

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олена БОРИЧЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітня програма Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

на тему: «Розробка системи адаптивного вуличного освітлення з регулюванням яскравості залежно від інтенсивності руху транспортних засобів»

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ГН-41мп

\_\_\_\_\_ Табачук Роман Віталійович \_\_\_\_\_  
( прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Чернявський А.В. \_\_\_\_\_  
( посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Нормоконтроль провідний інженер Прокопенко І.Д. \_\_\_\_\_  
( посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
( посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Олена БОРИЧЕНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
***Табачук Роман Віталійович***

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Розробка системи адаптивного вуличного освітлення з регулюванням яскравості залежно від інтенсивності руху транспортних засобів»

науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Чернявський А.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від 03 листопада 2025 р. №4749-с

2. Строк подання студентом дисертації 17 грудня 2025 року

3. Об'єкт дослідження: системи вуличного освітлення міської дорожньої інфраструктури.

4. Предмет дослідження: методи, алгоритми та технічні засоби адаптивного керування яскравістю вуличних світильників залежно від інтенсивності руху транспортних засобів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) аналізування сучасних систем вуличного освітлення та підходів до керування їх енергоспоживанням; 2) дослідження впливу інтенсивності руху транспортних засобів на вимоги до рівня освітленості вулично-дорожньої мережі; 3) розроблення структури та принципів функціонування системи адаптивного вуличного освітлення з регулюванням яскравості світильників; 4) моделювання роботи адаптивної системи освітлення та оцінювання її енергетичної ефективності.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація, структурна

схема системи адаптивного вуличного освітлення, алгоритм регулювання яскравості світильників залежно від інтенсивності руху транспортних засобів, результати моделювання режимів роботи системи та показники зниження електроспоживання.

7.Консультанти розділів дисертації

*Нормоконтроль*

*Прокопенко І.Д.*

8.Дата видачі завдання 01 вересня 2025 року

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання на магістерську дисертацію	01.09.2025	Вик.
2	Аналіз нормативних документів та літературних джерел з теми дослідження	05.09.2025	Вик.
3	Складання структури та плану магістерської дисертації	15.09.2025	Вик.
4	Аналіз сучасних систем вуличного освітлення та підходів до енергозбереження	01.10.2025 – 20.10.2025	Вик.
5	Дослідження впливу інтенсивності транспортного руху на вимоги до освітленості	21.10.2025 – 05.11.2025	Вик.
6	Розроблення алгоритму адаптивного керування яскравістю світильників	06.11.2025 – 20.11.2025	Вик.
7	Моделювання роботи адаптивної системи та оцінка енергоспоживання	21.11.2025 – 02.12.2025	Вик.
8	Розроблення стартап-проєкту Smart Traffic-Based Lighting	03.12.2025 – 08.12.2025	Вик.
9	Оформлення магістерської дисертації, підготовка реферату та презентації, перевірка на плагіат	09.12.2025 – 13.12.2025	Вик.
10	Захист магістерської дисертації	25.12.2025	Вик.

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська дисертація викладена на 118 сторінках. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та додатків. У роботі наведено 24 рисунків, 26 таблиць. Список використаних джерел містить 42 бібліографічних найменувань.

**Актуальність теми.** Сучасні міста характеризуються постійним зростанням транспортних потоків, щільності забудови та споживання електричної енергії. Вуличне освітлення є однією з ключових складових міської інфраструктури, що безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху, комфорт мешканців і рівень енергоспоживання. Традиційні системи вуличного освітлення, які працюють за фіксованими графіками та з постійною яскравістю, не враховують реальну змінність інтенсивності руху транспортних засобів, що призводить до перевитрат електроенергії та зниження загальної енергоефективності.

Розвиток світлодіодних технологій, сенсорних засобів і систем керування створює передумови для впровадження адаптивного вуличного освітлення, здатного змінювати рівень яскравості залежно від поточної інтенсивності трафіку. Такі системи дозволяють поєднати вимоги безпеки дорожнього руху з раціональним використанням енергетичних ресурсів, що є особливо актуальним в умовах обмеженого енергопостачання та необхідності підвищення стійкості міської інфраструктури.

Упровадження адаптивних систем вуличного освітлення також відповідає сучасним тенденціям розвитку «розумних міст», де інженерні системи інтегруються з цифровими платформами, забезпечуючи гнучке керування, моніторинг і аналіз роботи інфраструктури. Це зумовлює актуальність дослідження, спрямованого на розроблення та обґрунтування системи адаптивного освітлення з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика магістерської дисертації узгоджується з актуальними науковими напрямками у сфері енергоефективності та розвитку інтелектуальних систем електропостачання.

Дослідження спрямоване на вирішення прикладних завдань, пов'язаних із впровадженням адаптивних технологій керування вуличним освітленням, що відповідає сучасним тенденціям розвитку міської інфраструктури та концепції «розумного міста».

**Метою магістерської дисертації** є розроблення та обґрунтування системи адаптивного вуличного освітлення з регулюванням яскравості світильників залежно від інтенсивності руху транспортних засобів з метою підвищення енергоефективності та безпеки дорожнього руху.

**Об'єктом дослідження** є системи вуличного освітлення міської дорожньої інфраструктури.

**Предметом дослідження** є методи та алгоритми адаптивного керування яскравістю вуличних світильників на основі даних про інтенсивність транспортного руху.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи аналізу та узагальнення науково-технічних джерел, моделювання транспортних потоків, методи технічного та енергетичного аналізу, а також методи техніко-економічного оцінювання ефективності впровадження адаптивних систем освітлення. Для виконання розрахунків і моделювання застосовувалися сучасні програмні засоби комп'ютерної обробки даних.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У роботі запропоновано удосконалений підхід до побудови системи адаптивного вуличного освітлення, що базується на врахуванні інтенсивності транспортного руху та використанні багаторівневого регулювання яскравості світильників, що дозволяє підвищити енергоефективність системи без зниження рівня безпеки.

**Практичне значення роботи.** Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем вуличного освітлення в населених пунктах, а також під час впровадження інтелектуальних міських систем керування. Запропоновані рішення можуть слугувати основою для розроблення комерційних проєктів у сфері «розумного» освітлення.

Ключові слова. АДАПТИВНЕ ВУЛИЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ, ІНТЕНСИВНІСТЬ РУХУ, РЕГУЛЮВАННЯ ЯСКРАВОСТІ, СВІТЛОДІОДНІ СВІТИЛЬНИКИ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, SMART CITY, ТРАНСПОРТНИЙ ТРАФІК.

## ABSTRACT

**Structure and scope of the thesis.** The master's thesis is presented on 118 pages. The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, and appendices. It contains 24 figures, 26 tables. The list of references includes 42 bibliographic sources.

**Relevance of the topic.** Modern cities are characterized by a continuous increase in traffic flows, urban density, and electricity consumption. Street lighting is one of the key components of urban infrastructure that directly affects road safety, residents' comfort, and energy consumption levels. Traditional street lighting systems operating according to fixed schedules and constant brightness do not account for the actual variability of traffic intensity, which leads to excessive electricity consumption and reduced overall energy efficiency.

The development of LED technologies, sensor devices, and control systems creates favorable conditions for the implementation of adaptive street lighting capable of adjusting brightness levels according to current traffic intensity. Such systems make it possible to combine road safety requirements with rational use of energy resources, which is particularly important under conditions of limited energy supply and the need to enhance the resilience of urban infrastructure.

The implementation of adaptive street lighting systems also corresponds to modern trends in the development of smart cities, where engineering systems are integrated with digital platforms to provide flexible control, monitoring, and analysis of infrastructure performance. This determines the relevance of research aimed at the development and justification of an adaptive lighting system considering traffic intensity.

**Relation to scientific programs, plans, and topics.** The topic of the master's thesis is consistent with current research directions in the field of energy efficiency and the development of intelligent power supply systems. The study is focused on solving applied problems related to the implementation of adaptive control technologies for street lighting, which corresponds to modern trends in urban infrastructure development and the smart city concept.

**The purpose of the master's thesis** is to develop and substantiate an adaptive street lighting system with brightness control depending on traffic intensity in order to improve energy efficiency and road safety.

**The object of the study** is street lighting systems of urban road infrastructure.

**The subject of the study** is methods and algorithms for adaptive control of street luminaire brightness based on traffic intensity data.

**Research methods.** The study employs methods of analysis and generalization of scientific and technical sources, traffic flow modeling, technical and energy analysis methods, as well as methods of technical and economic evaluation of the efficiency of implementing adaptive lighting systems. Modern software tools for computer data processing were used to perform calculations and modeling.

**Scientific novelty of the obtained results.** The thesis proposes an improved approach to the development of an adaptive street lighting system based on accounting for traffic intensity and the use of multi-level brightness control of luminaires, which allows increasing energy efficiency without reducing the level of safety.

**Practical significance of the work.** The obtained results can be applied in the design and modernization of street lighting systems in settlements, as well as in the implementation of intelligent urban management systems. The proposed solutions may serve as a basis for the development of commercial projects in the field of smart lighting.

**Keywords.** ADAPTIVE STREET LIGHTING, BRIGHTNESS CONTROL, CONTROL SYSTEM, ELECTRICITY CONSUMPTION, ENERGY EFFICIENCY, LED LUMINAIRES, SMART CITY, TRAFFIC FLOW, TRAFFIC INTENSITY.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
<b>1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ .....</b>	<b>14</b>
1.1 Огляд нормативних вимог до систем вуличного освітлення .....	14
1.2 Аналіз сучасних технологій вуличного освітлення.....	19
1.3 Методи адаптивного освітлення та типи сенсорів руху .....	24
1.4 Системи «розумного» керування освітленням в концепції Smart City ...	30
1.5 Огляд типових рішень щодо модернізації вуличного освітлення .....	35
Висновок до розділу 1 .....	37
<b>2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....</b>	<b>40</b>
2.1 Принципи регулювання яскравості світильників залежно від інтенсивності руху .....	40
2.2 Визначення інтенсивності трафіку (сенсори, відеоаналітика, радары) ...	44
2.3 Моделювання трафіку для потреб адаптивного освітлення.....	47
2.4 Алгоритм адаптивного керування освітленістю.....	49
2.5 Розрахунок рівнів освітленості та режимів димування залежно від трафіку.....	51
Висновки до розділу 2 .....	71
<b>3 ПРОЄКТ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ.....</b>	<b>73</b>
3.1 Формування технічних вимог до системи.....	73
3.2 Розроблення структурної схеми та логіки взаємодії компонентів .....	76
3.3 Розроблення архітектури системи керування освітленням (сенсори – контролери – платформа керування) .....	81
3.4 Оцінка енергоспоживання традиційної системи та адаптивної системи	84
3.5 Оцінка економічного ефекту від впровадження адаптивної системи вуличного освітлення.....	86
Висновки до розділу 3 .....	90
<b>4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ “SMART TRAFFIC-BASED LIGHTING” .....</b>	<b>92</b>
4.1 Аналіз ринку та проблеми, які вирішує продукт .....	92
4.2 Опис ціннісної пропозиції та функціоналу стартап-рішення.....	96

	10
4.3 Бізнес-модель.....	98
4.4 Фінансове обґрунтування та план впровадження.....	100
4.5 Оцінка ризиків та сценарії масштабування.....	103
Висновки до розділу 4 .....	105
ВИСНОВОК.....	107
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	110

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

LED – світлодіод

Smart City – «розумне місто»

IoT – інтернет речей

АСВО – адаптивна система вуличного освітлення

STBL – Smart Traffic-Based Lighting

ДБН – державні будівельні норми

ДСТУ – державний стандарт України

EN – європейський стандарт

ККД – коефіцієнт корисної дії

PWM – широтно-імпульсна модуляція

PIR – пасивний інфрачервоний сенсор

IoT-платформа – платформа інтернету речей

Димування – регулювання яскравості

Трафік – інтенсивність руху

Smart Lighting – інтелектуальне освітлення

ТІ – пороговий індекс засліпленості (Threshold Index)

IP – ступінь захисту світильників від пилу та вологи (Ingress Protection)

IK – механічна міцність корпусів (Impact Protection)

PIR – інфрачервоні датчики (Passive Infrared Sensor)

LC – контролер світильника (Light Controller)

## ВСТУП

Сучасні міста стикаються з комплексом викликів, пов'язаних із зростанням транспортних потоків, підвищенням щільності забудови, обмеженістю енергетичних ресурсів та необхідністю забезпечення безпеки і комфорту громадян. Однією з ключових складових міської інфраструктури, що безпосередньо впливає на безпеку дорожнього руху, рівень злочинності, якість міського середовища та обсяги споживання електроенергії, є система вуличного освітлення. Традиційні підходи до її організації, засновані на фіксованих режимах роботи світильників, не враховують реальну змінність транспортної та пішохідної активності, що призводить до нераціонального використання енергоресурсів.

Особливої актуальності проблема ефективного вуличного освітлення набуває в умовах України, де енергетична інфраструктура зазнає значних навантажень та пошкоджень, а стабільність електропостачання не завжди може бути гарантована. За таких умов пріоритетним завданням стає впровадження енергоефективних, гнучких та стійких до відмов систем, здатних адаптуватися до реальних умов експлуатації та забезпечувати нормативний рівень безпеки при мінімальних витратах електроенергії.

Розвиток світлодіодних технологій, сенсорних систем, засобів зв'язку та обчислювальних платформ створив передумови для переходу від традиційних освітлювальних мереж до інтелектуальних систем керування освітленням. Адаптивні системи вуличного освітлення, що змінюють рівень яскравості залежно від інтенсивності руху, часу доби, погодних умов та рівня природного освітлення, розглядаються як важливий елемент концепції Smart City. Такі системи дозволяють не лише знижувати енергоспоживання, але й підвищувати комфорт та безпеку учасників дорожнього руху.

Незважаючи на наявність значної кількості технічних рішень у сфері вуличного освітлення, питання комплексного поєднання нормативних вимог, моделей трафіку, алгоритмів адаптивного керування та економічної доцільності впровадження таких систем залишається актуальним. Це зумовлює необхідність

проведення системного дослідження та розроблення адаптивної системи вуличного освітлення, орієнтованої на реальні умови міської дорожньої інфраструктури.

Метою даної дипломної роботи є розроблення та обґрунтування адаптивної системи вуличного освітлення на основі інтенсивності транспортного руху з урахуванням нормативних вимог, технічних, енергетичних та економічних аспектів її впровадження.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати нормативні вимоги та сучасні технології вуличного освітлення;
- дослідити методи адаптивного освітлення та засоби визначення інтенсивності транспортного руху;
- розробити модель адаптивного керування яскравістю світильників залежно від трафіку;
- спроектувати структуру та алгоритми роботи адаптивної системи вуличного освітлення;
- виконати оцінку енергетичної та економічної ефективності запропонованого рішення;
- розробити стартап-проект Smart Traffic-Based Lighting та обґрунтувати доцільність його впровадження.

Об'єктом дослідження є системи вуличного освітлення міської дорожньої інфраструктури.

Предметом дослідження є методи та алгоритми адаптивного керування вуличним освітленням на основі інтенсивності транспортного руху.

Методи дослідження, використані в роботі, включають аналіз нормативних документів і науково-технічних джерел, моделювання транспортних потоків, порівняльний аналіз традиційних і адаптивних систем освітлення, а також методи техніко-економічного обґрунтування.

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ТА СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ

## 1.1 Огляд нормативних вимог до систем вуличного освітлення

Нормативні вимоги до систем вуличного освітлення формують базову основу для проектування, модернізації та експлуатації зовнішніх освітлювальних мереж, визначаючи мінімальні стандарти безпеки, енергоефективності й якості світлового середовища. Вони покликані забезпечувати комфортні умови пересування пішоходів і водіїв у темний час доби, запобігати виникненню небезпечних ситуацій на дорозі, а також сприяти раціональному використанню енергоресурсів та зменшенню негативного впливу штучного освітлення на навколишнє середовище.

В Україні регулювання вимог до вуличного освітлення здійснюється на основі офіційних нормативних документів, що визначають ключові технічні параметри світлотехнічних систем. До них належать:

- ДСТУ EN 13201 (частини 1–5) [1-2] – адаптований європейський стандарт, у якому наведено класифікацію вулиць і доріг за категоріями, описано методи розрахунку освітленості, вимоги до кривих світлорозподілу та критерії оцінювання енергетичної ефективності освітлювальних систем;
- ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [3] – документ, що встановлює правила організації зовнішнього освітлення вулиць, площ, пішохідних зон та громадських просторів;
- ДСТУ 4094-2002 «Безпека дорожнього руху [4]. Освітлення автомобільних доріг загального користування» – стандарт, який визначає рівні освітлення автомобільних доріг різних категорій, враховуючи інтенсивність транспортних потоків і швидкісні режими.

Зазначені нормативи встановлюють комплекс світлотехнічних параметрів, яких необхідно дотримуватися під час проектування систем освітлення. До таких параметрів належать середня та мінімальна освітленість, рівень сліпучості,

рівномірність освітлення, колірна температура світлового потоку та індекс передачі кольору, що є важливими характеристиками для забезпечення якісного світлового середовища. Завдяки цим вимогам у проектуванні систем освітлення забезпечується відповідність інфраструктури функціональному призначенню території та потребам безпеки дорожнього руху.

Окреме місце в нормативній базі посідають положення, що спрямовані на оптимізацію енергоспоживання. Вони відображають загальну тенденцію до впровадження світлодіодних технологій та систем адаптивного керування світловим потоком. Регламентується можливість зменшення яскравості світильників у періоди низької активності, а також необхідність забезпечення високого коефіцієнта корисної дії світлових приладів, мінімальних втрат енергії та збалансованого світлорозподілу. Сучасні стандарти передбачають, що вуличні світильники мають підтримувати регулювання яскравості, що робить можливим впровадження інтелектуальних систем освітлення, здатних адаптуватися до поточної дорожньої ситуації.

Крім того, нормативні документи містять вимоги щодо мінімізації світлового забруднення та засліплення водіїв. Це передбачає обмеження частки світлового потоку, спрямованого у верхню півсферу, правильний вибір кривої світлорозподілу та ретельне проектування систем розташування опор, що дозволяє запобігати небажаному засвічуванню житлових будинків чи природних зон. Забезпечення цих вимог є важливим елементом створення комфортного міського середовища, в якому освітлення виконує свої функції без порушення природного балансу.

Окрім національних нормативних документів, у процесі проектування та модернізації систем вуличного освітлення дедалі частіше враховуються положення європейських стандартів, зокрема серії EN 13201 «Road lighting» [5]. Ці стандарти широко застосовуються в країнах Європейського Союзу та є основою для гармонізації вимог до зовнішнього освітлення в Україні. Вони визначають підхід до класифікації доріг за функціональним призначенням, умовами руху та рівнем

ризиком, що дозволяє більш гнучко адаптувати параметри освітлення до реальних умов експлуатації.

Європейські стандарти EN 13201 приділяють особливу увагу не лише середнім значенням освітленості або яскравості, але й таким параметрам, як поздовжня та поперечна рівномірність, пороговий індекс засліпленості (TI), а також якість передачі кольору. На відміну від традиційного підходу, де основний акцент робиться на досягненні фіксованого рівня освітленості, європейська методологія передбачає комплексну оцінку зорового комфорту водіїв і пішоходів, що є особливо важливим для сучасних міських умов із високою щільністю руху.

Порівняльний аналіз українських і європейських нормативів показує, що за основними світлотехнічними параметрами вони є близькими, проте європейські стандарти більш детально регламентують можливість використання адаптивного та димованого освітлення. Зокрема, EN 13201 допускає зміну класу освітлення залежно від інтенсивності руху, погодних умов та часу доби, за умови дотримання мінімально допустимих рівнів безпеки. Це створює нормативне підґрунтя для впровадження інтелектуальних систем керування освітленням, що автоматично коригують світловий потік відповідно до поточної ситуації на дорозі.

Важливим аспектом нормативних вимог є регулювання енергетичної ефективності систем вуличного освітлення. Сучасні стандарти передбачають оцінювання не лише встановленої потужності світильників, але й загального енергоспоживання системи з урахуванням режимів роботи, часу горіння та можливостей димування. Для цього вводяться показники енергетичної ефективності, які дозволяють порівнювати різні технічні рішення між собою та обґрунтовувати доцільність впровадження LED-технологій [6] і адаптивного керування.

Окрему увагу в нормативній базі приділено вимогам до надійності та безпеки експлуатації освітлювальних мереж. Регламентується допустимий діапазон робочих температур, ступінь захисту світильників від пилу та вологи (IP) [7], механічна міцність корпусів (IK), а також вимоги до електробезпеки та захисту від перенапруг. Дотримання цих вимог є особливо актуальним для систем

адаптивного освітлення, оскільки вони включають додаткові електронні компоненти – сенсори, контролери та комунікаційні модулі, чутливі до зовнішніх впливів.

Вимоги до надійності та безпеки експлуатації освітлювальних мереж тісно пов'язані з нормуванням світлотехнічних параметрів зовнішнього освітлення. Основною метою нормативного регулювання у цій сфері є забезпечення безпечних умов дорожнього руху шляхом встановлення допустимих рівнів яскравості та освітленості дорожнього покриття з урахуванням функціонального призначення вулиць і доріг та інтенсивності транспортних потоків.

Ключовим параметром при нормуванні зовнішнього освітлення в більшості країн є середня яскравість дорожнього покриття, оскільки саме вона безпосередньо впливає на зорове сприйняття дороги водієм. Додатково регламентуються показники рівномірності розподілу яскравості в поздовжньому та поперечному напрямках, а також параметри, що характеризують засліплюючу дію світлових приладів.

Ефективність системи вуличного освітлення визначається не лише технічними характеристиками світильників, але й класом дороги та рівнем інтенсивності руху транспорту. Саме тому в європейській та вітчизняній практиці нормовані значення яскравості приймаються диференційовано залежно від типу об'єкта.

Узагальнені нормативні діапазони яскравості для різних типів доріг наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Орієнтовні нормативні рівні яскравості дорожнього покриття

Тип дороги або вулиці	Нормований діапазон яскравості, кд/м <sup>2</sup>
Автомобільні дороги в сільських населених пунктах	0,2 – 1,5
Міські магістралі	0,4 – 1,5
Головні вулиці міст	1,0 – 5,0
Вулиці місцевого значення	0,2 – 0,7

В Україні вимоги до зовнішнього освітлення регламентуються ДБН В.2.5-28:2018, які гармонізовані з європейськими підходами. Згідно з даними нормами, всі вулиці та дороги поділяються на три категорії за освітленням:

- категорія А – магістральні дороги та вулиці загальноміського значення;
- категорія Б – магістральні вулиці районного значення;
- категорія В – вулиці та дороги місцевого значення.

Для кожної категорії встановлюються нормативні значення яскравості залежно від найбільшої інтенсивності руху транспорту. Наближені значення, отримані на основі нормативних діаграм, наведено в таблицях 1.2–1.3.

Таблиця 1.2 – Нормовані рівні яскравості для доріг категорії А

Інтенсивність руху, од/год	Середня яскравість, кд/м <sup>2</sup>
< 500	0,6
500 – 2000	1,0
2000 – 5000	1,5
> 5000	2,0

Таблиця 1.3 – Нормовані рівні яскравості для доріг категорій Б та В

Категорія дороги	Інтенсивність руху, од/год	Яскравість, кд/м <sup>2</sup>
Б	< 50	0,4
Б	50 – 2000	0,6 – 1,0
В	< 500	0,3
В	≥ 500	0,4

Окремо регламентуються вимоги до рівномірності освітлення. Відношення мінімальної яскравості дорожнього покриття до середньої не повинно бути меншим за 0,4 при середніх значеннях яскравості понад 0,6 кд/м<sup>2</sup> та не меншим за 0,3 при нижчих рівнях. Аналогічні вимоги встановлюються і для співвідношення мінімальної та максимальної яскравості в межах смуги руху.

Для тротуарів, що прилягають до проїзної частини, середня яскравість покриття повинна становити щонайменше 50 % від яскравості проїзної частини, що сприяє підвищенню безпеки пішохідного руху.

Важливою вимогою нормативних документів є обмеження засліплюючої дії світильників. Для цього вводиться показник засліпленості, значення якого не повинно перевищувати допустимі межі. Крім того, при проектуванні систем освітлення регламентується максимальна сила світла в напрямку лінії зору водія, що зменшує ризик зорового дискомфорту та аварійних ситуацій.

З урахуванням зниження світлового потоку в процесі експлуатації через старіння джерел світла та забруднення світильників, у розрахунках застосовується коефіцієнт запасу. Його значення зазвичай приймається в межах 1,4–1,6 залежно від типу світильника та умов експлуатації.

Таким чином, нормативні вимоги до зовнішнього освітлення населених пунктів формують комплексний підхід до проектування освітлювальних систем, що поєднує світлотехнічні параметри з вимогами надійності, безпеки та довговічності, що є особливо важливим для сучасних і адаптивних систем вуличного освітлення.

## **1.2 Аналіз сучасних технологій вуличного освітлення**

Основною ознакою, по якій класифікують системи зовнішнього освітлення є висота встановлення світлових приладів над рівнем дорожнього покриття, а отже — висота опор [42]. Для освітлення доріг, вулиць та промислових територій застосовується звичайна система освітлення, яка має висоту встановлення світлових приладів на опорі або підвісуна тросі від 6 до 15 м [40].

Сучасні системи вуличного освітлення за останні десятиліття зазнали суттєвої трансформації, зумовленої розвитком світлотехнічних і цифрових технологій. Традиційні джерела світла, такі як натрієві лампи високого тиску, металогалогенні та ртутні лампи, тривалий час залишалися основою міських мереж. Вони забезпечували базову видимість на дорогах і площах, проте

характеризувалися низькою енергоефективністю, обмеженою довговічністю, високим рівнем споживання електроенергії та неможливістю оперативного регулювання яскравості. Крім того, спектр світла цих ламп мав обмежену здатність передавати кольори, що ускладнювало розпізнавання деталей на дорозі та знижувало комфорт для учасників руху.

Перехід на світлодіодні технології став ключовим фактором модернізації освітлювальної інфраструктури. LED-світильники забезпечують високу світлову віддачу, що дозволяє досягати необхідного рівня освітленості за менших витрат електроенергії. Вони характеризуються тривалим терміном служби, який перевищує 50 000 годин [9], стабільністю світлового потоку протягом експлуатації та високим індексом передачі кольору, що покращує видимість і сприйняття деталей на дорозі. Світлодіодні модулі також дозволяють формувати різні криві світлорозподілу та адаптувати напрямок освітлення відповідно до функціонального призначення території, що сприяє зменшенню світлового забруднення та підвищенню енергоефективності.

Для більш наочного порівняння характеристик традиційних і сучасних джерел світла доцільно представити їх у вигляді таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристики традиційних джерел освітлення

Параметр	Натрієві лампи високого тиску (ДНаТ)	Металогалогенні лампи	Світлодіодні (LED)
Світлова віддача, лм/Вт	80–100	75–100	140–180
Термін служби, год	12 000–24 000	10 000–20 000	50 000–100 000
Індекс передачі кольору (CRI)	20–30	60–70	70–90
Можливість димування	Ні	Обмежена	Так
Енергоефективність	Низька	Середня	Висока
Час розігріву	5–10 хв	3–5 хв	Миттєво
Вплив на світлове забруднення	Високий	Середній	Низький
Вартість установки	Низька	Середня	Вища але окупається

З таблиці видно, що світлодіодні світильники поєднують високу енергоефективність, довговічність та здатність до адаптивного регулювання, що робить їх оптимальними для сучасних систем вуличного освітлення.

Важливою особливістю сучасних світлодіодних світильників є можливість гнучкого формування світлового потоку за допомогою вторинної оптики. Застосування лінз різної геометрії дозволяє отримувати асиметричні або симетричні криві світлорозподілу, що оптимально відповідають умовам освітлення проїзної частини, тротуарів або пішохідних зон. На практиці це дає змогу зменшити втрати світлового потоку за межами освітлюваної поверхні, підвищити рівномірність освітлення та мінімізувати засліплення учасників дорожнього руху.

Вибір типу світлорозподілу є одним із ключових етапів проектування системи вуличного освітлення. Для магістральних доріг зазвичай використовуються світильники з поздовжньо-асиметричним розподілом світла [10], які забезпечують ефективне освітлення проїзної частини без надмірного засвічування прилеглих територій. Для житлових вулиць та пішохідних зон доцільним є застосування світильників із ширшим кутом розсіювання, що створює більш комфортне світлове середовище та зменшує контраст між освітленими й затемненими ділянками.

Окрім оптичної частини, важливу роль відіграє електронна складова світлодіодних світильників, зокрема драйвери живлення. Сучасні драйвери забезпечують стабілізацію струму, захист від перенапруг, короткого замикання та перегріву, а також підтримують різні методи керування яскравістю. Використання інтелектуальних драйверів дозволяє реалізувати плавне димування без мерехтіння, що позитивно впливає на зоровий комфорт і продовжує термін служби світлодіодних модулів.

Інтеграція інтелектуальних драйверів у LED-світильники відкриває додаткові можливості для динамічного керування освітленням. Сучасні драйвери підтримують регулювання яскравості через цифрові протоколи, такі як DALI-2 [11], або через широтно-імпульсне керування, що дозволяє точно задавати інтенсивність світлового потоку та оптимізувати енергоспоживання. Завдяки

цьому виникає можливість реалізації адаптивного освітлення, при якому рівень світла змінюється залежно від часу доби, погодних умов або активності транспортних потоків, що дозволяє економити до 60–80% електроенергії порівняно з традиційними системами.

Однією з важливих характеристик світлодіодних світильників є деградація світлового потоку в процесі експлуатації. На відміну від традиційних ламп, які виходять з ладу раптово, LED-модулі поступово втрачають яскравість, що зумовлено термічним навантаженням, старінням напівпровідникових елементів та впливом зовнішніх умов. Для кількісної оцінки цього процесу використовуються показники L70, L80 або L90, які характеризують час, протягом якого світловий потік знижується до 70%, 80% або 90% від початкового значення.

У контексті вуличного освітлення найчастіше застосовується критерій L70 [12], який вважається компромісом між економічною доцільністю та забезпеченням нормативного рівня освітленості. Врахування деградації світлового потоку є обов'язковим під час проектування освітлювальних систем, оскільки саме на цій основі визначається коефіцієнт запасу, що компенсує зниження світлової віддачі світильників протягом усього строку їх експлуатації.

Застосування адаптивного димування дозволяє частково зменшити негативний вплив деградації, оскільки світильники значну частину часу працюють на зниженій потужності. Це знижує теплове навантаження на світлодіодні модулі та драйвери, уповільнює процес старіння і фактично подовжує експлуатаційний ресурс обладнання. Таким чином, адаптивні системи освітлення забезпечують не лише енергоефективність, але й підвищують довговічність світлотехнічних установок.

Ще одним важливим аспектом сучасних технологій вуличного освітлення є вибір підходу до організації системи керування. За цим критерієм розрізняють централізовані та децентралізовані системи управління освітленням. У централізованих системах керування основні алгоритми роботи зосереджені на центральному сервері або диспетчерському пункті, який надсилає команди

окремим світильникам або групам світильників. Такий підхід спрощує адміністрування, але підвищує залежність системи від стабільності каналу зв'язку.

Децентралізовані системи керування передбачають наявність локальних контролерів безпосередньо у світильниках або на опорах освітлення. У цьому випадку кожен вузол може автономно приймати рішення щодо рівня яскравості на основі даних локальних сенсорів. Централізована платформа при цьому виконує функції моніторингу, збору статистики та загального налаштування сценаріїв роботи. Така архітектура підвищує відмовостійкість системи та є більш придатною для реалізації адаптивного освітлення в умовах Smart City [8].

Сучасні мережі вуличного освітлення також активно використовують бездротові технології зв'язку, які дозволяють дистанційно контролювати та моніторити стан світильників. Типові технології зв'язку включають:

- ZigBee [13], що забезпечує сітчасту мережу для кварталів;
- LoRaWAN [14], яка дозволяє передавати дані на великі відстані до 10 км з низьким енергоспоживанням;
- NB-IoT [15], що використовує мобільний зв'язок для IoT-пристроїв;
- Wi-Fi [16] та мережі 4G/LTE [17], які застосовуються переважно для камер відеоаналітики на опорах освітлення.

Використання таких технологій дозволяє забезпечити централізоване керування мережею, дистанційне налаштування режимів роботи світильників, збір аналітичних даних та інтеграцію системи освітлення з іншими міськими сервісами, такими як транспортні системи, датчики екологічного моніторингу та системи безпеки.

Окрему роль у сучасних технологіях відіграють системи енергоменеджменту, які дозволяють аналізувати споживання електроенергії, оцінювати ефективність роботи кожного світильника, прогнозувати потреби в обслуговуванні та визначати найбільш економічно доцільні режими роботи. Поєднання LED-технологій, інтелектуальних драйверів та систем моніторингу створює умови для побудови адаптивних мереж, здатних оптимізувати світловий

потік у режимі реального часу та забезпечувати інтеграцію в цифрову інфраструктуру міста.

Таким чином, сучасні технології вуличного освітлення формують основу для створення інтелектуальних, енергоефективних та безпечних систем, здатних забезпечувати належний рівень видимості, адаптуватися до реальних умов руху та інтегруватися в Smart City, що робить їх незамінним елементом сучасної міської інфраструктури.

### **1.3 Методи адаптивного освітлення та типи сенсорів руху**

Адаптивне вуличне освітлення є ключовим елементом сучасної інтелектуальної інфраструктури міста. Його основна мета полягає в тому, щоб забезпечувати оптимальний рівень видимості на дорозі та в громадських просторах, змінюючи інтенсивність світла залежно від поточної ситуації на транспортній мережі. Такий підхід дозволяє економити електроенергію, продовжувати термін служби світильників і підвищувати безпеку учасників дорожнього руху. Адаптивне освітлення реалізується через інтеграцію сенсорів руху, відеоаналітики та інтелектуальних контролерів, які оперативно визначають інтенсивність трафіку та регулюють яскравість світильників відповідно до потреб конкретної ділянки.

Адаптивні системи вуличного освітлення можуть реалізовувати різні стратегії регулювання світлового потоку залежно від складності інфраструктури, типу дорожнього об'єкта та вимог до рівня безпеки. У найпростішому випадку використовується двоступеневе регулювання, при якому світильники працюють у режимі мінімальної яскравості та переходять у повний режим освітлення при виявленні руху. Такий підхід є відносно простим у реалізації та широко застосовується на малонавантажених вулицях, у житлових кварталах та пішохідних зонах.

Більш складні системи використовують багаторівневе або плавне регулювання яскравості, при якому інтенсивність світла змінюється пропорційно

до інтенсивності руху або швидкості транспортних засобів. У таких системах рівень освітлення може збільшуватися поступово, формуючи динамічний світловий коридор уздовж траєкторії руху об'єкта. Це дозволяє зберігати високий рівень зорового комфорту, уникати різких змін яскравості та зменшувати психологічне навантаження на водіїв і пішоходів.

Ще одним підходом є зональне адаптивне освітлення, при якому територія поділяється на окремі функціональні зони з різними сценаріями освітлення. Наприклад, на перехрестях, пішохідних переходах або зупинках громадського транспорту передбачаються підвищені рівні освітленості, незалежно від загальної інтенсивності руху на прилеглий ділянці. Такий підхід дозволяє точково підвищувати безпеку у потенційно небезпечних зонах без істотного збільшення загального енергоспоживання.

Основний принцип роботи адаптивних систем полягає в наступному. Сенсорна система фіксує присутність транспортного засобу або пішохода, контролер обробляє інформацію про швидкість, напрямок руху та інтенсивність потоку, після чого світильники на визначеному маршруті збільшують яскравість для забезпечення комфортної видимості. Після проходження об'єкта освітленість плавно зменшується до базового рівня, що дозволяє оптимізувати споживання електроенергії без погіршення безпеки.

Для реалізації адаптивного освітлення використовуються різні типи сенсорів. Інфрачервоні датчики (PIR) [18] реагують на теплове випромінювання об'єктів і характеризуються низькою вартістю та простотою установки, проте їх ефективність обмежена в умовах низької температури або при наявності перешкод. Принцип роботи датчика наведено на рисунку 1.1.

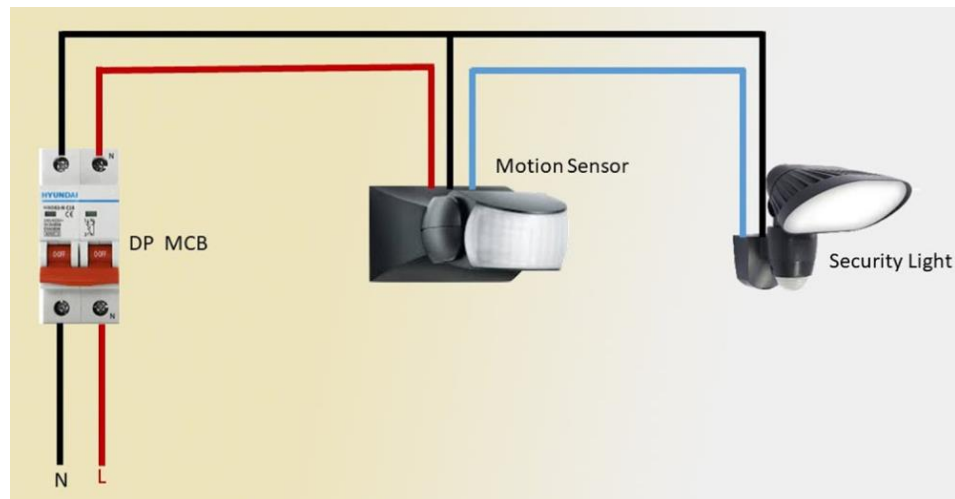


Рисунок 1.1 – Інфрачервоний датчик

Мікрохвильові або радарні сенсори [19] працюють на основі відбиття електромагнітних хвиль і забезпечують високу точність визначення швидкості руху, а також ефективність в будь-яких погодних умовах. Принцип роботи наведено на рисунку 1.2.

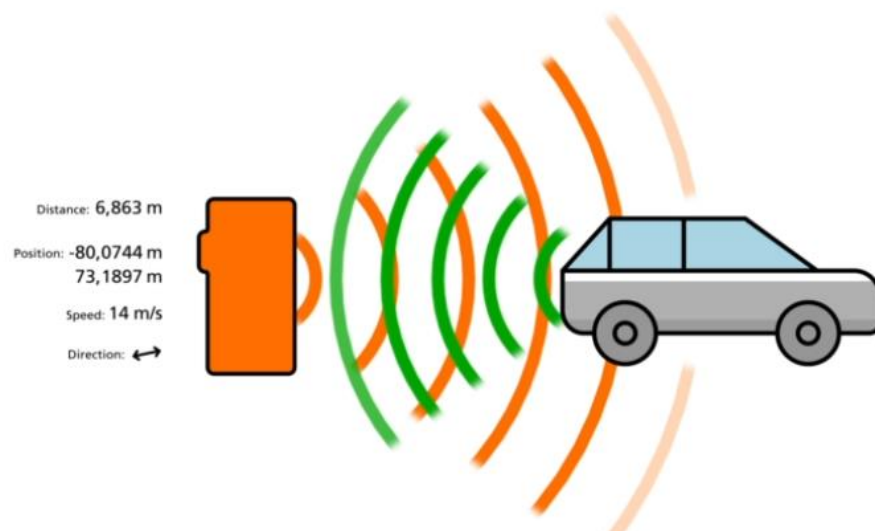


Рисунок 1.2 – Радарні сенсори

Відеоаналітика [20], що базується на камерах з комп'ютерним зором, дозволяє не лише визначати присутність транспортних засобів, але й підраховувати їх кількість, класифікувати об'єкти та оцінювати інтенсивність потоку, що робить її незамінною для магістральних ділянок та зон із високою динамікою руху. Принцип роботи відеоаналітики наведено на рисунку 1.3.

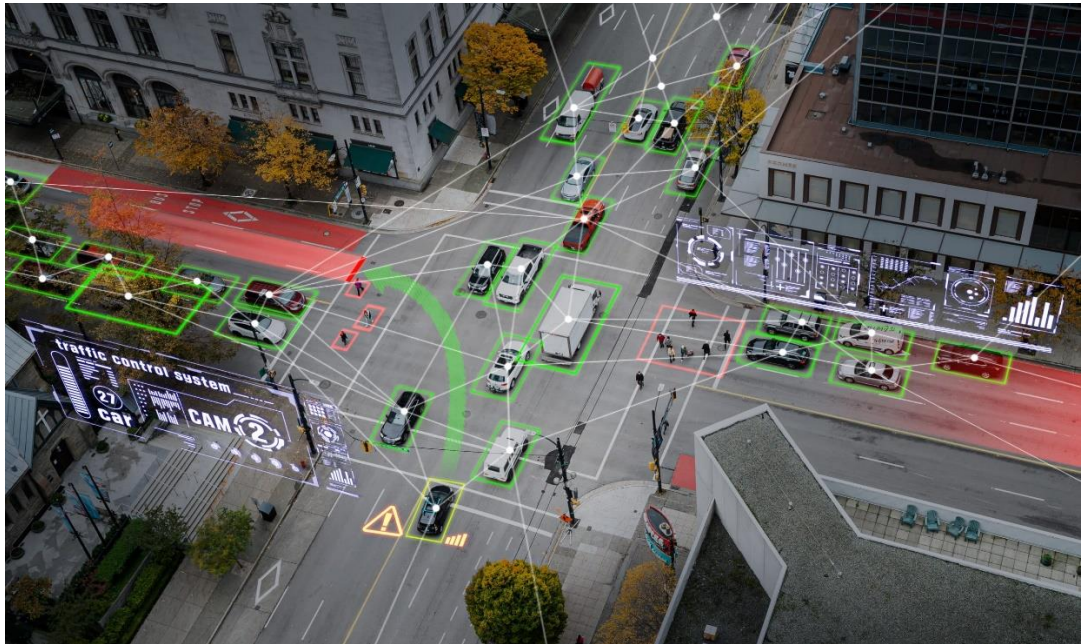


Рисунок 1.3 – Відеоаналітика

Індукційні петлі [21], встановлені у дорожнє полотно, реагують на металеві об'єкти, забезпечуючи високу точність визначення транспортних засобів, проте потребують складного монтажу та регулярного технічного обслуговування. Принцип роботи зображено на рисунку 1.4.

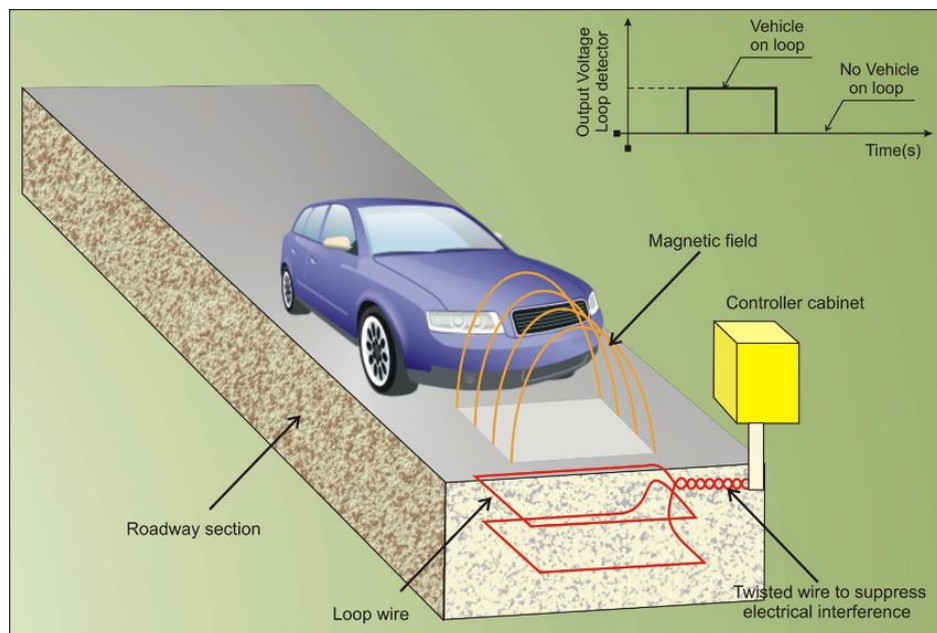


Рисунок 1.4 – Індукційні петлі

Додатково використовуються магнітометри та геофони, які фіксують зміни магнітного поля або вібрації дорожнього полотна і можуть застосовуватися для автономних вузлів адаптивного освітлення.

Ефективність роботи адаптивних систем освітлення значною мірою залежить від точності та надійності сенсорних пристроїв, що використовуються для визначення руху. Кожен тип сенсора має свої фізичні обмеження, які можуть впливати на коректність спрацювань у реальних умовах експлуатації. До таких факторів належать зміни температури повітря, атмосферні опади, туман, наявність сторонніх джерел тепла або електромагнітних завад.

Для інфрачервоних датчиків характерною проблемою є зниження чутливості в умовах низької різниці температур між об'єктом та навколишнім середовищем, що може призводити до пропуску руху або хибних спрацювань. Мікрохвильові та радарні сенсори, хоча й менш чутливі до температурних змін, можуть реагувати на рух поза межами контрольованої зони, що потребує ретельного налаштування діаграми спрямованості. Відеоаналітика, у свою чергу, забезпечує високу інформативність, але її робота може ускладнюватися при сильних опадах, засвічуванні або недостатньому рівні освітлення.

З метою підвищення надійності в сучасних системах дедалі частіше застосовуються комбіновані сенсорні рішення, які поєднують декілька типів датчиків в одному вузлі. Наприклад, поєднання PIR-датчика з радарним сенсором дозволяє зменшити кількість хибних спрацювань та забезпечити стабільну роботу системи за різних погодних умов. Отримані від сенсорів дані обробляються за допомогою алгоритмів логічної фільтрації, що дозволяє приймати рішення про зміну режиму освітлення лише за підтвердження факту руху кількома незалежними джерелами.

Для більш наочного порівняння характеристик сенсорів та їх можливостей можна представити їх у вигляді таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика сенсорів

Тип сенсора	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
PIR (інфра-червоні)	Реєстрація теплового випромінювання	Низька вартість, проста установка	Залежність від температури, реагують лише на теплі об'єкти	Пішохідні зони, невеликі дороги
Мікро-хвильові (радарні)	Відбиття електромагнітних хвиль	Робота в будь-яку погоду, визначення швидкості	Вища вартість	Магістралі, швидкісні дороги
Відео-аналітика	Обробка відеопотоку	Підрахунок і класифікація об'єктів, висока точність	Потребує живлення і гарного освітлення	Високонавантажені дороги, Smart City
Індукційні петлі	Визначення металевих об'єктів	Висока точність	Складний монтаж, обмежена мобільність	Автомобільні магістралі, перехрестя
Магнітометри/геофони	Фіксація змін магнітного поля або вібрацій	Автономність, простота інтеграції	Обмежена дальність, чутливість до зовнішніх впливів	Додаткові сенсорні вузли, локальні ділянки

Важливим параметром при виборі сенсорів для адаптивного освітлення є час реакції системи, тобто проміжок часу від моменту появи об'єкта у зоні контролю до зміни яскравості світильника. Надмірна затримка може знижувати ефективність освітлення та негативно впливати на безпеку руху, особливо на ділянках із високими швидкостями транспортних засобів. Тому сучасні системи орієнтуються на мінімізацію часу обробки сигналів та швидку передачу команд між світильниками.

Окрім швидкодії, суттєве значення має питання енергоспоживання сенсорних вузлів. У випадку автономних або напівавтономних систем освітлення,

де використовуються резервні джерела живлення або сонячні панелі, низьке енергоспоживання сенсорів є критично важливим. Саме тому перевага надається сенсорам із режимами сну, які активуються лише за необхідності, або сенсорам, здатним працювати в імпульсному режимі.

Інтеграція сенсорних систем з інтелектуальними драйверами світильників та платформами керування дозволяє не лише регулювати освітлення, але й збирати аналітичні дані про рух. Такі дані можуть використовуватися для оптимізації сценаріїв освітлення, аналізу транспортних потоків, планування технічного обслуговування та подальшого розвитку міської інфраструктури. У цьому контексті сенсорні системи стають важливим джерелом інформації для реалізації концепції Smart City.

Методи адаптивного освітлення у поєднанні з різноманітними типами сенсорів і сучасними технологіями зв'язку формують основу ефективного управління вуличним освітленням, забезпечуючи належну видимість, економію ресурсів і підвищення безпеки дорожнього руху.

#### **1.4 Системи «розумного» керування освітленням в концепції Smart City**

Інтелектуальні системи керування вуличним освітленням є невід'ємною частиною концепції Smart City, спрямованої на підвищення енергоефективності, комфорту та безпеки міського середовища. В умовах глобальної урбанізації, коли міста споживають близько 70% світової енергії та суттєво впливають на викиди CO<sub>2</sub> [22], питання оптимізації споживання електроенергії стає особливо актуальним. Вуличне освітлення, яке традиційно було великим споживачем енергії, за допомогою інтелектуальних технологій може стати джерелом економії та одночасно поліпшити рівень безпеки на дорогах та громадських просторах.

Концепція Smart City передбачає комплексний підхід до управління міськими ресурсами на основі використання цифрових технологій, сенсорних мереж та аналітичних платформ. У цьому контексті система вуличного освітлення розглядається не лише як інженерна інфраструктура, а як активний елемент міської

інформаційної екосистеми. Інтеграція освітлення з іншими підсистемами міста, такими як транспортні системи, відеоспостереження, екологічний моніторинг та системи безпеки, дозволяє досягти синергічного ефекту та підвищити загальну ефективність управління міським середовищем.

Однією з ключових переваг інтеграції адаптивного освітлення в Smart City є можливість централізованого моніторингу та диспетчеризації. Сучасні платформи управління дозволяють у режимі реального часу отримувати інформацію про стан кожного світильника, рівень його завантаження, споживання електроенергії та наявність несправностей. Це значно спрощує процес експлуатації, скорочує час реагування на аварійні ситуації та зменшує витрати на технічне обслуговування.

Крім того, інтегровані системи освітлення забезпечують накопичення великих масивів даних, які можуть використовуватися для подальшого аналізу та оптимізації роботи міських служб. Зокрема, дані про інтенсивність руху пішоходів і транспортних засобів дозволяють коригувати сценарії освітлення, планувати реконструкцію дорожньої інфраструктури та підвищувати рівень безпеки на найбільш навантажених ділянках міста.

Сучасна система “розумного” освітлення базується на LED-лампах, які забезпечують високу енергоефективність, тривалий термін служби та можливість адаптивного керування світловим потоком. Ключовим елементом є контролер світильника (Light Controller), який виконує роль центрального процесора кожного світильника. LC отримує інформацію від різноманітних сенсорів, обробляє її та передає команди на регулювання яскравості лампи. Він також забезпечує обмін даними із центральною системою управління через бездротові протоколи (ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi / 4G / LTE) або дротові рішення (PLC, Ethernet), що дозволяє інтегрувати систему у загальноміську мережу управління інфраструктурою. Місце контролера в системі освітлення наведено на рисунку 1.5.

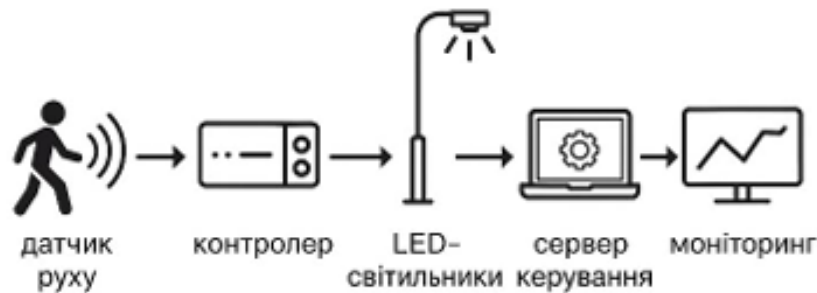


Рисунок 1.5 – Схема системи освітлення з використанням контролеру

Особливою складовою інтеграції систем вуличного освітлення в Smart City є питання масштабованості та сумісності обладнання різних виробників. Використання відкритих протоколів обміну даними та стандартних інтерфейсів дозволяє поступово розширювати систему без необхідності повної заміни вже встановленого обладнання. Такий підхід є особливо актуальним для великих міст, де модернізація освітлювальної інфраструктури відбувається поетапно.

Застосування хмарних платформ управління [23] відкриває можливості для централізованого зберігання даних, гнучкого налаштування алгоритмів керування та віддаленого доступу до системи. Хмарна архітектура дозволяє реалізувати складні аналітичні функції, зокрема прогнозування споживання електроенергії, виявлення аномалій у роботі обладнання та моделювання різних сценаріїв освітлення. При цьому забезпечується висока доступність сервісів і можливість швидкого оновлення програмного забезпечення без втручання в роботу польових пристроїв.

Окрему увагу в Smart City приділяють питанням інформаційної безпеки та захисту даних. Оскільки система вуличного освітлення є частиною критичної міської інфраструктури, до неї висуваються підвищені вимоги щодо захисту каналів зв'язку, автентифікації пристроїв та контролю доступу до платформи управління. Реалізація сучасних механізмів кібербезпеки дозволяє запобігти несанкціонованому втручанням та забезпечити стабільну і безпечну роботу всієї системи.

Важливу роль у роботі Smart Street Light відіграють сенсори [24]. Датчики руху та присутності дозволяють підвищувати освітленість лише там, де є користувачі, що значно знижує енергоспоживання. Світлочутливі сенсори або LDR, фотодіоди та фототранзистори вимірюють рівень природного освітлення та коригують яскравість ламп, забезпечуючи економію енергії у сутінкові години або при зміні погодних умов. Камери та відеоаналітика дозволяють не тільки підвищувати безпеку, а й визначати тип користувача дороги – пішохід чи автомобіль – і відповідно застосовувати різні схеми освітлення. Додаткові сенсори, такі як погодні, екологічні та електрометричні, забезпечують збір даних про температуру, вологість, рівень забруднення повітря, а також моніторинг споживання електроенергії і виявлення неполадок у системі.

Методи керування освітленням у Smart City поділяються на статичні та динамічні (адаптивні) [25]. Статичні методи передбачають заздалегідь запрограмовані сценарії роботи світильників, такі як Part-Night або Two-step control, коли освітлення включається у повному режимі на певний час і потім знижується до меншого рівня. Такі методи прості у впровадженні та дешеві, проте вони не реагують на зміни інтенсивності руху чи погодних умов. Статистичні методи освітлення зображені на рисунку 1.6.

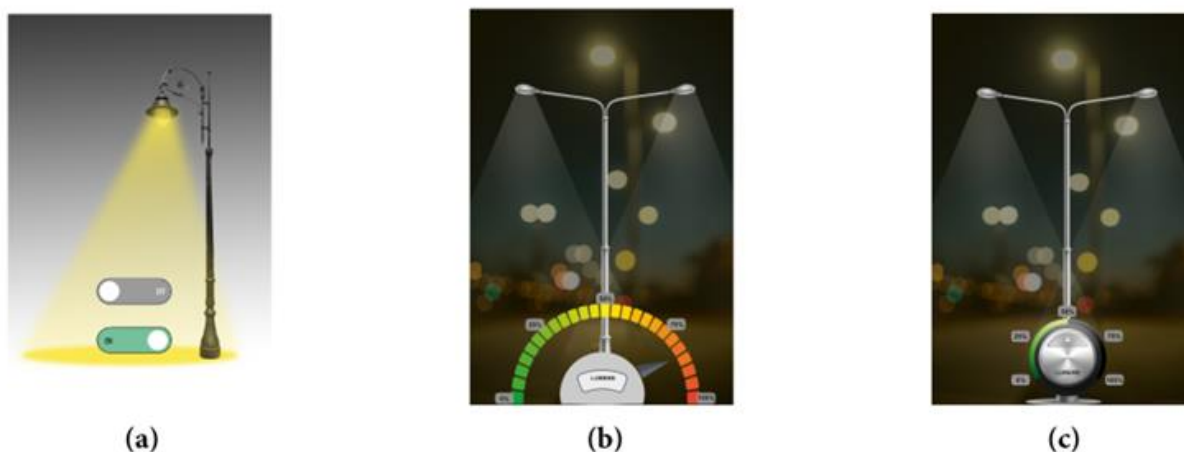


Рисунок 1.6 – Статистичні методи керування освітлення

Динамічні методи керування забезпечують значно більшу гнучкість та ефективність [25]. Вони передбачають адаптивне регулювання яскравості в реальному часі за допомогою датчиків руху, освітлення, камер та погодних сенсорів. Наприклад, схема зонування (zoning) дозволяє створювати локальні освітлені коридори для пішоходів та автомобілістів: світильники, що знаходяться ближче до користувача, світять яскравіше, а віддалені – поступово тьмяніють. Це дозволяє економити електроенергію до 70–90% порівняно з традиційними НІД-лампами, зберігаючи при цьому необхідний рівень освітленості для безпеки.

Динамічні методи освітлення зображені на рисунку 1.7.

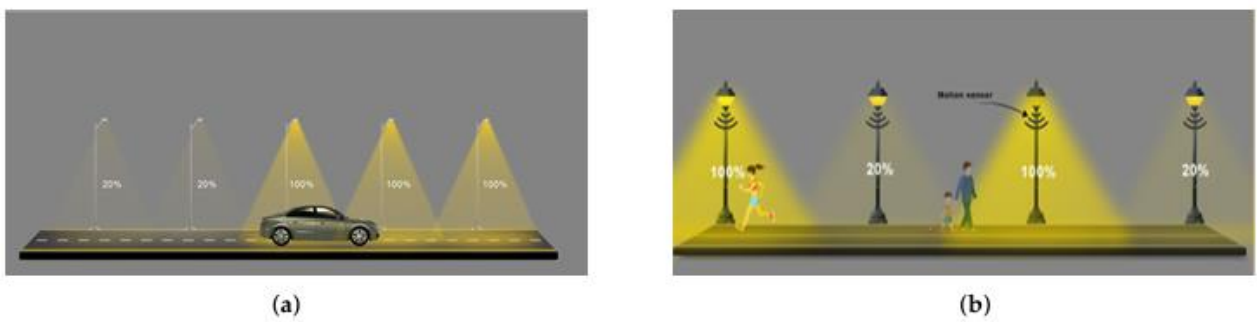


Рисунок 1.7 – Динамічні методи керування освітлення

Інтеграція адаптивного освітлення з іншими міськими сервісами створює передумови для реалізації комплексних сценаріїв управління міським простором. Наприклад, у разі виникнення надзвичайних ситуацій система освітлення може автоматично переходити в аварійний режим із підвищеним рівнем яскравості на маршрутах евакуації або в зонах підвищеного ризику. Аналогічно, під час проведення масових заходів можливе тимчасове коригування режимів освітлення з урахуванням збільшеного пішохідного навантаження.

Завдяки інтеграції з системами відеоспостереження та міського транспорту адаптивне освітлення може відігравати важливу роль у підвищенні громадської безпеки. Покращення якості освітлення в ключових точках міста сприяє зменшенню кількості правопорушень та підвищує відчуття безпеки серед мешканців. Таким чином, система вуличного освітлення перестає бути

ізолюваною інженерною підсистемою і стає повноцінним інструментом управління міським середовищем.

Інтелектуальні системи можуть інтегрувати веб-дані та штучний інтелект для більш точного керування. Використання API [26] для отримання інформації про погодні умови та інтенсивність трафіку дозволяє прогнозувати потреби в освітленні та оптимізувати роботу ламп. Алгоритми штучного інтелекту, включно з нейронними мережами та глибоким навчанням, здатні автоматично коригувати світлові схеми залежно від конкретної ситуації, враховуючи рух користувачів, погодні умови та рівень природного освітлення. Такі системи забезпечують не тільки енергоефективність, а й мінімізують світлове забруднення та підвищують комфорт міського середовища.

### **1.5 Огляд типових рішень щодо модернізації вуличного освітлення**

Модернізація вуличного освітлення передбачає системний підхід до підвищення ефективності та надійності існуючих мереж. Одним із ключових напрямів є оптимізація конструктивної частини світильників та опор, що дозволяє зменшити втрати енергії і підвищити довговічність обладнання. Це включає використання більш ефективних матеріалів, корозійностійких покриттів, захисту від вологи та пилу, а також інтеграцію з механізмами швидкої заміни ламп та вузлів управління. Крім того, оновлення мереж передбачає впровадження централізованих систем моніторингу, які дозволяють відстежувати роботу кожного світильника та прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні без фізичного обходу території.

Ще один напрям модернізації пов'язаний із впровадженням енергоменеджменту на рівні кварталів чи окремих вулиць. Це включає визначення зон пріоритетного освітлення [27], регулювання потужності світильників залежно від інтенсивності руху, сезонних змін та місцевих подій. Такі підходи дозволяють економити ресурси без шкоди для безпеки та комфорту громадян, одночасно

створюючи гнучкі сценарії для тимчасових заходів чи аварійних ситуацій. Ілюстрація даного напрямку модернізації зображена на рисунку 1.8.

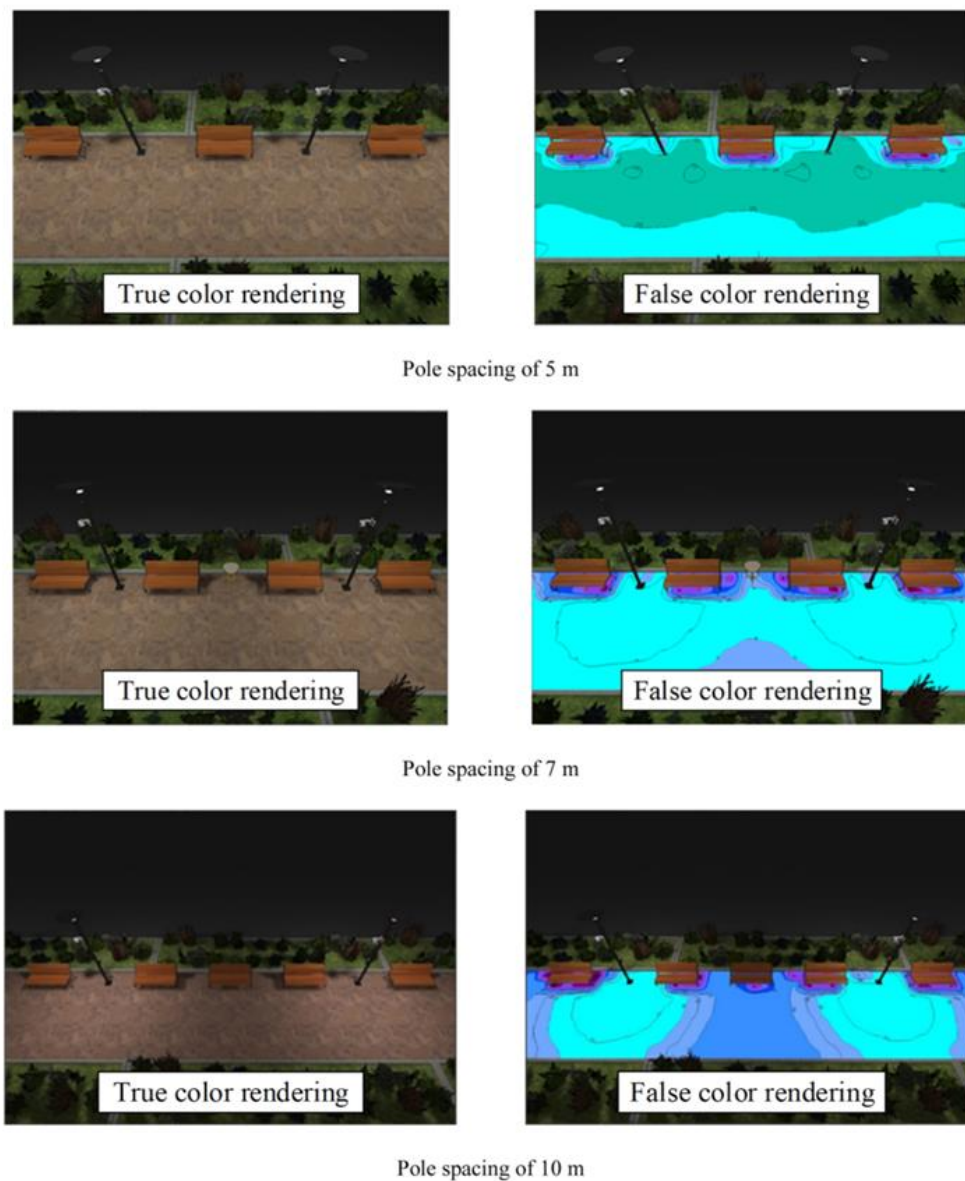


Рисунок 1.8 – Визначення зон пріоритетного освітлення

Важливим елементом модернізації є підвищення інтеграції освітлення з іншими інфраструктурними системами. Сюди входить можливість живлення додаткових міських сервісів, наприклад, станцій зарядки електромобілів, мережі моніторингу якості повітря, а також пунктів доступу для комунікаційних мереж. Такі комплексні рішення дозволяють перетворити освітлювальні мережі на мультифункціональні платформи, що обслуговують різні потреби міста одночасно.

Особливу увагу приділяють адаптації до локальних умов. При модернізації враховують специфіку руху транспортних засобів та пішоходів, щільність забудови, наявність зелених зон і парків, а також освітленість суміжних територій. Це дозволяє максимально ефективно розподіляти ресурси, уникати зайвого освітлення та зменшувати світлове забруднення.

Крім технічних рішень, важливим аспектом модернізації є впровадження процесів планування та управління проектами. Це включає аудит існуючих мереж, розрахунок економічної ефективності модернізаційних заходів, визначення пріоритетних зон для оновлення, контроль якості монтажу та налаштування обладнання. Такий системний підхід дозволяє забезпечити стабільну роботу освітлювальної мережі протягом багатьох років із мінімальними витратами на підтримку.

Водночас, реалізація модернізації вуличного освітлення в Україні сьогодні стикається з особливими викликами через воєнний стан. Руїнування інфраструктури, нестача фінансування, обмежений доступ до матеріалів і обладнання, а також ризики для безпеки монтажних бригад суттєво ускладнюють планові роботи. Багато проєктів доводиться відкладати або адаптувати до мінімально необхідних робіт, зосереджуючись на відновленні пошкоджених мереж і забезпеченні критичних зон безперервним освітленням. У цих умовах пріоритетом стає не стільки впровадження інновацій, скільки підтримка базового функціонування мережі та оперативне реагування на надзвичайні ситуації, що потребує гнучкого планування та оперативного використання наявних ресурсів.

## **Висновок до розділу 1**

Проведений у розділі аналіз сучасних технологій вуличного освітлення та систем регулювання показав, що традиційні підходи до організації освітлювальних мереж, які базуються на фіксованих режимах роботи світильників, дедалі менше відповідають реальним умовам експлуатації міської інфраструктури. Зростання інтенсивності транспортних і пішохідних потоків, їх значна добова, тижнева та

сезонна нерівномірність, а також підвищені вимоги до безпеки дорожнього руху формують потребу у впровадженні більш гнучких та інтелектуальних рішень у сфері зовнішнього освітлення.

Аналіз нормативної бази України та європейських стандартів засвідчив, що чинні документи не лише регламентують мінімально допустимі рівні освітленості та яскравості, але й створюють нормативні передумови для застосування адаптивних та димованих режимів освітлення. Зокрема, стандарти серії EN 13201 допускають зміну класу освітлення залежно від інтенсивності руху та умов експлуатації, що повністю узгоджується з концепцією адаптивного керування світловим потоком.

Розвиток світлодіодних технологій став ключовим фактором модернізації вуличного освітлення. Світлодіодні світильники забезпечують високу світлову віддачу, тривалий термін служби, можливість формування різних кривих світлорозподілу та підтримку димування без погіршення якості світла. Це створює технічну основу для реалізації систем, здатних динамічно змінювати рівень освітлення відповідно до реальних потреб дорожньої інфраструктури.

Особливу увагу у розділі приділено методам адаптивного освітлення та типам сенсорів руху. Проведений аналіз показав, що використання інфрачервоних, радарних сенсорів, відеоаналітики, індукційних петель та комбінованих сенсорних рішень дозволяє з достатньою точністю визначати інтенсивність і характер руху. При цьому кожен тип сенсорів має свої переваги та обмеження, що обумовлює доцільність їх комбінування для підвищення надійності та стійкості системи в реальних умовах експлуатації.

У межах концепції Smart City системи вуличного освітлення розглядаються як елемент єдиної міської цифрової екосистеми. Інтеграція освітлення з IoT-платформами, системами відеоспостереження, транспортною інфраструктурою та аналітичними сервісами дозволяє не лише знижувати енергоспоживання, а й підвищувати рівень безпеки, комфорту та керованості міського простору.

В умовах України, де енергетична інфраструктура зазнає значних навантажень і пошкоджень, раціональне використання електроенергії набуває

особливої актуальності. Адаптивні системи вуличного освітлення розглядаються не лише як інструмент енергозбереження, але і як важливий елемент підвищення стійкості та надійності міських територій. Отримані у розділі результати формують теоретичну та технологічну основу для подальшого моделювання, розроблення алгоритмів і практичної реалізації адаптивних систем освітлення.

## 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО ОСВІТЛЕННЯ

### 2.1 Принципи регулювання яскравості світильників залежно від інтенсивності руху

Адаптивне регулювання яскравості вуличних світильників базується на принципі змінної освітленості, що коригується відповідно до фактичної інтенсивності транспортного потоку. У традиційних системах освітлення рівень яскравості залишається сталим протягом усієї темної частини доби, тоді як адаптивні системи дозволяють зменшувати потужність світильників у періоди низького трафіку та підвищувати її в години інтенсивного руху. Такий підхід забезпечує відповідність нормам ДБН та ДСТУ, водночас істотно знижуючи енерговитрати та мінімізуючи світлове забруднення.

Процес моделювання інтенсивності транспортних та пішохідних потоків є ключовим етапом при розробці алгоритмів адаптивного керування вуличним освітленням. Коректність роботи системи безпосередньо залежить від адекватності обраної моделі, яка повинна відображати реальні умови експлуатації освітлювальної мережі. У практичних задачах моделювання, як правило, використовується статистичний підхід, що ґрунтується на аналізі середніх значень інтенсивності руху за певні проміжки часу.

Добова нерівномірність транспортних потоків є характерною особливістю міських вулиць і визначається функціональним призначенням дороги, типом забудови та соціальною активністю населення. У нічний час, особливо в проміжку між 00:00 та 05:00 годинами, інтенсивність руху суттєво зменшується, що створює передумови для застосування режимів зниженого освітлення. Водночас у вечірні години пік, а також у ранковий період, рівень освітлення повинен відповідати нормативним вимогам для забезпечення безпеки дорожнього руху.

Окрім добових коливань, під час моделювання доцільно враховувати тижневу та сезонну нерівномірність трафіку. Так, у вихідні дні інтенсивність руху в житлових районах може суттєво знижуватися, тоді як у зонах відпочинку або

поблизу торговельних центрів – зростати. У зимовий період, з огляду на скорочення світлового дня та погіршення погодних умов, вимоги до стабільності освітлення зростають, що повинно враховуватися під час формування сценаріїв роботи адаптивної системи.

Для формалізації цих процесів у моделі вводяться коефіцієнти коригування, які відображають зміну інтенсивності руху залежно від часу доби, дня тижня та сезону. Використання таких коефіцієнтів дозволяє будувати універсальну модель, придатну для аналізу різних сценаріїв експлуатації системи вуличного освітлення без необхідності повної перебудови алгоритму керування.

У межах моделі також доцільно враховувати ймовірнісну природу руху. Навіть у періоди мінімального навантаження існує ненульова ймовірність появи транспортних засобів або пішоходів, що обумовлює необхідність підтримання мінімального рівня освітленості. Такий підхід забезпечує компроміс між енергоефективністю та вимогами безпеки, що є одним із ключових принципів адаптивного освітлення. З урахуванням імовірнісної природи руху доцільно використовувати коефіцієнти інтенсивності, що змінюються залежно від часу доби. Відповідні значення коефіцієнтів інтенсивності руху наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти інтенсивності руху залежно від часу доби

Період	Коефіцієнт інтенсивності
18:00–22:00	1,0
22:00–00:00	0,7
00:00–05:00	0,3
05:00–07:00	0,6

Основою для встановлення необхідних рівнів освітленості виступають вимоги ДБН В.2.5-28:2018 “Природне і штучне освітлення” [3], які нормують яскравість і освітленість дорожнього покриття відповідно до категорії дороги та інтенсивності транспортного потоку. Згідно з цими нормами, проектування вуличного освітлення на дорогах із регулярним рухом повинно виконуватися з урахуванням середньої яскравості покриття (для удосконалених типів покриттів)

або середньої горизонтальної освітленості (для покриттів перехідного чи нижчого типу).

У нормативному документі зазначено, що для вулиць категорії Б середня горизонтальна освітленість має становити 6 лк, для вулиць і доріг категорії В – 4 лк при перехідному покритті та 2 лк при покритті нижчого типу. Ці показники є базовими для встановлення мінімальних рівнів освітлення, від яких надалі формується адаптивна шкала регулювання яскравості в реальних умовах.

Норми також уточнюють, що вибір підкласу дорожнього об'єкта та відповідної йому яскравості покриття виконується на основі розрахункової максимальної інтенсивності руху за годину, що прямо відображає принципи адаптивного освітлення: рівень світлового потоку повинен відповідати реальному або прогнозованому трафіку. В таблиці 2.2 наведено нормативні значення середньої яскравості дорожнього покриття залежно від категорії дороги, її призначення та інтенсивності руху.

Таблиця 2.2 – Нормативні показники для міських вулиць і доріг з асфальтобетонним покриттям [3]

Категорія об'єкта за освітленням	Вулиці, дороги і площі	Підклас об'єкта	Найбільша інтенсивність руху транспорту в обох напрямках, фіз. од/год	Середня яскравість покриття, кд/м <sup>2</sup>
А	Магістральні дороги, магістральні вулиці загальноміського значення	А1	Більше 5000	2,0
		А2	Від 3000 до 5000	1,5
		А3	Від 1000 до 3000	1,2
		А4	Від 500 до 1000	0,8
		А5	Менше 500	0,6

## Продовження таблиці 2.2

Б	Магістральні вулиці районного значення	Б1	Більше 2000	1,0
		Б2	Від 1000 до 2000	0,8
		Б3	Від 500 до 1000	0,6
		Б4	Менше 500	0,4
В	Вулиці і дороги місцевого значення	В1	500 і більше	0,4
		В2	Менше 500	0,3

Згідно з ДБН, середня яскравість тротуарів, що прилягають до проїзної частини, повинна становити не менше половини від нормативної яскравості дорожнього покриття. Мінімальна та максимальна яскравості також регламентуються: співвідношення мінімальної до середньої яскравості не повинно бути меншим за 0,4 (для значень понад 0,6 кд/м<sup>2</sup>) та 0,3 (для значень 0,6 кд/м<sup>2</sup> і нижче). Ці вимоги безпосередньо впливають на алгоритми регулювання яскравості, оскільки система повинна забезпечувати не лише середній рівень світла, а й рівномірність освітлення.

Норми також регламентують обмеження засліпленості (TI) [28], максимальну силу світла при певних кутах та висоту встановлення світильників, що визначає геометрію розподілу світлового потоку. Усі ці параметри формують базові вимоги, які адаптивна система повинна дотримуватись у будь-якому режимі роботи, незалежно від інтенсивності трафіку.

Під час проектування адаптивної системи ураховується коефіцієнт запасу – одна з ключових норм ДБН, яка компенсує зниження світлового потоку в процесі експлуатації через забруднення світильників та старіння джерел світла. Саме тому система димування має працювати не від номінальної світлової потужності світильника, а від скоригованих значень, які враховують експлуатаційні втрати.

У контексті адаптивних систем особливе значення мають моделі управління яскравістю [29], які визначають спосіб взаємодії світильників між собою та з датчиками. На практиці застосовують дві основні моделі:

- локальне адаптивне регулювання, коли кожен світильник автономно змінює свою яскравість на основі даних власного сенсора руху, освітленості або відеоаналітики;

- групове (коридорне) регулювання, коли декілька світильників формують “динамічний світловий коридор”, підвищуючи яскравість у напрямку руху транспортного засобу або пішохода.

Адаптивне регулювання яскравості світильників формується на основі двох взаємопов’язаних блоків: нормативних вимог до рівня освітлюваності та яскравості та поточної або прогнозованої інтенсивності руху. Завдання системи полягає в тому, щоб автоматично підтримувати освітленість у таких межах, які відповідають ДБН, але при цьому мінімізують енергоспоживання в години низького трафіку. Таким чином, адаптивне освітлення забезпечує безпечні умови руху згідно з вимогами національних стандартів, одночасно підвищуючи ефективність і економічність експлуатації вуличних мереж.

## **2.2 Визначення інтенсивності трафіку (сенсори, відеоаналітика, радар)**

Оцінювання інтенсивності дорожнього руху є критично важливим елементом функціонування адаптивних систем вуличного освітлення. Система повинна оперативно та достовірно отримувати інформацію про всі об’єкти, що рухаються в зоні контролю – транспортні засоби, велосипедистів, пішоходів – а також визначати їх параметри руху. На основі цих даних алгоритм освітлення обирає оптимальний режим роботи світильників, формує світловий коридор або зменшує світловий потік у періоди низької активності.

У процесі розроблення моделі роботи адаптивної системи вуличного освітлення важливим етапом є визначення набору вхідних параметрів, які безпосередньо впливають на алгоритм керування. До таких параметрів належать інтенсивність транспортного та пішохідного руху, час доби, поточний стан освітлювальних приладів, а також зовнішні умови експлуатації. Формалізація цих

параметрів дозволяє перейти від описового аналізу до кількісної оцінки режимів роботи системи.

Одним із базових параметрів моделі є рівень інтенсивності руху, який може задаватися у вигляді дискретних станів або безперервної величини. У спрощених моделях доцільно використовувати декілька характерних рівнів інтенсивності, наприклад низький, середній та високий. Кожному з цих рівнів відповідає певний режим освітлення, що визначається значенням світлового потоку або відсотком димування світильників. Такий підхід дозволяє зменшити обчислювальну складність алгоритму та забезпечити його стабільну роботу в реальних умовах.

Час доби є ще одним важливим фактором, який враховується під час моделювання. Навіть за відсутності руху система повинна підтримувати мінімально допустимий рівень освітлення, що гарантує безпеку пересування та відповідає нормативним вимогам. У вечірні та нічні години алгоритм керування може використовувати знижені базові рівні яскравості з подальшим їх підвищенням при виявленні руху. Такий принцип дозволяє досягти значної економії електроенергії без погіршення якості освітлення.

У моделі також враховується інерційність світлотехнічної системи, пов'язана з часом реакції сенсорів, затримками передачі сигналів та характеристиками драйверів світильників. Різкі зміни яскравості можуть негативно впливати на зоровий комфорт, тому в алгоритмах адаптивного керування передбачаються плавні переходи між режимами освітлення. Це досягається шляхом обмеження швидкості зміни світлового потоку або використання часових інтервалів усереднення даних сенсорів.

Основна мета збору інформації – точне визначення факту руху, типу учасника руху, його швидкості та напрямку. Окрім того, система повинна забезпечувати надійний обмін цими даними з контролером освітлення через дротові або бездротові канали зв'язку. Коректність інтерпретації даних безпосередньо впливає на стабільність роботи освітньої мережі, адже помилкові спрацювання (хибні позитиви або пропуски) можуть або збільшити

енергоспоживання, або погіршити рівень освітленості, що суперечить вимогам ДБН В.2.5-28:2018 щодо безпеки руху.

Датчики руху є найпростішими засобами фіксації факту руху. Вони дозволяють швидко та недорого інтегруватися зі світильником і використовуються переважно у локальних системах регулювання на малих вулицях. Основним обмеженням є неможливість визначати тип об'єкта або його швидкість, а також схильність до хибних спрацювань через температуру чи сторонні джерела.

Відеоаналітика поєднує камери та алгоритми комп'ютерного зору та є універсальним методом збору трафіку. Камери формують відеопотік, який обробляється на локальному мікросервері або в хмарі, що дозволяє визначати кількість об'єктів, їх тип, траєкторії, швидкість, інтенсивність потоку та щільність руху. Сучасні алгоритми працюють у складних погодних умовах і при низькому освітленні завдяки інфрачервоним фільтрам і цифровій стабілізації. Переваги відеоаналітики – висока точність і багатофункціональність, недоліки – потреба у постійному зв'язку та значних обчислювальних ресурсах.

Радари та лідари дозволяють визначати відстань до об'єкта, напрямок його руху, швидкість за доплерівським методом та кількість транспортних засобів. Лідари будують тривимірну модель простору з точністю до сантиметрів, радари менш точні, але стійкі до несприятливих погодних умов. Їхні переваги – висока точність визначення швидкості та незалежність від освітлення, недоліки – вища вартість у порівнянні з відеодетекторами.

Індукційні петлі та магнітометри застосовуються на дорогах вищих категорій для точного обліку транспортного потоку. Вони надають дані про інтенсивність руху, швидкість транспорту, орієнтовну довжину транспортних засобів та інтервали між ними. Головні переваги – висока точність підрахунку, недоліки – складність монтажу та необхідність порушення дорожнього покриття.

Інформація, отримана від цих технологій, повинна оновлюватися в реальному часі, мати похибку визначення швидкості не більше  $\pm 5\%$ , ідентифікувати тип об'єкта з точністю не менше 90% та передаватися у зашифрованому вигляді. Після надходження даних до контролера система визначає

об'єкт, його швидкість і напрямок руху, прогнозує появу на ділянках дороги та формує динамічний світловий коридор, збільшуючи яскравість наперед і плавно зменшуючи світловий потік після зникнення руху, забезпечуючи баланс між безпекою та енергоефективністю сучасного «розумного» освітлення.

### 2.3 Моделювання трафіку для потреб адаптивного освітлення

Моделювання трафіку транспортного потоку визначається як процес оцінки кількості транспортних засобів, що проходять через певний переріз дороги за одиницю часу (годину, добу, рік). Для цього використовують два підходи: облік у фізичних одиницях та у приведених одиницях.

Фізичні одиниці характеризують окремі типи транспортних засобів – легкові автомобілі, вантажівки, автобуси, тролейбуси, мотоцикли та велосипеди. Інтенсивність у фізичних одиницях ( $N$ , авт./год) визначається шляхом підсумовування кількості всіх транспортних засобів, що пройшли через ділянку дороги за певний проміжок часу.

Інтенсивність у приведених одиницях враховує склад транспортного потоку, тобто співвідношення різних типів транспортних засобів у потоці. За одиницю виміру прийнято легковий автомобіль, а інші транспортні засоби переводяться у «легкові автомобілі» за допомогою коефіцієнтів приведення [30]:

$$N_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n (k_i \cdot N_i) \quad (2.1)$$

де  $N_{\text{пр}}$  – інтенсивність у приведених одиницях (од./год);

$k_i$  – коефіцієнт приведення для  $i$ -го типу транспорту;

$N_i$  – інтенсивність  $i$ -го типу транспорту у фізичних одиницях;

$n$  – кількість типів транспортних засобів.

В Україні ці коефіцієнти встановлюються нормативними документами і не диференціюють умови руху на різних ділянках доріг та перехрестях. Вони базуються на співвідношенні динамічних габаритів транспортних засобів при русі.

Інформація щодо коефіцієнтів приведення наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти приведення до легкового автомобіля

Тип транспортних засобів	Коефіцієнти приведення
Легкові автомобілі	1
Мотоцикли з коляскою	0,75
Мотоцикли без коляски та мопеди	0,5
Автобус	3,0
Автобус зчеплений	5,0
Тролейбус	3,5
Тролейбус зчеплений	5,0
Вантажні автомобілі, вантажопідйомністю	
до 2 тонн	1,5
від 2 до 6 тонн	2,0
від 6 до 8 тонн	2,5
від 8 до 14 тонн	3,0
понад 14 тонн	3,5
Автопоїзд вантажопідйомністю	
до 12 тонн	3,5
від 12 до 20 тонн	4,0
від 20 до 30 тонн	5,0
понад 30 тонн	6,0

Виміряна інтенсивність у фізичних одиницях може бути застосована для моделювання трафіку на ділянках вулично-дорожньої мережі. При цьому необхідно враховувати добові, тижневі та сезонні коливання трафіку, а також зміну інтенсивності протягом години, щоб адаптивні системи освітлення працювали ефективно в пікові години та запобігали утворенню заторів. Виміри інтенсивності можуть проводитися на різних рівнях: локально на окремих ділянках, зонально для

певних територій або на межі зон, що забезпечує точне моделювання транспортних потоків для потреб адаптивного освітлення.

## 2.4 Алгоритм адаптивного керування освітленістю

Алгоритм адаптивного керування освітленістю забезпечує автоматичне регулювання режимів роботи світильників на основі даних сенсорів освітленості та присутності. Він дозволяє підтримувати нормативний рівень освітлення та мінімізувати енергоспоживання, забезпечуючи роботу світильників лише за реальної потреби. Структурна схема алгоритму наведена на рисунку 2.1.

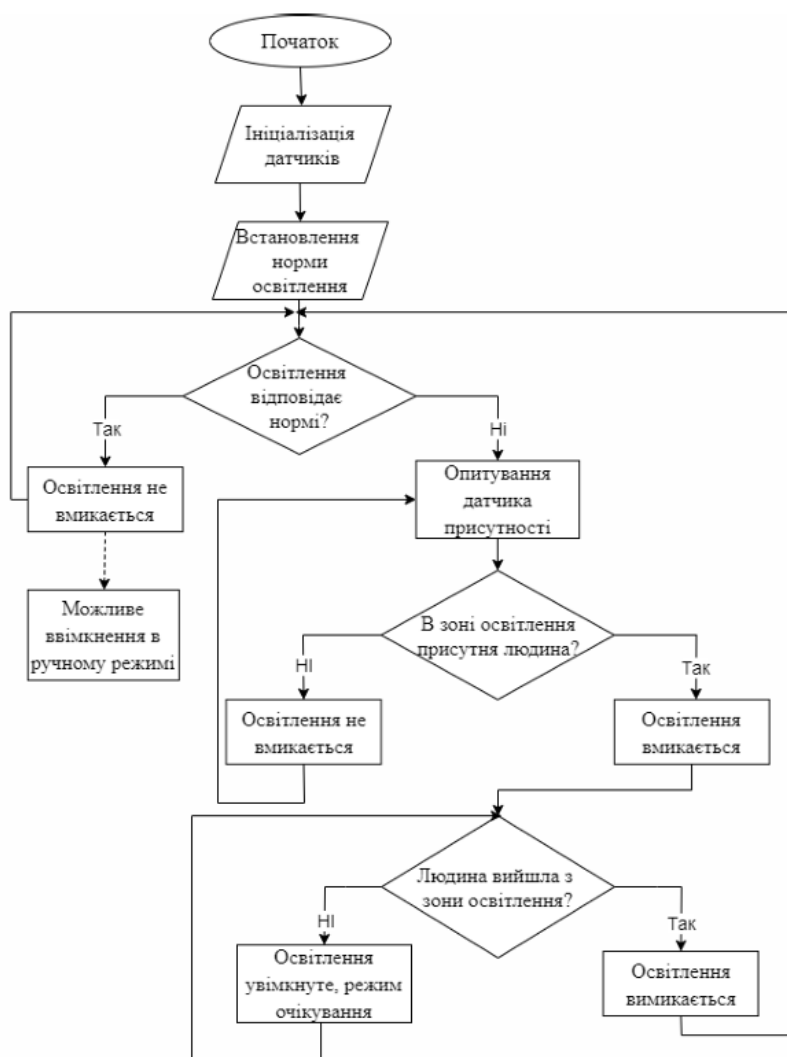


Рисунок 2.1 – Алгоритм роботи адаптивного керування освітленістю

На початковому етапі система виконує ініціалізацію встановлених сенсорів і налаштування контрольних параметрів. Зокрема задається пороговий рівень освітленості, який відповідає нормативним вимогам для конкретної ділянки. Після цього здійснюється первинне зчитування величини природного освітлення та визначається, чи відповідає вона встановленій нормі. Якщо освітленість достатня, штучне освітлення не активується, а система переходить у режим очікування, забезпечуючи можливість ручного керування за потреби.

У випадку, коли рівень природного освітлення є нижчим за нормативний, система запускає опитування сенсорів присутності для визначення наявності людей або транспортних засобів у зоні освітлення:

- якщо виявлено об'єкт руху, освітлення вмикається на робочий рівень яскравості;
- якщо руху немає, освітлення залишається вимкненим, що дозволяє уникнути зайвих витрат електроенергії у періоди низької активності.

Після ввімкнення світильника система продовжує моніторинг зони в режимі реального часу. Освітлення працює доти, доки сенсор фіксує присутність об'єкта. Після того як рух припиняється, запускається затримка вимкнення, що запобігає частим перемиканням і створює комфортні умови для користувачів. Коли цей час сплине, світильник вимикається або переходить у режим пониженої яскравості (режим очікування), зберігаючи мінімальний рівень освітлення.

Такий алгоритм працює циклічно, постійно зчитуючи актуальні значення сенсорів і реагуючи на зміну умов. Завдяки цьому система є адаптивною та здатною оперативно змінювати режими роботи світильників, залежно від інтенсивності руху та зовнішнього освітлення. Такий підхід забезпечує значне зниження енергоспоживання та підвищення ефективності функціонування системи вуличного освітлення.

## 2.5 Розрахунок рівнів освітленості та режимів димування залежно від трафіку

Під час визначення сили світла освітлювального приладу в заданій розрахунковій точці необхідно враховувати, що його світлорозподіл, представлений у вигляді таблиці сили світла, заданий у координатній системі  $I(C, \gamma)$ , яка пов'язана з освітлювальним приладом. Водночас положення та орієнтація приладу, а також розрахункова точка, описуються в системі координат розрахункового поля дороги. Тому для коректного розрахунку сили світла в розрахунковій точці потрібно визначити кути  $C$  і  $\gamma$ , які характеризують положення цієї точки в координатній системі освітлювального приладу [41].

Система координат розрахункового поля пов'язується з прямокутною (декартовою) системою координат  $(x, y, z)$ , у якій вісь  $x$  спрямована вздовж напрямку руху транспортного потоку, вісь  $y$  — перпендикулярно до нього, а вісь  $z$  орієнтована вертикально вгору (рис. 2.2).

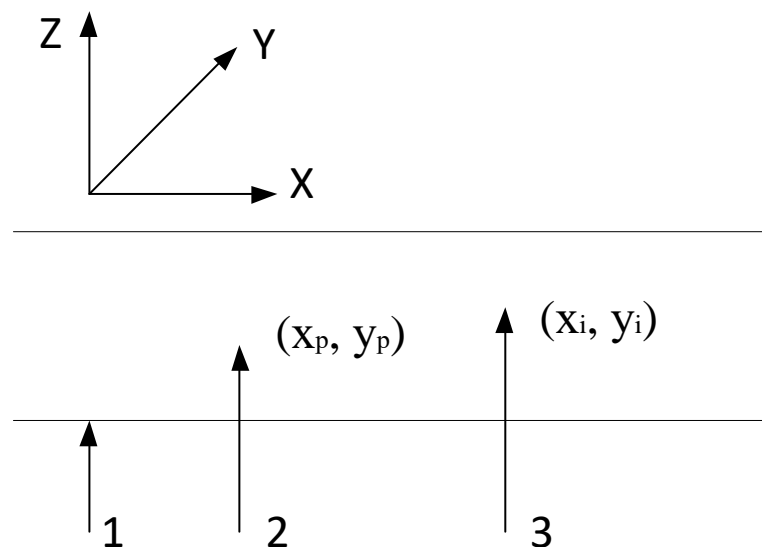


Рисунок 2.2 – Орієнтація системи координат відносно розрахункового поля: 1 – границя проїзної частини; 2 – розрахункова точка; 3 – ОП.

Координатні відстані між розрахунковою точкою  $(x_p, y_p)$  і ОП  $(x_i, y_i)$  визначаються як:

$$x = x_p - x_i; \quad (2.2)$$

$$y = y_p - y_i. \quad (2.3)$$

Орієнтація освітлювального приладу в системі координат розрахункового поля задається трьома кутами повороту відносно координатних осей —  $\nu$ ,  $\delta$  та  $\psi$ . За умови довільної орієнтації освітлювального приладу в декартовій системі координат  $(x, y, z)$ , визначеної зазначеними кутами, а також з урахуванням його положення відносно розрахункової точки, яке характеризується координатами  $x$ ,  $y$  та висотою встановлення приладу над розрахунковою площиною  $H$ , кути  $C$  і  $\gamma$  обчислюються за певною послідовністю дій. На першому етапі виконується визначення допоміжних параметрів  $x'$ ,  $y'$  та  $H'$  у системі координат освітлювального приладу.

$$x' = x(\cos\nu \cos\psi - \sin\nu \sin\delta \sin\psi) + y(\sin\nu \cos\psi + \cos\nu \sin\delta \sin\psi) + H \cos\delta \sin\psi; \quad (2.4)$$

$$y' = -x \sin\nu \cos\delta + y \cos\nu \cos\delta - H \sin\delta; \quad (2.5)$$

$$H' = -x(\cos\nu \sin\psi + \sin\nu \sin\delta \cos\psi) - y(\sin\nu \sin\psi - \cos\nu \sin\delta \cos\psi) + H \cos\delta \cos\psi. \quad (2.6)$$

Розрахунок азимутального кута  $C$  у системі координат ОП наведено в таблиці 2.4.

Розрахунок шуканого полярного кута  $\gamma$  в системі координат ОП наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Формули для розрахунку кута  $C$ 

$x'$	$y'$	$C$
$> 0$	$\geq 0$	$\arctan \frac{y'}{x'}$
	$< 0$	$360^\circ + \arctan \frac{y'}{x'}$
$= 0$	$\neq 0$	$90^\circ$
	$= 0$	Приймається $0^\circ$
$< 0$	$\geq 0$	$180^\circ + \arctan \frac{y'}{x'}$
	$< 0$	

Таблиця 2.5 – Формули для розрахунку кута  $\gamma$ 

$H'$	$\gamma$
$> 0$	$\arctan \frac{\sqrt{(x')^2 + (y')^2}}{H'}$
$= 0$	$90^\circ$
$< 0$	$180^\circ + \arctan \frac{\sqrt{(x')^2 + (y')^2}}{H'}$

Після визначення кутів  $C$  і  $\gamma$  за отриманими значеннями, з використанням таблиці сили світла та відповідних інтерполяційних залежностей обчислюють шукане значення  $I(C, \gamma)$  у розрахунковій точці.

Інтерполяція таблиці сили світла.

Значення сили світла  $I(C, \gamma)$  для напрямків, які не відповідають вузловим значенням кутів, наведеним у таблиці сили світла, визначають методом інтерполяції між табличними значеннями  $I(C_i, \gamma_j)$ . Розрахунок сили світла для напрямку, що задається кутами  $C$  і  $\gamma$ , які знаходяться в межах інтервалів відповідних табличних значень, здійснюється на основі інтерполяційних формул.

$$C_i \leq C \leq C_{i+1}, i = 1, 2, \dots, m - 1,$$

$$\gamma_j \leq \gamma \leq \gamma_{j+1}, j = 1, 2, \dots, n - 1,$$

використовують наступні формули:

$$I(C, \gamma) = I(C, \gamma_j) - K_\gamma [I(C, \gamma_j) - I(C, \gamma_{j+1})], \quad (2.7)$$

$$\text{де } K_\gamma = \frac{\gamma_j - \gamma}{\gamma_j - \gamma_{j+1}},$$

$$I(C, \gamma_j) = I(C_i, \gamma_j) - K_C [I(C_i, \gamma_j) - I(C_{i+1}, \gamma_{j+1})],$$

$$I(C, \gamma_{j+1}) = I(C_i, \gamma_{j+1}) - K_C [I(C_i, \gamma_{j+1}) - I(C_{i+1}, \gamma_{j+1})],$$

$$K_C = \frac{C_i - C}{C_i - C_{i+1}}.$$

Значення яскравості ДП, створюваної одним ОП у розрахунковій точці, яку бачить спостерігач у стандартних умовах спостереження, визначається як

$$L_{11} = \frac{I(C, \gamma) \cdot \Phi \cdot r(\beta, \varepsilon)}{K_3 \cdot H^2} \text{ [кд/м}^2\text{]}, \quad (2.8)$$

де  $I(C, \gamma)$  – сила світла ОП в напрямку розрахункової точки, обумовленому кутами  $C$  і  $\gamma$  в системі координат ОП [кд/клм];

$\Phi$  – сумарний світловий потік ДС в ОП [клм];

$r(\beta, \varepsilon)$  – табличне значення редукованого коефіцієнта яскравості ДП при падінні променя світла від ОП у розрахункову точку під кутом  $\varepsilon$  до поверхні ДП у стандартних умовах спостереження, при цьому площа падіння повернута відносно площини спостереження на кут  $\beta$  [стер<sup>-1</sup>];

$K_3$  – коефіцієнт запасу;

$H$  – висота ОП над розрахунковою площиною [м].

У додатку А наведені значення скороченого коефіцієнта яскравості, помножені на  $10^4$ , які подані як функції стандартизованих аргументів  $\beta$  та  $\text{tg } \varepsilon$  для двох типів дорожнього покриття. Ці дані отримані шляхом перерахунку відповідних значень коефіцієнта яскравості.

Сумарна яскравість дорожнього покриття в розрахунковій точці  $P$ , сформована у напрямку спостерігача сукупністю з  $n$  освітлювальних приладів, визначається як алгебраїчна сума внесків яскравості  $L_i$ , створених кожним  $i$ -тим освітлювальним приладом.

$$L_P = \sum_{i=1}^n L_i. \quad (2.9)$$

У поздовжньому напрямку межі розрахункового поля визначаються кроком  $S$  між освітлювальними приладами, що встановлені в одному ряді. Спостерігач при цьому розміщується на відстані 60 м перед першим освітлювальним приладом (рис. 2.3). У випадку наявності кількох рядів освітлювальних приладів з різними значеннями кроку розрахункове поле формується відносно того ряду, для якого характерний найбільший крок.

У поперечному напрямку розрахункове поле обмежується шириною проїзної частини  $W_r$  в одному напрямку руху.

Розрахункові точки рівномірно розміщуються по всій площі розрахункового поля як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках (рис. 2.4). Кількість розрахункових точок та відстань між ними визначаються відповідно до такого правила:

– у поздовжньому напрямку: якщо  $S \leq 30$  м, то число точок  $N_1$  дорівнює 10, якщо  $S > 30$  м, то  $N_1$  дорівнює такому найменшому цілому числу, при якому крок між точками  $D_1 = S / N_1 \leq 3$  м. При цьому крайні точки відстоять від границь розрахункового поля на відстані  $D_1/2$ ;

– у поперечному напрямку: число точок дорівнює 3 на кожну смугу руху шириною  $W_L$ . Крок дорівнює  $D_2 = W_L/3$ , а крайні точки відстоять від границь смуги на відстані  $D_2/2$ . Загальне число точок при числі смуг  $N_L$  дорівнює  $N_2 = 3 \cdot N_L$ .

По всьому розрахунковому полю загальне число розрахункових точок дорівнює  $N = N_1 \cdot N_2$ .

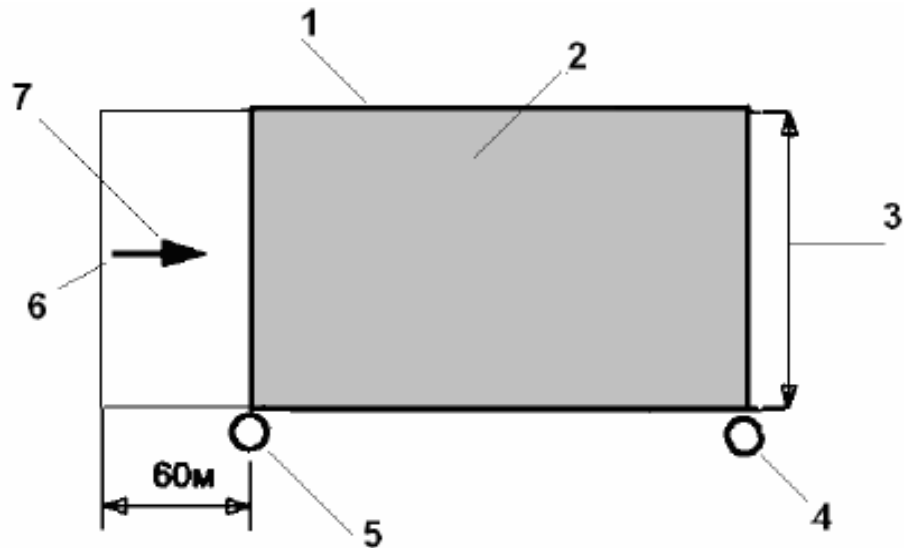


Рисунок 2.3 – Розрахункове поле для яскравості: 1 – границя проїзної частини (в одному напрямку руху); 2 – розрахункове поле; 3 – ширина проїзної частини (в одному напрямку руху); 4 і 5 – сусідні ОП; 6 – спостерігач; 7 – напрямок спостереження.

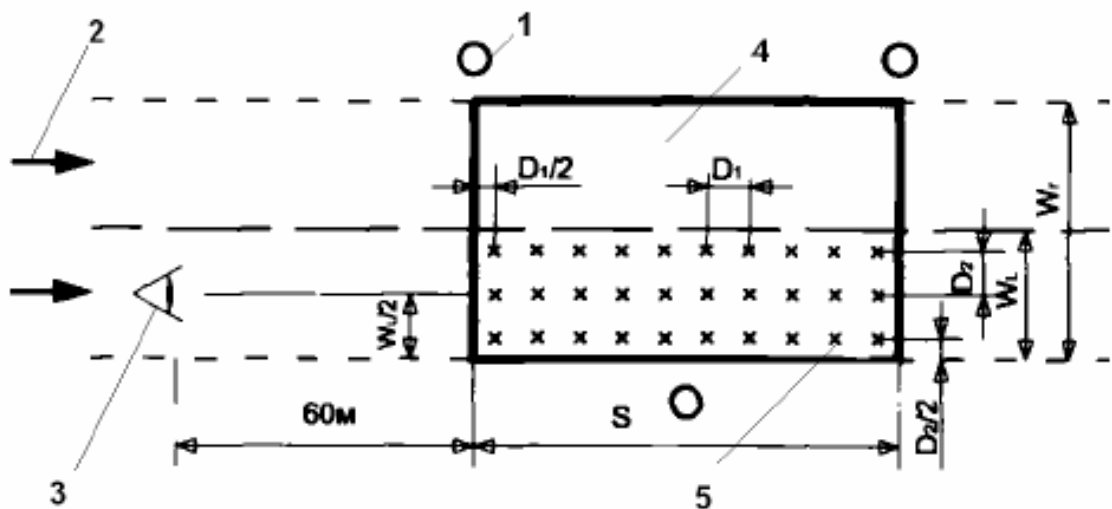


Рисунок 2.4 – Розташування розрахункових точок у розрахунковому полі (показано тільки по одній смузі руху): 1 – ОП; 2 – напрямок руху; 3 – спостерігач; 4 – розрахункове поле; 5 – розрахункові точки.

Для узбіч із асфальтобетонним покриттям порядок визначення кількості та схеми розташування розрахункових точок приймається таким самим, як і для проїзної частини.

Спостерігач послідовно розміщується на осьовій лінії кожної смуги руху в точці, що знаходиться на відстані 60 м від найближчої межі розрахункового поля, при цьому висота положення ока спостерігача фіксується на рівні 1,5 м над поверхнею дорожнього покриття.

Під час розрахунку яскравості до уваги беруться лише ті освітлювальні прилади, які знаходяться в межах прямокутної області, визначеної відносно розрахункової точки (рис. 2.5). Геометричні розміри цієї області встановлюються залежно від висоти  $H$  розміщення освітлювальних приладів над поверхнею дороги.

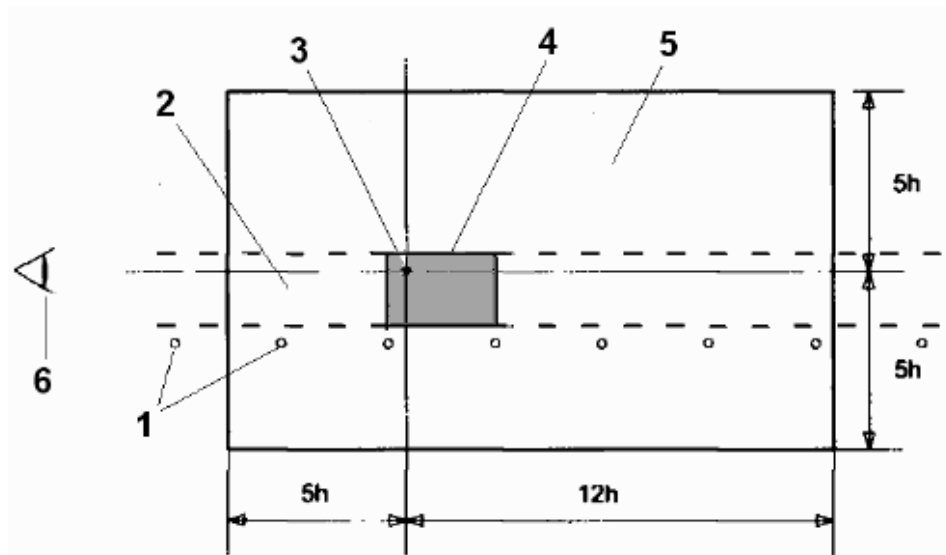


Рисунок 2.5 – Область ОП, які враховують у розрахунку яскравості: 1 – ОП; 2 – проїзна частина; 3 – розрахункова точка; 4 – розрахункове поле; 5 – область ОП, які враховують у розрахунку; 6 – спостерігач.

У цьому розділі розглядаються три види освітленості: горизонтальна, напівциліндрична і вертикальна.

У наведених нижче формулах для розрахунку вказаних видів освітленостей у розрахунковій точці від одного ОП використані такі параметри:

$I(C, \gamma)$  – сила світла ОП у напрямку розрахункової точки, обумовленому кутами  $C$  і  $\gamma$  у системі координат ОП [кд/кلم];

$\Phi$  – сумарний світловий потік ламп в ОП [кلم];

$\varepsilon$  – кут падіння променя світла від ОП у розрахункову точку [рад];

$\alpha$  – кут між вертикальною площиною, що містить падаючий луч від ОП у розрахункову точку, і базисною вертикальною площиною, перпендикулярною до вертикальної площини напівциліндра (для напівциліндричної освітленості, рис. 5.5) або до вертикальної розрахункової площини (для вертикальної освітленості, рис. 5.6), і орієнтованою уздовж основного руху пішоходів (для доріг це напрямок руху транспорту);

$H$  – висота ОП над площиною ДП [м];

$K_3$  – коефіцієнт запасу.

Горизонтальна освітленість (на рівні ДП):

$$E_{\text{гор}} = \frac{I(C, \gamma) \cdot \Phi \cdot \cos(\varepsilon)^3}{K_3 \cdot H^2} \text{ [лк]}. \quad (2.10)$$

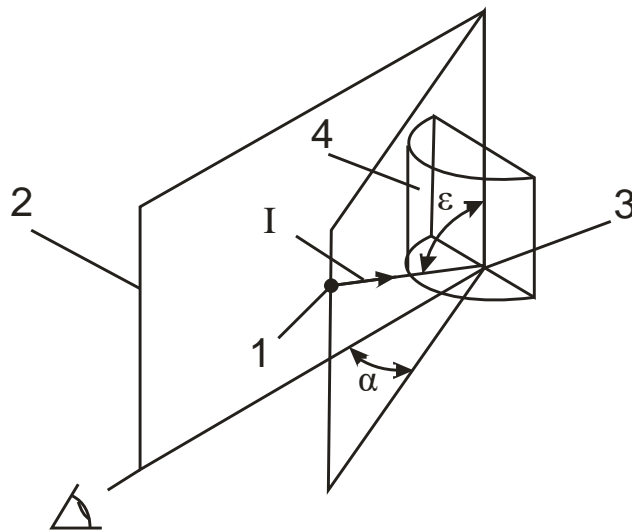


Рисунок 2.6 – До розрахунку напівциліндричної освітленості: 1 – ОП; 2 – базисна вертикальна площина, перпендикулярна до вертикальної площини напівциліндра; 3 – розрахункова точка.

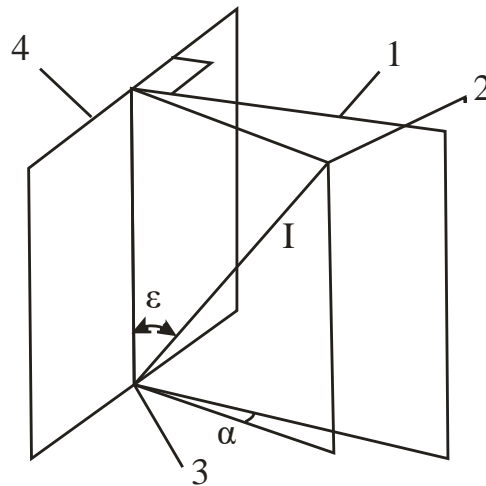


Рисунок 2.7 – До розрахунку вертикальної освітленості: 1 – базисна вертикальна площина, перпендикулярна до вертикальної освітлюваної площини 4; 2 – ОП; 3 – розрахункова точка.

Напівциліндрична освітленість (на рівні 1,5 м над ДП):

$$E_{\text{нпц}} = \frac{I(C, \gamma) \cdot \Phi \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot (1 + \cos \alpha)}{\pi \cdot K_3 \cdot (H - 1,5)^2} \text{ [лк]}. \quad (2.11)$$

Вертикальна освітленість (на рівні 1,5 м над ДП):

$$E_{\text{вер}} = \frac{I(C, \gamma) \cdot \Phi \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \cos \alpha}{K_3 \cdot (H - 1,5)^2} \text{ [лк]}. \quad (2.12)$$

Розрахункове поле, а також кількість і схема розміщення розрахункових точок у поздовжньому напрямку встановлюються за тим самим принципом, що й під час виконання розрахунку яскравості. У поперечному напрямку кількість розрахункових точок  $N_2$  визначається таким чином: якщо ширина розрахункового поля  $W_r \leq 4,5$  м, то число точок  $N_2$  дорівнює 3, якщо  $W_r > 4,5$  м, то  $N_2$  дорівнює такому найменшому цілому числу, при якому крок  $D_2 = W_r / N_2 \leq 1,5$  м. При цьому крайні точки відстоять від границь розрахункового поля на відстані  $D_2/2$ .

Значення сумарної освітленості в розрахунковій точці Р, створюваною сукупністю  $n$  ОП, визначається сумою внесків освітленості  $E_i$  від кожного  $i$ -го ОП, тобто

$$E_P = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (2.13)$$

Під час розрахунку горизонтальної освітленості враховуються лише ті  $n$  освітлювальних приладів, які знаходяться в межах області, обмеженої колом із центром у розрахунковій точці та радіусом, що дорівнює  $5H$ , де  $H$  — висота встановлення освітлювального приладу над освітлюваною поверхнею. Для розрахунку напівциліндричної та вертикальної освітленостей зазначена область має вигляд півкола того ж радіуса, орієнтованого відповідно до напрямку базисної вертикальної площини.

У випадках, коли освітлювана ділянка характеризується нестандартною геометричною формою, вибір розрахункових точок здійснюється таким чином: цю ділянку вписують у прямокутник, у межах якого формують сітку розрахункових точок за правилами, що застосовуються для ділянок зі стандартною геометрією. У подальших розрахунках враховуються лише ті точки, які розташовані безпосередньо в межах освітлюваної області. За нерівномірного розміщення освітлювальних приладів крок між ними не завжди можливо узгодити з відстанню між розрахунковими точками, тому схема розташування точок може бути довільною, проте в будь-якому випадку відстань між сусідніми точками не повинна перевищувати 1,5 м як у поздовжньому, так і в поперечному напрямках.

Орієнтація базисної вертикальної площини під час визначення напівциліндричної та вертикальної освітленостей має обиратися з урахуванням основного функціонального призначення відповідних пішохідних зон.

Нормовані показники, що стосуються яскравості або освітленості, повинні визначатися безпосередньо у вузлах розрахункової сітки без застосування подальшої інтерполяції. Виняток становить ситуація, коли вузли розрахункової сітки не співпадають з осью лінією смуги руху під час визначення поздовжньої рівномірності яскравості. У такому разі на осевих лініях додатково задаються розрахункові точки за тим самим принципом, що й при формуванні точок у поздовжньому напрямку.

Під час визначення початкових значень середньої яскравості та освітленості коефіцієнт запасу приймається рівним 1, тоді як для встановленого строку експлуатації він береться рівним нормованому значенню.

Обчислення наведених нижче параметрів виконують за умови розміщення спостерігача на кожній окремій смузі руху.

Середня яскравість  $L_{\text{сер}}$  визначається як середнє арифметичне значень яскравості у вузлах сітки розрахункового поля за умови розташування спостерігача на осьовій лінії відповідної смуги руху:

$$L_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N L_k. \quad (2.14)$$

де  $L_k$  — яскравість [кд/м<sup>2</sup>] ДП в  $k$ -й розрахунковій точці поля від всіх ОП, що беруть участь у розрахунку;

$N$  – кількість розрахункових точок у розрахунковому полі.

Загальна рівномірність  $U_0$  визначається як відношення найменшого значення яскравості  $L_{\text{мін}}$  у вузлах сітки розрахункового поля до значення середньої яскравості  $L_{\text{сер}}$  при розташуванні спостерігача на осьовій лінії смуги руху:

$$U_0 = \frac{L_{\text{мін}}}{L_{\text{сер}}}. \quad (2.15)$$

Поздовжня рівномірність  $U_1$  визначається як відношення найменшого  $L_{\text{мін}}$  до найбільшого  $L_{\text{макс}}$  значень яскравості в розрахункових точках розрахункового поля, розташованих уздовж осьовий лінії смуги руху, при розташуванні спостерігача на цій же осьовій лінії:

$$U_1 = \frac{L_{\text{мін}}}{L_{\text{макс}}}. \quad (2.16)$$

Вказані нижче параметри стосуються всіх розглянутих в даних методичних вказівках видів освітленості: горизонтальної, напівциліндричної та вертикальної. Середня освітленість  $E_{\text{сер}}$  визначається як середнє арифметичне значень освітленості у вузлах розрахункової сітки:

$$E_{\text{сєр}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N E_k. \quad (2.17)$$

де  $E_k$  – освітленість [лк] в  $k$ -ої розрахунковій точці поля від всіх ОП, що враховують у розрахунку (див. п. 5.2.2.1);

$N$  – кількість розрахункових точок у розрахунковому полі (див. п. 5.2.2.1).

Мінімальна освітленість  $E_{\text{мін}}$  визначається як найменше значення освітленості у вузлах розрахункової сітки.

Загальна рівномірність  $U_0(E)$  визначається відношенням найменшого значення освітленості у вузлах розрахункової сітки  $E_{\text{мін}}$  до значення середньої освітленості  $E_{\text{сєр}}$ :

$$U_0(E) = \frac{E_{\text{мін}}}{E_{\text{сєр}}}. \quad (2.18)$$

Проведемо розрахунок для всіх розрахункових точок.

Вхідні дані:

$R=3$  м;

Кількість полос руху: 2;

Категорія об'єкта за освітленням: А;

Найбільша інтенсивність руху транспорту в обох напрямках: 5600 од/год;

Тип дорожнього покриття: дрібнозернисте асфальтобетонне;

Схема розташування світильників: схема 1.

Виконаємо обчислення. За категорією вулиці та найбільшою інтенсивністю руху транспорту в обох напрямках за додатком Е визначаємо нормовані показники:

$$L_n = 2 \text{ кд/м}^2, \quad E_n = 20 \text{ лк}$$

Приймаємо освітлювальний пристрій. Світильник: Philips SGS254GB із SON-PP250W,  $\Phi_{\text{л}} = 31100$  лм,  $P_{\text{св}} = 274$  Вт.

Для даного ОП рекомендована висота опор 10–12 м. Приймаємо висоту опор  $H = 10$  м. Довжина консолі опор  $a=0,3$  м.

Приймаємо відстань між опорами з діапазону  $(2 \div 4) H$ .

$$D = 40 \text{ м.}$$

Розрахункове поле зображено на рисунку 2.8.

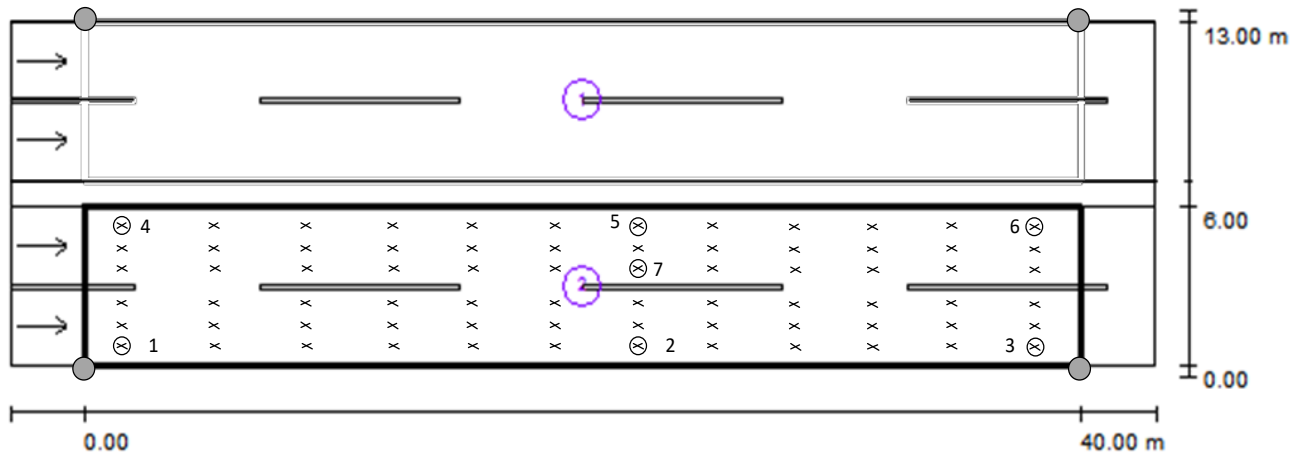


Рисунок 2.8 – Розрахункове поле

Кількість розрахункових точок в поздовжньому напрямі – 13, в поперечному – 6. Оскільки розрахунок виконується вручну оберемо 7 точок, які на рисунку позначені числами від 1 до 7.

Виконаємо світлотехнічний розрахунок для точки 1. Її координати (1,5; 0,5).

Розглянемо перший освітлювальний пристрій. Його координати з урахуванням довжини консолі (0;0,3).

Координатні відстані між розрахунковою точкою і ОП визначаються як

$$x = x_p - x_i = 1,5 - 0 = 1,5 \text{ м;}$$

$$y = y_p - y_i = 0,5 - 0,3 = 0,2 \text{ м.}$$

Розрахуємо допоміжні параметри  $x'$ ,  $y'$  і  $H'$  у системі координат ОП:

$$x' = 1,5(\cos 20^\circ \cos 0^\circ - \sin 20^\circ \sin 0^\circ \sin 0^\circ) + 0,2(\sin 20^\circ \cos 0^\circ + \cos 20^\circ \sin 0^\circ \sin 0^\circ) + 10 \cos 0^\circ \sin 0^\circ = 1,43 \text{ м;}$$

$$y' = -1,5 \sin \nu \cos 0^\circ + 0,2 \cos \nu \cos 0^\circ - 10 \sin 0^\circ = -0,44 \text{ м;}$$

$$H' = -1,5(\cos 20^\circ \sin 0^\circ + \sin 20^\circ \sin 0^\circ \cos 0^\circ) - 0,2(\sin 20^\circ \sin 0^\circ - \cos 20^\circ \sin 0^\circ \cos 0^\circ) + 10 \cos 0^\circ \cos 0^\circ = 10 \text{ м.}$$

Розраховуємо азимутальний кут  $C$  у системі координат ОП

$$C = 360^\circ + \arctan\left(\frac{-0,44}{1,43}\right) = 342,81^\circ.$$

Розраховуємо полярний кут  $\gamma$  у системі координат ОП

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sqrt{1,43^2 + (-0,44)^2}}{10}\right) = 8,53^\circ.$$

Далі для знайдених кутів  $C$  і  $\gamma$ , використовуючи ТСС і відповідні інтерполяційні формули, визначають шукане значення  $I(C, \gamma)$  у розрахунковій точці за додатком Е, для обраного світильника.

$$I(C, \gamma) = 0,118 \text{ кд/кЛМ.}$$

Знаходимо табличне значення редукованого коефіцієнта яскравості ДП при падінні променя світла від ОП у розрахункову точку під кутом  $\varepsilon$  до поверхні ДП у стандартних умовах спостереження за додатком Е.

$$r(\beta, \varepsilon) = 318 \cdot 10^{-4} \text{ стер}^{-1}.$$

Значення яскравості ДП, створюваної одним ОП у розрахунковій точці, яку бачить спостерігач у стандартних умовах спостереження:

$$L_{11} = \frac{0,118 \cdot 31100 \cdot 318 \cdot 10^{-4}}{1,3 \cdot 10^2} = 0,905 \text{ кд/м}^2,$$

де  $K_3=1,3$  – коефіцієнт запасу.

Горизонтальна освітленість (на рівні ДП):

$$E_{11} = \frac{0,118 \cdot 31100 \cdot \cos(8,53^\circ)^3}{1,3 \cdot 10^2} = 27,526 \text{ лк.}$$

Розрахунок для інших ОП для точки 1 зведемо в таблицю 2.6

Значення сумарної яскравості ДП у розрахунковій точці 1

$$L_1 = \sum_{i=1}^{10} L_{1i} = 1,982 \text{ кд/м}^2.$$

Таблиця 2.6 – Розрахунок світлотехнічних параметрів для точки 1

№	$x_i$	$y_i$	$X$	$Y$	$x'$	$y'$	$H'$	$C$	$\gamma$	$I(C, \gamma)$	$r(\beta, \epsilon)$	$L, \text{ кд/м}^2$	$E, \text{ лк}$
1	0	0,5	1,5	0	1,43	-0,44	10	342,81	8,53	118,97	318	0,905	27,52
2	40	0,5	-38,5	0	-36,78	11,38	10	162,81	75,44	103,29	54	0,133	0,393
3	80	0,5	-78,5	0	-74,99	23,20	10	162,81	82,74	52,59	8	0,010	0,025
4	120	0,5	-118,5	0	-113,2	35,02	10	162,81	85,18	35,67	2	0,002	0,005
5	-40	0,5	41,5	0	39,65	-12,26	10	342,81	76,45	61,54	5	0,007	0,189
6	0	11,5	1,5	-11	-1,82	-10,95	10	260,58	47,99	96,17	141	0,324	6,897
7	40	11,5	-38,5	-11	-40,03	0,87	10	178,76	75,98	97,68	118	0,276	0,332
8	80	11,5	-78,5	-11	-78,24	12,69	10	170,79	82,81	51,62	13	0,016	0,024
9	120	11,5	-118,5	-11	-116,4	24,51	10	168,11	85,20	35,31	2	0,002	0,005
10	-40	11,5	41,5	-11	36,40	-22,77	10	327,97	76,89	43,20	5	0,005	0,121

Значення сумарної освітленості в розрахунковій точці

$$E_1 = \sum_{i=1}^{10} E_{1i} = 41,729 \text{ лк.}$$

Розрахунок для інших розрахункових точок зведемо в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахунок світлотехнічних параметрів

№	$x_p$	$y_p$	$L$ , кд/м <sup>2</sup>	$E$ , лк
1	1,5	0,5	1,982	41,730
2	19,5	0,5	2,078	11,785
3	37,5	0,5	2,108	43,417
4	1,5	5,5	2,366	56,561
5	19,5	5,5	2,008	13,172
6	37,5	5,5	2,677	62,218
7	19,5	2,5	2,055	12,477

Середня яскравість  $L_{\text{сеп}}$  визначається як середнє арифметичне значень яскравостей у вузлах сітки розрахункового поля

$$L_{\text{сеп}} = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 L_k = 2,182 \text{ кд/м}^2.$$

Загальна рівномірність

$$U_0 = \frac{1,982}{2,182} = 0,909.$$

Поздовжня рівномірність

$$U_1 = \frac{1,982}{2,677} = 0,741.$$

Середня освітленість

$$E_{\text{сеп}} = \frac{1}{7} \sum_{k=1}^7 E_k = 34,48 \text{ лк.}$$

Бачимо, що всі отримані значення задовольняють норми.

Окрім наведеного аналітичного світлотехнічного розрахунку, оцінку параметрів зовнішнього освітлення проїзної частини магістральної вулиці можна також здійснити спрощеним методом із використанням онлайн-калькуляторів.

Для цього може бути застосований онлайн-калькулятор вуличного освітлення, доступний на веб-ресурсі [39].

Зазначений калькулятор дозволяє виконати попередній або перевірочний розрахунок освітленості на основі основних вихідних параметрів, таких як категорія дороги, схема розташування опор, висота встановлення світильників, відстань між опорами та тип дорожнього покриття. Використання даного інструменту дає змогу швидко отримати орієнтовні значення освітленості без виконання повного ручного світлотехнічного розрахунку. На рисунку 2.9 наведено розрахунок освітленості за допомогою онлайн-калькулятора.

**Калькулятор наружного освещения**

Класс дороги:  
Класс А — магистраль

Длина улицы (м):  
100

Схема размещения опор:  
С двух сторон

Высота опоры освещения (м):  
10 м — дорога В

Шаг установки (м):  
40 м — при высоте от 10 м

**Рассчитать**

**Тип светильника:** LED, 90 Вт

**Количество опор:** 5 шт.

**Суммарная мощность:** 450 Вт

**Средняя освещённость:** 22.50 лк

**Норма:** 20 лк (класс А)

Рисунок 2.9 – Інтерфейс та результати розрахунку освітленості за допомогою онлайн-калькулятора вуличного освітлення

Одним із ключових параметрів для адаптивного керування освітленням є фактична інтенсивність руху на певній ділянці. Для аналізу роботи системи було використано статистичні дані про середню інтенсивність руху автомобілів у місті Києві протягом доби. На рисунку 2.10 наведено графік добового розподілу трафіку.

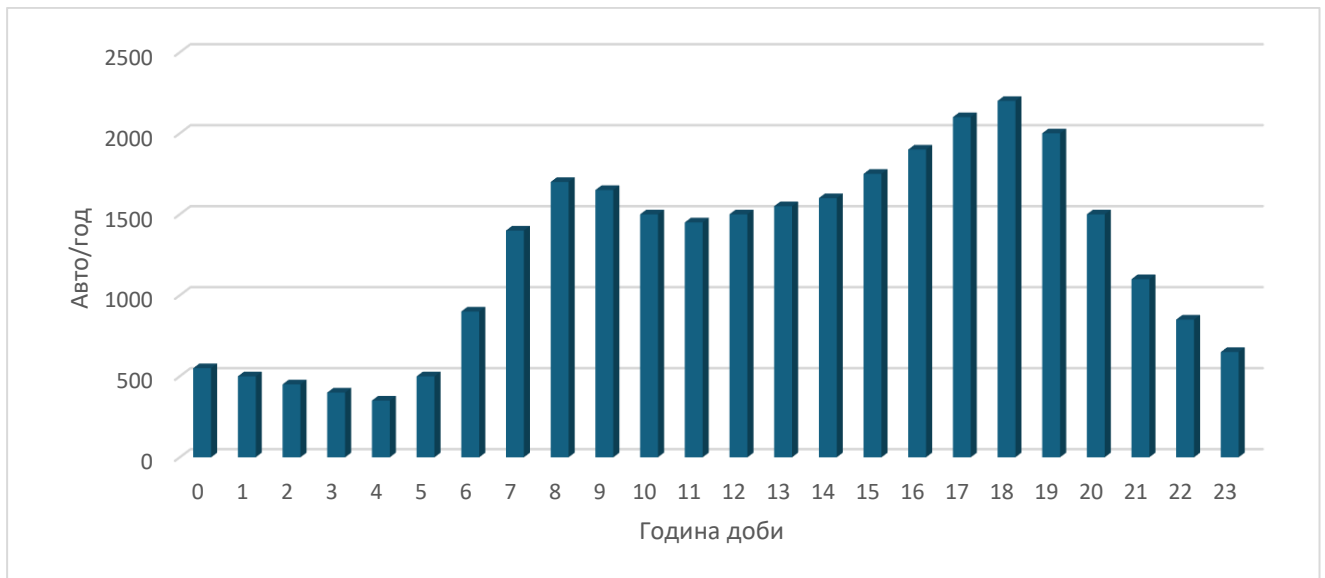


Рисунок 2.10 – Графік добового розподілу трафіку м. Києва

Аналіз графіка показує, що інтенсивність руху має виражений добовий характер:

- мінімальні значення (300–500 авто/год) спостерігаються у нічний час (0:00–5:00);
- після 7:00 інтенсивність різко зростає та досягає значень 1500–1800 авто/год;
- пікові навантаження фіксуються у проміжку 17:00–19:00 і перевищують 2000 авто/год;
- після 21:00 спостерігається поступове зниження до 800–900 авто/год.

Ця інформація дозволяє визначити рівні димування [31] світильників залежно від реального трафіку.

Розрахунок рівнів освітленості в адаптивних системах вуличного освітлення базується на принципі змінної яскравості світильників відповідно до інтенсивності руху. Це дозволяє зменшити енергоспоживання в періоди низького трафіку,

забезпечуючи водночас нормативний рівень безпеки для учасників дорожнього руху.

Для визначення нормативного освітлення відповідно до завантаженості трафіку доріг необхідно скористатися ДБН В.2.5-28:2018. Таблиця, що описує відповідні норми наведена в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Необхідні значення яскравості і освітленості дорожнього покриття вулиць і доріг [3]

Категорія вулиць	Найменування об'єкта	Найбільша інтенсивність руху в обох напрямках, од./год.	Середня яскравість покриття L, кд/м <sup>2</sup>	Середня горизонтальна освітленість покриття, лк
А	Магістральні дороги, магістральні вулиці загальноміського значення	Понад 3000	1,6	20
		Від 1000 до 3000	1,2	20
		Від 500 до 1000	0,8	15
Б	Магістральні вулиці районного значення	Понад 2000	1,0	15
		Від 1000 до 2000	0,8	15
		Від 500 до 1000	0,6	10
		Менше 500	0,4	10
В	Вулиці та дороги місцевого значення	500 і більше	0,4	8
		Менше 500	0,3	6

Розглянемо часовий інтервал доби з 20:00 до 21:00. Згідно з даними графіка, інтенсивність дорожнього руху у цей період становить близько 1500 автомобілів за годину. Припускаючи, що досліджуваний об'єкт є магістральною автомобільною дорогою, відповідно до вимог таблиці 2.3 нормативне значення середньої горизонтальної освітленості проїзної частини має бути не меншим ніж 20 лк.

Для визначення режимів димування використовуються такі величини:

- $E_{norm}$  – нормативна освітленість для даної категорії дороги;
- $I_{(t)}$  – інтенсивність трафіку в конкретний момент часу;

- $I_{\max}$  – максимальна інтенсивність трафіку на даній ділянці;
- $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність світильника;
- $D$  – ступінь димування у відсотках (%).

Залежно від  $I_{(t)}$  визначається, який рівень освітленості необхідно забезпечити. Для спрощеної моделі використовується лінійна або ступінчата залежність між інтенсивністю руху та рівнем димування.

$$D = \frac{I_{(t)}}{I_{\max}} \cdot 100\% \quad (2.19)$$

$$E = D \cdot E_{\text{norm}} \quad (2.20)$$

Така модель застосовується у системах, де яскравість змінюється плавно.

Ступінчата модель, яка поширена у Smart Lighting набуває наступного вигляду:

$$D = \begin{cases} 20\%, & I_{(t)} < 10\% \\ 40\%, & 10\% \leq I_{(t)} < 30\% \\ 70\%, & 30\% \leq I_{(t)} < 60\% \\ 100\%, & I_{(t)} < 10\% \end{cases}$$

Відповідні рівні освітленості:

$$E = D \cdot E_{\text{norm}} \quad (2.21)$$

На основі інтенсивності руху система автоматично перемикає режими:

- Режим 1 – мінімальний (20 %)

Застосовується вночі або при майже відсутньому русі. Забезпечує базову навігаційну освітленість.

- Режим 2 – помірний (40 %)

Використовується при періодичних пересуваннях пішоходів або поодинокому транспорту.

- Режим 3 – підвищений (70 %)

Вмикається при стабільному русі середньої інтенсивності.

- Режим 4 – повний (100 %)

Забезпечує нормативну освітленість при інтенсивному трафіку та у пікові години.

Такі режими дозволяють знизити енергоспоживання на 40–70 % у порівнянні з постійним максимальним освітленням.

Проведемо розрахунок. Нормативна освітленість для розрахованої ділянки доріг становить:

$$E_{norm} = 20 \text{ лк}$$

Припустимо, що максимальна інтенсивність руху становить 3000 автомобілів на годину. Тоді поточна інтенсивність руху, буде :

$$I_{(t)} = 50\% \cdot I_{max}$$

Згідно з ступінчатою моделлю:

$$D = 70\%$$

$$E = 0,70 \cdot 20 = 14 \text{ лк}$$

Тобто освітленість зменшується до рівня, який все ще забезпечує комфортне орієнтування при невеликому русі.

## **Висновки до розділу 2**

У другому розділі досліджено принципи побудови та функціонування адаптивної системи вуличного освітлення з урахуванням змінної інтенсивності транспортних і пішохідних потоків. Проведений аналіз підтвердив, що добова, тижнева та сезонна нерівномірність трафіку створює умови, за яких використання фіксованих режимів освітлення є енергетично неефективним і не відповідає сучасним вимогам сталого розвитку міської інфраструктури.

Розглянуті методи визначення інтенсивності руху, зокрема сенсорні технології, відеоаналітика та радарні системи, дозволяють отримувати достатньо

точні дані для автоматизованого керування освітленням у режимі реального часу. Моделювання трафіку з використанням фізичних та приведених одиниць дало змогу формалізувати зміну навантаження на дорожню мережу та використати ці дані для побудови алгоритмів регулювання яскравості світильників.

Запропонований підхід до керування освітленням базується на поєднанні нормативних вимог до рівнів освітленості з поточними або прогнозними значеннями інтенсивності руху. Використання коефіцієнтів коригування, що враховують час доби та характер трафіку, дозволяє формувати гнучкі сценарії освітлення, які забезпечують мінімально допустимий рівень світла у періоди низької активності та повну освітленість у години пікового навантаження.

Результати моделювання режимів роботи адаптивної системи показали, що застосування знижених рівнів яскравості у нічні години та періоди низького трафіку не призводить до погіршення умов безпеки за умови дотримання вимог ДБН. Водночас такий підхід забезпечує істотне скорочення споживання електроенергії та зменшення експлуатаційних витрат.

Порівняльний аналіз традиційної та адаптивної систем освітлення на прикладі міської магістралі продемонстрував значний потенціал енергозбереження при використанні динамічних режимів роботи світильників. Це підтверджує доцільність впровадження адаптивних систем як з економічної, так і з технічної точки зору, особливо в умовах зростання тарифів на електроенергію та нестабільного електропостачання.

## 3 ПРОЄКТ ТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ

### 3.1 Формування технічних вимог до системи

Сучасні міські освітлювальні системи традиційного типу (натрієві або флуоресцентні лампи) працюють у фіксованому режимі протягом усієї ночі, що призводить до значного енергоспоживання, підвищення витрат на електроенергію та неефективного використання інфраструктури. У багатьох випадках фактична потреба у світлі знижується у нічні години через низьку інтенсивність транспортного руху та відсутність пішоходів, проте класичні системи продовжують працювати на повну потужність.

Адаптивна система вуличного освітлення вирішує цю проблему, автоматично регулюючи світловий потік залежно від реальної ситуації на вулиці. Основна мета її впровадження – забезпечити оптимальне співвідношення безпеки, комфорту та економії енергії, знижуючи витрати на електроенергію та покращуючи екологічні показники міста.

Основні технічні вимоги до системи:

1. Автономне виявлення руху. Кожна опора повинна мати сенсори та відеомодуль, що дозволяють у режимі реального часу визначати присутність транспортних засобів (автомобілі, мотоцикли, велосипеди) та пішоходів. Це забезпечує можливість адаптивного керування світлом, включаючи автоматичне збільшення яскравості у зоні руху.

2. Динамічне регулювання яскравості. Система повинна підтримувати плавне зменшення освітленості до мінімально допустимого рівня у разі відсутності руху та автоматичне збільшення до оптимального рівня при появі об'єктів. Це дозволяє досягати значного зниження енергоспоживання без шкоди для безпеки учасників руху.

3. Відповідність нормативам. Мінімальні та максимальні рівні освітленості повинні відповідати державним стандартам для вуличного освітлення та нормам

безпеки. При проектуванні враховується вид дорожнього полотна, інтенсивність руху та погодні умови, що впливають на видимість.

4. Енергозбереження та екологічність. Основним критерієм є зменшення енергоспоживання порівняно з традиційними системами на 40–80%, залежно від інтенсивності руху та конфігурації мережі. Використання LED-технологій, енергоефективних драйверів та інтелектуального керування дозволяє знизити викиди CO<sub>2</sub> та світлове забруднення.

5. Бездротовий зв'язок та інтеграція в IoT. Опори повинні об'єднуватися у mesh-мережу з використанням ZigBee/LoRa, що забезпечує обмін командами та даними між опорами та центральним сервером. Важливо, щоб мережа була надійною, масштабованою та захищеною від сторонніх втручань.

6. Віддалене керування та моніторинг. Через веб-платформу та мобільний додаток адміністрація повинна мати змогу встановлювати графіки освітлення, контролювати стан кожної опори, отримувати статистику енергоспоживання та аварійних подій, оперативно реагувати на надзвичайні ситуації.

7. Відмовостійкість. Система повинна мати режим роботи за умов втрати зв'язку або виходу з ладу окремих компонентів, у якому світильники переходять на мінімальний безпечний рівень освітленості, забезпечуючи безпеку руху.

8. Масштабованість та гнучкість конфігурації. Архітектура системи повинна дозволити додавання нових опор, зміну зон контролю, інтеграцію нових датчиків та інших сервісів (наприклад, моніторинг довкілля, відеоспостереження) без перебудови мережі.

Встановлення технічних вимог до адаптивної системи вуличного освітлення є надзвичайно важливим етапом проектування, оскільки саме вони визначають, яким чином система буде виконувати свої функції, реагувати на різні умови та забезпечувати ефективне використання ресурсів. Чітко сформульовані вимоги гарантують зниження витрат на електроенергію та обслуговування, оскільки система здатна автоматично регулювати освітлення відповідно до фактичного руху транспортних засобів і пішоходів, а також погодних умов. Крім того, такі вимоги роблять систему готовою до інтеграції у концепцію «розумного міста», де

освітлювальна інфраструктура є частиною IoT-мережі, що дозволяє збирати, аналізувати та обмінюватися даними для подальшого підвищення ефективності та функціональності міських сервісів.

Після визначення основних технічних вимог важливим етапом є визначення режимів роботи адаптивної системи вуличного освітлення. Кожен режим відповідає конкретній ситуації на вулиці та визначає, як система буде регулювати освітленість, пріоритети безпеки та рівень енергоспоживання. Це дозволяє не лише економити енергію, а й забезпечувати належний рівень освітлення відповідно до фактичних потреб, реагувати на аварійні ситуації, погодні умови та підвищену активність на дорогах. Нижче наведена узагальнена таблиця основних сценаріїв роботи системи, їхніх характеристик та цілей.

Таблиця 3.1 – Основні сценарії роботи системи освітлення

Сценарій роботи	Призначення	Характеристики	Особливості
Нічний режим	Оптимальне освітлення залежно від руху	Мінімальна яскравість при відсутності руху, автоматичне збільшення при появі транспортних засобів або пішоходів	Плавна зміна яскравості, врахування погодних умов, максимальне енергозбереження
Денний режим	Моніторинг та збір даних	Світильники вимкнені, сенсори та відеокамери працюють у повному режимі	Дані передаються на сервер для прогнозування руху та налаштування нічного режиму
Аварійний режим	Безпека при відмові системи	Фіксоване мінімальне освітлення, відсутня динамічна зміна	Вмикається при втраті зв'язку або виході з ладу компонентів, повідомлення на сервер і мобільний додаток

Продовження таблиці 3.1

Підвищена активність	Додаткове освітлення при високому ризику	Автоматичне збільшення яскравості при високому трафіку або складних погодних умовах	Можливість формування динамічних зон освітлення, активуються додаткові сенсори і камери
----------------------	--	---	---

Кожен із зазначених сценаріїв забезпечує відповідний рівень освітлення та оптимальне енергоспоживання залежно від умов на вулиці. Подальший етап проектування передбачає розробку структурної схеми системи та логіки взаємодії її компонентів для реалізації цих сценаріїв на практиці.

### 3.2 Розроблення структурної схеми та логіки взаємодії компонентів

У процесі проектування сучасної системи вуличного освітлення важливо не лише підібрати ефективні апаратні компоненти, а й вибудувати комплексну архітектуру їхньої взаємодії. Тому на цьому етапі розглянемо принципи формування інтелектуальної інфраструктури, яка забезпечує адаптивність, гнучкість та можливість масштабування системи. Запропонована система орієнтована на створення розумної мережі громадського освітлення, здатної автоматично адаптувати свої режими роботи залежно від умов довкілля та потреб користувачів.

Основні можливості такої інфраструктури включають:

- віддалене керування всією мережею освітлення, з можливістю контролю окремих ліхтарів, груп стовпів або окремих зон;
- інтелектуальне регулювання яскравості на основі часу доби, наявності пішоходів і транспортних засобів, погодних умов і рівня природного освітлення.

Загальна концептуальна структура системи наведена на рисунку 3.1, який ілюструє основні компоненти та їхні функціональні зв'язки.

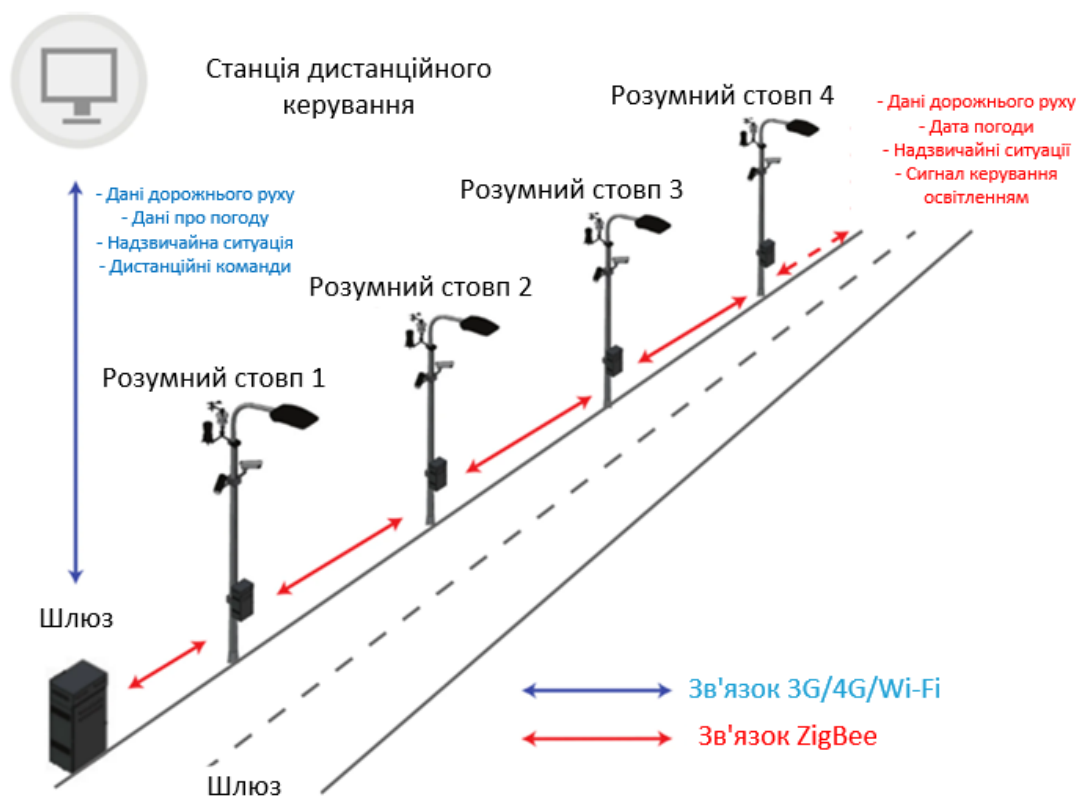


Рисунок 3.1 – Концепція інфраструктури розумного освітлення [32]

Центральним елементом системи є розумний стовп, який інтегрує такі ключові модулі:

- локальний контролер та модуль керування світильником;
- відеокамеру або сенсор присутності;
- обчислювальний блок для локальної обробки відеопотоку;
- метеорологічні датчики для фіксації погодних параметрів;
- модуль зв'язку для передачі даних до центральної системи;
- високоефективний LED-світильник із підтримкою димерування.

Між собою стовпи обмінюються технічною інформацією у межах локальної мережі, а через спеціальний шлюз зв'язку – з веб-додатком, який забезпечує централізований моніторинг, контроль та формування сценаріїв роботи.

"Розумність" системи забезпечується виконанням таких основних функцій:

- виявлення об'єктів руху (транспортних засобів і людей) у зоні дії сенсорів або камер;

- динамічна зміна яскравості відповідно до часу доби, рівня руху та погодних умов (туман, дощ, низьке природне світло);
- підтримання нормативного рівня освітленості для різних типів вулиць відповідно до чинних українських та міжнародних стандартів;
- передача даних та повідомлень на центральну станцію керування про стан обладнання, можливі несправності або критичні події.

Окрему увагу приділено диференціації типів стовпів, оскільки їх функціональне наповнення може змінюватися залежно від місця встановлення та задач. Розумний головний стовп (Smart Master Pole) [33] обладнаний сенсорами руху, метеостанцією, комунікаційними модулями та димерами. Він здатний самостійно аналізувати ситуацію та передавати команди підлеглим стовпам. Розумний підлеглий стовп (Smart Slave Pole) містить лише систему димерування та виконує команди, отримані від головного стовпа або центрального контролера.

Такий підхід дозволяє оптимізувати вартість інфраструктури, уникаючи надлишкового встановлення сенсорних модулів. Наприклад, на довгих прямолінійних ділянках дороги достатньо розмістити Master-стовпи на початку та в кінці, тоді як проміжні можуть виконувати роль Slave-стовпів.

У складніших умовах – на перехрестях, транспортних вузлах або відкритих площах – система може працювати в режимі централізованого керування, коли інтенсивність світла задається сценаріями, сформованими в центральному контролері, навіть якщо окремі стовпи не оснащені сенсорами руху. Це забезпечує гнучкість та адаптивність щодо різних сценаріїв міського середовища.

У підсумку запропонована архітектура забезпечує узгоджену роботу всіх елементів мережі, де кожен тип стовпа виконує свою роль у формуванні єдиного адаптивного освітлювального середовища. Для наочного представлення алгоритмів функціонування та механізмів взаємодії між головними й підлеглими стовпами доцільно розглянути детальні блок-схеми їхньої роботи.

На рисунках 3.2 та 3.3 представлені блок-схеми роботи головного та підлеглого стовпів у системі адаптивного вуличного освітлення. Ця схема демонструє логіку, за якою система автоматично регулює інтенсивність світла

залежно від змін у навколишньому середовищі, погодних умов та інтенсивності руху, а також способи взаємодії між стовпами.

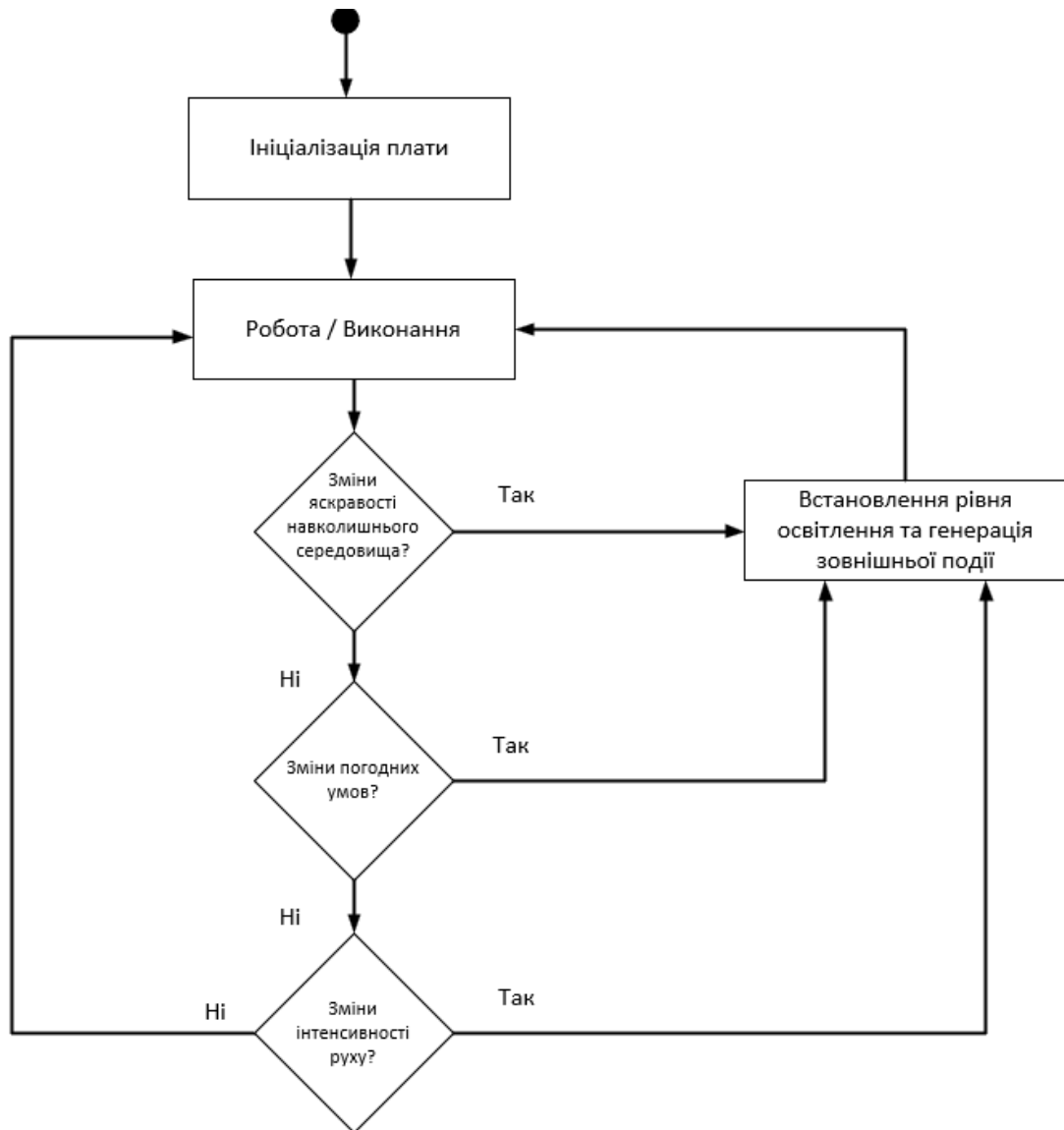


Рисунок 3.2 – Блок-схема роботи головного стовпа за участю головного стовпа

Для головного стовпа процес починається з етапу ініціалізації плати, де відбувається запуск апаратних і програмних компонентів контролера. Після цього стовп переходить у стан роботи, де постійно відстежуються умови навколишнього середовища.

На цьому етапі система перевіряє три ключові фактори:

1. Зміни яскравості навколишнього середовища – якщо природне освітлення змінилося, стовп підлаштовує рівень власного світла відповідно до стандартів безпеки та комфорту.

2. Зміни погодних умов – у разі дощу, туману або інших несприятливих погодних факторів рівень світла коригується для забезпечення оптимальної видимості.

3. Зміни трафіку – при виявленні транспортних засобів або пішоходів інтенсивність світла підвищується, а у разі відсутності руху знижується до мінімального допустимого значення.

Якщо будь-яка з цих умов змінюється, головний стовп встановлює новий рівень освітлення та генерує зовнішню подію, яка передається підлеглим стовпам через локальний канал зв'язку. У протилежному випадку головний стовп підтримує поточний рівень освітлення без змін.

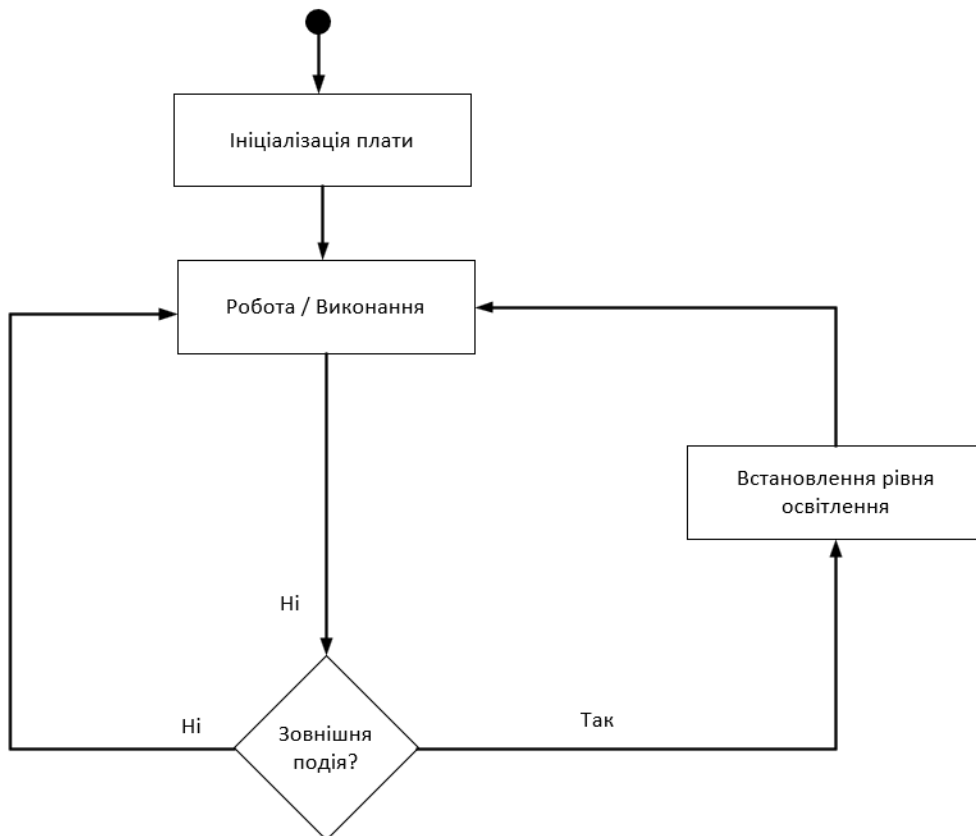


Рисунок 3.3 – Блок-схема роботи підлеглого стовпа за участю підлеглого стовпа

Для підлеглого стовпа процедура спрощена. Після етапу ініціалізації плати стовп переходить у стан роботи. Підлеглий стовп зберігає поточний рівень освітлення до отримання зовнішньої події від головного стовпа. Після отримання сигналу він оновлює рівень освітлення відповідно до команди головного стовпа. Така архітектура дозволяє ефективно управляти освітленням на всій ділянці, оптимізуючи енергоспоживання і забезпечуючи безпечні умови руху.

### 3.3 Розроблення архітектури системи керування освітленням (сенсори – контролери – платформа керування)

Архітектура системи керування освітленням передбачає взаємодію сенсорів, контролерів та центральної платформи керування, що забезпечує комплексний збір і обробку даних. Для відображення структурної організації елементів системи, а також способів їх взаємодії, на рисунку 3.3 наведено узагальнену схему інформаційних потоків та мережевих з'єднань, які забезпечують роботу всієї інфраструктури.

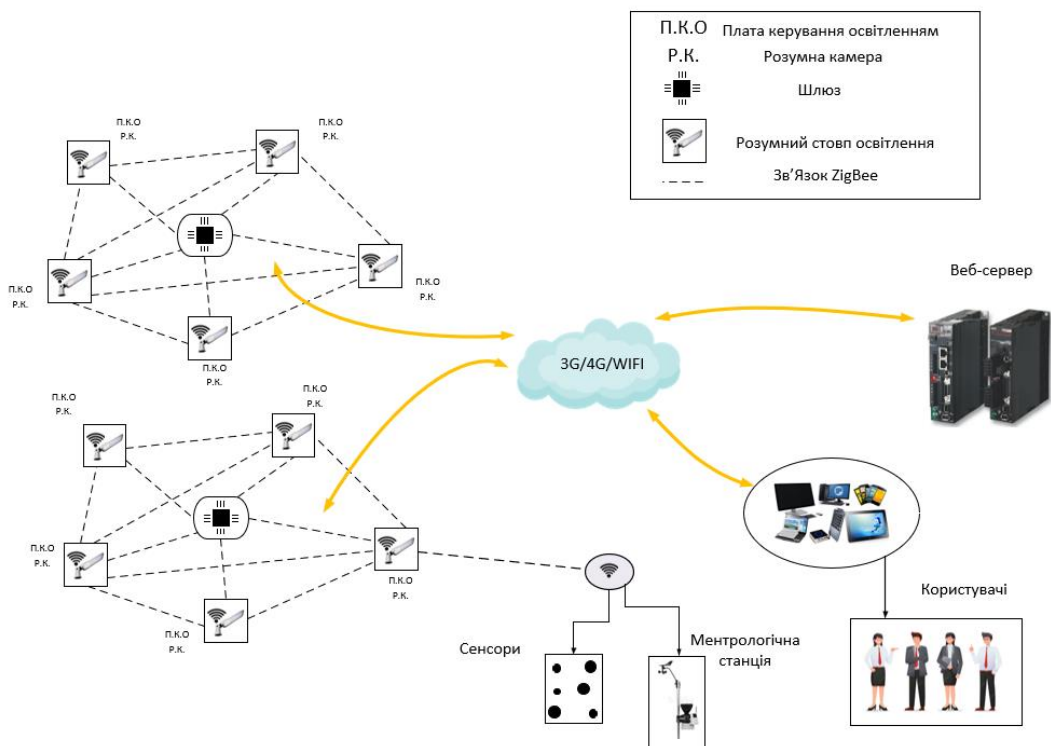


Рисунок 3.3 – Архітектура системи

Архітектурна модель системи керування вуличним освітленням ґрунтується на комбінованому використанні локальних та глобальних каналів зв'язку. Локальний рівень відповідає за взаємодію між окремими інтелектуальними світловими опорами, забезпечуючи обмін інформацією всередині однієї мережевої групи. У свою чергу, віддалений канал забезпечує передачу даних від локальних сегментів до центральної серверної платформи, що дає змогу здійснювати централізоване управління та аналітику. Через такий канал надходять відомості про споживання електроенергії, транспортні потоки, метеоумови, технічний стан обладнання та інші параметри, необхідні для оптимізації роботи системи.

Функціонування внутрішньої мережі ґрунтується на бездротовому стандарті ZigBee, що побудований на основі протоколу IEEE 802.15.4 [34]. Цей протокол спеціально розроблений для систем з малою потужністю передавання, де важлива енергоефективність та надійність. ZigBee широко застосовується в IoT-інфраструктурах завдяки простоті інтеграції, доступності сумісних шлюзів та вбудованим механізмам безпеки. Зокрема, він забезпечує контроль доступу та шифрування даних, що дозволяє захищати мережеві обміни навіть у умовах потенційних зовнішніх впливів.

У ZigBee-мережі можливе використання пристроїв трьох типів:

- координатор (шлюз) – головний елемент, який ініціює мережу, видає адреси та організовує маршрутизацію. У кожній мережі існує лише один такий вузол;
- маршрутизатор – проміжний вузол, який передає дані між іншими елементами мережі, забезпечуючи розширення зони покриття;
- кінцевий пристрій – споживач або постачальник даних, який не бере участі у пересиланні пакетів до інших вузлів.

Архітектура системи передбачає:

- наявність кількох самостійних локальних мереж, що можуть працювати паралельно;
- керування кожною з них окремим координатором або шлюзовим модулем;

- оснащення всіх пристроїв системи (сенсорних модулів, контролерів освітлення, камер та інших електронних компонентів) радіомодулями ZigBee;
- побудову мережі за принципом mesh, що підвищує стійкість і забезпечує альтернативні маршрути для обміну даними.

Попри те, що стандарт ZigBee теоретично підтримує мережеві структури з понад 65 тисячами вузлів [35], у практичних умовах цей показник значно нижчий. На ефективність роботи впливають перешкоди довкілля: щільність забудови, наявність дерев, металевих конструкцій, інших джерел радіовипромінювання. Тому оптимальний розмір мережі визначається під час конфігурації з використанням спеціалізованих програмних інструментів (наприклад, XSTU від DiGi International), які дозволяють перевірити силу сигналу, маршрути, адресацію та інші важливі параметри мережевої топології.

Центральною складовою архітектури виступає віддалений сервер або хмарна платформа, яка відповідає за тривале зберігання даних, їх обробку та оперативне керування всією системою в режимі реального часу. Такий сервер здатний об'єднувати інформацію з усіх локальних сегментів мережі, аналізувати зміни у навантаженні на освітню інфраструктуру, прогнозувати рівень енергоспоживання та підтримувати можливість автоматизованого або ручного управління світильниками, включаючи регулювання яскравості й зміни режимів роботи. Доступ до платформи може здійснюватися з різних типів пристроїв – від персональних комп'ютерів до мобільних терміналів, що спрощує експлуатацію системи та надає широкі можливості для адміністрування. Крім того, сервер може бути інтегрований з іншими міськими інформаційними службами, такими як метеорологічні станції чи системи моніторингу транспортних потоків, забезпечуючи узгоджену роботу всієї інфраструктури.

Зв'язок між локальними мережами опор освітлення та сервером реалізується за допомогою сучасних технологій бездротової передачі даних – 3G, 4G, 5G або Wi-Fi. Використання різних каналів комунікації дозволяє адаптувати систему до конкретних умов розгортання і забезпечує її масштабованість від невеликих квартальних кластерів до повноцінної міської мережі. Архітектура

також передбачає можливість підключення широкого спектра сенсорних пристроїв, включаючи датчики руху, освітленості, погодні модулі та відеокамери. Це створює умови для реалізації адаптивного освітлення, за якого інтенсивність світлового потоку автоматично змінюється відповідно до реальної ситуації на вулицях і потреб користувачів.

У сукупності така архітектура дозволяє істотно зменшити енергоспоживання, підвищити загальну надійність роботи системи завдяки наявності резервних маршрутів передавання даних, скоротити витрати на технічне обслуговування обладнання та покращити рівень безпеки на дорогах. Гнучкість побудови та можливість масштабування роблять цю систему придатною для впровадження на будь-якому рівні – від окремого району до масштабів усього міста.

### **3.4 Оцінка енергоспоживання традиційної системи та адаптивної системи**

Енергоспоживання є одним із ключових показників ефективності систем зовнішнього освітлення. Воно безпосередньо впливає на експлуатаційні витрати та екологічний вплив освітлювальної інфраструктури. Для магістральних доріг було визначено два сценарії роботи системи: традиційна система з постійною потужністю та адаптивна система з димуванням світильників.

У традиційній системі всі світильники працюють постійно на 100% номінальної потужності протягом усього року. Такий підхід є максимально простим у реалізації і забезпечує стабільну освітленість на всій довжині дороги, однак він не враховує змінну інтенсивність руху та потребу в освітленні в різні години доби.

Припустимо що наша дорога займає 5 кілометрів та налічує 125 світильників по 150 Вт кожен. Сумарна встановлена потужність:

$$P_{\text{сум}} = 125 \cdot 150 = 18\,750 \text{ Вт}$$

Річний час роботи становить 4200 год. Тоді річне енергоспоживання:

$$E_{\text{трад}} = 18\,750 \cdot 4200 = 78\,750 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Цей показник свідчить про високе енергоспоживання системи, що безпосередньо впливає на витрати електроенергії та викиди парникових газів.

Адаптивна система використовує коефіцієнт димування, що визначає частку номінальної потужності світильника в різні години доби залежно від інтенсивності руху або погодних умов. Наприклад,  $k=0,7$  означає, що світильник працює на 70% потужності, що забезпечує трохи менш яскраве, але достатнє освітлення.

У нашому прикладі буде використано три режими димування, що наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Режимы димування

Режим	Потужність (%)	k	Год/рік
1	100%	1,0	1 166,67
2	70%	0,7	1 400
3	40%	0,4	1 633,33

Річне енергоспоживання адаптивної системи обчислюється як сума енергії для кожного режиму:

$$E_{\text{адапт}} = \sum_{i=1}^3 P_{\text{заг}} \cdot k_i \cdot t_i \quad (3.1)$$

Покроково розрахуємо споживання для кожного режиму:

Режим 1 (100% потужності):

$$E_1 = 18,75 \cdot 1166,67 = 21\,875 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Режим 2 (70% потужності):

$$E_2 = 18,75 \cdot 0,7 \cdot 1400 = 18\,375 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Режим 3 (40% потужності):

$$E_3 = 18,75 \cdot 0,4 \cdot 1633,33 = 12\,250 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Загальне річне споживання:

$$E_{\text{адапт}} = E_1 + E_2 + E_3 = 52\,500 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Завдяки використанню димування енергоспоживання зменшилося приблизно на третину порівняно з традиційною системою, що демонструє високий потенціал адаптивних систем у економії ресурсів.

### **3.5 Оцінка економічного ефекту від впровадження адаптивної системи вуличного освітлення**

Впровадження адаптивної системи освітлення магістральних доріг дозволяє досягти значного економічного та екологічного ефекту. Основним джерелом економії є зменшення споживаної електроенергії завдяки використанню технології димування.

Розрахуємо абсолютну економію електроенергії:

$$\Delta E = E_{\text{трад}} - E_{\text{адапт}} = 78\,750 - 52\,500 = 26\,250 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Це означає, що впровадження адаптивної системи дозволяє зменшити річне споживання електроенергії на понад 26 тисяч кВт·год, що є значним ресурсозбереженням для одного магістрального відрізка довжиною 5 км.

Відносна економія відображає ефективність впровадження адаптивного регулювання:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_{\text{трад}}} \cdot 100\% = \frac{26\,250}{78\,750} \cdot 100\% = 33,3\%$$

Відносна економія підтверджує високий потенціал енергозбереження та ефективності адаптивних систем освітлення.

Припустимо, що вартість електроенергії для комунального підприємства складає 4,32 грн/кВт·год. Тоді річна економія коштів:

$$C_{\text{екон}} = \Delta E \cdot 4,32 = 26\,250 \cdot 4,32 = 113\,400 \text{ грн/рік}$$

Це суттєва економія, яка дозволяє окупити додаткові витрати на встановлення датчиків, системи керування та інтелектуальної апаратури у порівняно короткий термін. З огляду на довгострокову перспективу, економія коштів на електроенергії може складати сотні тисяч гривень для всіх магістральних доріг міста.

Проведемо повні фінансові розрахунки для впровадження адаптивної системи вуличного освітлення. Показники наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Фінансові показники проєкту

Параметр	Значення
Кількість світильників	125
Потужність світильника	150 Вт
Сумарна потужність	18,75 кВт
Річний час роботи	4200 год
Тариф на електроенергію	4,32 грн/кВт·год
Річне споживання (традиційна система)	78 750 кВт·год
Річне споживання (адаптивна система)	52 500 кВт·год
Економія енергії	26 250 кВт·год
Економія коштів	113 400 грн/рік
Капітальні витрати на систему адаптивного освітлення	500 000 грн
Термін розрахунку	10 років
Дисконтна ставка	12%

Термін окупності визначає, за який період інвестиції у впровадження адаптивної системи повністю компенсуються економією коштів на електроенергії.

Формула розрахунку проста:

$$P = \frac{500\,000}{113\,400} = 4 \text{ роки } 4 \text{ місяці}$$

Отримане значення є показником високої ефективності, особливо для інфраструктурних проєктів, де термін служби обладнання становить 15–20 років. Вже на п'ятий рік експлуатації система починає генерувати чистий економічний ефект, який зменшує витрати на електроенергію та дозволяє спрямовувати ці кошти на інші потреби міської інфраструктури.

Знайдемо чисту приведену вартість (NPV), що оцінює економічну доцільність інвестицій із урахуванням дисконтування майбутніх грошових потоків.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (3.2)$$

де  $CF_t$  – річний грошовий потік (економія коштів);

$r$  – ставка дисконтування;

$T$  – період розрахунку;

$I_0$  – капітальні витрати.

Дисконтовані грошові потоки для кожного року виглядають наступним чином:

$$CF^{disc}_t = \frac{113\,400}{(1 + 0,12)^t}$$

Знайдемо грошовий потік протягом 10 років. Інформація щодо розрахунку представлена в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Таблиця грошових потоків на 10 років

Рік	Грошовий потік, грн	Дисконтований CF (12%), грн	Накопичений NPV, грн
0	-500 000	-500 000	-500 000
1	113 400	101 250	-398 750
2	113 400	90 410	-308 340
3	113 400	80 726	-227 614
4	113 400	72 078	-155 536
5	113 400	64 354	-91 182
6	113 400	57 449	-33 733
7	113 400	51 274	17 541
8	113 400	45 758	63 299
9	113 400	40 860	104 159
10	113 400	36 482	140 641

Зобразимо розрахунки графічно на рисунку 3.3.

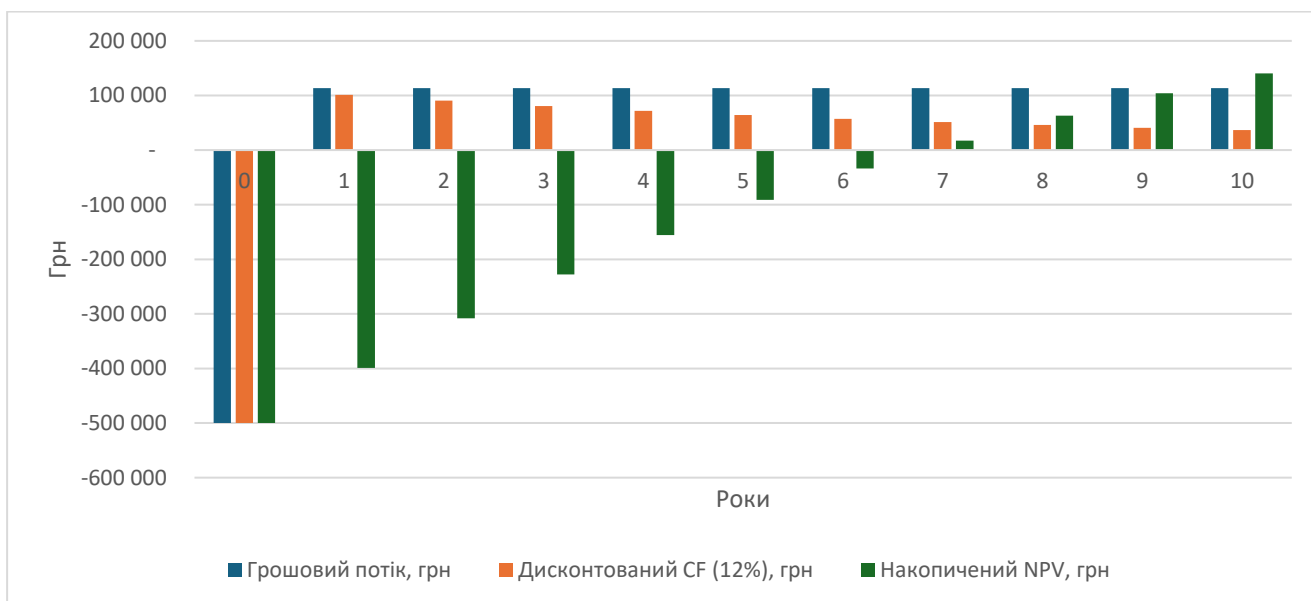


Рисунок 3.3 – Економічний аналіз доцільності заходу

Проект є економічно вигідним, оскільки  $NPV > 0$ . Точка окупності по дисконтованих потоках припадає на 6–7 рік, що підтверджує попередні розрахунки терміну окупності. IRR визначається як ставка дисконту, при якій  $NPV = 0$ . Це показник ефективності проекту без прив'язки до зовнішніх факторів.

Для наших даних  $IRR = 18,5\%$ , що значно перевищує дисконтну ставку  $12\%$ . Це свідчить про те, що інвестиції у систему адаптивного освітлення не лише окупаються, але й генерують прибуток, який можна реінвестувати в інші міські проекти.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі розроблено технічну структуру адаптивної системи вуличного освітлення та проаналізовано архітектурні рішення, що забезпечують її надійну та ефективну роботу. Запропонована система базується на принципі децентралізованого керування, що дозволяє підвищити відмовостійкість та зменшити залежність від центральних вузлів управління.

Використання головних і підлеглих опор освітлення забезпечує ефективний розподіл функцій між елементами системи та знижує навантаження на канали зв'язку. Така архітектура дозволяє локально приймати рішення щодо зміни режимів освітлення на основі даних сенсорів, зберігаючи при цьому можливість централізованого моніторингу та налаштування параметрів системи.

Аналіз розроблених алгоритмів керування показав, що поєднання інформації про інтенсивність руху, рівень природного освітлення та погодні умови дозволяє здійснювати більш точне та адаптивне регулювання яскравості світильників. Плавна зміна світлового потоку забезпечує комфортні умови для учасників дорожнього руху та зменшує негативний вплив різких змін освітленості на зорове сприйняття.

Оцінка енергоспоживання підтвердила, що адаптивна система має суттєві переваги порівняно з традиційною схемою освітлення. Зменшення часу роботи світильників на номінальній потужності дозволяє не лише скоротити споживання електроенергії, але й знизити теплове навантаження на світлодіодні модулі, що позитивно впливає на їхній ресурс і надійність.

Інтеграція системи з IoT-платформами та можливість віддаленого моніторингу відкривають додаткові можливості для збору аналітичних даних,

прогнозування навантажень та планування технічного обслуговування. Це дозволяє розглядати розроблену систему як складову ширшої екосистеми Smart City та забезпечує її готовність до масштабування і подальшого розвитку.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ “SMART TRAFFIC-BASED LIGHTING”

### 4.1 Аналіз ринку та проблеми, які вирішує продукт

Світовий ринок інтелектуального вуличного освітлення стрімко розвивається, оскільки міста переходять до впровадження концепції Smart City і прагнуть скоротити енергоспоживання, зменшити навантаження на електромережі та підвищити безпеку дорожнього руху. Урбанізація та збільшення транспортних потоків створюють додатковий тиск на міську інфраструктуру, що змушує муніципалітети шукати адаптивні технологічні рішення. Поширення IoT-технологій, сенсорних мереж, систем комп'ютерного зору й edge-аналітики сприяє появі нових форматів управління освітленням, де інтенсивність світла залежить від реальної дорожньої активності.

Більшість існуючих систем вуличного освітлення працює за фіксованими часовими графіками, що не враховують зміни інтенсивності руху впродовж доби. Ліхтарі функціонують на постійній потужності, незалежно від наявності автомобілів або пішоходів, що призводить до суттєвих перевитрат електроенергії. Крім того, відсутність інтелектуального моніторингу ускладнює своєчасне виявлення несправностей освітлювальних пристроїв. Через неможливість дистанційного контролю комунальні служби несуть додаткові витрати на обслуговування, а час реагування на аварійні ситуації збільшується. Це створює ризики для дорожньої безпеки, оскільки недостатнє або нерівномірне освітлення може стати причиною підвищення аварійності, особливо на ділянках із активним рухом у нічний час.

Сучасна інфраструктура освітлення створює значний рівень світлового забруднення, що негативно впливає на навколишнє середовище. Постійне освітлення всієї протяжності доріг у нічний період не лише збільшує викиди CO<sub>2</sub> через надмірне енергоспоживання, але й створює дискомфорт для мешканців. Додатковою проблемою є низька інтегрованість традиційних світильників із

цифровими платформами та відсутність можливості їх включення до єдиної мережі Smart City.

Ці недоліки формують запит на інноваційні системи, здатні адаптувати роботу світильників на основі аналізу транспортного потоку, пішохідної активності та екологічних параметрів. Smart Traffic-Based Lighting дозволяє вирішити ключові технічні проблеми завдяки використанню сенсорів руху, камер для комп'ютерного зору, локальних обчислювальних модулів та алгоритмів динамічного регулювання інтенсивності освітлення. Основні недоліки наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні недоліки традиційного підходу [36]

Проблема	Опис
Неефективне використання енергії	Освітлення працює на постійній потужності, незалежно від наявності людей або транспорту.
Високі витрати на утримання інфраструктури	Відсутність моніторингу стану світильників у режимі реального часу збільшує витрати на ремонт.
Низький рівень безпеки	Статичне освітлення не реагує на аномальну поведінку транспортних потоків, аварії, високі швидкості та небезпечні зони.
Світлове забруднення	Постійне освітлення всієї довжини доріг сприяє надмірному світловому випромінюванню.
Відсутність інтеграції з іншими системами Smart City	Сучасні ліхтарі часто не мають можливості підключення до сенсорних мереж та аналітичних платформ.

Проблема, яку вирішує Smart Traffic-Based Lighting, полягає в нераціональному використанні енергії та відсутності адаптивності в роботі систем освітлення. Міста змушені переплачувати до 60–80% бюджету освітлення, оскільки інтенсивність світла не змінюється відповідно до фактичної активності на дорогах. Наявні системи не здатні враховувати пікові навантаження, прогнозувати інтенсивність руху або реагувати на небезпечні ситуації, що знижує рівень безпеки на дорогах. Основні проблеми наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Виявлені технічні проблеми та рішення

Категорія	Технічна проблема	Рішення, що забезпечує Smart Traffic-Based Lighting
Енергоспоживання	Відсутність інтелектуального регулювання яскравості	Адаптивне керування освітленням на основі даних про реальний транспортний та пішохідний потік, що дозволяє динамічно змінювати яскравість і знижувати витрати до 40–70%.
Моніторинг і контроль	Немає механізмів віддаленої діагностики стану світильників	Інтегрований модуль IoT-моніторингу, що збирає телеметрію, повідомляє про несправності та надає можливість дистанційного керування кожним світильником.
Аналіз трафіку	Використання застарілих або неточних систем підрахунку транспорту	Система комп'ютерного зору та сенсорних модулів, які в режимі реального часу визначають інтенсивність руху, швидкість, щільність потоку та аномальні ситуації.
Безпека дорожнього руху	Освітлення не реагує на аварії, небезпечні ділянки чи активність пішоходів	Автоматичне підсилення освітлення при виявленні високої швидкості, руху пішоходів у зоні ризику або потенційної аварійної ситуації, що підвищує безпеку.
Екологічний вплив	Надмірна світлова інтенсивність у нічний час	Зменшення потужності світильників у зонах з низьким трафіком та точкове освітлення лише активних ділянок, що скорочує світлове забруднення.

Ринок, до якого належить продукт, охоплює муніципалітети, операторів дорожньої інфраструктури, промислові підприємства та компанії, що реалізують Smart City рішення. Для муніципалітетів критичним фактором є оптимізація витрат на освітлення та зниження навантаження на бюджет. Оператори доріг потребують технологій, що підвищують безпеку руху, а приватні промзони – можливості автономного управління освітленням залежно від робочих циклів та транспортної активності.

Сучасні тенденції ринку формують високий попит на адаптивні системи освітлення. Масове впровадження LED-ламп спрощує інтеграцію нового обладнання та дає змогу ефективніше використовувати інтелектуальні контролери. Швидкий розвиток IoT-мереж (NB-IoT, LoRaWAN, LTE-M) забезпечує можливість передачі телеметричних даних з освітлювальних модулів у реальному часі. Поширення технологій комп'ютерного зору допомагає виконувати локальну відеоаналітику, визначати швидкість та щільність транспортного потоку, виявляти аварійні ситуації та адаптувати освітлення під поточні умови. Паралельно із цим вимоги до зниження аварійності стимулюють впровадження динамічного освітлення, яке вже демонструє помітний позитивний вплив на безпеку дорожнього руху. Інформація щодо конкурентів наведена в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Конкурентні рішення на ринку

Компанія	Тип продукту	Недоліки існуючих рішень
Philips Signify	Інтелектуальні світильники	Відсутність модулів аналізу трафіку з комп'ютерним зором
Schreder EXEDRA	IoT-система управління освітленням	Працює за розкладом, не аналізує поведінку транспорту
Telensa	Smart street lighting	Орієнтація на економію енергії, а не на роботу з транспортним потоком
Autoscope	Трафік-детекція [37]	Не інтегрована зі світильниками без додаткових модулів

Smart Traffic-Based Lighting поєднує аналіз транспортних потоків, адаптивне управління інтенсивністю світла та IoT-комунікацію в одному рішенні. На відміну від конкурентів, система не просто зменшує або збільшує яскравість за таймером, а базується на фактичних даних про кількість автомобілів, швидкість руху, присутність пішоходів і загальну ситуацію на дорозі. Використання edge-обробки робить систему автономною та стійкою до збоїв у мережі.

Ринок інтелектуального освітлення швидко зростає, але адаптивні рішення, які враховують дорожню ситуацію в реальному часі, залишаються недостатньо

представленими. Smart Traffic-Based Lighting здатна забезпечити економію до 40–70% енергії, підвищити рівень безпеки та вписатися в інфраструктуру Smart City, роблячи її більш стійкою та технологічною.

## **4.2 Опис ціннісної пропозиції та функціоналу стартап-рішення**

Система Smart Traffic-Based Lighting формує нову концепцію управління вуличним освітленням, яка поєднує адаптивні алгоритми, аналіз транспортних потоків та можливості інтелектуальної IoT-інфраструктури. Її цінність полягає у повній переорієнтації освітлювальної мережі з статичного режиму на динамічну модель, що реагує на реальні умови руху. Це забезпечує поєднання енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат та підвищення рівня безпеки дорожнього руху.

Пропозиція продукту базується на принципі "освітлення за потребою", коли рівень інтенсивності світла формується не за часовими графіками, а алгоритмічно – відповідно до транспортного навантаження, наявності пішоходів, погодних умов та виявлених аномальних подій. Такий підхід дозволяє не лише оптимізувати споживання енергії, а й значно зменшити знос обладнання, оскільки світильники працюють у більш щадних режимах. Завдяки інтеграції із мережами LoRaWAN, NB-IoT або LTE-M система забезпечує постійний обмін даними з центральною платформою, що дозволяє оперативно реагувати на несправності, змінювати режими освітлення та відстежувати показники у режимі реального часу.

Цінність рішення також полягає в здатності виконувати локальну обробку даних на edge-пристроях. Це дозволяє уникати затримок у передачі відео або телеметрії на сервер, а високоточні алгоритми комп'ютерного зору забезпечують визначення кількості транспортних засобів, їх швидкості, траєкторії руху та виявлення потенційно небезпечних ситуацій. Система здатна автоматично збільшувати або зменшувати яскравість світильників на підставі цих даних, створюючи динамічні коридори освітлення, що рухаються разом із транспортом або пішоходами.

Окремою складовою ціннісною пропозицією є підтримка екологічної сталості. Адаптивне зменшення освітлення в зонах низького трафіку суттєво знижує світлове забруднення, а економія електроенергії сприяє зменшенню вуглецевого сліду міста. Система також дозволяє збирати статистику щодо інтенсивності руху та формувати аналітичні звіти, що можуть бути використані при плануванні транспортної інфраструктури та оптимізації дорожніх схем.

Інтеграція Smart Traffic-Based Lighting із зовнішніми сервісами відкриває додаткові можливості для муніципалітетів та операторів доріг. Наприклад, платформа може передавати дані про аномальні ситуації до служб безпеки, інформувати диспетчерські центри про зниження видимості через погодні умови або сприяти плануванню оптимальних маршрутів комунального транспорту. Функціонал системи включає модульну архітектуру, що дозволяє підключати додаткові сенсори (вологість, шум, якість повітря), розширюючи можливості інфраструктурної аналітики. Основні ключові елементи наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Ключові елементи функціоналу системи Smart Traffic-Based Lighting

Функціональний модуль	Основний зміст роботи	Практична цінність
Адаптивне регулювання освітлення	Динамічна зміна яскравості на основі транспортної активності та присутності пішоходів	Зменшення енергоспоживання, підвищення комфорту та безпеки
Комп'ютерний зір та відеоаналітика	Виявлення транспортних засобів, визначення інтенсивності руху та потенційних небезпек	Підвищення рівня безпеки, створення розумних світлових коридорів
Система IoT-моніторингу	Збір телеметрії, контроль стану світильників, передача даних у центральну платформу	Оперативне реагування на несправності, скорочення витрат на обслуговування
Edge-комп'ютинг	Локальна обробка даних без залежності від серверів	Висока швидкість обробки сигналів, автономність роботи
Аналітичний модуль	Статистика трафіку, теплові карти руху, звітність	Дані для містобудівного планування та оптимізації дорожньої інфраструктури

## Продовження таблиці 4.4

Інтеграційний інтерфейс	Підключення до Smart City платформ, API для зовнішніх систем	Масштабованість і взаємодія з іншими міськими сервісами
-------------------------	--	---

Функціональні можливості рішення надають комплексну цінність для всіх типів користувачів. Муніципалітети отримують інструмент для оптимізації бюджетів та підвищення рівня комфорту мешканців. Оператори дорожньої інфраструктури – система, яка автоматично підтримує безпечні умови на дорогах. Приватні зони та промислові підприємства – можливість впровадити енергоефективні технології та підвищити інфраструктурну автономність.

Завдяки поєднанню IoT, комп'ютерного зору та динамічних режимів роботи, Smart Traffic-Based Lighting формує новий стандарт роботи освітлювальних мереж, роблячи міські простори безпечнішими, енергоефективнішими та технологічно розвиненими.

### 4.3 Бізнес-модель

Бізнес-модель Smart Traffic-Based Lighting побудована на принципі створення стійкого екосистемного продукту, де технологія сама по собі стає джерелом конкурентної переваги, а спосіб її інтеграції у міську інфраструктуру формує економічну вигоду для клієнтів. Основна стратегія полягає у поетапному впровадженні рішення з мінімізацією ризиків та максимізацією віддачі для замовника, що дозволяє стартапу зменшити бар'єри входу на ринок і створити довгострокові партнерські відносини.

Цінність продукту для муніципалітетів та операторів доріг полягає не тільки у прямій економії енергії, але й у можливості планувати розвиток інфраструктури на основі реальних даних про транспортні потоки. Це перетворює систему з простого освітлювального обладнання на інструмент стратегічного управління міською інфраструктурою. Аналітичні дані, що збираються системою, дозволяють

оптимізувати маршрути комунального транспорту, прогнозувати потреби у модернізації доріг і підвищувати ефективність роботи служб безпеки.

Модель взаємовідносин із клієнтами побудована таким чином, щоб забезпечити постійний контакт та підтримку, що дозволяє збирати зворотний зв'язок і оперативно впроваджувати покращення. Це створює додаткову цінність для клієнтів, підвищує лояльність і дозволяє планувати подальше масштабування системи. Також бізнес-модель передбачає гнучкі фінансові умови для різних сегментів ринку, що полегшує прийняття рішень муніципалітетами та приватними підприємствами, які часто мають обмежені бюджети або потребують довгострокових контрактів для обґрунтування витрат.

Особлива увага приділяється масштабованості та модульності системи. Це дозволяє адаптувати рішення під різні міські умови, починаючи від невеликих районів і завершуючи цілими містами, без необхідності повного переобладнання вже встановленої інфраструктури. Такий підхід створює додатковий потенціал для доходів від розширення послуг, підключення нових аналітичних модулів та ліцензування технології іншим інтеграторам.

Бізнес-модель також включає інтеграцію з іншими Smart City рішеннями, що відкриває нові джерела доходу від обміну даними, аналітики і оптимізації роботи суміжних систем (транспорт, безпека, енергоспоживання). Це дозволяє створити додаткову стратегічну цінність для міста, перетворюючи Smart Traffic-Based Lighting на компонент комплексного управління міською інфраструктурою. Бізнес-модель описується через канву Business Model Canvas [38], яка виділяє дев'ять ключових блоків цінності та взаємодії. Вона наведена на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Бізнес модель Canvas

Система Smart Traffic-Based Lighting будує економічну модель, яка поєднує прямі доходи від продажу обладнання та сервісів із довгостроковими доходами від контрактів на обслуговування та підписки на аналітичні сервіси. Завдяки модульній архітектурі рішення легко масштабувати під різні сегменти клієнтів і інтегрувати з існуючою інфраструктурою міста, що знижує бар'єри входу на ринок і підвищує привабливість продукту для муніципальних та приватних замовників. Бізнес-модель також передбачає використання даних для аналітики і прогнозування, що відкриває можливості додаткового доходу від надання статистичних сервісів та рекомендацій для планування дорожньої мережі.

#### 4.4 Фінансове обґрунтування та план впровадження

Реалізація стартапу Smart Traffic-Based Lighting базується на комплексному фінансовому та технічному плануванні, яке дозволяє забезпечити рентабельність проекту та оптимальне використання ресурсів. Основними витратними статтями є розробка апаратного та програмного забезпечення, закупівля сенсорів і світильників, інтеграція з IoT-мережами, обслуговування системи та маркетингові

активності для залучення муніципальних і приватних клієнтів. Доходи формуються за рахунок продажу обладнання, підписки на аналітичні сервіси, сервісних контрактів та ліцензування технології.

Фінансове обґрунтування враховує два ключові показники: економію електроенергії для міст (до 40–70%) та зменшення витрат на обслуговування інфраструктури. Ці показники дозволяють швидко окупити інвестиції у модернізацію освітлення та підвищити привабливість продукту для муніципальних замовників. Додатково, впровадження системи створює можливість отримання доходів від аналітики, що використовується для оптимізації дорожньої інфраструктури та планування нових маршрутів. Бюджет проєкту наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Бюджет проєкту (приклад на перший рік впровадження)

Стаття витрат	Сума, USD	Коментар
Розробка апаратного забезпечення	120 000	Дизайн і прототипи сенсорів та світильників
Розробка програмного забезпечення	100 000	Платформа IoT, відеоаналітика, інтерфейси управління
Закупівля обладнання	150 000	Сенсори, LED-світильники, контролери
Інтеграція та монтаж	80 000	Встановлення обладнання та підключення до мереж
Технічне обслуговування та підтримка	50 000	Сервісні контракти, оновлення ПЗ
Маркетинг і просування	30 000	Демонстрації, участь у тендерах, рекламні матеріали
Разом	530 000	Витрати першого року

Розрахуємо приблизний прогноз прибутку від впровадження даного стартап-проєкту. Він поданий в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Прогноз доходів (перший рік)

Джерело доходу	Очікуваний дохід, USD	Коментар
Продаж обладнання	300 000	Постачання сенсорів та світильників у пілотні проєкти
Підписка на ПЗ та аналітичні сервіси	120 000	Щомісячна підписка для муніципальних центрів управління
Сервісне обслуговування	80 000	Контракти на обслуговування та підтримку
Ліцензування технологій	50000	Інтегратори та приватні підприємства
Разом	550 000	Потенційний дохід першого року

Різниця між доходами та витратами першого року становить приблизно 20,000 USD, що свідчить про швидку окупність та потенціал для масштабування. При збільшенні кількості впроваджень та підписників доходи зростають пропорційно, а витрати на розробку з часом зменшуються за рахунок оптимізації та тиражування обладнання. Для розробки проєкту пропонується план впровадження, який наведений в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – План впровадження

Етап	Термін	Основні дії
Підготовчий етап	1–2 місяці	Аналіз ринку, технічне проектування, вибір постачальників обладнання
Розробка та прототипування	3–5 місяців	Створення апаратних прототипів, розробка програмного забезпечення, тестування алгоритмів адаптивного освітлення
Пілотне впровадження	6–8 місяців	Монтаж обладнання на обмеженій ділянці, підключення до IoT-платформи, віддалений моніторинг та корекція роботи системи
Аналітика та оптимізація	9–10 місяців	Збір даних про трафік, ефективність енергоспоживання, корекція алгоритмів, підготовка звітів для замовника
Масштабування та комерційне впровадження	11–12 місяців	Розгортання системи на всій території клієнта, підписка на аналітичні сервіси, навчання персоналу, підготовка до нових замовлень

Реалізація цього плану дозволяє швидко перевести інноваційне рішення з етапу прототипу до комерційного використання, забезпечити контроль ефективності та адаптацію під потреби конкретного міста чи промислової зони. Поєднання фінансового планування з поетапним впровадженням гарантує економічну рентабельність, технологічну надійність та конкурентоспроможність продукту на ринку Smart City рішень.

#### **4.5 Оцінка ризиків та сценарії масштабування**

Запуск та впровадження стартапу Smart Traffic-Based Lighting передбачає взаємодію технологічних, фінансових та регуляторних факторів. Основним завданням є мінімізація ризиків, що можуть вплинути на ефективність, рентабельність і репутацію продукту, а також визначення стратегій масштабування для різних сегментів ринку. Ризики поділяються на технічні, фінансові, ринкові та регуляторні, і кожен з них потребує своєчасного управління.

Технічні ризики пов'язані з інтеграцією сенсорів, світильників та IoT-платформ, стабільністю алгоритмів комп'ютерного зору та точністю адаптивного регулювання освітлення. Виникає потреба у тестуванні обладнання у різних погодних умовах, забезпеченні стійкості edge-обробки та надійності каналів передачі даних. Фінансові ризики включають недотримання бюджету, затримки у реалізації проєктів та коливання вартості компонентів. Ринкові ризики стосуються конкуренції, затримок у прийнятті рішень муніципалітетами та низької готовності клієнтів до інноваційних рішень. Регуляторні ризики охоплюють вимоги до електромагнітної сумісності, сертифікацію обладнання, дотримання норм щодо світлового забруднення та стандартів енергоспоживання. Основні ризики наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Оцінка ключових ризиків та заходи їх мінімізації [36]

Категорія ризику	Конкретний ризик	Заходи мінімізації
Технічні	Нестабільна робота сенсорів та світильників в екстремальних умовах	Використання промислових стандартів для обладнання, тестування прототипів у різних кліматичних умовах, резервні алгоритми edge-обробки
Технічні	Помилки алгоритмів комп'ютерного зору	Верифікація моделей на реальних даних, навчання нейромереж на різноманітних сценаріях, регулярні оновлення ПЗ
Фінансові	Перевищення бюджету на розробку та інтеграцію	Розподіл бюджету на етапи з контрольними точками, пошук додаткових грантів та інвестицій, оптимізація постачальників
Фінансові	Затримки у поверненні інвестицій	Пілотні проекти з гарантіями економії, модульна система оплати для клієнтів, укладання довгострокових контрактів
Ринкові	Сильна конкуренція на ринку Smart City	Диференціація через адаптивну систему на основі аналізу трафіку та edge-комп'ютингу, маркетингові кампанії, демонстрації ефективності
Ринкові	Низька готовність клієнтів до нових технологій	Проведення навчання та консультацій, пілотні впровадження з доказом економічної ефективності, участь у державних програмах підтримки
Регуляторні	Вимоги сертифікації та нормативів	Вивчення регуляторних норм на ранніх етапах, сертифікація обладнання, відповідність стандартам енергоспоживання та світлового забруднення

Сценарії масштабування системи передбачають поступове розширення географії впровадження, підключення додаткових модулів та інтеграцію з іншими Smart City платформами. Масштабування може відбуватися у кілька етапів, його сценарії наведено в таблиці 4.9 : локальний пілот на одній ділянці, регіональне

розгортання у межах одного міста, масштабування на всю інфраструктуру міста та подальше розширення на інші міста або приватні території.

Таблиця 4.9 – Сценарії масштабування [36]

Етап масштабування	Основні дії	Потенційна користь
Локальний пілот	Встановлення на обмеженій ділянці дороги, тестування алгоритмів, збір даних	Перевірка працездатності, підготовка аналітики для клієнта, мінімальні інвестиції
Міське масштабування	Підключення всіх світильників міста, інтеграція з існуючою інфраструктурою	Максимальна економія електроенергії, підвищення безпеки, дані для міської аналітики
Регіональне/Національне розгортання	Розширення на інші міста та території, створення централізованих платформ управління	Масштабування доходів, стандартизація процесів, підвищення впізнаваності бренду
Інтеграція з Smart City екосистемою	Підключення додаткових сенсорів (якість повітря, шум, погодні умови), обмін даними з транспортними та енергетичними системами	Комплексне управління міською інфраструктурою, нові джерела доходу від аналітики, високий рівень інтеграції

Оцінка ризиків та поетапне масштабування забезпечують гнучкість впровадження, дозволяють зменшити вплив непередбачуваних факторів та забезпечити економічну ефективність і технологічну надійність системи Smart Traffic-Based Lighting. Такий підхід створює основу для стійкого розвитку стартапу та поступового виходу на регіональні та національні ринки Smart City рішень.

#### Висновки до розділу 4

У четвертому розділі виконано оцінку економічної доцільності впровадження системи Smart Traffic-Based Lighting та розроблено стартап-проект, орієнтований на потреби муніципалітетів і операторів дорожньої інфраструктури.

Проведений аналіз підтвердив, що поєднання енергоефективних технологій, адаптивного керування та цифрової аналітики формує значний економічний потенціал у довгостроковій перспективі.

Запропонована бізнес-модель, розроблена з використанням Business Model Canvas, демонструє можливість створення стійкого продукту з декількома джерелами доходу. До них належать постачання обладнання, впровадження програмного забезпечення, сервісне обслуговування, а також надання аналітичних і консалтингових послуг. Така модель дозволяє адаптувати рішення під різні масштаби проєктів та фінансові можливості замовників.

Фінансове обґрунтування показало, що впровадження адаптивних систем освітлення забезпечує скорочення витрат на електроенергію та обслуговування, що сприяє відносно короткому терміну окупності інвестицій. Поетапний план реалізації проєкту дозволяє мінімізувати фінансові ризики та забезпечити поступове масштабування системи.

Окрема увага приділена аналізу ризиків, пов'язаних із воєнним станом, нестабільністю постачання енергоресурсів та обмеженими фінансовими можливостями органів місцевого самоврядування. Урахування цих факторів підкреслює практичну спрямованість запропонованого стартап-рішення та його адаптованість до реальних умов експлуатації.

Таким чином, впровадження адаптивних систем вуличного освітлення розглядається як важливий крок до підвищення енергетичної стійкості, безпеки та ефективності міської інфраструктури. Реалізація проєкту Smart Traffic-Based Lighting відповідає сучасним тенденціям розвитку Smart City і має значний потенціал для практичного застосування в Україні.

## ВИСНОВОК

Виконана магістерська робота була спрямована на розв'язання актуальної для сучасних міст проблеми нераціонального використання електроенергії в системах вуличного освітлення за умов нерівномірної інтенсивності транспортного та пішохідного руху. Необхідність пошуку нових підходів до керування освітленням зумовлена як зростанням навантаження на міську інфраструктуру, так і підвищеними вимогами до енергоефективності, безпеки та стійкості інженерних систем.

Вихідною передумовою дослідження стало усвідомлення того, що традиційні системи освітлення, побудовані на фіксованих режимах роботи світильників, не здатні адекватно реагувати на реальні умови експлуатації. Це призводить до ситуацій, коли у періоди низької активності транспортних потоків освітлення працює з надлишковою потужністю, що не лише збільшує енергоспоживання, але й прискорює зношення обладнання. Саме тому доцільним є перехід до адаптивних систем, здатних динамічно змінювати параметри освітлення відповідно до поточного стану дорожньої мережі.

З урахуванням цього в роботі було проаналізовано нормативні вимоги у сфері зовнішнього освітлення та встановлено, що чинні стандарти не суперечать впровадженню димованих і адаптивних режимів роботи світильників. Навпаки, вони допускають зміну рівнів освітленості залежно від інтенсивності руху за умови дотримання мінімальних вимог безпеки. Таким чином, нормативна база створює необхідні умови для практичної реалізації інтелектуальних систем вуличного освітлення.

Подальший аналіз сучасних світлодіодних технологій і сенсорних засобів підтвердив технічну можливість реалізації адаптивного підходу. Світлодіодні світильники, завдяки високій енергоефективності та підтримці плавного димування, у поєднанні з сенсорами руху, радарними системами та відеоаналітикою, забезпечують отримання достовірної інформації про

інтенсивність трафіку в режимі реального часу. Наявність таких даних є ключовою умовою для побудови ефективних алгоритмів керування освітленням.

Спираючись на результати аналізу, було розроблено модель адаптивного керування яскравістю світильників, яка поєднує нормативно встановлені рівні освітленості з фактичними показниками інтенсивності руху. Урахування добових, тижневих та сезонних коливань трафіку дозволяє формувати гнучкі сценарії роботи системи, за яких освітлення відповідає реальним потребам конкретної ділянки дороги. Це забезпечує збереження безпечних умов руху одночасно зі зменшенням надлишкового енергоспоживання.

Логічним продовженням моделювання стало проектування технічної структури системи з децентралізованою архітектурою керування. Розподіл функцій між локальними контролерами та централізованою платформою моніторингу підвищує відмовостійкість системи та зменшує її залежність від безперервності зв'язку. Такий підхід також створює умови для масштабування рішення та його інтеграції з іншими компонентами міської цифрової інфраструктури.

Запровадження адаптивних алгоритмів керування безпосередньо відобразилося на показниках енергоспоживання системи вуличного освітлення. Скорочення часу роботи світильників на номінальній потужності дозволяє досягти відчутної економії електроенергії, зменшити експлуатаційні витрати та подовжити термін служби світлодіодного обладнання. Ці переваги набувають особливого значення в умовах нестабільного електропостачання та обмежених енергетичних ресурсів.

Отримані технічні результати стали підґрунтям для економічного обґрунтування впровадження системи Smart Traffic-Based Lighting. Аналіз бізнес-моделі показав, що поєднання енергозбереження, централізованого управління та аналітичних сервісів формує довгострокову економічну вигоду для муніципалітетів і операторів дорожньої інфраструктури. Поетапна реалізація проекту та врахування можливих ризиків дозволяють адаптувати рішення до реальних умов експлуатації.

Узагальнюючи результати виконаної роботи, можна зробити висновок, що адаптивні системи вуличного освітлення є ефективним інструментом підвищення енергоефективності, безпеки та стійкості міської інфраструктури. Запропоноване рішення органічно вписується в концепцію Smart City та має значний потенціал для практичного застосування під час модернізації існуючих освітлювальних мереж і проектування нових міських просторів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 13201-2:2016 «Вуличне освітлення. Частина 2. Технічні вимоги (EN 13201-2:2015, IDT)». – Режим доступу: [https://dnaop.com/html/62426/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_EN\\_13201-2\\_2016](https://dnaop.com/html/62426/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_EN_13201-2_2016) (дата звернення: 05.11.2025).
2. ДСТУ EN 13201-5:2016 «Вуличне освітлення. Частина 5. Показники енергетичної ефективності (EN 13201-5:2015, IDT)». – Режим доступу: [https://dnaop.com/html/61896\\_2.html](https://dnaop.com/html/61896_2.html) (дата звернення: 20.10.2025).
3. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення». – Режим доступу: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074958732556240833?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2) (дата звернення: 15.10.2025).
4. ДСТУ 4092:202X. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги. Правила застосування. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://dorndi.org.ua/files/upload/%D0%BF%D1%80%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_4092\\_1\\_%D1%80%D0%B5%D0%B4.pdf](https://dorndi.org.ua/files/upload/%D0%BF%D1%80%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_4092_1_%D1%80%D0%B5%D0%B4.pdf) – (дата звернення: 18.11.2025).
5. Something about EN 13201 road lighting design standards / ZGSM — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.zgsm-china.com/blog/something-about-en-13201-road-lighting-design-standards.html> — Дата звернення: 20.09.2025.
6. LED-освітлення: технології, переваги та можливості використання / RadiyLED – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://radiyled.com/ua/blog/led-osvitlennya-tehnologii-perevagi-ta-mozhливosti-vikoristannya/> – Дата звернення: 11.10.2025.
7. Що таке ступінь захисту IP світильника? / Optimaltd — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.optimaltd.com.ua/ua/blog/chto-takoye-stepen-zashchity-ip-svetilnika/> — Дата звернення: 08.12.2025.

8. Smart city // *Wikipedia: The Free Encyclopedia* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_city](https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_city) — Дата звернення: 08.12.2025.
9. Illuminating Efficiency: Exploring LED Lighting Benefits / *WISCOON Lighting* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.wiscoonlighting.com/uk/Illuminating-Efficiency-Exploring-LED-Lighting-Benefits> — Дата звернення: 18.12.2025.
10. Асиметричне і симетричне освітлення: що краще? / *MyLiKeLED* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://mylikeled.com/uk/асиметричне-і-симетричне-освітлення--що-краще/> — Дата звернення: 18.12.2025.
11. Everything You Need to Know About DALI Dimming / *LEDYi Lighting* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ledyilighting.com/uk/everything-you-need-to-know-about-dali-dimming/> — Дата звернення: 18.12.2025.
12. How to Choose LED Street Light / *BenweiLight* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.benweilight.com/info/how-to-choose-led-street-light-73642761.html> — Дата звернення: 18.12.2025.
13. Zigbee // *Wikipedia: The Free Encyclopedia* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee> — Дата звернення: 18.12.2025.
14. LoRa Module / *MinewSemi* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://en.minewsemi.com/ad/lora-module/> — Дата звернення: 18.12.2025.
15. NB-IoT: Reliable, power-efficient IoT for challenging locations / *COM4* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.com4.no/en/blog/nb-iot-reliable-power-efficient-iot-for-challenging-locations> — Дата звернення: 18.12.2025.
16. Wi-Fi // *Wikipedia: The Free Encyclopedia* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi> — Дата звернення: 18.12.2025.
17. LTE // *Wikipedia: Den frie encyklopedi* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://no.wikipedia.org/wiki/LTE> — Дата звернення: 18.12.2025.

18. Пасивні інфрачервоні (PIR) датчики / *InterNetri* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://internetri.net/qntm/2023/07/27/pasyvni-infrachervoni-pir-datchyky/> — Дата звернення: 18.12.2025.
19. The complete guide to microwave sensor / *TOSUNlux* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.tosunlux.eu/uk/blog/the-complete-guide-to-microwave-sensor/> — Дата звернення: 18.12.2025.
20. Video Analytics / *VPN Unlimited* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.vpnunlimited.com/ua/help/cybersecurity/video-analytics> — Дата звернення: 18.12.2025.
21. Контролер індукційної петлі ZKTeco LD01 / *VIDIMOST* — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://vidimost.com/kontroler-indukcijnoyi-petli-zkteco-ld01> — Дата звернення: 18.12.2025.
22. Нова нанотехнологія може скоротити викиди CO<sub>2</sub> більш ніж на 1 мільйон тонн. — *Український телекомунікаційний портал*. — 2025. — Режим доступу: <https://portaltele.com.ua/news/technology/nova-nanotehnologiya-mozhe-skorotiti-vikidi-co2-bilsh-nizh-na-1-miljon-tonn.html> — (дата звернення: 10.11.2025).
23. ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ХМАРНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ. — *IT для Бізнесу* (itfb.com.ua). — 13.03.2024. — Режим доступу: <https://itfb.com.ua/uk/osoblivosti-keruvannya-hmarnoyu-infrastrukturoyu/> — (дата звернення: 12.10.2025).
24. 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, art. 100142. — Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773186324000720> — (дата звернення: 20.10.2025).
25. 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, art. 7415. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7415> — (дата звернення: 15.10.2025).

26. Satellite Data API — API для доступу до супутникових даних. — *EOS Data Analytics* (*eos.com*). — 2021 (?). — Режим доступу: <https://eos.com/uk/products/satellite-data-api/> — (дата звернення: 05.11.2025).
27. CHIRADEJA P., YOOMAK S. Development of public lighting system with smart lighting control systems and Internet of Things (IoT) technologies for smart city. — *Energy Reports*. — 2023. — Vol. 10, pp. 3355–3372. — Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723014622> — (дата звернення: 25.10.2025).
28. Нормування штучного освітлення. — *Pidru4niki.com*. — Режим доступу: [https://pidru4niki.com/2015073065461/bzhd/normuvannya\\_shtuchnogo\\_osvitlennya](https://pidru4niki.com/2015073065461/bzhd/normuvannya_shtuchnogo_osvitlennya) — (дата звернення: 15.11.2025).
29. Які останні тенденції у технологіях вуличного освітлення. — *Xingkelight* (*xingkelight.com*). — 29.10.2025. — Режим доступу: <https://www.xingkelight.com/uk/blog/what-are-the-latest-trends-in-street-light-technology> — (дата звернення: 30.11.2025).
30. Дослідження інтенсивності руху й складу транспортного потоку [Електронний ресурс]. — *Studfile.net*. — 19.11.2019. — Режим доступу: <https://studfile.net/preview/9917302/page:6/> — (дата звернення: 18.11.2025).
31. «Розумне освітлення: як димування трансформує наш побут та професійне середовище» // *Watt.ua*. — 2.10.2024. — Режим доступу: <https://watt.ua/rozumne-osvitlennia-yak-dymuvannia-transformuie-nash-pobut-ta-profesiine-seredovyshche/> — Дата звернення: 17.11.2025.
32. Wang, Q., Li, J., & Zhang, H. Edge AI for Smart Cities: Applications and Challenges // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 3, No. 4. — Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2624-6511/3/4/71>. — Дата звернення: 15.10.2025.
33. «Що таке розумний стовп?» // *Autex Solar* (укр.). — 26.07.2024. — Режим доступу: <https://uk.autexsolar.com/news/what-is-the-smart-pole/> — Дата звернення: 12.11.2025.

34. IEEE 802.15.4 Standard: a tutorial / primer // *Electronics-Notes.com*. — Без дати. — Режим доступу: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/ieee-802-15-4-wireless/basics-tutorial-primer.php> — Дата звернення: 10.11.2025.
35. «Що таке протокол Zigbee і як він працює у розумному домі» // *ROZETKA.Journal*. — 25.06.2025. — Режим доступу: <https://journal.rozetka.com.ua/p1397-shcho-take-protokol-zigbee-i-yak-vin-pratsyue-u-rozumnomu-domi.html> — Дата звернення: 14.11.2025.
36. Method instructions – Development of startup projects / Науково-методичні вказівки. — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. — Режим доступу: [https://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/11/Method\\_instructions\\_Development\\_of\\_startup\\_projects.pdf](https://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/11/Method_instructions_Development_of_startup_projects.pdf)
37. Autoscope® Traffic Sensors // *Econolite.com*. — Без дати. — Режим доступу: <https://www.econolite.com/products/traffic-sensors/autoscope/> — Дата звернення: 18.11.2025.
38. Business model canvas // *Wikipedia: The Free Encyclopedia*. — Без дати. — Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Business\\_model\\_canvas#:~:text=The%20business%20model%20canvas%20is%20a%20strategic%20management,to%20align%20their%20activities%20by%20illustrating%20potential%20trade-offs](https://en.wikipedia.org/wiki/Business_model_canvas#:~:text=The%20business%20model%20canvas%20is%20a%20strategic%20management,to%20align%20their%20activities%20by%20illustrating%20potential%20trade-offs). — Дата звернення: 11.11.2025.
39. Калькулятор вуличного освітлення — онлайн розрахунок освітленості доріг // *SBK Ukraine*. — Без дати. — Режим доступу: <https://sbk.ltd.ua/uk/lep-opori-osvitlennja/295-kalkuljator-ulichnogo-osveschenija-onlaj-raschet-osveschennosti-territorii.html> — Дата звернення: 20.11.2025.
40. Волянчук Б. Я., Сидорук Б. В. Розробка проекту модернізації систем освітлення вулиць мікрорайону «Аляска» у м. Тернопіль : кваліфікаційна робота бакалавра за спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. — Тернопіль, 2024.

41. Чернявський А. В., Веремійчук Ю. А., Закладний О. О., Черкашина Г. І. Енергоєфективні технології споживання електричної енергії. Практикум за темою «Силові споживачі» : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/items/4e9e48ee-0a22-4851-a346-7759b2e5ffd9> — Дата звернення: 21.11.2025.

42. Салтиков В.О. Освітлення міст: Навчальний посібник. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 221 с.



## Норми зовнішнього освітлення міських і сільських поселень

Категорія об'єкта за освітленням	Вулиці, дороги	Найбільша інтенсивність руху транспорту в обох напрямках, од/год	Середня яскравість покриття, кд/м <sup>2</sup>	Середня горизонтальна освітленість покриття, лк
А	Магістральні дороги, магістральні вулиці загальноміського значення	Більше 5000	2,0	20
		Від 3000 до 5000	1,5	20
		Від 1000 до 3000	1,2	20
		Від 500 до 1000	0,8	15
		Менше 500	0,6	10
Б	Магістральні вулиці районного значення	Більше 2000	1,0	15
		Від 1000 до 2000	0,8	15
		Від 500 до 1000	0,6	10
		Менше 500	0,4	10
В	Вулиці і дороги місцевого значення	500 і більше	0,4	6
		Менше 500	0,3	4
		Поодинокі автомобілі	0,2	4
<b>Примітка 1.</b> Середня яскравість покриття швидкісних доріг незалежно від інтенсивності руху транспорту приймається 1,6 кд/м <sup>2</sup> в межах міста і не менше 1,0 кд/м <sup>2</sup> – поза містом на основних під'їздах до аеропортів, річкових і морських портів.				
<b>Примітка 2.</b> Середня яскравість або середня освітленість покриття проїзної частини в межах транспортного перехрестя в двох і більше рівнях на всіх магістралях, які перехрещуються, повинна бути як на основній з них, так і на з'їздах і відгалуженнях не менше 0,8 кд/м <sup>2</sup> або 10 лк.				
<b>Примітка 3.</b> Рівень освітлення вулиць місцевого значення, які примикають до швидкісних доріг і магістральних вулиць, повинен бути не менше однієї третини від рівня освітлення швидкісної дороги або магістральної вулиці на відстані не менше 100 м від лінії примикання.				
<b>Примітка 4.</b> На пішохідних переходах на одному рівні з проїзною частиною вулиць і доріг з інтенсивністю руху більше 500 од/год слід передбачати підвищення норми освітлення не менше ніж в 1,3 раза порівняно з нормою освітлення проїзної частини, яка перетинається. Підвищення рівня освітлення досягається за рахунок зміни кроку опор, встановлення додаткових або більш потужних світлових приладів, використання освітленого покриття на переході тощо.				

Рівень освітлення проїзної частини вулиць, доріг і площ з перехідними і нижчими типами покриттів у міських поселеннях регламентується величиною середньої горизонтальної освітленості, яка для вулиць, доріг і площ категорії Б повинна бути 6 лк, для вулиць і доріг категорії В при перехідному типі покриттів – 4 лк і при покритті нижчого типу – 2 лк.

Середня яскравість тротуарів, які примикають до проїзної частини вулиць, доріг і площ, повинна бути не менше половини середньої яскравості покриття проїзної частини цих вулиць, доріг і площ, наведеної у таблиці 5.

Відношення мінімальної яскравості покриттів до середнього значення повинно бути не менше 0,4 за норми середньої яскравості більше 0,6 кд/м<sup>2</sup> і не менше 0,3 – за норми середньої яскравості 0,6 кд/м<sup>2</sup> і нижче.

Відношення мінімальної яскравості покриття до максимальної по смузі руху повинно бути не менше 0,6 за норми середньої яскравості більше 0,6 кд/м<sup>2</sup> і не менше 0,4 – за норми середньої яскравості 0,6 кд/м<sup>2</sup> і нижче.

**Таблиця сили світла для Philips SGS254GB**

$\gamma \backslash C$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
0	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142	142
15	143	160	177	181	177	160	143	135	134	135	134	135	143
30	153	227	275	275	275	227	153	133	133	134	133	133	153
45	173	319	339	286	339	319	173	131	120	112	120	131	173
60	187	302	231	186	231	302	187	119	93	82	93	119	187
75	96	127	59	43	59	127	96	68	49	39	49	68	96
90	1,81	2,61	0,8	0	0,8	2,61	1,81	1,91	2,01	3,01	2,01	1,91	1,81