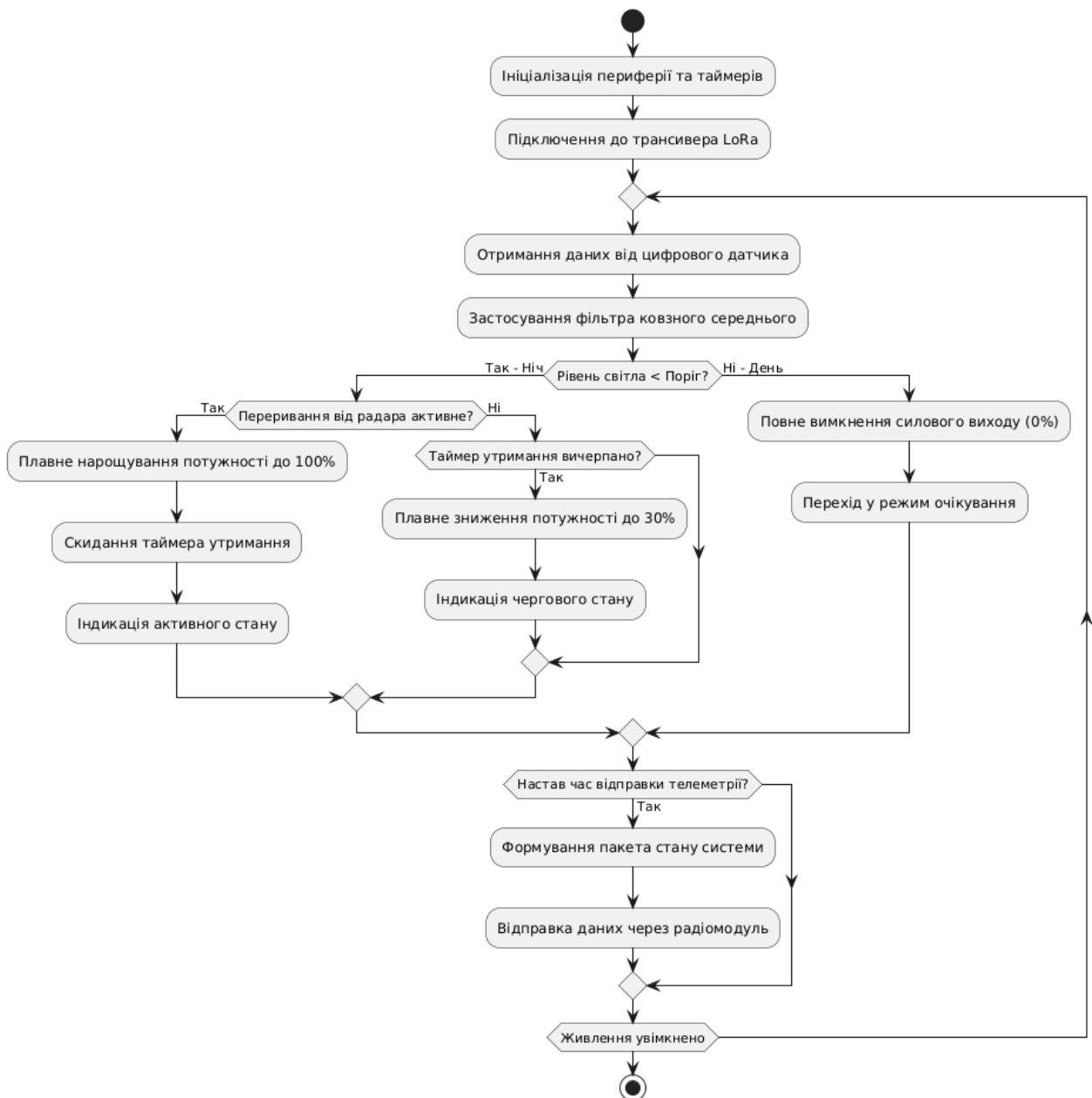


Рисунок 2.6 – Блок-схема основного алгоритму мікроконтролера

Створене алгоритмічне забезпечення відрізняється високою надійністю та здатністю до автономного функціонування. Реалізовані програмні фільтри та механізми адаптивного управління ШІМ-сигналом дозволяють досягти

оптимального балансу між економією електричної енергії та дотриманням нормативних вимог щодо безпеки освітлення вуличної інфраструктури.

#### 2.4 Проектування серверної частини на базі Node-RED та інтерфейсу веб-застосунку

Проектування серверної частини є завершальним етапом розробки комплексної кіберфізичної системи, що забезпечує перехід від локального апаратного керування до централізованого моніторингу та диспетчеризації. Для реалізації серверної логіки та побудови графічного інтерфейсу користувача було обрано платформу потокового програмування Node-RED. Вибір даного програмного середовища зумовлений його високою гнучкістю, вбудованою підтримкою протоколу MQTT для асинхронного обміну повідомленнями [7, 36] та наявністю інструментарію для розробки структурованих інформаційних панелей. Завдяки такій архітектурі серверна частина здатна безперервно приймати телеметрію від віддаленого крайового вузла, виконувати її синтаксичний аналіз у режимі реального часу та архівувати у реляційній базі даних для подальшої обробки.

Інформаційна взаємодія між апаратним вузлом освітлення та сервером відбувається через проміжний шлюз мережі LoRaWAN, який ретранслює прийняті радіопакети до глобальної мережі з використанням брокера повідомлень. У середовищі Node-RED потік даних ініціюється вузлом підписки на відповідний топик пристрою, після чого отриманий зашифрований пакет передається до блоку парсингу. Спеціально розроблена програмна функція виконує дешифрування корисного навантаження та виокремлює головні змінні. Після структурування у формат JSON інформація направляєється на паралельні гілки обробки: запис у часовий ряд бази даних та маршрутизацію змінних до відповідних віджетів користувацького інтерфейсу. Графічну модель розроблених потоків обробки даних на сервері представлено на рисунку 2.7.

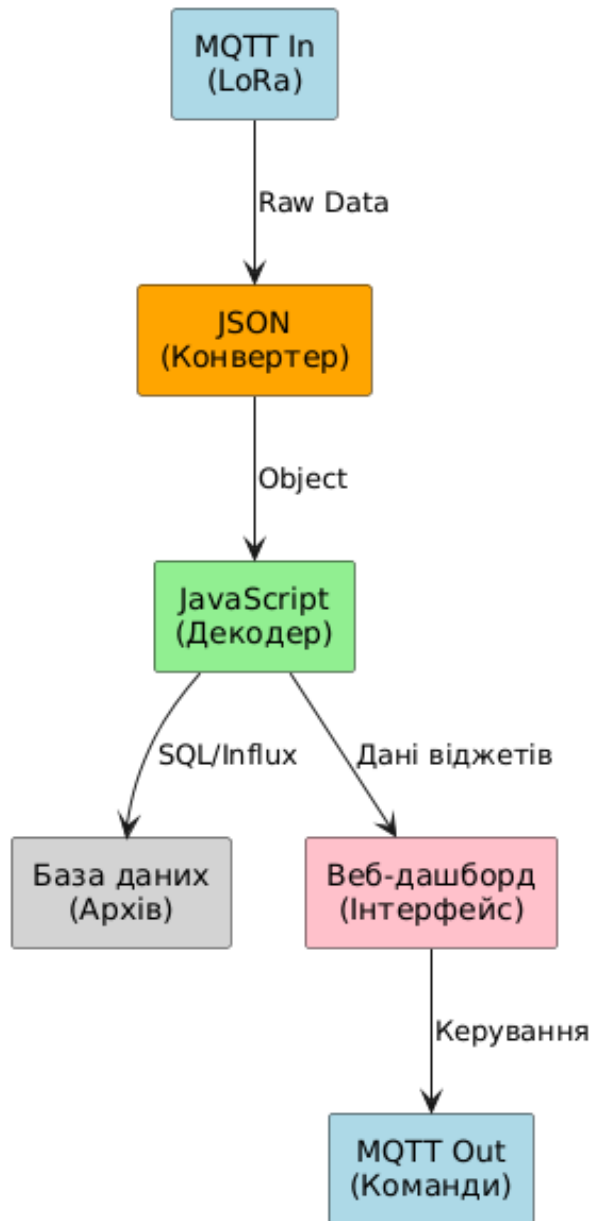


Рисунок 2.7 – Структурна схема потоків обробки телеметрії у середовищі Node-RED

Розробка клієнтського програмного забезпечення передбачає створення структурованого веб-інтерфейсу диспетчера. З архітектурної точки зору розроблений застосунок поділяється на три основні функціональні модулі: модуль моніторингу, модуль керування та модуль аналітики. Модуль моніторингу телеметрії забезпечує відображення поточного стану крайового вузла, використовуючи цифрові індикатори для візуалізації рівня природного освітлення у люксах, дискретного стану мікрохвильового радара та фактичного

відсотка потужності широтно-імпульсної модуляції силового виходу. Це дозволяє оператору в режимі реального часу контролювати коректність роботи алгоритму мікроконтролера.

Модуль керування реалізує механізм двостороннього зв'язку, надаючи оператору інструментарій для віддаленого втручання в роботу системи [20, 26]. Основною функцією цього модуля є можливість перемикання ліхтаря з автоматичного адаптивного режиму в режим ручного управління. У ручному режимі диспетчер формує керівний вплив шляхом завдання цільового рівня яскравості, який конвертується у низхідне повідомлення та передається на крайовий пристрій. Такий функціонал є конче необхідним при проведенні технічного обслуговування інфраструктури або виникненні нештатних ситуацій на контрольованій ділянці. Модуль аналітики інтегрує дані з історичного архіву для побудови часових діаграм, зокрема графіка спрацювання детектора руху, що слугує інструментом для оцінки інтенсивності трафіку та оптимізації алгоритмів енергозбереження. Архітектурну структурну схему розробленого програмного веб-застосунку наведено на рисунку 2.8.

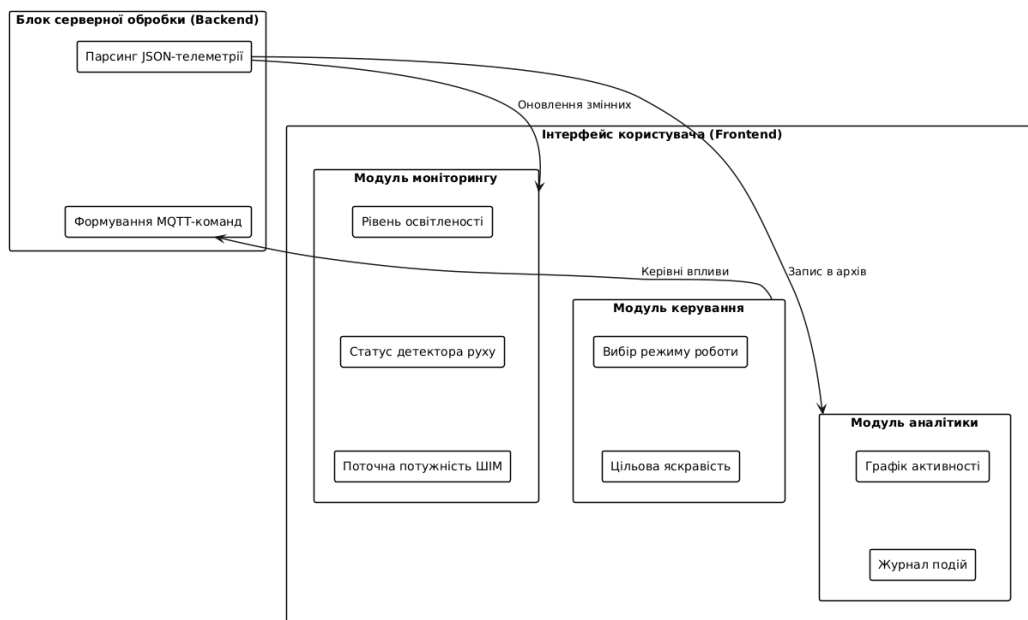


Рисунок 2.8 – Інтерфейс веб-застосунку для моніторингу та керування вуличним освітленням

## 2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі було виконано комплексне проектування апаратної та програмної частин кіберфізичної системи моніторингу та керування вуличним освітленням. Процес розробки охопив усі важливі рівні архітектури Інтернету речей від створення апаратного крайового вузла та його алгоритмічного забезпечення до розгортання хмарної серверної інфраструктури диспетчеризації.

На основі поглибленого аналізу умов експлуатації обґрунтовано вибір елементної бази та розроблено електричну принципову схему крайового пристрою. Використання мікроконтролера архітектури ESP32 як головного обчислювального модуля дозволило забезпечити високу продуктивність для обробки сенсорних даних та керування периферійними пристроями. Відмова від класичних інфрачервоних датчиків на користь мікрохвильового радару RCWL-0516, який працює за принципом ефекту Доплера, та прецизійного цифрового сенсора освітленості BH1750 суттєво підвищила стійкість системи до теплових завад та атмосферних впливів. Інтеграція силового N-MOSFET модуля для комутації навантаження та радіотрансивера LoRa-02 з SPI-інтерфейсом дозволила створити надійний і повністю автономний пристрій із можливістю енергоефективної бездротової інтеграції у глобальну мережу розумного міста.

Розроблено багаторівневе алгоритмічне забезпечення мікроконтролера, архітектура якого базується на моделі скінченного автомата з трьома основними станами: денним очікуванням, нічним економічним черговим режимом та активним станом повної потужності. Застосування методів цифрової фільтрації вхідних сигналів та нелінійних математичних функцій для генерації керівного ШІМ-сигналу забезпечило ідеально плавне адаптивне регулювання яскравості світлодіодного освітлення без ефекту мерехтіння. Додатково реалізовано підпрограми локальної візуальної індикації станів за допомогою адресного кільця NeoPixel та формування структурованих телеметричних пакетів. Це

гарантує високий рівень енергозбереження, зберігаючи при цьому візуальний комфорт та безпеку для учасників дорожнього руху.

Спроектовано серверну частину системи та архітектуру диспетчерського веб-застосунку в середовищі візуального потокового програмування Node-RED. Розроблена структурно-функціональна модель програмного забезпечення логічно поділяється на модулі моніторингу, інтерактивного керування та історичної аналітики. Використання стандартизованого протоколу MQTT для асинхронного обміну повідомленнями та впровадження алгоритмів парсингу JSON-пакетів забезпечило надійну двосторонню комунікацію. Це дозволяє оператору не лише дистанційно відстежувати телеметрію в режимі реального часу і аналізувати графіки трафіку, а й формувати низхідні команди для примусового перемикання пристрою в ручний режим керування при виникненні нештатних чи аварійних ситуацій на інфраструктурному об'єкті.

Таким чином, розроблений апаратно-програмний комплекс відзначається високим ступенем модульності, масштабованості та відмовостійкості. Отримані результати проектування повністю задовольняють поставлені технічні вимоги і формують надійне інженерне підґрунтя для переходу до наступного етапу – фізичної реалізації прототипу та його експериментального тестування.

### 3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ВУЛИЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ

3.1 Опис реалізації модулів апаратного та програмного забезпечення програмно-технічного засобу

Перехід від етапу теоретичного проектування до практичної реалізації кіберфізичної системи вимагає створення валідаційного прототипу. Враховуючи високу вартість та технічну складність інтеграції силових напівпровідникових компонентів на початкових стадіях розробки, для первинного тестування логіки керування було обрано метод віртуального моделювання. Реалізація апаратної частини крайового вузла виконана у професійному середовищі симуляції мікропроцесорних систем. Такий підхід дозволяє з високою точністю відтворити електричні процеси та перевірити роботу алгоритмів мікроконтролера до моменту створення фізичної друкованої плати.

Базовим обчислювальним ядром розробленого віртуального стенда виступає мікроконтролер архітектури ESP32. Підключення периферійних пристроїв повністю відповідає розробленій раніше електричній принциповій схемі. Роль мікрохвильового радара виконує базовий цифровий детектор руху, який генерує логічний сигнал високого рівня при фіксації об'єкта. Даний сигнал передається на чотирнадцятий порт вводу-виводу загального призначення. Для вимірювання рівня природної освітленості застосовано аналоговий фоторезистор, підключений до тридцяти четвертого порту, що підтримує аналого-цифрове перетворення. Отримані значення напруги програмно масштабуються у діапазон від нуля до тисячі люкс, імітуючи роботу прецизійного цифрового сенсора.

Виконавчий механізм системи поданий у вигляді світлодіода, який імітує роботу потужної твердотільної матриці вуличного ліхтаря. Керування цим елементом здійснюється через двадцять п'ятий порт мікроконтролера за

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

допомогою апаратної широтно-імпульсної модуляції. Роздільна здатність генератора сигналів встановлена на рівні восьми біт, що забезпечує двісті п'ятдесят п'ять кроків регулювання вихідної потужності.

Загальний вигляд візуальної моделі розробленої апаратної частини крайового вузла у середовищі симуляції наведено на рисунку 3.1.

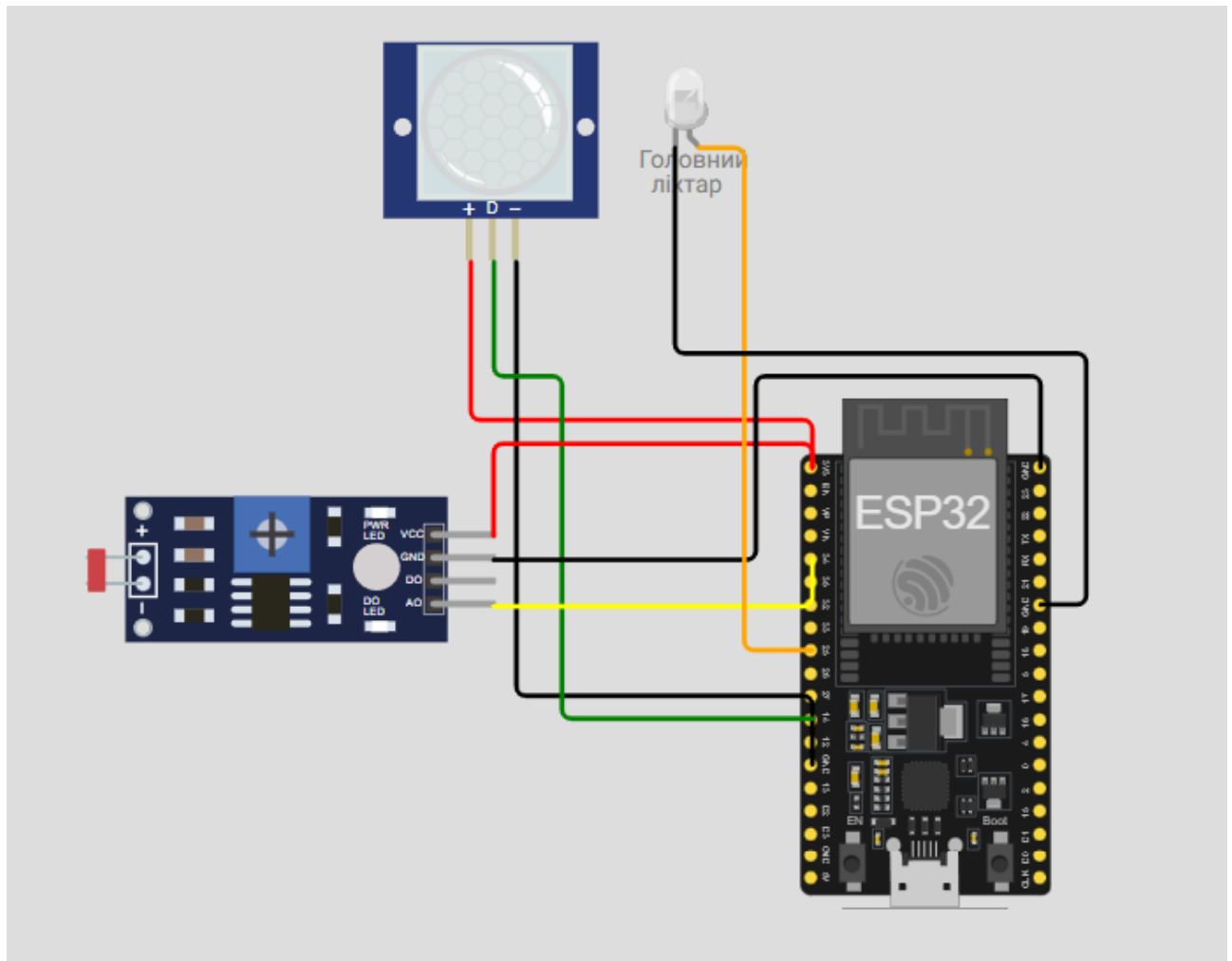


Рисунок 3.1 – Модель апаратної частини крайового вузла у середовищі симуляції

Програмне забезпечення для мікроконтролера створене мовою C++ з використанням спеціалізованого фреймворку у середовищі розробки Visual Studio Code. Керування залежностями та компіляція машинного коду реалізуються за допомогою платформи PlatformIO. Архітектурною базою

керуючої програми є математична модель скінченного автомата. Алгоритм безперервно аналізує показники сенсорів та перемикає систему між визначеними станами функціонування.

Базовим станом є «День», при якому генерація керуючого сигналу повністю припиняється через достатній рівень природного освітлення. При падінні показників нижче встановленого порогу сутінків система переходить у стан «Ніч чергова». У цьому режимі на силовий вихід подається сигнал із заповненням на рівні тридцяти відсотків від номінальної потужності. Поява пішохода або транспортного засобу ініціює миттєвий перехід у стан «Ніч активна», що супроводжується підвищенням інтенсивності випромінювання до ста відсотків. Додатково реалізовано стан ручного перехоплення керування «Дистанційне керування», який тимчасово блокує локальну автоматику та очікує команд від сервера.

Особливу увагу при розробці програмного забезпечення приділено алгоритму плавного регулювання яскравості. Миттєва зміна потужності освітлювального приладу створює різкі перепади освітленості, що негативно впливає на зір учасників дорожнього руху. Для усунення цього недоліку реалізовано математичну функцію поступового нарощування та зниження скважності керуючих імпульсів. Швидкість збільшення потужності налаштована на вищі показники порівняно зі швидкістю затухання. Це гарантує швидке освітлення дороги перед рухомим об'єктом та комфортне плавне згасання ліхтаря після його зникнення із зони видимості сенсора.

Комунікаційна підсистема крайового вузла забезпечує безперервний двосторонній обмін даними з диспетчерським центром. Програма періодично формує структурований пакет даних у форматі легковагового обміну інформацією. Кожен такий пакет містить поточний рівень освітленості, бінарний статус детектора руху, розрахунковий відсоток потужності силового виходу та текстовий ідентифікатор поточного стану автомата. Сформований рядок передається на глобальний брокер через протокол черг повідомлень телеметрії.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Водночас мікроконтролер підтримує постійну підписку на вхідний канал зв'язку для миттєвого прийому команд конфігурації.

Програмну архітектуру логіки перемикання режимів функціонування мікроконтролера у вигляді діаграми станів скінченного автомата проілюстровано на рисунку 3.2.

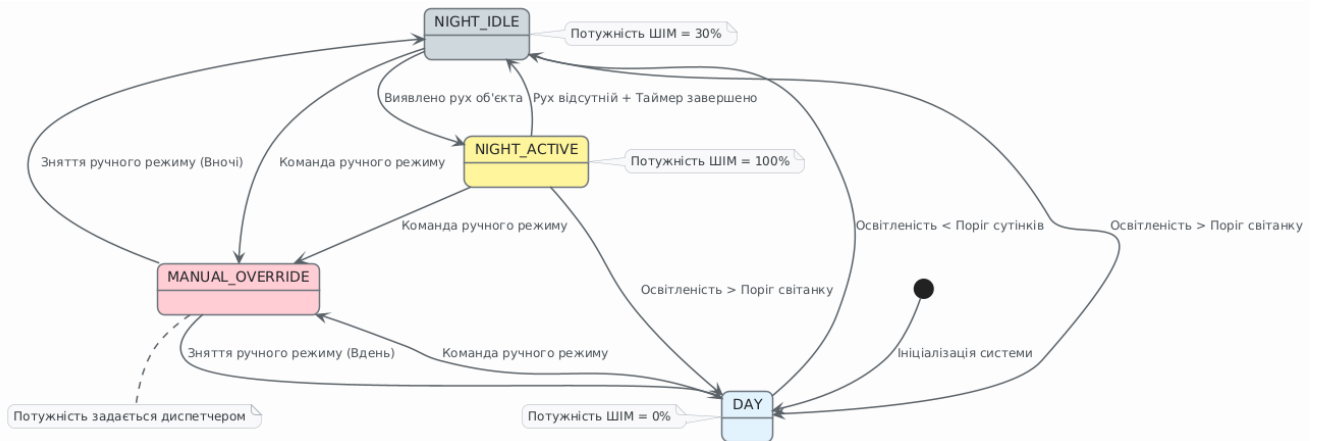


Рисунок 3.2 – Програмна архітектура скінченного автомата керування освітленням

### 3.2 Опис процесу створення баз даних та серверної інфраструктури

Розгортання серверної частини кіберфізичної системи є критичним етапом для забезпечення централізованого збору телеметрії та віддаленого керування. Для гарантування надійного та швидкого обміну повідомленнями між крайовим пристроєм та сервером використано протокол черг повідомлень телеметрії. Транспортним ядром системи виступає хмарний брокер повідомлень. Використання розподіленої хмарної архітектури брокера дозволяє уникнути необхідності розгортання та підтримки власного фізичного сервера для маршрутизації трафіку, забезпечуючи при цьому високу пропускну здатність та мінімальні затримки при передачі пакетів даних.

Основним середовищем для обробки інформації та побудови серверної логіки обрано платформу потокового програмування. Цей інструментарій

дозволяє візуально проєктувати маршрути проходження даних та інтегрувати різноманітні мережеві протоколи. Процес обробки вхідного потоку розпочинається з вузла підписки на визначений інформаційний канал брокера. Після отримання зашифрованого текстового повідомлення від мікроконтролера система ініціює процедуру автоматичного синтаксичного аналізу. Вхідний рядок конвертується у структурований формат об'єктів, що дозволяє серверу ізолювати окремі змінні, а саме рівень освітленості, поточний статус системи, наявність руху та відсоток потужності широтно-імпульсної модуляції.

Загальну структурну схему інформаційної взаємодії компонентів серверної інфраструктури та маршрутизації мережевого трафіку відображено на рисунку 3.3.

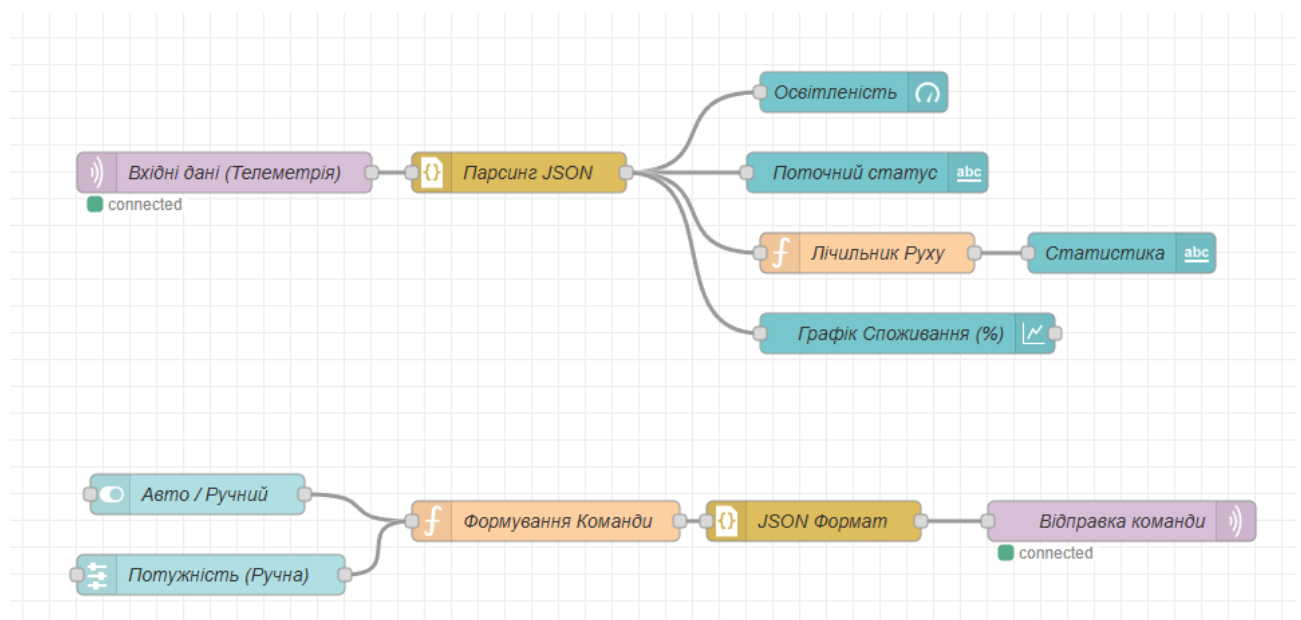


Рисунок 3.3 – Візуальна схема потоків обробки даних у серверному середовищі

Збереження та накопичення отриманої інформації реалізовано через механізми глобальної контекстної пам'яті серверного середовища та інтегровані модулі аналітики. Замість розгортання ресурсомістких реляційних баз даних для даного прототипу застосовано підхід динамічного збереження часових рядів безпосередньо у пам'яті обчислювальних вузлів. Кожне нове значення проходить

через алгоритмічний вузол формування статистики. Запрограмований сценарій порівнює попередній бінарний стан детектора руху з поточним. У разі фіксації зміни стану з нульового на одиничний сервер інкрементує глобальний лічильник подій. Історичні дані зміни потужності ліхтаря буферизуються у внутрішній пам'яті системи для забезпечення безперервної передачі масивів точок на інтерфейсний модуль побудови графіків.

Окрім безперервного збору телеметричної інформації, спроектована серверна інфраструктура виконує важливу функцію формування та маршрутизації низхідних керуючих впливів. Необхідність реалізації такого механізму зумовлена жорсткими вимогами до керованості об'єктів міської інфраструктури, де у разі виникнення нештатних або аварійних ситуацій диспетчер повинен мати абсолютний апаратний пріоритет над локальними автономними алгоритмами. Логіка зворотного зв'язку активується в момент ініціації ручного режиму керування через клієнтський інтерфейс. Для забезпечення безпомилкової трансляції намірів оператора у машинні інструкції архітектура системи передбачає використання спеціально розробленого вузла обробки подій. Цей програмний компонент перехоплює асинхронні мережеві запити, проводить первинну валідацію вхідних значень і збирає обрані параметри бажаного режиму функціонування та необхідного цільового рівня вихідної потужності освітлення. Після успішної перевірки на цілісність алгоритм компілює розрізнені змінні у єдиний структурований пакет даних формату легковагового обміну інформацією. Такий підхід дозволяє суттєво мінімізувати обсяг мережевого трафіку та значно прискорює процес дешифрування команд на стороні мікропроцесора з обмеженими обчислювальними ресурсами. Сформований цифровий контейнер негайно перенаправляється на інтегрований вузол публікації повідомлень. Даний модуль забезпечує трансляцію команди через хмарний брокер у спеціально виділений командний канал зв'язку, на який безперервно підписаний відповідний крайовий пристрій. Прийом такого пакета мікроконтролером призводить до примусового встановлення вказаної

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

скважності широтно-імпульсної модуляції. Завдяки цій багатовступеневій архітектурній моделі формується повноцінний замкнений цикл інформаційної кіберфізичної взаємодії між апаратним виконавчим та серверним керуючим рівнями.

Схему базової інформаційної взаємодії клієнтського вебзастосунок з брокером повідомлень через протокол вебсокетів наведено на рисунку 3.4

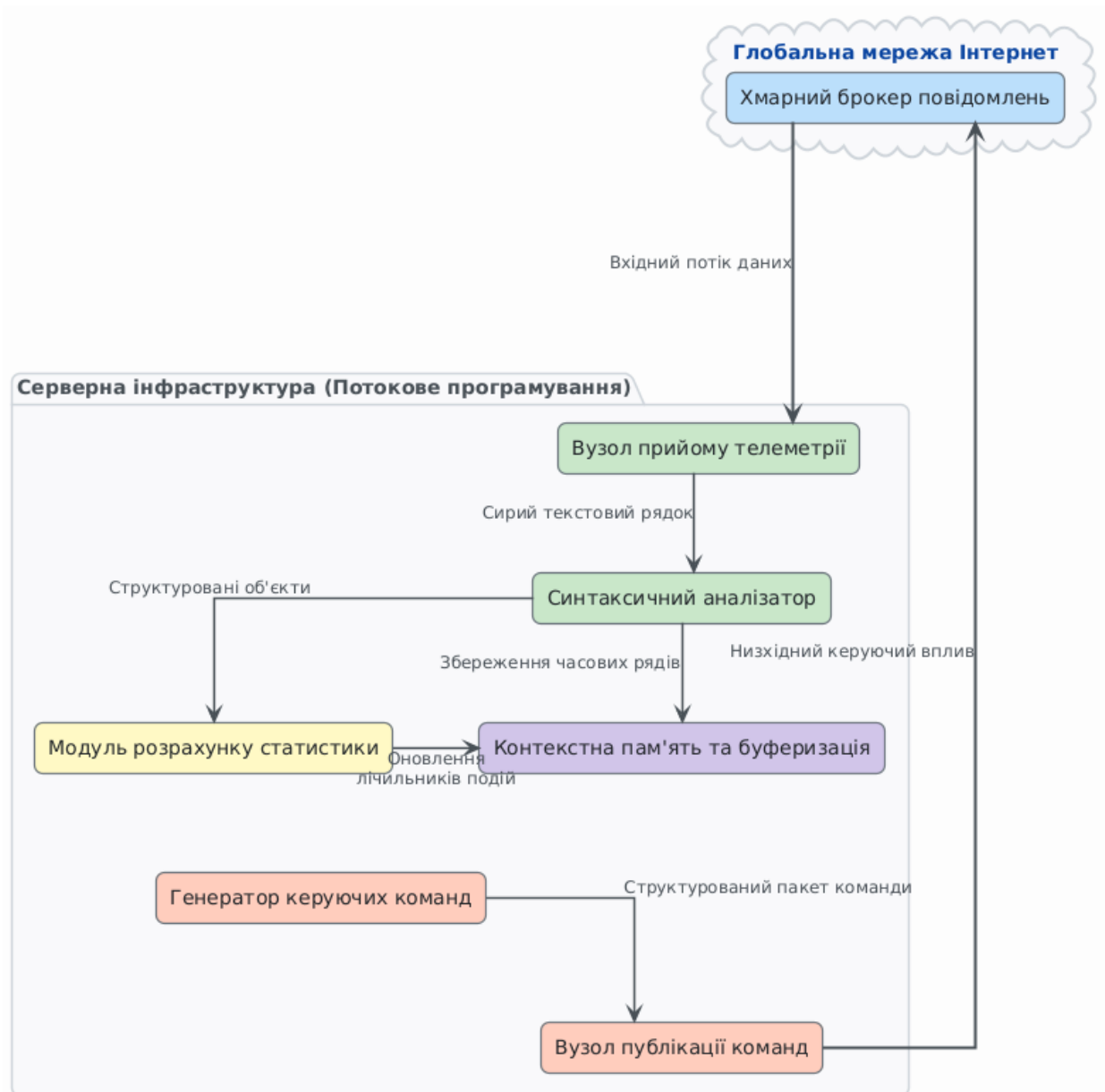


Рисунок 3.4 – Структурна схема інформаційної взаємодії серверної інфраструктури

### 3.3 Створення користувацького інтерфейсу

Розробка клієнтського програмного забезпечення є завершальним етапом формування повноцінної кіберфізичної системи моніторингу та керування. Архітектуру користувацького інтерфейсу диспетчерського центру спроектовано за концепцією односторінкового вебзастосунок з використанням прогресивної бібліотеки побудови інтерфейсів на основі реактивних компонентів. Даний підхід забезпечує точкове перемальовування лише тих візуальних блоків, дані яких змінилися, без необхідності повного перезавантаження екрана. Така швидкодія є важливою вимогою для систем моніторингу об'єктів інфраструктури у реальному часі. Оскільки стандартні веббраузери не підтримують пряму взаємодію з класичним протоколом черг повідомлень телеметрії, транспортний рівень імплементовано через мостове з'єднання поверх вебсокетів. Це гарантує безперервний дуплексний обмін пакетами між диспетчерською панеллю та крайовими вузлами. Схему базової інформаційної взаємодії клієнтського вебзастосунку з брокером повідомлень через протокол вебсокетів наведено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Схема інформаційної взаємодії клієнтського вебзастосунку з брокером

Проектування візуальної структури розробленої диспетчерської панелі базується на строгих принципах ергономіки та мінімізації когнітивного навантаження на оператора. Зважаючи на безперервний характер моніторингу

об'єктів міської інфраструктури, робочий простір екрана логічно сегментовано на ізольовані функціональні зони. Найвищий ієрархічний рівень інтерфейсу займає верхня інформаційна панель, яка слугує консолідованим центром відображення глобальних агрегованих індикаторів ефективності функціонування всієї підконтрольної мережі. Такий архітектурний підхід гарантує миттєвий доступ диспетчера до основних метрик без необхідності глибокого аналізу стану кожного окремого крайового пристрою.

Основою аналітичного блоку верхньої панелі є динамічний обчислювальний алгоритм, який функціонує у фоновому режимі клієнтського застосунку. Дане програмне забезпечення здійснює безперервне порівняння фактично згенерованого рівня широтно-імпульсної модуляції з еталонним нерегульованим режимом споживання. Шляхом математичного інтегрування цих показників у часі система автоматично розраховує та візуалізує загальний відсоток збереженої електричної енергії. Отримана метрика є об'єктивним критерієм рентабельності використання адаптивних алгоритмів та слугує базою для подальших аналітичних перетворень.

На основі накопичених даних про заощаджену електроенергію обчислювальне ядро інтерфейсу математично вираховує еквівалент скорочення викидів вуглекислого газу в атмосферу. Застосування стандартизованих коефіцієнтів емісії дозволяє перевести енергетичні показники у зрозумілий екологічний формат. Демонстрація цих параметрів у режимі реального часу не лише підтверджує екологічну доцільність впровадження кіберфізичної системи, але й формує необхідну доказову базу для сертифікації муніципальної інфраструктури за світовими стандартами зеленої енергетики.

Поряд із аналітичними метриками ефективності в межах верхньої панелі розташовано блок глобальних елементів керування лінією освітлення. Цей функціонал забезпечує генерацію ширококомовних керуючих пакетів, які через брокер повідомлень одночасно транслюються на всі підключені крайові вузли. Завдяки цьому диспетчер має змогу одним натисканням інтерфейсної кнопки

					КвРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



картку вузла. Оператор має змогу заблокувати роботу автономного алгоритму за допомогою інтерактивного тумблера переходу в ручний режим. Активація цієї функції розблоковує повзунок інтенсивності випромінювання. Будь-яка зміна його положення формує керуючий пакет даних, який миттєво відправляється на мікроконтролер для зміни скважності вихідного сигналу. Зовнішній вигляд блоку графічної аналітики для відстеження динаміки зміни потужності освітлення у реальному часі наведено на рисунку 3.7.

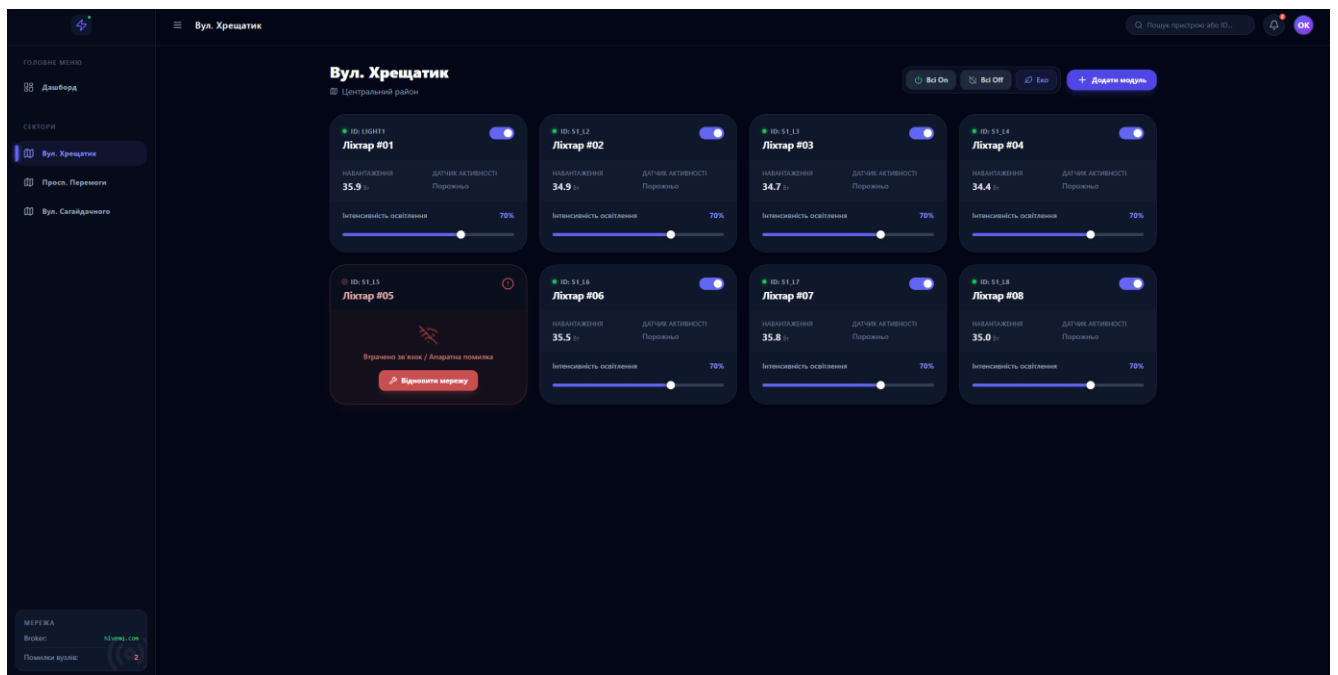


Рисунок 3.7 – Динамічні модулі індивідуального моніторингу крайових вузлів

Окрему увагу при проектуванні інтерфейсу приділено механізмам обробки та візуалізації апаратних збоїв. Програмний сценарій контролює час надходження телеметричних пакетів від кожного вузла. У разі переривання потоку даних або отримання коду помилки, графічне представлення пристрою переходить у тривожний стан. Для проведення глибокого ретроспективного аналізу динаміки споживання електроенергії у нижній частині вебзастосунку розгорнуто аналітичний блок. За допомогою спеціалізованої бібліотеки векторного малювання інтерфейс буде лінійний графік зміни навантаження у реальному часі. Для оптимізації використання оперативної пам'яті комп'ютера

алгоритм рендерингу відмальовує лише визначений часовий інтервал. Повну ієрархічну структуру взаємозв'язків між реактивними компонентами розробленої диспетчерської панелі схематично відображено на рисунку 3.8.

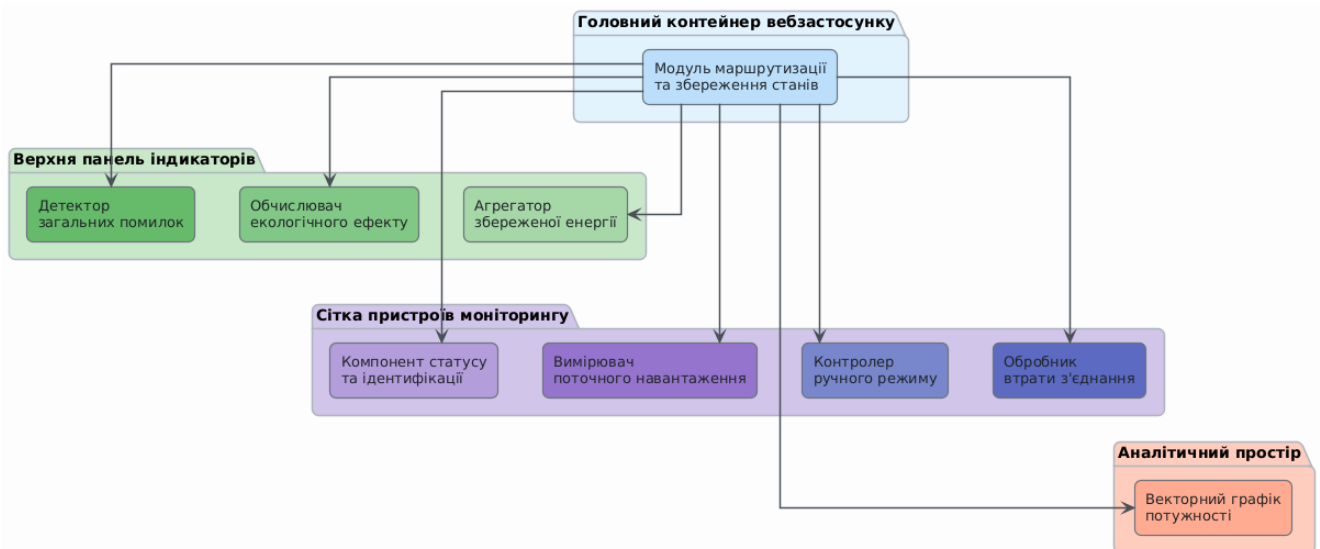


Рисунок 3.8 – Ієрархічна структура реактивних компонентів диспетчерської панелі

### 3.4 Опис виробу та результати його тестування

Розроблений апаратно-програмний комплекс являє собою повноцінну кіберфізичну систему, яка об'єднує рівень периферійних обчислень, глобальну мережеву маршрутизацію та хмарний диспетчерський центр. Функціонально виріб складається з віртуальної моделі мікропроцесорного крайового вузла, брокера черг повідомлень телеметрії та клієнтського вебзастосунку на базі реактивних компонентів. Для підтвердження працездатності запропонованих алгоритмів та оцінки надійності архітектури було проведено комплексне експериментальне тестування виробу у змодельованих умовах експлуатації, максимально наближених до реального міського середовища.

Перший етап експериментального тестування був спрямований на комплексну верифікацію автономної роботи локального обчислювального ядра.

Головною метою цього масиву випробувань стало беззаперечне підтвердження коректності логічних переходів математичної моделі скінченного автомата при динамічній зміні фізичних параметрів навколишнього середовища. У процесі лабораторної імітації поступового зниження рівня природної освітленості нижче заздалегідь встановленого порогу сутінків, аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера здійснював безперервний моніторинг падіння напруги на виході фоторезистора. Для уникнення ефекту хибних багаторазових спрацювань на межі світлового переходу, програмний алгоритм успішно застосовував метод усереднення показників, ігноруючи короточасні тіні від хмар або птахів.

Після підтвердження стабільного настання темної пори доби обчислювальне ядро безперебійно генерувало команду на зміну поточного статусу, переводячи кіберфізичну систему зі стану «День» у стан «Ніч чергова». Реєстрація цього переходу автоматично ініціювала запуск апаратного генератора широтно-імпульсної модуляції. Базова скважність керуючого електричного сигналу встановлювалася на рівні тридцяти відсотків від максимально можливої номінальної потужності. Такий рівень фонового випромінювання виконавчого механізму був обраний як оптимальний компроміс, що забезпечує достатню видимість контурів дорожнього полотна для превентивної безпеки, зводячи при цьому витрати електричної енергії до технологічного мінімуму.

Наступним, важливим кроком випробувального циклу, стала глибока перевірка реакції локальної автоматики на появу динамічних об'єктів у зоні відповідальності крайового вузла. Шляхом апаратної симуляції спрацювання мікрохвильового детектора руху на відповідному цифровому порту мікроконтролера формувалася логічний сигнал високого рівня. Алгоритм обробки переривань миттєво фіксував цю подію, що негайно ініціювало перехід скінченного автомата у пріоритетний стан «Ніч активна». Швидкість реакції обчислювального ядра на тригер руху виявилася достатньою для гарантування того, що освітлення почне посилюватися ще до моменту входу пішохода або транспортного засобу безпосередньо у неосвітлену зону.

					КвРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За результатами серії практичних спостережень було підтверджено, що спеціально розроблений алгоритм плавного розгоряння відпрацьовує без жодних часових чи апаратних відхилень. Програма генерувала каскад математично розрахованих інкрементних значень для контролера широтно-імпульсної модуляції, завдяки чому потужність освітлювального приладу поступово зростала до максимуму. Висока частота генерації керуючих імпульсів забезпечила абсолютну відсутність візуального мерехтіння на всіх етапах перехідного процесу. Водночас плавне нарощування сили струму суттєво знизило пускове навантаження на напівпровідникові компоненти драйвера живлення, що гарантує подовження експлуатаційного ресурсу світлодіодної матриці. Такий нелінійний підхід до керування струмом дозволив повністю уникнути ефекту миттєвих сліпучих світлових спалахів, які здатні викликати тимчасову дезорієнтацію водіїв та пішоходів через фізіологічну інерційність адаптації людського ока до різких перепадів яскравості

Кінцева фаза тестування полягала у перевірці механізмів повернення системи до економного режиму функціонування. Після зникнення імітованого рухомого об'єкта із зони видимості сенсорної підсистеми, логічний сигнал детектора змінювався на низький рівень. Ця подія активувала внутрішній програмний таймер утримання яскравості, який розпочинав зворотний відлік жорстко заданого інтервалу часу. Даний механізм також успішно нівелював вплив локальних сліпих зон мікрохвильового радара, оскільки будь-яка повторна фіксація активності миттєво обнуляла лічильник часу без зміни рівня освітлення. Лише після повного вичерпання ліміту часу автоматика ініціювала виконання алгоритму плавного затухання, поступово зменшуючи скважність імпульсів та м'яко повертаючи вуличний ліхтар у базовий фоновий режим енергозбереження. Швидкість такого зниження інтенсивності була алгоритмічно налаштована на повільніший темп порівняно з фазою розгоряння, що забезпечило максимально природну зорову адаптацію людини до повернення у середовище зі зниженим рівнем освітленості.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### Діаграма роботи системи автоматичного освітлення

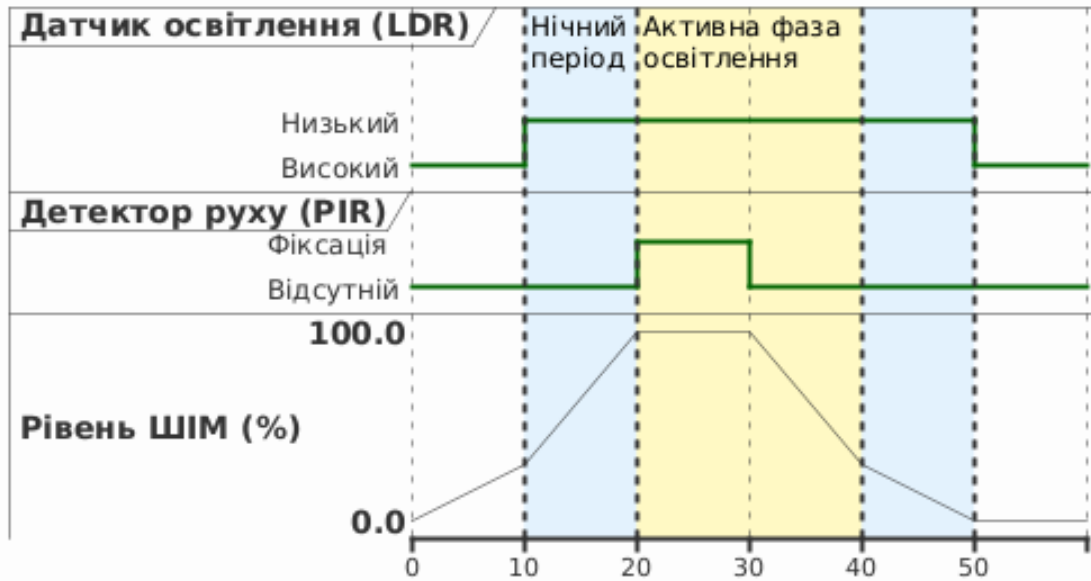


Рисунок 3.9 – Часова діаграма тестування реакції крайового вузла на сенсорні події

Другий етап випробувань передбачав аудит телекомунікаційної взаємодії та оцінку пропускнуої здатності розгорнутої інфраструктури. Оскільки крайовий вузол генерував структуровані пакети даних кожні дві секунди, важливо було переконатися у відсутності втрат інформації при передачі через глобальну мережу. Аналіз логів брокера повідомлень підтвердив стабільний прийом масивів телеметрії. Затримка між виникненням апаратної події на мікроконтролері та її доставкою на порт клієнтського застосунку не перевищувала кількох десятків мілісекунд, що повністю задовольняє вимоги до систем моніторингу реального часу.

Особливий перевірці підлягав механізм двосторонньої комунікації, а саме здатність диспетчерського центру здійснювати жорстке перехоплення керування. Під час тестування оператор ініціював перемикання інтерфейсного тумблера у положення ручного режиму та змінював положення повзунка інтенсивності. Сформована керуюча команда миттєво доставлялася на крайовий пристрій, який блокував обробку локальних сенсорів і встановлював рівень

широотно-імпульсної модуляції точно відповідно до вказівки сервера. При поверненні інтерфейсу в автоматичний режим мікроконтролер миттєво відновлював повноцінне опитування датчиків та адаптував потужність до поточної фізичної ситуації.

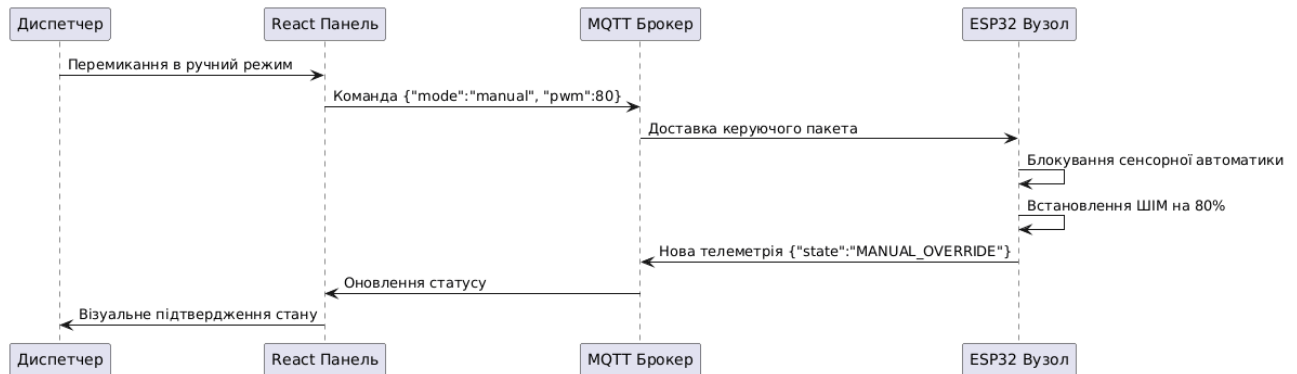


Рисунок 3.10 – Діаграма послідовності тестування режиму ручного перехоплення керування

Третій етап тестування фокусувався на стабільності роботи клієнтського програмного забезпечення. Інтерфейс диспетчерської панелі продемонстрував високу стійкість до інтенсивного потоку даних. Модуль агрегації статистики коректно інкрементував лічильники виявлення об'єктів при кожному логічному переході сенсора руху. Вбудована графічна підсистема плавно відмальовувала векторні лінії споживання електроенергії, успішно очищаючи застарілі масиви точок для запобігання переповненню оперативної пам'яті браузера.

Імітація аварійних ситуацій довела ефективність розробленої логіки обробки виключень. При штучному розірванні мережевого з'єднання віртуального стенда з брокером повідомлень диспетчерський застосунок фіксував припинення оновлення часових міток телеметрії. Програмний сценарій автоматично переводив відповідну графічну картку ліхтаря у критичний статус, забарвлюючи її попереджувальним кольором та виводячи повідомлення про апаратну помилку або втрату зв'язку. Така поведінка підтверджує готовність

системи до експлуатації в умовах нестабільного покриття міських бездротових мереж.

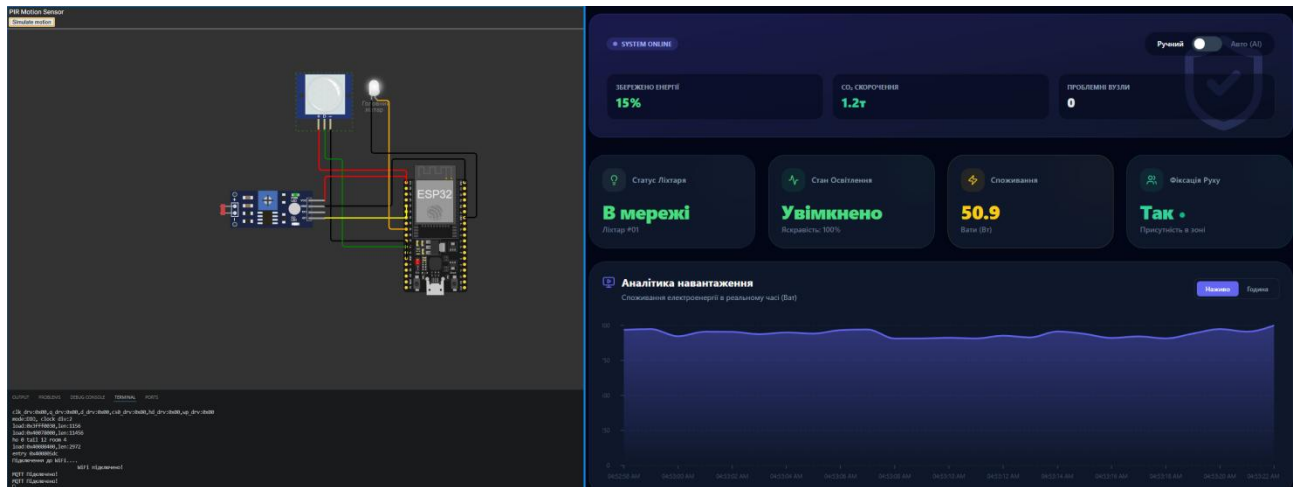


Рисунок 3.11 – Синхронне відображення сенсорних подій на інтерфейсі диспетчерського центру

Завершальним критерієм оцінки успішності розробленого виробу став розрахунок теоретичної економічної ефективності. Під час тестування моделювався типовий нічний період тривалістю десять годин. Традиційна система освітлення за цей проміжок часу працювала б на ста відсотках потужності безперервно. Спроектована кіберфізична система, спираючись на аналіз типового трафіку спальних районів, активувала максимальне освітлення лише сумарно протягом двох годин, тоді як решту вісім годин ліхтар функціонував у черговому режимі на рівні тридцяти відсотків потужності.

Математичне зведення отриманих результатів доводить, що застосування адаптивного широтно-імпульсного регулювання дозволяє знизити споживання електричної енергії на понад п'ятдесят відсотків для кожного окремого вузла мережі. Масштабування таких показників на рівень міської інфраструктури гарантує колосальний економічний ефект, суттєве зниження навантаження на трансформаторні підстанції та пропорційне зменшення обсягів викидів парникових газів у довкілля.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 3.12 – Оцінка енергетичної ефективності впровадження розробленого алгоритму

### 3.5. Висновки до третього розділу

У третьому розділі кваліфікаційної роботи успішно реалізовано та протестовано програмно-апаратний комплекс кіберфізичної системи моніторингу та адаптивного керування вуличним освітленням. За допомогою методів віртуального моделювання створено працездатний валідаційний прототип крайового вузла на базі мікроконтролерної архітектури. Розроблене алгоритмічне забезпечення довело свою високу надійність у задачах локального аналізу параметрів навколишнього середовища. Імплементация математичної моделі скінченного автомата у комбінації з алгоритмами плавного широтно-імпульсного регулювання забезпечила безперебійне перемикання станів ліхтаря залежно від рівня природної освітленості та наявності рухомих об'єктів. Практичне тестування підтвердило відсутність різких світлових перепадів під час розгоряння та затухання, що гарантує збереження візуального комфорту для учасників дорожнього руху.

Мережева підсистема та диспетчерський центр успішно розгорнуті з використанням хмарного брокера черг повідомлень телеметрії та сучасних вебтехнологій. Побудова клієнтського застосунку на базі реактивних компонентів дозволила створити ергономічний, масштабований та швидкодіючий інтерфейс для моніторингу об'єктів інфраструктури у реальному

часі. Інтеграція мостового з'єднання через протокол вебсокетів забезпечила мінімальні мережеві затримки при дуплексній комунікації. Експериментальні випробування підтвердили здатність системи миттєво фіксувати апаратні збої, виводити графічні сповіщення про втрату зв'язку та безпомилково відпрацьовувати команди дистанційного ручного перехоплення керування з боку диспетчера.

Експериментальна оцінка енергетичної ефективності розробленого рішення продемонструвала значний потенціал ресурсозбереження. Розрахунки на основі змодельованого типового десятигодинного нічного циклу роботи підтвердили можливість зниження споживання електричної енергії більш ніж на п'ятдесят відсотків порівняно з традиційними нерегульованими мережами. Отримані результати практичної реалізації та комплексного тестування повністю підтверджують правильність обраних архітектурних рішень і засвідчують абсолютне досягнення головної мети дипломного проєкту. Запропонований системний підхід формує надійне технологічне підґрунтя для безперешкодного масштабування поодиноких крайових вузлів у глобальні муніципальні мережі.

Окрім прямої фінансової рентабельності, впровадження розробленого комплексу безпосередньо сприяє покращенню екологічного та логістичного стану урбанізованих територій. Зниження загального навантаження на генеруючі потужності пропорційно зменшує обсяги викидів парникових газів, а використання адаптивного освітлення мінімізує негативний ефект світлового забруднення неба. Водночас завдяки підсистемі віддаленої діагностики комунальні підприємства отримують змогу відмовитися від неефективних регулярних нічних об'їздів територій. Натомість формується проактивна модель технічного обслуговування, яка суттєво скорочує час простою несправних ділянок мережі та підвищує загальний рівень безпеки дорожнього руху. Практична реалізація подібних апаратно-програмних інновацій є вкрай необхідним кроком для модернізації міського господарства та повноцінного переходу до інтелектуальної концепції розумного міста.

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було успішно спроектовано, програмно реалізовано та комплексно протестовано кіберфізичну систему моніторингу та адаптивного керування вуличним освітленням, яка забезпечує високий рівень енергозбереження при безумовному збереженні безпеки міської інфраструктури.

У першому розділі проведено аналіз поточного стану та проблематики енергозбереження в традиційних мережах зовнішнього освітлення. Доведено, що використання статичних розкладів керування та застарілих газорозрядних ламп призводить до значних економічних втрат і хронологічного переосвітлення порожнього простору. Досліджено сучасні апаратно-програмні засоби реалізації інтелектуального освітлення та обґрунтовано необхідність застосування тривірневої ієрархічної моделі розподілених кіберфізичних систем. Сформовано комплексні вимоги до крайових вузлів, комунікаційних протоколів та серверної інфраструктури, що дозволило поставити чітку задачу на проектування автономної системи з підтримкою динамічної адаптації та віддаленої диспетчеризації.

У другому розділі проведено детальне проектування апаратно-програмного комплексу системи. Обґрунтовано вибір мікроконтролерної платформи, високоточного цифрового датчика освітленості та мікрохвильового радара виявлення руху, який відрізняється високою стійкістю до теплових та атмосферних завад. Розроблено математичну модель логіки керування у вигляді скінченного автомата з трьома базовими станами функціонування. Спроектовано алгоритми плавного широтно-імпульсного регулювання потужності освітлювальних приладів для уникнення візуального дискомфорту учасників руху. Також сформовано архітектуру хмарної серверної частини, визначено структуру телеметричних повідомлень на базі протоколу черг телеметрії та

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розроблено концепцію інформаційної взаємодії між апаратним вузлом і диспетчерським центром.

У третьому розділі виконано практичну реалізацію та експериментальне тестування розробленої кіберфізичної системи. За допомогою методів віртуального моделювання створено працездатний валідаційний прототип крайового вузла, який підтвердив коректність роботи алгоритмів локального аналізу середовища та безперебійного генерування керуючих сигналів. Успішно розгорнуто серверну інфраструктуру та розроблено повноцінний клієнтський вебзастосунок на базі реактивних компонентів із застосуванням мостового з'єднання через протокол вебсокетів. Комплексне тестування довело високу стабільність передачі телеметрії, здатність системи миттєво реагувати на команди дистанційного ручного перехоплення керування та коректно обробляти ситуації втрати зв'язку. Математична оцінка результатів тестування підтвердила, що використання розробленого адаптивного алгоритму дозволяє знизити споживання електричної енергії більш ніж на п'ятдесят відсотків, формуючи надійне технологічне підґрунтя для комплексної модернізації комунального господарства в межах концепції розумного міста.

					КвРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Stellios I., Mokos K., Kotzanikolaou P. Assessing smart light enabled cyber-physical attack paths on urban infrastructures and services. *Connection Science*. 2022. Vol. 34, No. 1. P. 1401–1429.
2. Chen Z., Sivaparthipan C. B., Muthu B. IoT based smart and intelligent smart city energy optimization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. Vol. 49. P. 101724.
3. Vadi S. Design and Implementation of an Off-Grid Smart Street Lighting System Using LoRaWAN and Hybrid Renewable Energy for Energy-Efficient Urban Infrastructure. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 17. P. 5579.
4. Khemakhem S., Krichen L. A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities. *Franklin Open*. 2024. Vol. 8. P. 100142.
5. Agramelal F., Sadik M., Moubarak Y., Abouzahir S. Smart street light control: a review on methods, innovations, and extended applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 21. P. 7415.
6. Shavkatov S. Adaptive Illumination: Designing a Smart Street Lighting System for Sustainable Urban Environments. *MATRIX Academic International Online Journal Of Engineering And Technology*. 2023. Vol. 6, No. 1. P. 18–32.
7. Sudha Rani G., Naveen Kumar G., Anusha I., Venkata Jyothi M., Niteesh Kumar P. IoT based street light controller and monitoring system. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*. 2024. Vol. 10, No. 02. P. 274–281.
8. Deepaisarn S. et al. Automated street light adjustment system on campus with AI-assisted data analytics. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 4. P. 1853.
9. Chiradeja P., Yoomak S. Development of public lighting system with smart lighting control systems and internet of thing (IoT) technologies for smart city. *Energy Reports*. 2023. Vol. 10. P. 3355–3372.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Danang D., Prasetya F. A., Siswanto E. Design of Intelligent Street Lighting Systems Based on Motion and Ambient Light Sensors. *Journal of Multidisciplinary Research and Technology*. 2026. Vol. 2, No. 1. P. 65–79.

11. Godase V. A comprehensive review on PIR sensor-based light automation systems. *International Journal of Image Processing and Smart Sensors*. 2025. Vol. 1, No. 1. P. 22–29.

12. Guobadia A. Analysis of proximity sensors for smart street lighting solutions. 2024.

13. Sithravel R., Olsson T., Aries M. Optimizing presence sensing lighting for energy efficiency and user behavioral needs in small Swedish homes. *Leukos*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 107–125.

14. Widartha V. P., Ra I., Lee S.-Y., Kim C.-S. Advancing smart lighting: a developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies. *Journal of Low Power Electronics and Applications*. 2024. Vol. 14, No. 1. P. 6.

15. Quattrocchi A. et al. Designing a low-cost system to monitor the structural behavior of street lighting poles in smart cities. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 15. P. 6993.

16. Kiran R., Pranathi G. H. S., Devi Y. Y., Singh M. K. Improvements in lighting brightness using IoT bolt platform. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3000, No. 1. P. 020018.

17. Mishko O., Matiuk D., Derkach M. Security of remote IoT system management by integrating firewall configuration into tunneled traffic. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2024. Vol. 115, No. 3. P. 122–129.

18. Rao P. B. S. et al. Automated IoT Solutions for Efficient Hydroponic Farming: Nutrients, PH and Lighting Management. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2024. Vol. 57, No. 5.

19. Velásquez C., Espín F., Castro M. Á., Rodríguez F. Energy efficiency in public lighting systems friendly to the environment and protected areas. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 12. P. 5113.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Kanthi M., Dilli R. Smart streetlight system using mobile applications: secured fault detection and diagnosis with optimal powers. *Wireless Networks*. 2023. Vol. 29, No. 5. P. 2015–2028.

21. Deshpande S., Hsieh S.-J. Cyber-physical system for smart traffic light control. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 11. P. 5028.

22. Lynn T., Wood C. Smart streets as a cyber-physical social platform: A Conceptual framework. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 3. P. 1399.

23. Sobb T., Moustafa N., Turnbull B. Responsible resilience in cyber–physical–social systems: A new paradigm for emergent cyber risk modeling. *Future Internet*. 2025. Vol. 17, No. 7. P. 282.

24. Jabbar W. A. et al. Optimising urban lighting efficiency with IoT and LoRaWAN integration in smart street lighting systems. *Discover Internet of Things*. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 64.

25. Kouah S. et al. Internet of Things-Based Multi-Agent system for the control of smart street lighting. *Electronics*. 2024. Vol. 13, No. 18. P. 3673.

26. Abedin T. et al. The energy-efficient control solutions of smart street lighting systems: a review, issues, and recommendations. *Engineering and Technology Journal*. 2023. Vol. 41, No. 8. P. 1–24.

27. Bengler K. et al. A references architecture for human cyber physical systems, part II: fundamental design principles for human-CPS interaction. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*. 2024. Vol. 8, No. 1. P. 1–27.

28. Munawar A., Ali M. N., Qasim A., Kim B.-S. GWO-LightGBM: A Hybrid Grey Wolf Optimized Light Gradient Boosting Model for Cyber-Physical System Security. *Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES)*. 2025. Vol. 145, No. 1.

29. War M. R. et al. Review on the use of federated learning models for the security of cyber-physical systems. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2025. Vol. 26, No. 1. P. 16–33.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Dudykevych V., Mykytyn G., Stosyk T., Skladannyi P. Platform for the Security of Cyber-Physical Systems and the IoT in the Intellectualization of Society. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems 2024*. 2024. Vol. 3654. P. 449–457.

31. Alowaidi M., Sharma S. K., AlEnizi A., Bhardwaj S. Integrating artificial intelligence in cyber security for cyber-physical systems. *Electronic Research Archive*. 2023. Vol. 31, No. 4.

32. Teixeira De Castro H. et al. A model-based approach for assessing the security of cyber-physical systems. *Proceedings of the 19th International Conference on Availability, Reliability and Security*. 2024. P. 1–10.

33. Koval V., Martsenko S. V., Zin M. Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. *CITI*. 2023. P. 241–249.

34. Hadj Abdelkader O., Bouzebiba H., Pena D., Aguiar A. P. Energy-efficient IoT-based light control system in smart indoor agriculture. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 18. P. 7670.

35. Idris M. R., Irdyanti M. N., Ramlee M. A review of microcontroller design in future industrial revolution. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2750, No. 1. P. 050031.

36. Kabir Md. H. et al. Design and implement IoT-based intelligent manageable smart street lighting systems for future smart city. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 56, No. 1. P. 147.

37. Yaichi M., Bouchiba B., Rebhi M. IoT-Based Smart Street Lighting System and Enhanced Energy Saving Using ESP-NOW Protocol. *Light & Engineering*. 2024. Vol. 32, No. 6. P. 76–84.

38. Mohanty P., Pati U. C., Mahapatra K. EnSlight: Energy autonomous LoRaWAN-based, IoT-enabled, real-time street light management system for smart cities and smart villages. *Artificial intelligence techniques for sustainable development*. CRC Press, 2024. P. 114–139.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

39. Bicomumakuba E. et al. IoT-enabled LoRaWAN gateway for monitoring and predicting spatial environmental parameters in smart greenhouses: A review. *Precision Agriculture Science and Technology*. 2025. Vol. 7, No. 1. P. 28–46.

40. Schneider S., Goetze M., Krug S., Hutschenreuther T. A Retrofit Streetlamp Monitoring Solution Using LoRaWAN Communications. *Eng.* 2024. Vol. 5, No. 1. P. 513–531.

41. Thomas A. K., Shekhar H., Bhagyalakshmi L., Suman S. K., Sreelakshmy R., Bhasha A. IoT Enabled Smart Street Light and Air Quality Control. *International Conference on Data Science, Machine Learning and Applications*. Springer, 2023. P. 843–853.

42. Shobana S., Shakunthala M., Chairma Lakshmi K. R. et al. IoT based on Smart Traffic Lights and Streetlight System. *2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*. IEEE, 2023. P. 1311–1316.

43. Rodriguez-Antunano I., Martinez-Sanchez J., Cabaleiro M., Riveiro B. Anticipating the collapse of urban infrastructure: a methodology based on Earth observation and MT-InSAR. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 15. P. 3867.

44. Srinivasan S., Shoba L. K., Alavanthar T., Srinivasan C., Murugan S., Sujatha S. IoT-enabled horticultural lighting for optimizing plant growth and agriculture operations. *2024 2nd International Conference on Networking and Communications (ICNWC)*. IEEE, 2024. P. 1–7.

45. Omidi S. A., Baig M. J. A., Iqbal M. T. Design and implementation of node-red based open-source SCADA architecture for a hybrid power system. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 5. P. 2092.

46. Altunkaya M., Karaaltun M. Design of Real-Time Lighting System Using Scada System and Image Processing Techniques. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2025. Vol. 7, No. 2. P. 245–258.

47. Trivedi A., Chaurasia B. K. Multi-publisher and Subscriber Lightweight Communication for IoT Using the Cloud. *International Conference on Trends in Computational and Cognitive Engineering*. Springer, 2023. P. 399–409.

					КВРКІ.220046.22.02.78 ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		







## Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%**

**Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 10%**

ID: 272150 Назва: БКР Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху Додано в БД: 2026-05-25 Автора: Євгеній КУДИРКО Керівники: Тетяна КИСІЛЬ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	85339	600	1918 (2%)	25 (4%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Євгеній КУДІРКО

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху

Експерт: Тетяна КИСІЛЬ

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1:6.63%

Коефіцієнт подібності 2:2.77%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-25 11:47:49.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-25

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Кудирко Євгеній Романович

Тема: Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень  3  Кількість сторінок записки  56

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проєктування та розробка кіберфізичної системи керування вуличним освітленням
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз предметної області та проблематики енергозбереження в традиційних мережах зовнішнього освітлення. Досліджено сучасні технології, апаратно-програмні засоби реалізації систем інтелектуального освітлення та особливості ієрархічної організації розподілених кіберфізичних систем. На основі проведеного аналізу сформульовано вимоги та виконано загальну постановку задачі дослідження. В другому розділі спроектовано апаратно-програмний комплекс кіберфізичної системи керування освітленням. Обґрунтовано вибір елементної бази та розроблено електричну принципову схему крайового вузла. Розроблено математичну модель і алгоритмічне забезпечення мікроконтролера у вигляді скінченного автомата для адаптивного ШІМ-керування потужністю. Також спроектовано серверну частину на базі платформи Node-RED та архітектуру диспетчерського вебзастосування. В третьому розділі виконано програмно-апаратну реалізацію та тестування системи. Змодельовано апаратну частину крайового вузла у середовищі віртуальної симуляції, розроблено програмне забезпечення мовою C++. Розгорнуто серверну інфраструктуру з використанням MQTT-брокера та створено клієнтський користувацький інтерфейс

диспетчера на базі компонентів і протоколу WebSocket. Проведено комплексне тестування автономної роботи, мережевої взаємодії та виконано розрахунок економічної та енергетичної ефективності виробу.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: бракує результатів випробувань фізичного прототипу на базі реальної друкованої плати в умовах впливу зовнішнього середовища.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: добре В 185

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) \_\_\_\_\_

К.І.Г., розроб. Корча Ю.В.  
факультет менеджменту БДІ

"25" травня 2026 р.

 (підпис)

Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Свгеній КУДИРКО

ІІІІ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-2

#### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

### КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система моніторингу та керування вуличним освітленням на основі датчиків освітленості та руху  
 Автор Свгеній КУДИРКО  
 Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування  
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
 Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія  
 Науковий керівник: канд.фіз.-мат.наук, доц Тетяна КИСІЛЬ

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

#### Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформлені посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту;
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 6,63%; та системою Anti-Plagiarism складає 1%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

Ольга ПАВЛОВА  
І.п.п.

Андрій НІЧЕПОРУК  
І.п.п.

Тетяна КИСІЛЬ  
І.п.п.