

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
В. о. завідувача кафедри

---

Олександр ЮРЧЕНКО

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Підвищення ефективності та надійності системи  
зовнішнього освітлення м. Українка Київської області»

Виконала

\_\_\_\_\_ (підпис)

Анастасія КУЗЬМИНСЬКА  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група

З ЕТЕ 2401м

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Віктор КОЗІН  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Олена ДОВЖИК  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**завдання** на дипломну (магістерську) роботу

## АНОТАЦІЯ

**Кузьминська Анастасія Олександрівна** «Підвищення ефективності та надійності системи зовнішнього освітлення м. Українка Київської області».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

У роботі виконано огляд існуючої системи вуличного освітлення м. Українка Київської області та запропоновано способи її модернізації із застосуванням сучасних методів енергозбереження на основі використання димінгу та автономних систем електропостачання із використанням міні сонячної електростанції. Доведено можливість уніфікації розробленої автономної системи енергозабезпечення одиничного вузла вуличного освітлення для умов його використання для різних класів проїзних частин та режимів димінгу, що застосовуються у населених пунктах. Досліджено вплив профілю димінгу на енергоспоживання і ресурс АКБ. Подано докладні рекомендації щодо проведення поетапної модернізації системи зовнішнього освітлення м. Українка Київської області з можливістю їх подальшого масштабування для інших населених пунктів.

У економічному розділі виконано розрахунки економічної доцільності впровадження димінгу для автономної системи вуличного освітлення з живленням від сонячних панелей. Виконано порівняльний економічний розрахунок системи зовнішнього освітлення для різних профілів димінгу.

У розділі «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» наведено основні заходи з охорони праці, техніки безпеки та пожежної безпеки для систем зовнішнього освітлення, виконано розрахунки безпечної експлуатації та обслуговування вуличного світильника.

Кваліфікаційна робота має апробацію на 31-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в індустрії 5.0» (21-23 жовтня 2025 р.).

**Ключові слова:** світильник, димінг, вуличне освітлення, автономне джерело живлення, сонячна електростанція, моделювання.

## ABSTRACT

**Kuzmyska Anastasiia** «Improving the efficiency and reliability of the outdoor lighting system in the city of Ukrainka, Kyiv region».

Qualification work for a master's degree in electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics under the educational programme 'Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics' in the speciality 141 'Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics', Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

The thesis reviews the existing street lighting system in the city of Ukrainka, Kyiv Region, and proposes ways to modernise it using modern energy-saving methods based on the use of dimming and autonomous power supply systems using a mini solar power plant. The possibility of unifying the developed autonomous power supply system for a single street lighting node for use in different classes of roadways and dimming modes applied in populated areas has been proven. The influence of the dimming profile on energy consumption and battery life has been investigated. Detailed recommendations have been provided for the phased modernisation of the outdoor lighting system in the city of Ukrainka, Kyiv Region, with the possibility of further scaling for other settlements.

The economic section contains calculations of the economic feasibility of implementing dimming for an autonomous street lighting system powered by solar panels. A comparative economic calculation of the outdoor lighting system for different dimming profiles has been performed.

The section «Occupational health and safety in emergency situations» outlines the main occupational health, safety and fire safety measures for outdoor lighting systems and provides calculations for the safe operation and maintenance of street lighting.

The thesis was approved at the 31<sup>st</sup> International Scientific and Practical Conference 'Innovative Technologies in Industry 5.0' (21-23 October 2025).

**Keywords:** luminaire, dimming, street lighting, autonomous power supply, solar power station, modelling.

## ЗМІСТ

	С.
ЗАВДАННЯ.....	2
АНОТАЦІЯ.....	3
ВСТУП.....	8
<b>1 АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ</b>	
<b>М. УКРАЇНКА ТА НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Огляд сучасних підходів до проєктування, експлуатації і диспетчеризації систем зовнішнього освітлення.....	12
1.2 Класифікація вулично-дорожніх просторів і класів освітлення.....	13
1.3 Огляд системи зовнішнього освітлення м. Українка.....	14
Висновки до розділу 1.....	18
<b>2 МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....</b>	
2.1 Загальні положення.....	19
2.2 Фотометричне моделювання.....	19
2.3 Моделі надійності елементів системи зовнішнього освітлення.....	24
2.4 Методика розрахунку електричних режимів і захисту.....	26
2.5 Енергетичне моделювання з урахуванням димінгу.....	27
2.6 Алгоритм застосування моделювання для м. Українка.....	31
Висновки з розділу 2.....	32
<b>3 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ СИСТЕМ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....</b>	
3.1 Вибір LED-світильників та інтерфейсів керування.....	34
3.2 Оптична оптимізація системи освітлення.....	35
3.3 Автоматизація системи вуличного освітлення.....	36
3.4 Реконфігурація освітлювальних мереж.....	37
3.5 Захист від перенапруг у освітлювальних мережах.....	38
3.6 Пілотні ділянки освітлювальних мереж.....	38
3.7 Вимоги до обладнання освітлювальних мереж.....	39

3.8 Очікувані ефекти та сумісність у системі вуличного освітлення.....	40
Висновки з розділу 3.....	40
<b>4 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ.....</b>	<b>44</b>
4.1 Енергоефективна автономна система зовнішнього освітлення.....	48
4.2 Дослідження вимог щодо класу освітлення.....	64
4.3 Дослідження впливу профілю димінгу на енергоспоживання і ресурс АКБ.....	70
Висновки з розділу 4.....	74
<b>5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....</b>	<b>75</b>
5.1 Методика фінансового моделювання.....	76
5.2 Техніко-економічний розрахунок впровадження димінгу у автономній системі вуличного освітлення.....	81
5.3 Економічна оцінка впливу профілю димінгу у автономній системі вуличного освітлення.....	84
Висновки з розділу 5.....	87
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>88</b>
6.1 небезпечні чинники і типові ризики у системі вуличного освітлення.....	88
6.2 Оцінка ризиків і керування ними.....	90
6.3 Заходи з техніки безпеки і охорони праці.....	90
6.4 Інженерні розрахунки з питань охорони праці і техніки безпеки.....	92
Висновки до розділу 6.....	96
ВИСНОВКИ.....	97
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	101

## ВСТУП

Інфраструктура вулично-дорожнього освітлення більшості українських громад сформована фрагментарно, із багаторічною стратифікацією обладнання різних поколінь і виробників, що спричиняє підвищені втрати електроенергії, нерівномірність світлорозподілу, недостатній рівень світлотехнічних показників на пішохідних переходах та вузлах конфліктної взаємодії потоків, а також високу частоту відмов застарілих джерел світла і пускорегулювальної апаратури. У поєднанні з актуальними обмеженнями енергосистеми та необхідністю гарантованого забезпечення критичних функцій міського середовища (нічна навігація, безпека руху, відеоспостереження, робота об'єктів комунального господарства) це формує нагальну потребу у керованій, стандартизовано спроектованій та телеметрованої системі освітлення з прогнозованими показниками енергоефективності й готовності. Водночас Україна гармонізувала ключові європейські стандарти зі вуличного та дорожнього освітлення, що усуває невизначеність вимог і створює усталене нормативне поле для модернізації: чинна серія ДСТУ EN 13201 охоплює вибір класів освітлення, світлотехнічні вимоги, методи розрахунку і польових вимірювань, а також індикатори енергетичної ефективності, тож проєктні рішення можуть спиратися на однозначно інтерпретовані критерії якості та енергоощадності [1–5]. Додатково, на рівні національних правил і будівельних норм встановлено вимоги електробезпеки, якості електроенергії та містобудівних параметрів вулично-дорожнього простору, що забезпечує сумісність і безпечність рішень у складі міських електричних мереж і транспортної інфраструктури [6–11]. З урахуванням зростання чутливості світлодіодних драйверів до квазіімітаційних режимів і перенапруг (атмосферних та комутаційних) обов'язковими стають вимоги до блискавкозахисту і до правильного підбору пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗП) за класами, узгодженими з європейськими нормами, прийнятими як ДСТУ [12; 13].

Зазначене створює підґрунтя для комплексної модернізації, орієнтованої на вимірювано нижчі питомі витрати електроенергії при гарантованому досягненні нормативних світлотехнічних показників і підвищеній відмовостійкості системи. Підхід базується на об'єктивних, відтворюваних процедурах моделювання і верифікації, визначених гармонізованими стандартами, які в Україні мають статус чинних: зокрема ДСТУ CEN/TR 13201-1 (алгоритми вибору класів), ДСТУ EN 13201-2 (експлуатаційні вимоги до освітленості/яскравості та рівномірності), ДСТУ EN 13201-3 (методи розрахунку), ДСТУ EN 13201-4 (методи польових вимірювань) і ДСТУ EN 13201-5 (показники енергетичної ефективності) [1–5]. Чинність частин 3 і 4 у редакціях з оновленими датами набрання чинності підтверджено відповідними наказами національного органу стандартизації, що прямо важливо для коректного планування інструментальних вимірювань і приймально-здавальних випробувань модернізованих ділянок у 2024–2025 роках.

**Актуальність дослідження.** Більшість ділянок системи зовнішнього освітлення м. Українка сформована з різноманітного обладнання, що спричиняє підвищені втрати електроенергії, недостатню відповідність світлотехнічним показникам і підвищену відмовність. В умовах обмежень енергосистеми та вимог безпеки дорожнього руху актуальним є науково обґрунтоване підвищення енергоефективності та готовності системи з гарантованою відповідністю вимогам ДСТУ EN 13201 і чинним електротехнічним нормам.

**Мета дослідження.** Науково-технічне обґрунтування та розроблення комплексу рішень з підвищення енергоефективності, надійності та світлотехнічної якості системи зовнішнього освітлення м. Українка з урахуванням чинних національних і гармонізованих європейських стандартів, топології мереж і експлуатаційних обмежень.

Для досягнення мети визначено послідовні **завдання**: виконати огляд існуючої ситуації системи зовнішнього освітлення у м. Українка Київської області; класифікувати ділянки за функціональним призначенням та інтенсивностями потоків із присвоєнням класів освітлення за

ДСТУ SEN/TR 13201-1; виконати світлотехнічне моделювання і багатоваріантні перерахунки відповідно до ДСТУ EN 13201-3 з метою забезпечення вимог ДСТУ EN 13201-2 до середніх значень яскравості та освітленості, рівномірності та показників сліпучої дії; сформувати енергетичний профіль та розробити сценарії керування (астрономічні/адаптивні) з оцінкою річного споживання електроенергії та індикаторів ДСТУ EN 13201-5; провести перевірку електричних режимів системи автономного живлення світлоточки (падіння напруги, селективність захистів) з урахуванням вимог ПУЕ та ДСТУ EN 50160; підготувати техніко-економічне обґрунтування з оцінкою  $LCC/TCO$ ,  $NPV$ ,  $IRR$ , строку окупності.

**Об'єкт дослідження** – система зовнішнього освітлення м. Українка як складна електротехнічна інфраструктура, що включає мережі живлення, світлоточки, комутаційно-захисні пристрої, системи керування і телеметрії, засоби грозозахисту та обліку електроенергії.

**Предмет дослідження** – методи та технічні рішення з підвищення енергоефективності і надійності системи, включаючи світлотехнічне моделювання за ДСТУ EN 13201, інтеграцію керованих LED-світильників, оптимізацію схем живлення, застосування ПЗПП і блискавкозахисту відповідно до ДСТУ EN 62305 та ДСТУ EN 61643-11, впровадження диспетчеризації [2–5; 12; 13].

**Наукова новизна** очікуваних результатів полягає у формуванні інтегрованої методики модернізації міської системи освітлення, яка синхронізує:

- 1) багатокритеріальне світлотехнічне проектування та польову верифікацію за чинною серією ДСТУ EN 13201;
- 2) надійнісно-орієнтоване структурування мереж (секціонування, резервування живлення критичних ділянок, селективність захистів) із формалізованими показниками  $MTBF$ ,  $MTTR$ , коефіцієнтом готовності;
- 3) енергетичну оптимізацію на рівні годинних профілів споживання з урахуванням алгоритмів димінгу і показників енергоефективності за ДСТУ EN 13201-5;

4) поєднання вимог ПУЕ, ДБН В.2.5-28 і ДБН В.2.3-5 з електромагнітною сумісністю і якістю електроенергії за ДСТУ EN 50160;

5) повномасштабну реалізацію грозозахисту та координації ПЗП у світлоточках і шафах керування під стандартизовані рівні імпульсної витривалості LED-драйверів.

**Практична значущість** роботи полягає у розробленні пакету прикладних рішень для м. Українка: типових вимог до світильників, алгоритмів димінгу для різних зон, схеми секціонування і координації захистів, регламенти застосування ПЗП, протоколи вимірювань і приймання, що забезпечують досягнення нормативної світлотехнічної якості при зниженні питомого енергоспоживання та підвищенні готовності. [2–5; 12; 13]

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, список використаних джерел (92 найменування).

Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки – 110 сторінок.

# **1 АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ М. УКРАЇНКА ТА НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ**

Система зовнішнього освітлення населеного пункту є інженерним комплексом, що поєднує джерела світла, світильники з оптикою і драйверами, опори з кронштейнами, шафи керування та комутації, кабельні і повітряні лінії, вузли обліку електроенергії, засоби грозо- та захисту від перенапруг, а також підсистеми диспетчеризації. Для м. Українка, як компактного міського утворення на Дніпровському каскаді з різнотипними функціональними зонами – магістральними вулицями, житловими кварталами, рекреаційними набережними та мостовими переходами – вимоги до освітлення мають базуватися на чинній серії гармонізованих стандартів ДСТУ EN 13201 та національних нормативних актах, які визначають експлуатаційні показники, методи розрахунку і вимірювання світлотехнічної якості, а також вимоги до електробезпеки, якості електроенергії і конструктивної безпеки світильників. У цьому розділі наведено огляд сучасних підходів до проєктування, експлуатації та диспетчеризації вуличного освітлення, систему класифікації вулично-дорожніх просторів за класами М/С/Р, критерії якості (середня яскравість або освітленість, рівномірність, обмеження сліпучої дії через індикатори TI/GR), методику інвентаризації наявної інфраструктури м. Українка, підходи до складання вихідного енергетичного балансу, оцінювання показників надійності та якості електроенергії, структуру експлуатаційних витрат і типових відмов, а також процедуру виявлення невідповідностей і «вузьких місць» системи з погляду нормативної відповідності і подальшої модернізації [14–27].

## **1.1 Огляд сучасних підходів до проєктування, експлуатації і диспетчеризації систем зовнішнього освітлення**

Сучасне проєктування вуличного освітлення ґрунтується на виборі класів освітлення відповідно до ДСТУ SEN/TR 13201-1 (алгоритм класифікації дорожніх сцен і користувацьких сценаріїв) та забезпеченні експлуатаційних

показників, установлених ДСТУ EN 13201-2, які тракуються як «класи освітлення» для конкретних категорій простору і умов руху. Розрахунковий етап виконується за ДСТУ EN 13201-3 із використанням фотометричних даних світильників і геометрії вулиць, підтвердженням відповідності здійснюється інструментальними вимірюваннями відповідно до ДСТУ EN 13201-4, оцінки енергетичної ефективності за індикаторами Частини 5 серії (ДСТУ EN 13201-5). На рівні конструктивної і електричної безпеки застосовують ДСТУ EN 60598-1 і ДСТУ EN 60598-2-3, які регламентують вимоги та випробування світильників для доріг і вулиць, включно зі ступенями захисту оболонок, механічною стійкістю, електробезпекою та фотобіологічними аспектами. Паралельно повинні виконуватися вимоги ДБН В.2.5-28:2018 до зовнішнього освітлення територій і ДБН В.2.3-5:2018 щодо категоризації вулиць, геометрії та організації руху, що зумовлює вибір класу освітлення і світлорозподілів. Диспетчеризація орієнтується на керування профілями вмикання/вимикання і димінгу (плавного регулювання світлового потоку) з урахуванням добових профілів трафіку та безпекових зон, а також на моніторинг електричних параметрів і подій. Усі розрахунки та вимірювання виконуються в умовах, що відповідають вимогам до якості електроенергії (ДСТУ EN 50160) і методам вимірювання показників якості (ДСТУ EN 61000-4-30), а також до правил улаштування електроустановок (ПУЕ) у частині захисту, заземлення, селективності і електробезпеки [14–27].

## **1.2 Класифікація вулично-дорожніх просторів і класів освітлення**

Відповідно до серії ДСТУ EN 13201, дорожні сцени класифікують за трьома групами класів освітлення: «М» (motorized, проїзна частина для транспортних засобів на швидкостях, характерних для магістралей і головних вулиць), «С» (conflict areas – перехрестя, кільцеві розв'язки, площі, стики потоків) і «Р» (pedestrian – пішохідні та житлові зони, тротуари, внутрішньоквартальні проїзди). Для класів М цільовим параметром є середня яскравість дорожнього покриття  $\bar{L}, \text{кд} / \text{м}^2$ , та її рівномірність  $U_0 = L_{\min} / \bar{L}$ , поздовжня рівномірність  $U_L$

, індикатор обмеження сліпучої дії  $TI$ , %, та пороговий приріст засвічення. Для класів С і Р використовують середню горизонтальну освітленість  $\bar{E}_h,лк$ , мінімальну освітленість  $E_{min}$  і рівномірність  $U_0 = E_{min} / \bar{E}_h$ , а також показник дискомфорту  $GR$  для оцінювання сліпучої дії. Вибір конкретного підкласу (M1–M6, C0–C5, P1–P7) виконується за ДСТУ СЕН/TR 13201-1 на основі інтенсивностей і структур потоків, швидкісних режимів, частки вразливих учасників руху, конфігурації простору і оточення, а також безпекових факторів. Розрахунок і перевірка показників здійснюються за методикою Частини 3 і вимірювальними процедурами Частини 4; енергоефективні варіанти порівнюють за індикаторами Частини 5, включно зі специфічним споживанням і класифікаційними енергетичними індикаторами, що враховують профілі керування світловим потоком протягом ночі [14–18].

### 1.3 Огляд системи зовнішнього освітлення м. Українка

Базовим етапом модернізації є повна інвентаризація світлоточок і мереж. Для кожної світлоточки фіксуються тип світильника (ДНаТ/ДРЛ/LED), номінальна потужність  $P_{ном}, Вт$ , тип і ККД драйвера/ПРА, фотометричний файл (IES/ULD/LDT), корельована колірна температура ССТ,  $K$ , індекс кольоропередачі  $R_a$ , оптичний код (тип кривої сили світла), сумісність з інтерфейсами керування (0–10 V, DALI/D4i), ступінь захисту IP, клас електрозахисту, наявність вбудованих ПЗП (SPD) та їх клас, виробник і дата встановлення. Для опор – матеріал, висота  $H$ , м, винос кронштейна  $d$ , м, крок опор  $S$ , м, стан фундаментів, зона корозії. Для шаф керування – типове позначення, схема живлення, автоматичні вимикачі і ПЗВ, контактори/димери, лічильники, модеми/контролери, системи АСКОЕ, клас/тип ПЗП на вводі (T1/T2). Для ліній – тип кабелю (матеріал, переріз), довжини, глибина прокладання, маркшейдерні схеми, опори ПЛ-0,4 кВ, розрахункові падіння напруги, петлі фаза-нуль, опір заземлення. Дані інвентаризації структуруються у геоінформаційну базу з прив'язкою до ділянок і класів освітлення, що

забезпечує репрезентативний вибір для світлотехнічного перерахунку за ДСТУ EN 13201-3 та планування польових вимірювань за ДСТУ EN 13201-4. Вимоги до самих світильників і їхніх випробувань забезпечуються ДСТУ EN 60598-1 і ДСТУ EN 60598-2-3; відповідність вимогам до зовнішнього освітлення територій, пішохідних переходів і фасадного підсвічування підтверджується ДБН В.2.5-28:2018 [19; 22; 23].

Місто Українка Київської області засноване 1979 року та має площу 5,91 км<sup>2</sup>, населення 16081 осіб (станом на 01.01.2022 р.), координати 50°9' пн.ш., 30°45' сх. д. (рис. 1.1, 1.2) Точна інформація щодо загальної кількості і стану системи зовнішнього освітлення м. Українка відсутня у відкритому доступі. Однак, використовуючи відкриті дані Google Map, можна оцінити загальну довжину мережі зовнішнього освітлення до 40 км, у тому числі невеликих вулиць і провулків, що може бути оцінено у близько 1100 світлоточок при середній відстані 35–37 м/світлоточку. Однак до найбільших і найважливіших вулиць, що забезпечують цілодобову життєдіяльність міста, можна віднести: вул. Будівельників (798 м); Дніпровський проспект (1633 м); вул. Юності (3273 м); вул. Південна (1960 м); вул. Промислова (2656 м). Отже, загальна протяжність критично важливих вулиць міста – 10320 м, що при середній відстані 35–37 м/світлоточку відповідає близько 300 світлоточок, які надалі будемо брати до уваги при аналізі системи вуличного освітлення м. Українка.

У місті переважають повітряні лінії електропередачі. У даний час основний тренд – встановлення LED-світильників, що поступово витісняють натрієві високого тиску (ДНАТ/HPS) на вулично-дорожній мережі. У м. Українка відбувається поступова заміна світильників на LED та встановлення автономних LED на переходах.

Орієнтовна структура вуличних світильників на даний час (оцінно):

1) 70 % – консольні дорожні LED-світильники (оптика для класів М за ДСТУ EN 13201; потужність 30–100 Вт; драйвер із нічним профілем і димінгом; IP65/66); середня кількість відмов 0,3–1,5 %/рік;

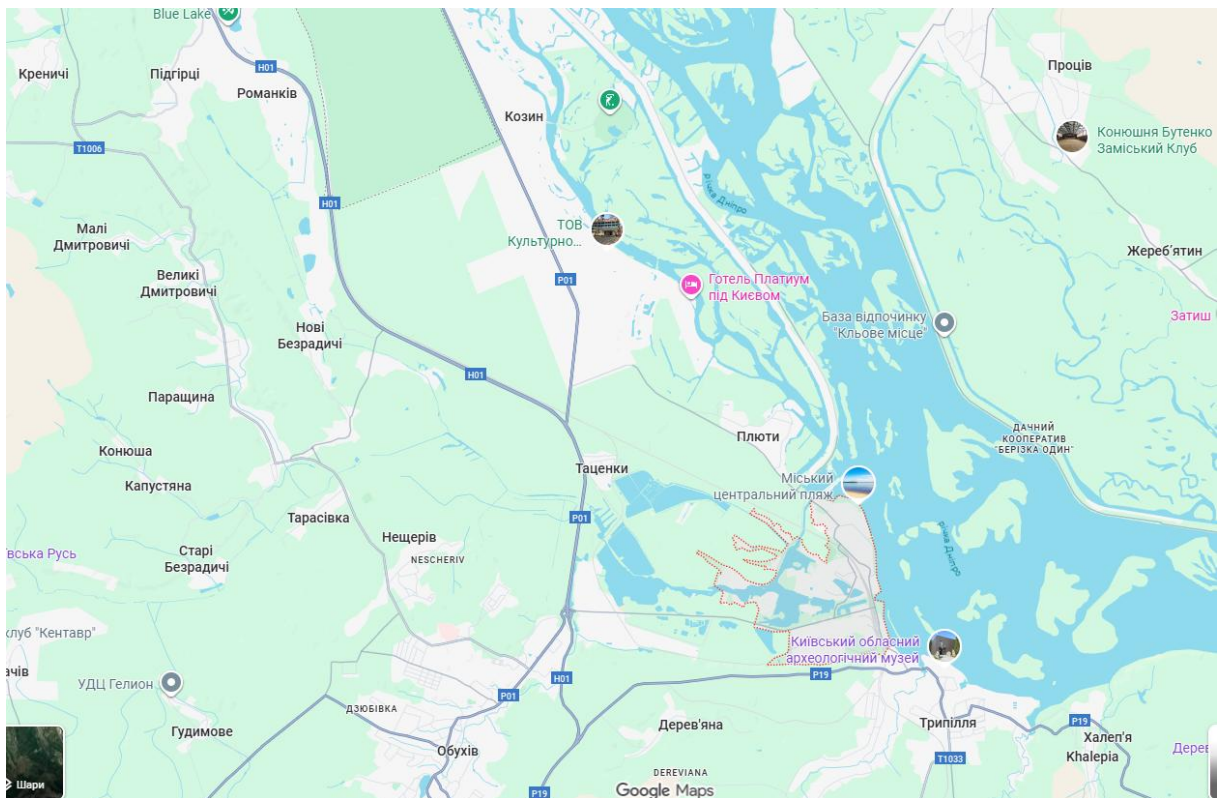


Рисунок 1.1 – Територіальне розміщення м. Українка

2) 20 % – консольні НPS-світильники під ДНаТ 70/100/150 *Вт* із ПРА (електромагнітним або електронним); середня кількість відмов 7–10 %/рік;

3) 5 % – паркові/декоративні опори зі світильниками типу «кульові/декоративні голови» – часто з LED-модулями E27/інтегрованими; середня кількість відмов 0,3–1,5 %/рік;

4) 5 % – інтегровані автономні (сонячні) LED-комплекси для пішохідних переходів (панель PV, АКБ, LED-модуль, датчики руху/освітленості, автономія  $\geq 1$ –3 діб) середня кількість відмов 1–3 %/рік.

Режими роботи системи освітлення: від заходу до світанку до запровадження військового стану та відключення під час комендантської години (з 23:00 до 5:00); нічне приглушення можливе за рішеннями громади/області. Автономні переходи працюють адаптивно за датчиками.

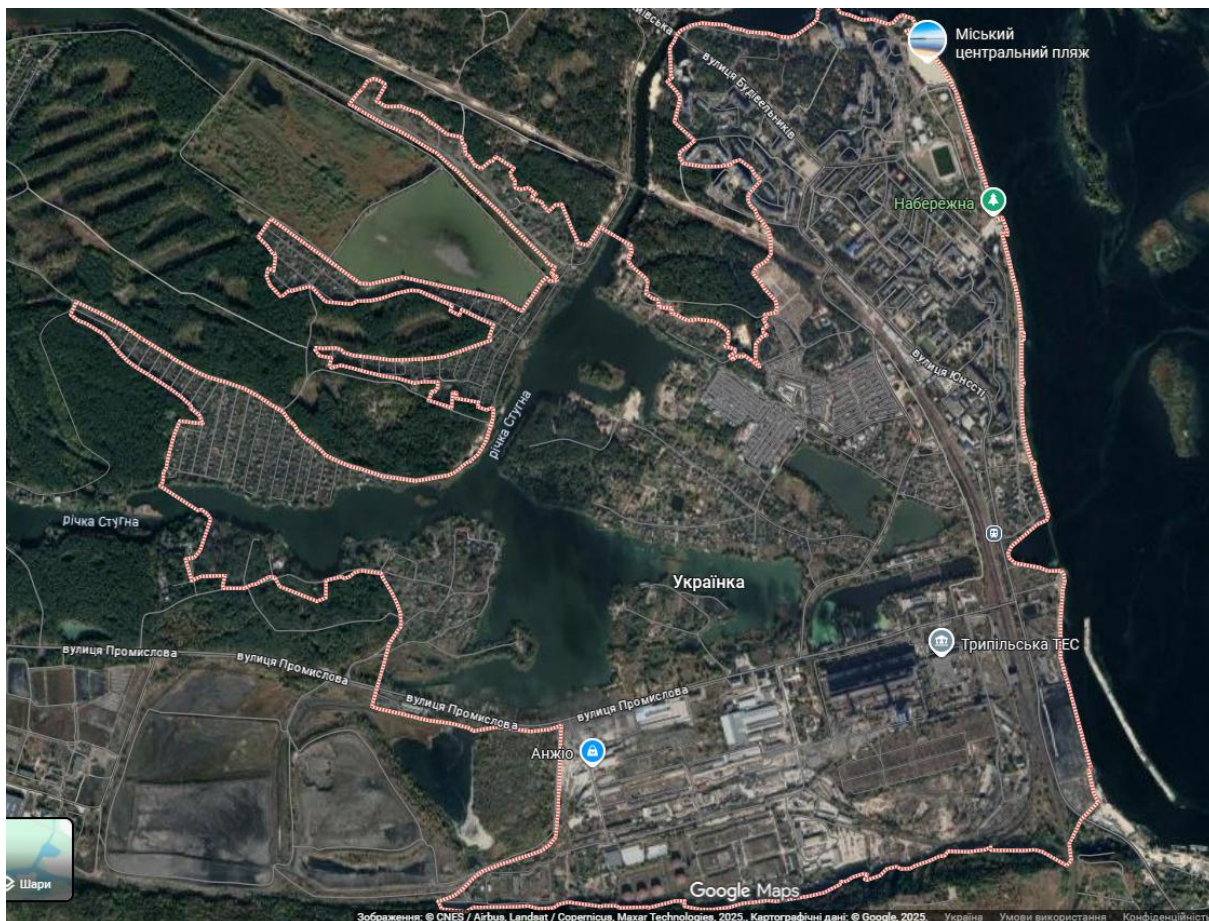


Рисунок 1.2 – Територія м. Українка з вказанням основних вулиць

Наявні енергозберігаючі підходи щодо системи вуличного освітлення у м. Українка за 2022–2025 рр.:

- встановлення автономних сонячних комплексів на переходах у кількості 49 світильників із використанням LED ламп та датчиків руху;

- точкова заміна аварійних залізобетонних опор у кількості 31 шт. із переходом на оцинковані металеві та використанням LED ламп, що зменшує споживану потужність системи при збереженні або покращенні освітленості;

3) оперативне технічне обслуговування та діагностика мереж після тривалих перерв у роботі у 2022–2023 рр.;

4) скорочення вуличного освітлення у вечірній та нічний час як захід енергозбереження та безпеки.

## **Висновки до розділу 1**

Нормативно-технічна база України забезпечує повний цикл – від класифікації дорожніх сцен і світлотехнічного проектування через розрахунок і вимірювання до енергетичної оцінки та експлуатаційного контролю. Системний аналіз стану зовнішнього освітлення м. Українка має спиратися на інвентаризацію активів, перевірку світлотехнічної відповідності класам M/C/P, оцінювання енергетичних і надійнісних показників, якості електроенергії, ідентифікацію «вузьких місць» у мережах та захистах. У межах модернізації доцільно інтегрувати керований димінг, секціонування і координацію захистів, комплексний ПЗП/блискавкозахист і за потреби – СЕС, приєднану за ДСТУ EN 50549-1 і введену в експлуатацію за ДСТУ EN 62446-1, що разом із енергоменеджментом дозволяє досягнути нормативних показників безпеки дорожнього руху, енергоефективності та високої готовності системи [14–29].

## 2 МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

### 2.1 Загальні положення

Методологія охоплює чотири взаємопов'язані рівні аналізу:

1) фотометричне моделювання для репрезентативних ділянок вулично-дорожньої мережі (магістралі, перехрестя, пішохідні переходи) з перевіркою відповідності чинним класам освітлення М/С/Р за ДСТУ EN 13201;

2) моделі надійності елементної бази (LED-модулі, драйвери, захисні апарати, мережеве обладнання керування) з оцінкою  $\lambda$ , MTBF, MTTR, коефіцієнта готовності  $A$  і впливу структур системи;

3) розрахунки електричних режимів (втрати напруги, вибір перерізів, струми короткого замикання, селективність захистів, грозозахист SPD типів 1/2);

4) енергетичне та економічне моделювання життєвого циклу (профілі навантаження або димінгу,  $LCC/TCO$ ,  $NPV$ ,  $IRR$ , строк окупності, аналіз чутливості), а також телеметрія/керування і вимоги кіберзахисту з урахуванням українських і гармонізованих європейських норм [1–5; 34; 10; 25; 37; 38; 40; 43; 48]. Діючий в Україні комплекс ДСТУ EN 13201-1/-2/-3/-4/-5 від 01.07.2024 є основою для вибору класів, розрахунку та вимірювання світлотехнічних показників і енергетичних індикаторів, що забезпечує уніфікованість підходів і порівнянність результатів.

### 2.2 Фотометричне моделювання

Вихідні дані: геометрія (ширина проїзної частини  $W$ , кількість смуг  $n$ , ширина тротуарів/велодоріжок, відстані/виноси/висоти підвісу  $h$ , крок опор  $S$ ), класи покриття з R-таблицями (R1–R4), розміщення світильників (однобічне, двобічне, шахове, центральне), кути нахилу і оберту, фотометрія світильників ( $IES/LDT$ ), коефіцієнт підтримання  $MF$ , спектральні характеристики ( $CCT$ ,  $Ra$ ), фонові яскравість. Для конфліктних зон і пішохідних переходів додаються зони спостереження, переривчасті/спрямовані пучки, протисліпучі екрани [1; 2; 4; 5].

Критерії якості: для класів М (рух автотранспорту) – середня яскравість  $\bar{L}$ ,  $\text{кд} / \text{м}^2$ , загальна рівномірність  $U_0$ , поздовжня рівномірність  $U_l$ , сліпуча дія у вигляді порогового приросту  $TI$ , %, коефіцієнт яскравості узбіч  $REI$ ; для класів С/Р (конфліктні/пішохідні простори) – освітленість  $\bar{E}$ ,  $E_{\min}$ ,  $U_0 = E_{\min} / \bar{E}$ ,  $GR$  (discomfort glare). Розрахунок проводиться за EN 13201-3 з перевіркою вимірюваннями за EN 13201-4 [2–4].

Основні залежності наведено нижче:

– середня яскравість проїзної частини,  $\text{кд} / \text{м}^2$

$$\bar{L} = \frac{1}{A} \int_A \int_A L(x, y) dx dy, \quad (2.1)$$

де  $A$  – площа оцінювання,  $\text{м}^2$ ;

$L(x, y)$  – яскравість у точці,  $\text{кд} / \text{м}^2$ .

– рівномірність

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{\bar{L}}; \quad (2.2)$$

$$U_l = \frac{L_{\min.лан}}{L_{\max.лан}}; \quad (2.3)$$

– пороговий приріст у наближенні CIE/EN

$$TI = 65 \cdot \frac{L_v}{L_{ad}^{0,8}} \cdot 100 \%, \quad (2.4)$$

де  $L_v$  – «засвітлювальна» яскравість від джерел блиску,  $\text{кд} / \text{м}^2$ ;

$L_{ad}$  – адаптаційна яскравість дороги ( $\text{кд} / \text{м}^2$ ) [2; 3; 30].

Перехрестя й переходи моделюються із сітками за ДСТУ EN 13201-3, власними зонами оцінювання та, за потреби, локальними кривими сили світла. Рекомендовано верифікацію натурними вимірюваннями ( $\bar{L}$ ,  $U_0$ ,  $TI$  для М-класів;  $\bar{E}$ ,  $U_0$ ,  $GR$  для С/Р) за процедурами EN 13201-4 (класи точності приладів, траси, кроки вимірювань) [3].

**Вихідний енергетичний баланс.** Річне споживання електроенергії системою вуличного освітлення обчислюється як

$$E_y = \sum_{i=1}^N (P_{i,eff} \cdot t_{i,y}), \quad (2.5)$$

де  $N$  – кількість світлоточок;

$P_{i,eff}$  – середня ефективна потужність  $i$ -тої світлоточки з урахуванням режимів керування,  $кВт$ ;

$t_{i,y}$  – напрацювання протягом року,  $год/рік$ .

Для систем із димінгом зручно записати

$$P_{i,eff} = P_{i,nom} \cdot \sum_k (\alpha_k \cdot \tau_k), \quad (2.6)$$

де  $\alpha_k \in [0;1]$  – відносний рівень світлового потоку (та/або відсоток яскравості), що відповідає ступеню димінгу у  $k$ -му інтервалі;

$\tau_k$  – частка тривалості цього інтервалу від річної роботи.

Питомі енергетичні показники для порівняння сценаріїв визначаються як  $e_{pt} = E_y / N$ ,  $кВт \cdot год / (світлоточку \cdot рік)$  та  $e_{km} = E_y / L$ ,  $кВт \cdot год / (км \cdot рік)$ , де  $L$  – довжина освітлюваної мережі. Для оцінювання енергетичної ефективності

у сенсі ДСТУ EN 13201-5 застосовують нормативні індикатори, що інтегрують корекцію на клас освітлення, фотометричні цілі і профілі керування; ці індикатори використовують у техніко-економічному порівнянні варіантів модернізації [39].

**Показники надійності.** Для елементів системи вважають вихідними інтенсивність відмов  $\lambda$ , *відмов/год*, і середній час напрацювання на відмову, *год*, за експоненційної моделі безвідмовної роботи

$$MTBF = 1 / \lambda, \quad (2.7)$$

середній час відновлення *MTTR*, *год*, та коефіцієнт готовності

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}. \quad (2.8)$$

Додатково на мережевому рівні обліковують частоту перерв у живленні  $n_{out}$ , *подій/(рік·ділянку)*, та сумарну тривалість перерв  $t_{out}$ , *год/(рік·ділянку)*, з розмежуванням за причинами (аварійні комутації, грозові перенапруги, планові роботи). Підвищення готовності досягається координацією апаратури захисту за ПУЕ, впровадженням секціонування ліній, правильною установкою ПЗІП за ДСТУ EN 61643-11 і виконанням блискавкозахисту згідно з ДСТУ EN 62305-3, що знижує кількість відмов драйверів і модулів LED унаслідок імпульсних перенапруг [46–48].

**Якість електроенергії.** Вимоги до параметрів напруги у мережах загального призначення визначено ДСТУ EN 50160, який задає діапазони відхилень напруги, частоти, коефіцієнтів несинусоїдності та флікера для мереж низької і середньої напруги. Відповідно до метрології оцінювання якості застосовуються класи вимірювань за ДСТУ EN 61000-4-30. У розрахунках і вимірюваннях використовують коефіцієнт потужності  $PF = P / S$  (для

несинусоїдальних режимів) і  $PF \approx \cos \varphi$  за відсутності істотних вищих гармонік; повний коефіцієнт гармонік струму

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100 \% , \quad (2.9)$$

де  $I_1$  – амплітуда основної гармоніки;

$I_h$  – амплітуда  $h$ -тої гармоніки.

Дотримання вимог якості електроенергії є необхідною передумовою коректної роботи драйверів і правильного визначення енергетичних індикаторів ДСТУ EN 13201-5. У частині обмеження вищих гармонік і коливань напруги (флікери) для підключених пристроїв із вхідним струмом до 16 А застосовують гармонізовані стандарти серії EN 61000-3; в українській практиці для вимірювань і нормоконтролю насамперед посилаються на ДСТУ EN 50160 та ДСТУ EN 61000-4-30 як базові документи щодо показників і методики вимірювання [45–47].

**Експлуатаційні витрати та типові відмови.** Структура експлуатаційних витрат охоплює оплату електроенергії  $C_e = E_y \cdot t_e$ , де  $t_e$  – середній тариф, грн/(кВт·год), планове обслуговування  $C_{pm}$ , аварійно-відновлювальні роботи  $C_{em}$ , витрати на зв'язок/диспетчеризацію  $C_{scada}$ , заміну витратних матеріалів і ПЗП  $C_{spd}$ . Типові технічні збої в українських мережах вуличного освітлення – деградація оптичних систем (пожовтіння лінз/розсіювачів), відмови LED-драйверів від перенапруг, корозія з'єднань і контактні пошкодження у розподільчих коробках, старіння ізоляції кабелів, перевантаження ліній і розбаланс фаз у мережах 0,4 кВ. Нормативні рішення щодо обмеження перенапруг оформлюють за ДСТУ EN 61643-11 із класифікацією ПЗП типів 1/2/3; блискавкозахист споруд і опор – за ДСТУ EN 62305-3; вимоги до

світильників, їхніх ступенів захисту та стійкості – за ДСТУ EN 60598-1/-2-3; вимоги до мережевих режимів і захистів – відповідно до ПУЕ [43; 44; 46–48].

Виявлення невідповідностей нормам і «вузьких місць» системи. На основі порівняння розрахункових та вимірних значень  $\bar{L}$ ,  $\bar{E}_h$ ,  $U_0$ ,  $U_L$ ,  $TI/GR$  із вимогами присвоєного класу освітлення визначаються ділянки з недосягненням середніх значень, провалами рівномірності, перевищенням дискомфорту або надмірною сліпучою дією. Електротехнічні аналізи виявляють лінії зі збільшеними падіннями напруги, недостатність перерізів або неузгодженість апаратури захисту (відсутність селективності). Окремо виділяються точки з підвищеною імовірністю імпульсних пошкоджень від грозових струмів і комутаційних перенапруг, для яких за результатами аудиту ПЗП і заземлення визначається необхідність модернізації. На рівні енергетичної ефективності зіставляють питомі індикатори  $e_{pt}$  і  $e_{km}$  із типовими значеннями для відповідних класів і режимів керування за ДСТУ EN 13201-5. Відхилення в бік підвищеного споживання як правило свідчать про нераціональні профілі димінгу, високу частку застарілих світильників або надлишкові рівні освітлення порівняно з вимогами класу [10; 13; 25; 38; 39; 45].

## **2.3 Моделі надійності елементів системи зовнішнього освітлення**

### **2.3.1 Загальні показники та припущення**

Для LED-світильників і драйверів використовуються інтенсивність відмов  $\lambda \text{ год}^{-1}$ , середній напрацювання до відмови  $MTBF$ , середній час відновлення  $MTTR$ , готовність  $A$ . За експлуатаційними даними муніципальних мереж  $\lambda$  для вуличних LED-світильників знаходиться як правило у діапазоні  $(1-5) \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$  для драйверів та для світлодіодних модулів  $(0,2-2) \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$ . За результатами моделювання ці значення уточнюють за статистикою ремонту міста [31–33; 35].

### **2.3.2 Структурні схеми**

#### **а) Послідовна система**

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t), \quad (2.10)$$

де  $R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$  – за умови сталої інтенсивності освітлення.

б) Паралельна (резервована)

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i(t)). \quad (2.11)$$

Для вузла «світильник» послідовне з'єднання «LED-модуль + драйвер + SPD світильника» визначає домінуючий внесок драйвера у загальну структуру відмов  $\lambda$ . Резервування можливе на рівні ліній та ділянок мережі.

### 2.3.3 Моделі відновлення

Для ремонтпридатного об'єкта двостанової моделі (працює/відмова) з параметрами  $\lambda$  і  $\mu = 1/MTTR$  стаціонарна готовність:

$$A_\infty = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}. \quad (2.12)$$

Для каскадів (шафа керування – лінія – світильник) розглядаються неперервні марковські ланцюги з графом станів і інтенсивностями переходів [31; 32; 34].

## 2.4 Методика розрахунку електричних режимів і захисту

### 2.4.1 Вибір перерізів проводів і перевірка за втратами напруги

Розрахункова втрата напруги на ділянці довжини  $l$ , км, для трифазної лінії, В

$$\Delta U = \sqrt{3}I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)l, \quad (2.13)$$

де  $I$  – лінійний струм, А;

$R$ ,  $X$  – питомі опір/реакт. провідника, Ом/км;

$\varphi$  – кут навантаження.

Критерій  $\Delta U / U_n \leq 5\%$  (як правило 3–5 % для освітлювальних ліній у нормальному режимі). Вибір і прокладання відповідно до ДСТУ HD 60364-5-52 (добір перерізу за нагрівом, механікою, умовами прокладання) [36].

### 2.4.2 Струми короткого замикання та селективність

Еквівалентний початковий надперехідний струм КЗ на шині, А

$$I_K'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3Z_\Sigma}}, \quad (2.14)$$

де  $U_n$  – номінальна лінійна напруга, В;

$Z_\Sigma$  – сумарний еквівалентний опір до точки КЗ, Ом;

$c$  – поправковий коефіцієнт.

Подальший добір апаратів із урахуванням граничної відсічної здатності, теплових і динамічних впливів; перевірка часово-струмових характеристик для селективності (вимикачі/плавкі запобіжники «шафа – лінія – опора/світильник») [37]. Напруга живлення має відповідати ДСТУ EN 50160; якість вимірюється за

ДСТУ EN 61000-4-30, гармонійні складники/коефіцієнт потужності – за ДСТУ EN IEC 61000-3-2/-3-12 (для відповідних діапазонів струмів) [10; 25; 38; 47; 49].

### **2.4.3 Захист від перенапруг і блискавкозахист**

Ввідні щити і комплектні розподільчі пункти (КРП) у зонах зовні або на межі об'єкта, де прямий удар блискавки виключено, але повний електромагнітний імпульс блискавки ще діє, а струми перенапруг від індукцій і наведень можуть бути дуже високими (LPZ0B) і внутрішня зона після первинного екранування (LPZ1), де струм імпульсу та поле вже частково обмежені або ослаблені засобами блискавозахисту та екрануванням, обладнуються захистом від перенапруг (SPD) тип 1 – грубим (первинним) захистом. Його завдання – прийняти частку струму блискавки та вирівняти потенціали, щоб далі за каскадом спрацювали SPD тип 2. SPD тип 1 випробують ударним струмом  $I_{imp}$  з високоенергетичною формою ударного струму блискавки 10/350 мкс. У свою чергу, розподільчі та виносні елементи електричної схеми системи вуличного освітлення, розміщені за ввідним щитом або КРП обладнують SPD тип 2, що випробують імпульсом 8/20 мкс з кратністю струму  $I_{max}/I_n$ . Координація рівнів захисту  $U_p$  між цими ступенями мережі та правильне заземлення є критично важливими для тривалої і надійної експлуатації драйверів LED-світильника. Методика вибору пристроїв захисту від перенапруг і блискавкозахисту повинна відповідати ДСТУ EN 61643-11 і ДСТУ EN 62305-4 [13; 39].

## **2.5 Енергетичне моделювання з урахуванням димінгу**

### **2.5.1 Профілі роботи системи**

Астрономічне керування задає часові діапазони роботи системи освітлення з урахуванням астрономічних параметрів схід–захід сонця з можливим урахуванням корекції цих значень для регіону розміщення системи, адаптивне керування визначає динамічні рівні у відсотках до номінального потоку за даними датчиків або телеметрії відповідно до даних трафіку, погодних умов, подій на місцевості).

Річне споживання для  $i$ -го світильника визначається виразом:

$$E_{y,i} = \sum_{d=1}^{365} \sum_k P_{n,i} \eta_{D,k} h_{d,k}, \quad (2.15)$$

де  $P_{n,i}$  – номінальна потужність,  $\text{kВт}$ ;

$\eta_{D,k}$  – коефіцієнт димінгу у  $k$ -му інтервалі,  $\eta_{D,k} \in (0;1]$ ;

$h_{d,k}$  – тривалість,  $\text{год}$ .

Сумарно

$$E_y = \sum_i E_{y,i}. \quad (2.16)$$

Енергетичні характеристики мережі повинні відповідати ДСТУ EN 13201-5 [4; 5].

### 2.5.2 Підходи до телеметрії та керування

Використовують архітектури сегментне керування через відключення цілих шаф або електричних ліній, а також покомпонентне, коли керуванню піддають окремо кожну світлоточку. Для світильників використовують роз'єми NEMA ANSI C136.41 (3/5/7-pin) або Zhaga Book 18 для підключення контролерів, фотореле, датчиків. Для керування застосовують аналоговий (0–10 В) або цифровий (DALI-2) протоколи димінгу. При виборі технології керування враховують можливі затримки, результати техніко-економічних розрахунків проєктів, необхідну пропускну здатність засобів телеметрії, кількість вузлів, наявність покриття операторів у місці встановлення GSM модему, вплив зовнішніх електромагнітних умов (гармонік і перешкод) з урахуванням дотримання вимог електромагнітного впливу самої системи освітлення, що вимагає використання екранування, скрученого кабелю керування, коротких трас

та спільного заземлення, і її електробезпеки. Наприклад, вибір аналогового (0–10 В) протоколу скорочує капітальні витрати, більш просто реалізується, реакція драйвера на нього буде практично миттєвою, однак він чутливий до можливих наводок та може створювати плаваючий рівень яскравості світильника. Цифровий протокол (DALI-2) з підтвердженням команд, адресацією і телеметрією має нижчу чутливість до перешкод, але більш дороговартісний і складний у обслуговуванні, а також має типові затримки впродовж десятків мілісекунд на команду (залежно від трафіку на шині).

### **2.5.3 Вимоги до кіберзахисту**

Оскільки інфраструктура зовнішнього освітлення з покомпонентним керуванням на рівні окремих вузлів (світильник, шафа, датчик) – це розподілена кіберфізична система, що поєднує фізичні пристрої і програмно-мережеві компоненти, що взаємодіють між собою у реальному часі, тому політики безпеки формуються на базі системи менеджменту інформаційної безпеки відповідно до ДСТУ ISO/IEC 27001 з ризик-орієнтованим підходом з управлінням безпекою через роботу з ризиками: ідентифікацією активів (сервери, контролери, дані тощо)), загроз (злами, збої, пожежі), вразливостей (незакриті порти, слабкі паролі), оброблення ризиків (уникнення, зниження, передача, прийняття) і профілю безпеки для індустріальних (операційних) систем керування за серією ДСТУ EN IEC 62443 з кіберзахисту, що визначає: моделі зон і шлюзів (поділ системи на ізольовані зони з однорідними вимогами безпеки та канали або шлюзи між ними з контрольованою взаємодією), вимоги до життєвого циклу безпечної розробки і впровадження (щодо процесних вимог до безпеки на всіх стадіях: дизайн → розробка → тестування → впровадження → експлуатація → виведення з експлуатації) з урахуванням рекомендацій Національного координаційного центру кібербезпеки при Раді національної безпеки і оборони України щодо сегментації та принципів моделі «нульової довіри» (Zero Trust) для критичних сервісів муніципалітету, яка встановлює що не можна довіряти жодному користувачу або пристрою за замовчуванням, а доступ надається лише

мінімально необхідний і тільки після перевірок на ідентичність та стан пристрою. [49–51].

Мережеве розмежування здійснюють:

1) виділенням керуючої підмережі (наприклад, віртуальної локальної VLAN);

2) створенням демілітаризованої зони (проміжного сегменту мережі для розміщення публічно доступних сервісів (серверів керування), із жорстким фільтруванням доступів ззовні та всередину) – DMZ – для сервера системи керування вуличним освітленням;

3) встановленням міжмережових екранів (Firewall) – пристроїв або програмного забезпечення для фільтрації трафіку за правилами доступу, що забезпечують політику брандмауера «deny-by-default» – заборонити все за замовчуванням і явно дозволяти лише необхідні з'єднання;

4) багатофакторною автентифікацією систем диспетчеризації, журналювання (збору і зберігання подій, логів безпеки тощо), систем централізованого збору, кореляції, аналізу та оповіщення за подіями безпеки (SIEM);

5) періодичним оновленням програмного забезпечення (у т.ч. DALI-2 Part 105) [45; 50–51].

#### **2.5.4 Узгодження методів моделювання**

Фотометричні профілі (гарантовані значення середньої яскравості проїзної частини  $\bar{L}$ , загальної рівномірності освітлення або яскравості  $U_0$ , індексу засліплення водія  $TI$  за EN 13201-2/-3/-4) є обмеженням для енергетичного димінгу: величина часової функції коефіцієнта димінгу світильника  $\eta_D(t)$  підбирається так, щоб при мінімальній його потужності (або світловому потоці) зберігався клас освітлення та допустиме відношення індексу засліплення водія до індексу дискомфорту від блиску  $TI/GR$ . Електричні розрахунки (HD 60364-5-52, EN 60909-0) дозволяють отримати площі перерізу проводів, обрати клас захисту пристроїв і визначити межі втрат напруги, що впливає на стабільність

фотометрії (через драйвери з ШІМ або ССR, і коефіцієнт потужності) і надійність (через напругу на драйверах, режим роботи SPD). Оперативна телеметрія (напрацювання годин, кількість спрацювань захистів, фіксація перенапруг) слугує вхідними даними для постійного оновлювання розрахункових моделей енергоспоживання та надійності реальними даними, що дає змогу у режимі реального часу коригувати оцінку повної вартості життєвого циклу та показник чистої приведеної вартості проєкту (*LCC/NPV*).

## **2.6 Алгоритм застосування моделювання для м. Українка**

Протягом виконання програми з підвищення енергоефективності і надійності системи вуличного освітлення необхідно дотримуватися алгоритму, поданого нижче:

- 1) вибирати репрезентативні ділянки (магістралі, перехрестя, переходи) та визначати їх геометрію;
- 2) моделювання світлотехнічних параметрів у нормальних режимах роботи та режимах з димінгом відповідно до EN 13201-3;
- 3) вимірювання контрольних величин фотометричних показників (середню яскравість, загальну рівномірність, поздовжню рівномірність, показник засліплення, коефіцієнт оточення – для класу M; середню освітленість, мінімальну освітленість, рівномірність освітлення – для класів C/P, а також крім того напівциліндричну освітленість – для пішохідних або конфліктних зон; за потреби фіксують електричну потужність світильника в обраному режимі димінгу) відповідно до EN 13201-4;
- 4) інвентаризація обладнання (світильник (корпус, оптика, LED-модуль, драйвер), захист від імпульсних перенапруг (SPD), фотоголовка, контролер у роз'ємах NEMA/Zhaga, опора, кронштейн, фундамент, лінійна арматура (скриньки з'єднань, роз'єми), кабелі, проводи, щити керування (автоматичні вимикачі, запобіжники, контактори, реле тощо), шафа, шафний контролер, заземлення, ПЗВ (за наявності), комунікаційні шлюзи (LoRaWAN/NB-IoT/PLC)) для побудови надійної схеми та оцінки світлотехнічних параметрів

інтенсивність відмов  $\lambda$ , середній напрацювання на відмову  $MTBF$ , середній час відновлення  $MTTR$ , готовність системи  $A$ ;

5) електричні розрахунки мереж (добір перерізів за допустимими струмами та падінням напруги  $\Delta U$ , перевірка термічної витривалості провідників, розрахунок петлі «фаза-PE»/«фаза-N» для забезпечення автоматичного відключення живлення, вибір і селективність захистів (MCB, gG тощо), перевірка умов захисту від непрямих доторкань і заземлення тощо) відповідно до HD 60364-5-52, EN 60909-0;

6) побудова добових (графіків димінгу) і сезонних профілів (варіацію тривалості нічного освітлення протягом року)  $\eta_D(t)$ , розрахунок АЕСІ-індикаторів – річних показників енергоспоживання системи освітлення, нормований на опорну освітлювану поверхню, за EN 13201-5; сукупність цих профілів формує помісячні і річні енергобаланси;

7) розрахунок економічних показників ефективності ( $LCC$ ,  $TCO$ ,  $NPV$ ,  $IRR$  тощо) з чутливістю до  $p_e$ , вартості обладнання, ставки дисконтування  $r$ ;

8) вибір архітектури системи керування вуличним освітленням (СКВО) (роз'єми NEMA/Zhaga, бездротова (LoRaWAN, NB-IoT) або дротова PLC системи керування), політик кіберзахисту;

9) верифікація на пілотній ділянці та масштабування на всю територію.

## **Висновки з розділу 2**

У розділі сформульовано цілісну методологію оцінювання системи вуличного освітлення, що інтегрує світлотехнічне моделювання з перевіркою відповідності класам M/C/P за ДСТУ EN 13201, надійнісні моделі елементної бази, електротехнічні розрахунки режимів і захистів, а також енергетично-економічний аналіз життєвого циклу з урахуванням телеметрії, керування та вимог до кіберзахисту. Такий підхід забезпечує уніфікованість критеріїв і порівнянність результатів, оскільки опирається на чинний в Україні комплекс ДСТУ EN 13201-1/-2/-3/-4/-5 для вибору класів, розрахунку та вимірювання показників і індикаторів ефективності.

Методика формалізує енергобаланс і профіль димінгу через річне споживання, питомі індикатори та нормативні АЕСІ-показники за ДСТУ EN 13201-5, що використовуються у техніко-економічному порівнянні варіантів модернізації.

Надійність описано через інтенсивність відмов, *MTBF*, *MTTR* і готовність, із урахуванням послідовних та резервованих структур, моделей для каскадів «шафа–лінія–світильник», що відображає домінуючий внесок драйверів у відмовостійкість вузла «світильник».

Узагальнений алгоритм практичної реалізації включає вибір репрезентативних ділянок, світлотехнічне моделювання та вимірювання, інвентаризацію і побудову надійної схеми, електричні розрахунки, визначення АЕСІ, LCC/NPV/IRR, вибір архітектури СКВО та політик кіберзахисту, з підсумковою верифікацією на пілотній ділянці й масштабуванням.

Сукупно це створює відтворювану, нормативно узгоджену основу, яка дозволяє одночасно гарантувати фотометричну якість, електробезпеку, високу готовність та обґрунтованість інвестиційних рішень.

### **3 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ СИСТЕМ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ**

Вибір і впровадження технічних рішень для модернізації зовнішнього освітлення м. Українка мають спиратися на поєднання фотометричної відповідності класам освітлення за ДСТУ EN 13201, електротехнічної надійності мережі живлення, керованості та вимірюваності енергетичних показників упродовж життєвого циклу. Архітектура рішення включає: добір LED-світильників з потрібними світлотехнічними характеристиками та інтерфейсами керування; оптимізацію оптичних схем під геометрію вулиць; узгоджені алгоритми димінгу з астрономічним і/або адаптивним керуванням; реконфігурацію мереж і щитового обладнання з урахуванням втрат напруги, селективності захистів і грозозахисту; дослідні (пілотні) ділянки з повною фотометричною валідацією на відповідність ДСТУ EN 13201-3/-4; формування специфікацій і відомостей обсягів робіт, що забезпечують прозорі закупівлі на засадах LCC/TCO та критеріїв якості (у т.ч. показників довговічності та світлового комфорту) [52; 3; 4].

#### **3.1 Вибір LED-світильників та інтерфейсів керування**

Базовий набір вимог до світильника визначається цільовими класами освітлення M/C/P (категорії автомобільного, конфліктних зон і пішохідних просторів). Для класу M (лінійно-орієнтований рух) головним контрольованим критерієм під час проектування є яскравість дорожнього покриття, середнє значення та рівномірність, обмеження сліпучої дії. Для класів C/P – горизонтальна освітленість, рівномірність і циліндрична освітленість для розпізнавання облич, а також диспетчеризаційні сценарії зі зниженими рівнями в нічні вікна за умови збереження безпеки [52; 3; 4]. З урахуванням сучасної номенклатури виробників доцільно відбирати світильники зі світловою віддачею не нижче 130–170 *лм/Вт* у номінальному режимі (типові серії R2L2, DigiStreet, Ledinaire демонструють у паспортних даних 150–170 *лм/Вт* залежно від

конфігурації оптики та струму живлення), із сімействами оптичних розподілів для доріг усіх категорій – від вузьких вулиць до магістралей класу ME1/ME2 [64; 66; 67]. Вимога до ступеня захисту не нижче IP66 та ударостійкості оптичного модуля IK08, із захистом від УФ-деградації вторинної оптики, прямо впливає з експлуатаційного середовища та підтримується керівними документами публічних закупівель ЄС для дорожнього освітлення.

Вибір корельованої колірної температури (CCT) і загального індексу передавання кольору (Ra/CRI) має враховувати екологічну чутливість прилеглих територій та ризики світлового засмічення. Для житлових вулиць і зон, суміжних із зеленими насадженнями та набережними, доцільна CCT 2700–3000 К з контролем частки випромінювання у синьому діапазоні, для транзитних вулиць – 3000–4000 К з пріоритетом  $Ra \geq 70-80$ , що відповідає рекомендаціям щодо обмеження обтрузійного світла та «ALARA-підходу» до вибору рівнів освітлення [52].

Інтерфейси керування обираються з прицілом на поетапну еволюцію від автономних світильників до «інтелектуальних» вузлів мережі. Гарантовану взаємодію між драйверами та контролерами забезпечує стек DALI-2 (IEC 62386), а для світильників, що повинні зчитувати та надавати діагностику на рівні «водій-контролер», доцільно вимагати сертифікацію D4i (розширення DALI-2 для інтелектуальних світильників; додаткові пам'яті даних, живлення порту датчика тощо) [53; 54]. Для підключення зовнішніх датчиків/фотоконтролерів і комунікаційних модулів доцільне застосування стандартизованих механічно-електричних інтерфейсів: верхньоплатформеного роз'єму ANSI C136.41 (7-pin) і малоформатного роз'єму Zhaga Book 18 (Z10/Z11), які де-факто стали промисловими стандартами у вуличному сегменті [55; 56].

### **3.2 Оптична оптимізація системи освітлення**

Оптична оптимізація системи освітлення під геометрію вулиць та опор полягає у забезпеченні цільових показників середньої яскравості і освітленості та рівномірності при мінімальному встановленому навантаженні. Для доріг із

одностороннім розміщенням опор та шириною смуги 3,0–3,5 м застосовуються асиметричні криві розподілу з посиленою «довгокидністю» та контрольованою відсічкою, що обмежує освітлення будинків. При двосторонньому розміщенні – більш симетричні криві з обмеженою кривизною ізолюксів у зоні пішохідних переходів. Висота підвісу 8–10 м з виносом кронштейна 0,5–1,5 м і кроком 25–40 м відповідає типології вулиць місцевого значення. Для магістралей висоти 10–12 м і крок 35–45 м забезпечують досягнення ME3–ME2 за умови світлового модуля 8–16 тис. лм. Правильність вибору підтверджується каталогами виробників оптики (серії STRADA, інші лінійки) і прикладами застосування у дорожніх керівництвах [64; 65]. Для пішохідних переходів оптимізація виконується за вертикальною освітленістю у напрямку водія та контрольним коефіцієнтом TI/GR відповідно до ДСТУ EN 13201-3, що задає сітки розрахункових точок та процедуру розрахунку [3].

### **3.3 Автоматизація системи вуличного освітлення**

Енергетична оптимізація передбачає узгодження димінгу зі статистикою руху. На практиці ефективними є профілі з поетапним зниженням світлового потоку: 100 % від заходу до закінчення вечірнього піка, 70–80 % у проміжному часовому вікні, 40–60 % у глибоку ніч за низької інтенсивності руху, з автоматичним поверненням до 100 % під час світанкового піка або за детектуванням руху на сенсорах.

У типових міських умовах Київської області вечірній пік доцільно задавати як інтервал від моменту заходу сонця до приблизно трьох годин потому, або до 22:30–23:00, залежно від того, що настане раніше. У зимові місяці (листопад–лютий), коли захід відбувається близько 16:00–17:00, практичним є профіль: 100 % від заходу до 21:30–22:00; далі проміжне вікно 70–80 % орієнтовно до 00:30; глибока ніч 40–60 % від 00:30 до 04:30; передранкове проміжне вікно 70–80 % від 04:30 до світанку. У літні місяці (травень–серпень), коли захід 20:45–21:30 і світанок 04:45–05:15, доцільний зсув: 100 % від заходу до 23:30; 70–80 % до 01:30; «глибока ніч» 40–60 % приблизно 01:30–04:00; далі 70–80 % до світанку.

У перехідні місяці вікна лінійно «ковзають» між цими шаблонами, причому «глибока ніч» завжди зосереджується навколо середини темного періоду доби. За наявності локальних зон безпеки (переходи, вузли громадського транспорту, під'їзди до лікарень) мінімальний рівень у «глибоку ніч» для прилеглих опор фіксується на більш високому plateau (як правило 60–70 %), а при детекції присутності або підвищеного трафіку миттєво відновлюється 100 %.

Для автономних режимів достатньо астрономічних таймерів. Для мережевого керування – DALI-2/D4i із сегментними або покомпонентними контролерами, що передають команди локально або через вузли зв'язку LoRaWAN/NB-IoT/PLC [52]. LoRaWAN 1.0.4, завдяки енергоощадності та великому радіусу покриття, підходить для міст із радіомережами на базових станціях, тоді як NB-IoT покладається на ліцензійні стільникові мережі з гарантованою QoS; G3-PLC є альтернативою на ділянках зі стабільною якістю ліній живлення або в комбінації «PLC + RF» для підвищення надійності доставки телеметрії. Вимоги до електромагнітної сумісності та показників якості електроенергії в точках приєднання підтверджуються ДСТУ EN 50160 і методикою вимірювань за ДСТУ EN 61000-4-30 [10; 25].

### **3.4 Реконфігурація освітлювальних мереж**

Ремодернізація електричної частини охоплює балансування фаз у розподільчих мережах 0,4 кВ, оптимізацію перерізів кабелів відповідно до ДСТУ HD 60364-5-52 з урахуванням довжини відгалужень, категорій прокладання і допустимих падінь напруги для освітлювальних ліній. Проектно доцільно приймати граничне зниження напруги на найдальнійшій світлоточці не більш як 5 % у нормальному режимі димінгу та перевіряти найгірший випадок за максимального струму драйверів під час роботи без регулювання освітленості. Розрахунки струмів короткого замикання у вузлах керування та кінцях ліній виконуються за ДСТУ EN/IEC 60909-0 з подальшим вибором апаратів захисту (автоматичні вимикачі за ДСТУ EN 60898-1/-2 та запобіжники за ДСТУ EN 60269-х) з перевіркою умови відсічення та час-струмової селективності між

щитами і відгалуженнями [6; 36; 37]. Вузли обліку доцільно розміщати в шафах керування із можливістю профілювання навантаження (клас точності не нижче 1,0) і телеметричною передачею даних щодо споживання активної і реактивної енергії для подальшого коригування профілів димінгу за фактом.

### **3.5 Захист від перенапруг у освітлювальних мережах**

LED-драйвери мають нижчу стійкість до імпульсних перенапруг, ніж електромагнітні пуско-регулюючі апарати (ПРА) люмінесцентних ламп, тому система грозозахисту будуються каскадно: первинні SPD типу 1 (T1) у вводах або шафах керування на випадок часткового струму блискавки, комбіновані або типу 2 (T2) у лінійних шафах і полицях опор, та кінцеві модулі біля драйверів світильників. Рекомендовані архітектури, рівні витримуваних струмів і місця встановлення узгоджуються з нормами серії EN 61643-11 і EN 62305-4 щодо зонування LPZ та координації захистів. Практичні рішення для вуличного освітлення включають SPD із індикацією «кінця ресурсу», дистанційним сигналізуванням і IP-захистом для монтажу в нішах опор. Ефективність такої каскадації підтверджена польовими випробуваннями і системними тестами «шафа – опора – світильник» [13]. Контур заземлення має бути перевірений з огляду на опір розтікання та вирівнювання потенціалів. У випадку спільних опор із стороннім обладнанням (зв'язок, камерні комплекси) необхідна перевірка сумісності за режимами грозового струму та наявність іскробезпечних перемичок відповідно до EN 62305-4.

### **3.6 Пілотні ділянки освітлювальних мереж**

Перед масштабуванням впровадження доцільно реалізувати пілотні відрізки різних типів вуличного простору (магістраль, житлова вулиця, перехрестя, пішохідний перехід) з повним фотометричним перерахунком і замірами відповідно до ДСТУ EN 13201-4: вибір сіток точок, геометрії спостереження, методики обчислення середніх значень, рівномірності, показника TI/GR. За підсумками замірів складається протокол відповідності з відхиленнями від

моделі та коригуванням кутів нахилу/висот підвісу або профілів димінгу. Одночасно – вимірювання параметрів якості електроенергії за ДСТУ EN 50160 методами ДСТУ EN 61000-4-30 у репрезентативних точках мережі (показник THD, коливання напруги, несиметрія), що дозволяє виявити ділянки, де потрібні додаткові фільтри/перерозподіл фаз [4; 10; 25].

### **3.7 Вимоги до обладнання освітлювальних мереж**

Специфікації для закупівлі світильників та елементів керування повинні відображати очікувану світлотехнічну продуктивність за класами M/C/P, гарантовану світлову віддачу при референсній температурі  $T_s$ , межі CCT і Ra для екозон, підтверджену відповідність фотобіологічній безпеці, ступені IP/IK, інтерфейси DALI-2/D4і та механічні порти ANSI C136.41 або Zhaga Book 18, а також сценарії димінгу та телеметрії. Для мережевої частини – переліки кабелів із посиланням на HD 60364-5-52, апарати захисту з параметрами відсічення та селективності, SPD із класами T1/T2 і номіналами, шафи керування з обліком і комунікаційними шлюзами на обраному транспорті (LoRaWAN/NB-IoT/PLC). Європейські керівні документи з «зелених» закупівель надають структуровані приклади критеріїв і контрактних вимог, включно з вимогами до LCC, гарантій, ремонтпридатності і маркування активів, що суттєво знижує ризики закупівлі обладнання, не сумісного з проектними цілями [52]. Відомості обсягів робіт формуються з розбивкою на світильники за типорозмірами і оптикою, опори та кронштейни за висотами і виносками, мережеві лінії з довжинами за трасами, шафи керування зі складом обладнання, SPD за місцями встановлення, пусконаладжувальні та вимірювальні роботи; прикладні пакети для муніципалітетів і модельні документи для проектів вуличного освітлення наведені у відкритому доступі міжнародних фінансових інституцій і можуть бути шаблоном для узгоджених тендерів [57].

### **3.8 Очікувані ефекти та сумісність у системі вуличного освітлення**

Комплексне впровадження наведених технічних рішень дозволяє досягти зниження споживання електроенергії на 45–70 % порівняно з натрієвими ДНаТ світильниками при забезпеченні рівнів освітлення за ДСТУ EN 13201. Додаткові 10–25 % забезпечує адаптивний димінг, зафіксований у сучасних прикладних керівництвах і технічних звітах ЄС [52; 66]. Уніфікація інтерфейсів (DALI-2/D4i та C136.41/Zhaga Book 18) мінімізує прив'язку до одного виробника і дає змогу без заміни світильника додавати сенсори й комунікаційні модулі для розширених сервісів «розумного міста» [53–56]. Система грозозахисту, реалізована каскадно з координацією і резервом, істотно зменшує імовірність відмов драйверів і модулів керування під дією імпульсних перенапруг, підвищуючи готовність і знижуючи експлуатаційні витрати.

#### **Висновки з розділу 3**

Проведений у розділі аналіз показує, що цільова модернізація зовнішнього освітлення має спиратися на чотири взаємопов'язані блоки: вибір LED-світильників із підтвердженою світлотехнічною ефективністю та керованістю; оптичну оптимізацію під геометрію вулиць із гарантією класів освітлення M/C/P за ДСТУ EN 13201; керування навантаженням за астрономічними/адаптивними алгоритмами (стандартизовані «нічні вікна» димінгу, датчики присутності або трафіку); електротехнічну реконфігурацію мереж (балансування фаз, вибір перерізів, селективність і грозозахист). Уніфікація інтерфейсів мінімізує залежність від одного постачальника і спрощує масштабування. Каскадний захист від перенапруг та належне заземлення істотно знижують ризики відмов драйверів і контролерів. Пілотні ділянки з повним фотометричним та електротехнічним перерахунком і натурними вимірюваннями забезпечують валідацію проектних рішень перед впровадженням. Очікуваний ефект – зменшення споживання електроенергії на 45–70 % порівняно з натрієвими системами, додаткові 10–25 % завдяки адаптивному димінгу, при одночасному дотриманні критеріїв якості освітлення та вимог до якості електроенергії.

Запровадження вказаних підходів для м. Українка передбачає:

а) у світлотехнічній частині та виборі обладнання:

1) для магістралей і головних вулиць обрати консольні LED-світильники зі світловіддачею не нижче  $150 \text{ лм/Вт}$ , IP66/IK08, оптичну систему під класи ME3–ME2, а для житлових і пішохідних зон – під класи C/P;

2) використовувати лампи з колірною температурою близько  $3000 \text{ K}$  у житлових і природоохоронних зонах (набережна, парки),  $3000\text{--}4000 \text{ K}$  – на транзитних вулицях;  $R_a \geq 70$  у житловій забудові та понад 80 на площах і зупинках;

3) використовувати інтерфейси керування DALI-2/D4i, механічні порти ANSI C136.41 (7-pin) або Zhaga Book 18 для підключення контролерів і датчиків;

б) у частині оптичної оптимізації під геометрію вулиць перевірити та виконати модернізацію (за потреби):

1) на ділянках із висотою підвісу  $8\text{--}10 \text{ м}$  і шириною проїзду  $7\text{--}10 \text{ м}$  – крок опор  $25\text{--}35 \text{ м}$  із світильниками асиметричними кривими розподілу;

2) на магістралях ( $10\text{--}12 \text{ м}$ ) – крок  $35\text{--}45 \text{ м}$  з відповідними світильниками із кривою сили світла, що забезпечує підвищену поздовжню дальність освітлення;

3) для пішохідних переходів – оптичні схеми світильників повинні мати підсилену вертикальну освітленість в напрямку руху авто; необхідно контролювати пороговий приріст засліпленості (TI) та індекс дискомфортової сліпучої дії (GR);

в) у профілі димінгу та детектування трафіку руху:

1) реалізовувати тимчасовий профіль до завершення калібрування: 100 % освітленості від заходу сонця до  $\sim 23:00$ ; 70–80 % до  $23:00\text{--}01:30$ ; 40–60 % для  $01:30\text{--}04:00$ ; 70–80 % – до світанку.

2) після встановлення лічильників трафіку та сенсорів – адаптивно підвищувати освітленість до 100 % за подією (потік авто/пішоходів, погодні погіршення), з утриманням  $10\text{--}15 \text{ хв}$ ;

г) у частині електричній мережі та щитовому обладнанні:

1) здійснити балансування фаз, перевірити падіння напруги (не більше 5 % для найвіддаленіших світлоточок); перерахувати струми короткого замикання і перевірити селективності «шафа – відгалуження – кінець лінії».

2) здійснити модернізацію шаф керування: встановити лічильники електроенергії з можливістю встановлення профілів споживання, контролерів, що підтримують астротаймінг і димінг, засобів телеметричної передачі даних щодо напруг, струмів і подій.

д) у частині грозозахисту і заземлення:

1) застосувати ступеневий захист від імпульсних перенапруг: ПЗІП (SPD) типу 1 встановити на ввіді в КРП та шафи керування, ПЗІП типу 2 – у проміжних розподільчих пунктах і нішах опор (допускається кінцевий модуль у світильнику). Забезпечити координацію рівнів захисту  $U_p$  між ступенями та мінімальну індуктивність підключення, використовуючи мінімально можливі відстані до місця підключення контуру заземлення;

2) обстежити і звести опір заземлювальних пристроїв до розрахункових значень; переважно використовувати уніфіковані вузли з сигналізацією «переведення у відмову» ПЗІП;

е) у частині пілотних ділянок:

1) вибрати щонайменше чотири характерні локації (магістраль, житлова вулиця, перехрестя, пішохідний перехід).

2) виконати розрахунки за ДСТУ EN 13201-3 та натурні вимірювання за ДСТУ EN 13201-4, а також виміряти параметри якості електроенергії у характерних вузлах;

є) у частині специфікації:

1) сформулювати технічні вимоги до світильників (ефективність, оптика, CCT/Ra, IP/IK, DALI-2/D4i, порти), мережевої частини (кабелі/перерізи, захисти, шафи, ПЗІП), системи керування і датчиків;

2) деталізувати типорозміри світильників та опор, довжини ліній за трасами, склад шаф і комплектів ПЗІП, обсяг пусконаладжувальних і вимірювальних робіт;

ж) у частині КРІ та масштабування:

1) встановити контрольні показники: питомого електроспоживання ( $\text{kВт}\cdot\text{год}/\text{км}$  і  $\text{kВт}\cdot\text{год}/\text{світлоточку на рік}$ ), частки годин у димінгу, частоти відмов драйверів, частоти подій спрацювання ПЗП, відповідність класу освітлення, скарги мешканців тощо.

2) за результатами 3–6 місяців пілотного експерименту виконати коригування профілів, оптики або схем живлення та поетапне масштабування на решту міста.

Такий порядок дій поєднує вимоги світлотехніки, електробезпеки та експлуатаційної надійності, забезпечуючи швидку економію енергії, стабільну якість освітлення та керованість системи для подальшої «розумної» модернізації у межах м. Українка.

## 4 ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Концепція підвищення надійності та безперервності роботи системи зовнішнього освітлення м. Українка ґрунтується на поєднанні структурного резервування електроживлення критичних ділянок, оптимізації мережевої топології під аварійну відбудовність, забезпечення селективності апаратури захисту, впровадження діагностики стану на базі телеметрії та процедур профілактичного обслуговування і предиктивного ремонту. Методологічний каркас спирається на формалізовані показники надійності (інтенсивність відмов  $\lambda$ , середній напрацювання до відмови  $MTBF$ , середній час відновлення  $MTTR$ , коефіцієнт готовності  $A$ ) та ризик-орієнтовані підходи (матриці ризиків,  $FMEA/FMECA$ ), які узгоджено з чинними в Україні стандартами надійності й управління ризиками та викладом у навчальних і прикладних джерелах [31; 68–71; 75–77].

Під резервуванням живлення для критичних ділянок розуміють побудову мережі так, щоб у разі одиничної відмови живильного елемента зберігалася працездатність освітлення для визначених зон безпеки дорожнього руху (перехрестя, пішохідні переходи на магістралях, під'їзди до об'єктів критичної інфраструктури). Для міської мережі 0,4 кВ практично придатними є рішення з кільцюванням фідерів на рівні шаф керування з автоматизованими секційними апаратами або з вбудованою логікою АВР. Для відгалужених вуличних ліній – секціонування з можливістю швидкого перепідключення навантажень на сусідні фідери через заздалегідь передбачені перемички. Таке «м'яке» резервування підвищує структурну надійність без потреби дублювати все навантаження, а математично знижує системну інтенсивність відмов за рахунок переходу від суто серійних до серійно-паралельних структур [31; 68; 69; 72]. Проектне опрацювання виконується з урахуванням граничних падінь напруги, струмів короткого замикання і координації захистів, щоб у резервних режимах не виникали недопустимі перенавантаження та втрати напруги на найдовших

світлоточках, що безпосередньо впливає на відповідність світлотехнічним критеріям за ДСТУ EN 13201 [3; 4; 79].

Оптимізація топології під аварійну відбудовність передбачає виділення логічних секцій з приблизно рівними навантаженнями, балансування фаз у трифазних відгалуженнях, мінімізацію «довгих» прольотів із високими питомими втратами та структурне обмеження довжини радіальних гілок, що дозволяє скоротити середній час визначення пошкоджень і покращити показники *MTTR*. З точки зору теорії надійності, скорочення *MTTR* підвищує коефіцієнт готовності

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (4.1)$$

тому навіть якщо обладнання не стало надійнішим (середній час безвідмовної роботи не змінився  $MTBF = \text{const}$ ), перебудова мережі так, щоб швидко відокремлювати аварійну ділянку і одразу подавати живлення в обхід, помітно підвищує безперервність роботи освітлення [31; 33; 70].

Селективність апаратури захисту є обов'язковою умовою для безперервності: відмова або коротке замикання на кінцевій ділянці мають відсікатися найближчим до місця аварії апаратом, не виводячи з роботи цілий фідер або суміжні секції. Для цього на етапі проектування будують узгоджені час-струмові характеристики автоматичних вимикачів і запобіжників та перевіряють їх селективність у всьому діапазоні очікуваних струмів короткого замикання, включно з мінімальними на кінцях довгих ліні [71; 73; 74; 79].

Діагностика стану та телеметрія формують інформаційний контур стійкості. На рівні шаф керування та вибраних опор доцільно безперервно реєструвати фазні напруги, струми, температуру у шафі, спрацювання апаратів захисту, рахувати напрацювання годин увімкнення та фіксувати події перенапруг. Поточні телеметричні ряди дозволяють: оперативно виявляти деградацію елементів (повільне зростання струму кожної гілки, що вказує на відмови драйверів,

періодичні просідання напруги у визначений час, що корелюють з одночасними пусками), будувати прості трендові предиктори на основі ковзних статистик та оцінювати ризики відмов мережі під час негоди. Для ключових вузлів керування виправданим є введення граничних та попереджувальних порогів за температурою і вологістю, а також періодична перевірка якості електроенергії відповідно до національних методик, оскільки стабільність напруги і наявність гармонік прямо впливають на ресурс LED-драйверів [70; 10; 25; 78].

Профілактичне обслуговування та предиктивний ремонт переводять експлуатацію з реактивної у превентивну площину. На основі телеметрії формують карти пріоритетності обслуговування: гілки з підвищеною кількістю подій перенапруг, частими «підмигуваннями» (ознака поганих контактів), відхиленням коефіцієнта потужності та зростанням середньої температури в шафі ставлять у план перевірок першою чергою. Математично простий і водночас ефективний підхід – розбиття парку світлоточок на когорти за віком/типом обладнання та оцінка для кожної когорти базової інтенсивності відмов  $\lambda_0$ . Це відповідає практиці умовно-орієнтованого обслуговування і дає змогу прогнозувати, де очікується максимум відмов і який запас драйверів, SPD та з'єднувальної арматури варто тримати на складі [33; 70; 75–77].

Кількісна оцінка виграшу виконується через перерахунок показників  $MTBF$ ,  $MTTR$  і  $A$ . Якщо базова інтенсивність відмов парку світлоточок дорівнює  $\lambda$  ( $\text{год}^{-1}$ ), то  $MTBF = 1/\lambda$ . Припустімо, що до впровадження резервування та селективності середній час відновлення становив  $MTTR_0$ , а після – завдяки кращій локалізації дефектів і швидкому перепідключенню секцій –  $MTTR_1 < MTTR_0$ . Тоді приріст готовності

$$\begin{aligned} \Delta A &= \frac{MTBF}{MTBF + MTTR_1} - \frac{MTBF}{MTBF + MTTR_0} = \\ &= \frac{MTBF (MTTR_0 - MTTR_1)}{(MTBF + MTTR_1)(MTBF + MTTR_0)}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

За типових для міського освітлення величин  $MTBF \sim 10^5$  год і зменшення  $MTTR$  з 8 до 4 год отримуємо  $\Delta A \approx 3,8 \cdot 10^{-5}$  у абсолютних частках, що для великого парку означає десятки «людино-годин» відвернених відключень за сезон. Якщо ж додатково реалізоване структурне резервування знижує ефективну інтенсивність відмов підсистеми на  $k, \%$  відсотків ( $\lambda_1 = (1 - k)\lambda$ ) – наприклад, через можливість живлення критичних ділянок з альтернативного фідера – то  $MTBF$  зростає до  $MTBF = 1 / \left[ (k - 1)\lambda \right]$ , і приріст готовності посилюється. Навіть  $k = 0,1$  (10 %) дає істотну різницю протягом життєвого циклу [31; 68; 69; 72].

Оцінювання ризиків відмов виконується за матричною моделлю «ймовірність  $\times$  наслідки» відповідно до принципів управління ризиками. Для вуличного освітлення наслідки природно оцінюються як комбінація втрат безпеки дорожнього руху на небезпечних ділянках, соціального ефекту для мешканців та потенційних фінансових втрат муніципалітету. На першому кроці за історичними даними та телеметрією задають рівні ймовірності для типових подій (відмова драйвера, пошкодження кабелю, деградація контактів, спрацювання захисту від перенапруг), на другому – встановлюють вагові коефіцієнти наслідків для різних типів ділянок і формують матрицю з порогами прийнятності. Поглиблений аналіз на рівні вузлів виконується за методикою FMEA/FMECA: для кожної потенційної відмови оцінюються її тяжкість, ймовірність і можливість виявлення, розраховується пріоритетний індекс ризику (RPN), а заходи впливу (технічні, організаційні) відпрацьовуються у порядку спадання RPN. Для мереж із наявним грозозахистом доцільно виділяти окрему категорію ризику залишкові перенапруги після удару блискавки. На практиці експлуатації саме такі залишки імпульсів спричиняють деградації електроніки і пояснюють відмови після грозових фронтів [70; 10; 75; 76; 77].

## 4.1 Енергоефективна автономна система зовнішнього освітлення

### 4.1.1 Теоретичні відомості щодо класів вуличного освітлення

Класи вуличного освітлення за ДСТУ EN 13201 встановлюють цільові візуальні показники для різних типів міського простору та режимів руху, забезпечуючи відтворювану якість зорових умов під час проектування, верифікації та експлуатації систем. У межах чинної серії виділяють три родини класів:

- 1) М – для руху моторизованого транспорту на лінійних ділянках;
- 2) С – для зон конфліктних маневрів і перетинів;
- 3) Р – для пішохідно-велосипедної інфраструктури.

Кожна родина має власні нормовані критерії та методики оцінювання, що подані відповідно у частинах стандарту: класи й цільові значення в ДСТУ EN 13201-2, інженерні методи розрахунку у ДСТУ EN 13201-3, процедури натурного вимірювання у ДСТУ EN 13201-4, принципи енергетичної ефективності та керування у ДСТУ EN 13201-5.

Для класів М основним нормованим параметром є підтримувана середня яскравість дорожнього покриття  $L_{av}$ ,  $кд/м^2$ , із контролем загальної рівномірності  $U_0 = L_{min} / L_{av}$  та поздовжньої рівномірності  $U_l$ , а також обмеженням осліплювальної дії через пороговий приріст  $TI$ , виражений у відсотках. Така постановка завдання пов'язана з тим, що на швидкостях руху автомобілів ключовою є здатність водія розрізняти контраст і рельєф дорожнього полотна саме в координатах яскравості сцени.

Для класів С, які застосовують у зонах підвищеної складності траєкторій (перехрестя, кільцеві розв'язки, площі, вузли громадського транспорту), нормування ведуть переважно за горизонтальною освітленістю  $E_{av}$  з вимогами до рівномірності та обмеженням показника дискомфоротної сліпучої дії  $GR$ .

Для класів Р, призначених для пішоходів і велосипедистів, базовими є середня горизонтальна освітленість і рівномірність, а за наявності вимог до впізнавання обличь або відеоспостереження додатково нормують вертикальну

або напівциліндричну освітленість у контрольних точках, що напряду пов'язані з якістю відтворення людських силуетів і рис обличчя.

Вибір класу освітлення є наслідком багатофакторної оцінки функціональної категорії вулиці, розрахункової швидкості та інтенсивності руху з урахуванням складу транспортного потоку, наявності конфліктних точок, щільності пішохідних потоків, близькості соціально важливих об'єктів, історії аварійності та вимог правоохоронних органів або систем відеоаналітики. На рішення впливають також фотометричні властивості покриття (R-класи) і фонове світлове середовище забудови. Неправильна класифікація породжує або недоосвітлення зі зростанням ризику дорожньо-транспортних пригод і соціальних інцидентів, або систематичне перевитрачання електроенергії і коштів через безпідставно завищені вимоги.

У роботі розглядається система вуличного освітлення для міської вулиці (проспекту) з двостороннім рухом, яка належить до класу М. Основні характеристики, що характеризують цей клас наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики класу М

Підклас	$L_{av}$	$U_0$	$U_1$	$U_{0wet}^*$	$TI$	$REI^{**}$
	$кд / м^2$	–	–	–	%	–
М1	2,00	0,40	0,70	0,15	10	0,35
М2	1,50	0,40	0,70	0,15	10	0,35
М3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30
М4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,30
М5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30
М6	0,3	0,35	0,40	0,15	20	0,30

\*  $U_{0wet}$  – рівномірність у вологих умовах;

\*\* $REI$  – коефіцієнт межової освітленості за EN 13201-2.

Зміст нормованих вимог у кожному класі відображає цільову зорову задачу. Для М-класів забезпечується визначений рівень  $L_{av}$  на тлі обмежень  $U_0$ ,  $U_1$  та  $TI$ ,

що стабілізує сприйняття контрасту дорожнього полотна, розмітки, перешкод і транспортних засобів на характерних дистанціях огляду. Для С-класів, де домінують маневри та взаємодія потоків, пріоритетом є достатня освітленість сцени та комфортні значення  $GR$  з метою запобігання втратам сприйняття через засвічення. Для Р-класів у пріоритеті безпека вразливих учасників руху: відповідні значення горизонтальної освітленості та, за потреби, вертикальної або напівциліндричної освітленості гарантують упевнене ідентифікування людей та об'єктів у межах тротуарно-пішохідного простору.

Практичне застосування класів відповідає характеру вулично-дорожньої мережі. Ділянки дорожньої мережі з високими швидкостями руху та великими нічними потоками: позаміські автомагістралі і швидкісні дороги з розділювальною смугою (категорії автошляхів, що забезпечують безперервний рух, здебільшого без перетинів в одному рівні), міські швидкісні магістралі та об'їзні та кільцеві дороги, а також протяжні підходи до транспортних розв'язок на цих дорогах як правило належать до класів М1–М2, а інші міські магістралі та розподільчі вулиці як правило належать до класів М3–М6 залежно від швидкості, інтенсивності та конфігурації руху. Великі перехрестя і кільцеві розв'язки проєктують за класами С. Житлові вулиці, алеї, парки та велодоріжки – за класами Р з можливими додатковими вимогами щодо вертикальної освітленості у критичних проходах. Усі ці рішення підлягають верифікації за процедурою розрахунку (ДСТУ EN 13201-3) і натурних вимірювань (ДСТУ EN 13201-4) у відповідних точках та умовах.

Класи безпосередньо детермінують необхідний світловий потік та, у підсумку, електричну потужність світильників. Для дорожніх покриттів R-типу допустиме інженерне наближення пов'язує середню освітленість із яскравістю як  $E_h \approx L_{av} / Q_0$ , де  $Q_0$  – коефіцієнт яскравості покриття. Далі, у межах методу коефіцієнта використання для повторюваної «клітини» площі  $A = W \cdot S$  за наявності  $N$  однакових світильників отримують  $\Phi_{init} = \frac{E_h \cdot A}{UF \cdot MF \cdot N}$ , де  $UF$  – коефіцієнт використання;  $MF$  – коефіцієнт підтримуваності. Оцінна електрична

потужність одного світильника задається виразом  $P_{LED} = \Phi_{init} / \eta_{LED}$ , де  $\eta_{LED}$  – світлова ефективність світильника з оптикою. Підвищення класу (зростання цільового  $L_{av}$ ) лінійно збільшує  $E_h$ , а отже, і потрібний світловий потік  $\Phi_{init}$  та потужність  $P_{LED}$ . У разі автономних систем живлення від фотоелектричних модулів це безпосередньо масштабує необхідну встановлену потужність ФЕМ і ємність акумуляторної батареї для зимового періоду, що робить коректний вибір класу ключовим як для безпеки, так і для життєвого циклу витрат.

Актуальність стандартизованих класів полягає у поєднанні безпекових, правових і техніко-економічних наслідків. Дотримання ДСТУ EN 13201 забезпечує відтворюваність якості освітлення, прозорість проєктних рішень і приймання робіт, а також можливість раціонального керування енергоспоживанням через погодинний димінг та адаптивні алгоритми без ризику порушення норм. Для мереж, що поступово переходять на LED-світильники і інтелектуальне керування, коректне віднесення ділянок до класів М/С/Р стає передумовою оптимізації світлотехнічних параметрів, зниження співвідношення капітальних витрат до експлуатаційних *CAPEX/OPEX* та виконання цільових показників безпеки дорожнього руху та міського середовища.

#### **4.1.2 Димінг як спосіб енергозбереження у системах зовнішнього освітлення**

Димінг у системах зовнішнього освітлення – це кероване зниження світлового потоку світильників від номінального рівня з метою адаптації освітленості і яскравості до поточних потреб руху та фонових умов за умови збереження нормативної відповідності. Принцип дії ґрунтується на тому, що для світлодіодних джерел у широкому робочому діапазоні зменшення електричної потужності (через зміну струму або широтно-імпульсною модуляцією) майже пропорційно знижується світловий потік і споживання енергії, водночас позитивно впливаючи на термічний режим і темп деградації світлового модуля. За реалізацією димінгу може бути відкритим (за фіксованими «нічними вікнами» та/або астрономічними таймерами) або замкненим (адаптивним) – із використанням датчиків трафіку, присутності, освітленості, а також телеметрії

для зміни уставок у реальному часі. На рівні інтерфейсів застосовують аналогове керування 0–10 V, цифрове DALI-2/D4i із профілями кривих та функцією постійного світлового потоку, а для мережевого доступу – сегментні контролери та покомпонентні вузли зв'язку (PLC, LoRaWAN, NB-IoT) із політиками кіберзахисту і веденням журналу подій.

До переваг димінгу належать безпосередня енергетична економія без зміни світлорозподілу та опорної геометрії, зниження пікового та середнього навантаження на джерела живлення, зменшення теплових напружень у LED-модулях і драйверах, подовження напрацювання до відмов, а також можливість погодинної відповідності візуальній задачі (рух «за попитом») без відключення світлоточок. За наявності автономного живлення від фотоелектричних модулів димінг зменшує добову потребу в енергії, тим самим дає змогу зменшити встановлену потужність ФЕМ і ємність акумуляторних батарей або підвищити запас автономії під час найменшої природної освітленості протягом року (зимові місяці). Основні обмеження і ризики стосуються потенційної втрати відповідності класу освітлення при надмірному зниженні рівнів, можливого зростання відносної пульсації світлового потоку на низьких уставках у разі некоректної модуляції, системних відмов зв'язку або керування, а також потреб у дисципліні експлуатації (перевірка та підтвердження світлових кривих, періодична перевірка реальних рівнів освітленості за ДСТУ EN 13201-4). Технічно коректне впровадження передбачає визначення нижньої межі димінгу для кожної ділянки (не нижче підтримуваних значень для вибраного класу M/C/P), підтвердження розрахунком за ДСТУ EN 13201-3 та введення захисних сценаріїв (автоповернення до базового режиму при втраті телеметрії або під час складних погодних умов).

Окрім димінгу, підвищення енергоефективності досягають за рахунок переходу на світильники з вищою світловіддачею та коректно підбраною оптикою під геометрію проїзної частини, оптимізації висот і кроків опор, виключення світловитоків, впровадження функції постійного світлового потоку для усунення надлишкової освітленості, зниження втрат у живильних мережах і

підвищення коефіцієнта потужності, більш точної астрономічної синхронізації увімкнення/вимкнення, часткового вимкнення декоративного/акцентного освітлення у пізні години, а також енергоаудиту з усуненням неефективних вузлів. Однак більшість перелічених заходів або потребує додаткових капітальних вкладень (заміна світлотехніки, реконфігурація опор і мереж), або дає дискретний, а не оперативно-керований ефект. У зв'язку з цим димінг має перевагу керованості та масштабованості: його можна впровадити поверх наявної інфраструктури драйверів та контролерів, плавно підлаштовувати до сезонних і добових змін, поєднувати з датчиками для робочого циклу «за попитом» і при цьому зберігати нормативну якість візуальних умов. Саме здатність забезпечити безперервне, прогнозоване і відтворюване регулювання освітленості без зміни оптики і геометрії робить димінг базовим інструментом енергоефективності сучасних систем зовнішнього освітлення.

**Розрахункова частина.** Інженерний розрахунок автономного світильника зовнішнього освітлення для типової міської вулиці з двостороннім рухом, 2 смуги в кожному напрямку (проїзна частина  $\sim 14$  м), асфальтове покриття (типова поверхня R3), з тротуарами з обох боків.

Розрахунок виконується у припущенні двобічного «шахового» розміщення опор з консоллю (рис. 4.1), живлення поза мережею, керування димінгом за нічним графіком.



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд автономної системи зовнішнього освітлення з живленням від сонячної електростанції

**Вихідні дані, припущення та вибір класу.** Геометрія та схема:

– ширина проїзної частини  $W = 14\text{ м}$  (по  $2 \times 3,5\text{ м}$  у кожний бік), бордюрна смуга  $0,5\text{ м}$ , тротуари – наявні.

– висота підвісу  $H = 10\text{ м}$ ;

– виніс кронштейна  $e = 1,5\text{ м}$ ;

– відступ від кромки  $y = 0,5\text{ м}$ ;

– крок опор (по кожному боці), шахове розміщення:  $S = 30\text{ м}$ .

Поверхня покриття: асфальтобетон типу R3 з усередненим коефіцієнтом яскравості  $Q_0 \approx 0,07$  (сухе покриття).

Клас освітлення: Для міської артерії з  $2 \times 2$  смугами та швидкістю руху  $50\text{--}60\text{ км/год}$  типовими є класи M3–M4. Задаємося підкласом вуличного освітлення M4, що визначає компроміс між безпекою та енерговитратами з такими вимогами:

– середня яскравість покриття  $L_{av} \geq 0,75\text{ кд} / \text{м}^2$ ;

– загальна рівномірність  $U_0 \geq 0,4$ ;

– поздовжня рівномірність  $U_l \geq 0,6$ ;

– пороговий приріст (осліплювальна дія)  $TI \leq 15\%$ .

Керування світильником (нічний профіль димінгу): вечірній пік  $4\text{ год} - 100\%$ ; «глибока ніч»  $7\text{ год} - 40\%$ ; передранкове «вікно»  $2\text{ год} - 70\%$  (усього  $13\text{ год/ніч}$ ; у грудні/січні допускається подовження до  $14\text{--}15\text{ год}$  із пропорційним перерахунком енергії).

Середовище та обслуговування: коефіцієнт технічного запасу і підтримованості  $MF = 0,8$  (L80/F10, чисте середовище, регулярне ТО).

## **Фотометричний розрахунок**

### **1) Перехід «яскравість ↔ освітленість»**

Для R-покриттів доцільна наближена оцінка:

$$L_{av} \approx Q_0 \cdot \bar{E}_h$$

звідки

$$\bar{E}_h = \frac{L_{av}}{Q_0}, \quad (4.3)$$

де  $L_{av}$  – середня яскравість,

$\bar{E}_h$  – середня горизонтальна освітленість у полі проїзної частини;

$Q_0$  – усереднений коефіцієнт яскравості (для R3  $Q_0 \approx 0,07$ ). (Вивід з ламбертівської моделі та зв'язку  $Q_0\pi \approx \rho$ , де  $\rho$  – узагальнена відбивна здатність покриття).

Для М4:

$$\bar{E}_h \approx \frac{0,75}{0,07} \approx 10,7 \text{лк}.$$

## 2) Метод світлового потоку (UF-підхід) для повторюваної «клітини»

Розглядаємо «клітину» довжиною  $S = 30\text{м}$  та шириною проїзної частини  $W = 14\text{м}$ .

Площа «клітини»

$$A = W \cdot S = 14 \cdot 30 = 420\text{м}^2. \quad (4.4)$$

За двобічного шахового розміщення у межах  $S$  працюють 2 світильники (по одному з кожного боку). Позначимо  $UF$  – коефіцієнт використання світлового потоку одного світильника (залежить від кривої сили світла, геометрії, розміщення, нахилу). Для дорожньої оптики типу «широкий асиметричний розподіл» при  $H = 10\text{м}$ ,  $e = 1,5\text{м}$ ,  $y = 0,5\text{м}$ ,  $S = 30\text{м}$  задаємося  $UF \approx 0,36$ .

Баланс світлових потоків у «клітині»:

$$\bar{E}_h \cdot A \approx MF \cdot (\Phi \cdot UF) \cdot 2$$

звідки потрібний початковий світловий потік на один світильник:

$$\Phi = \frac{\bar{E}_h \cdot A}{2 \cdot MF \cdot UF} = \frac{10,7 \cdot 420}{2 \cdot 0,8 \cdot 0,36} = 7,81 \cdot 10^3 \text{ лм}. \quad (4.5)$$

**3) Підбір електричної потужності.** За ефективності LED-модуля з оптикою  $\eta_{LED} \approx 155 \text{ лм} / \text{Вт}$  отримаємо:

$$P_{LED} = \frac{\Phi}{\eta_{LED}} = \frac{7810}{155} \approx 50 \text{ Вт}. \quad (4.6)$$

Примітка: за вибору М3 ( $\bar{E}_h = 14,3 \text{ лк}$ ) отримаємо  $\Phi = 10,4 \text{ клм}$ , тоді

$$P_{LED} = \frac{\Phi}{\eta_{LED}} = \frac{10400}{155} \approx 67 \text{ Вт}.$$

#### 4) Енергоспоживання світильника

Добове енергоспоживання світильника відповідно до нічного профіля керування розраховують за виразом

$$E_i = \tau_{LED_i} \cdot \mu_{LED_i} \cdot P_{LED}, \quad (4.7)$$

де  $\tau_{LED_i}$  – тривалість роботи світильника потужністю  $P_{LED}$  при відносній яскравості  $\mu_{LED_i}$ .

Визначаємо добове енергоспоживання світильника відповідно до нічного профіля керування за астротаймером або контролером світильника:

– 4 год при яскравості 100 % від номінальної

$$E_1 = \tau_{LED1} \cdot \mu_{LED1} \cdot P_{LED} = 4 \cdot 1 \cdot 50 = 200 \text{Вт} \cdot \text{год};$$

– 7 год при яскравості 40 % від номінальної

$$E_2 = \tau_{LED2} \cdot \mu_{LED2} \cdot P_{LED} = 7 \cdot 0,4 \cdot 50 = 140 \text{Вт} \cdot \text{год};$$

– 2 год при яскравості 70 % від номінальної

$$E_3 = \tau_{LED3} \cdot \mu_{LED3} \cdot P_{LED} = 2 \cdot 0,7 \cdot 50 = 70 \text{Вт} \cdot \text{год}.$$

Сумарно на клеммах драйвера:

$$E_{LED} = E_1 + E_2 + E_3 = 200 + 140 + 70 = 410 \text{Вт} \cdot \text{год} / \text{ніч}.$$

З урахуванням ККД драйвера  $\eta_{drv} = 0,9$  та контролера  $\eta_{ctl} = 0,95$

$$E_{DC} = \frac{E_{LED}}{\eta_{drv} \cdot \eta_{ctl}} = \frac{410}{0,9 \cdot 0,95} = 480 \text{Вт} \cdot \text{год} / \text{ніч}. \quad (4.8)$$

## 5) Вибір АКБ

Задаємося системою живлення напругою 24 В DC, АКБ LiFePO4 типу з BMS-платою, що забезпечує кращу роботу на холоді та довший ресурс.

Задаємося запасом автономії АКБ  $N = 2 \text{доби}$ , тоді необхідна вихідна потужність

$$E_{out} = N \cdot E_{DC} = 2 \cdot 480 = 960 \text{Вт} \cdot \text{год}. \quad (4.9)$$

Задаємося допустимою глибиною розряду АКБ  $DoD = 80\% = 0,8$  та з урахуванням коефіцієнту запасу  $k = 1,2$ , що враховує запас ємності АКБ на зимову деградацію, тоді необхідна ємність АКБ

$$E_{AKB} = \frac{E_{out} \cdot k}{DoD} = \frac{960 \cdot 1,2}{0,8} = 1500 \text{ Вт} \cdot \text{год}. \quad (4.10)$$

У перерахунку на ампер-години ( $U = 24\text{В}$ ):

$$C_{AKB} = \frac{E_{AKB}}{U_{AKB}} = \frac{1500}{24} \approx 62,5 \text{ А} \cdot \text{год}. \quad (4.11)$$

Обираємо стандартний модуль напругою 24 В, ємністю 80 А·год (1,92 кВт·год) LiFePO4 типу із підігрівом та обмеженням заряду при відємних температурах, що дає запас на старіння, холод і можливе подовження тривалості освітлення.

#### **б) Підбір фотоелектричного поля (модулів) і МРРТ-контролера СЕС**

**Вихідні дані.** Для автономних сонячних електростанцій (СЕС) у найгірший місяць (грудень/січень) за сонячним ресурсом для м. Українка, Київська обл. беремо пікові сонячні години  $PSH \approx 1,6 \text{ год/добу}$  для панелі, нахиленої під «зимовий» кут близький до широти.

Позначимо загальний ККД ланцюга «панель → МРРТ → АКБ → DC-шина» у денному циклі заряджання як  $\eta_{PV} \approx 0,75$ .

**Потужність фотоелектричного модуля.** Добова енергія, яку має дати фотоелектричний модуль (ФЕМ) у найгірший місяць:

$$E_{PV,day} = \frac{E_{DC}}{\eta_{chg}} = \frac{480}{0,95} = 505 \text{ Вт} \cdot \text{год}. \quad (4.12)$$

Відповідно необхідна встановлена потужність:

$$P_{PV} = \frac{E_{PV,day}}{PSH \cdot \eta_{PV}} = \frac{505}{1,6 \cdot 0,75} = 420 \text{ Вт}. \quad (4.13)$$

Вибираємо 2 модулі потужністю 230–240 Вт, тоді при послідовному підключенні, тоді загальна номінальна потужність геліополя  $P_{PV} = 470 \text{ Вт}$ . У результаті загальна вихідна потужність СЕС

$$E_{зима} = P_{PV} \cdot PSH \cdot \eta_{PV}; \quad (4.14)$$

$$E_{зима} = 470 \cdot 1,6 \cdot 0,75 = 564 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{добу} > E_{PV,day} = 505 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

**Вибір контролера заряду (MPPT).** Для 2 модулів, підключених послідовно:

$$U_{mp} = 2 \cdot 34 = 68 \text{ В}; I_{mp} = 8 \text{ А};$$

$$U_{oc.stc} = 2 \cdot 41 = 82 \text{ В}.$$

З урахуванням зниження температури довкілля взимку задаємося коефіцієнтом запасу за напругою  $k = 1,2$ , тоді напруга холостого ходу геліополя

$$U_{oc} = k \cdot U_{oc.stc} = 1,2 \cdot 82 \approx 98 \text{ В}.$$

Вибір MPPT-контролера з вхідною напругою  $U_{PV,max} = 150 \text{ В}$ , вихідна напруга 24 В, сила струму контролера  $I_{chg} \geq 20 \text{ А}$ . Для потужності геліополя на рівні 470 Вт при напрузі 24 В, сила струму складає 20 А. Рекомендовано вибирати контролер із запасом на модернізацію, із силою струму не менше 30 А.

## Розрахунок втрат та підбір перерізів проводів і пристроїв захисту

### а) Навантажувальна гілка (АКБ/контролер – драйвер світильника)

Струм навантаження

$$I_{LED} = \frac{P_{LED}}{U_{sys} \cdot \eta_{drv}} = \frac{50}{24 \cdot 0,9} = 2,31 \text{ A.} \quad (4.15)$$

Допустиме падіння напруги  $\delta U \leq 3\%$ , що для напруги 24 В складає

$$\Delta U = 24 \cdot 3/100 = 0,72 \text{ В.}$$

Довжина траси (вгору по опорі і назад) складає  $l = 24 \text{ м}$ .

Проводи DC ділянки виготовлені з міді для якої питомий активний опір  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ . Тоді, виходячи з виразу

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot I}{S}, \quad (4.16)$$

визначаємо мінімальну площу перерізу провідників

$$S \geq \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot I}{\Delta U} = \frac{2 \cdot 0,0175 \cdot 24 \cdot 2,31}{0,72} = 2,2 \text{ мм}^2.$$

Вибираємо найближчий більший стандартний переріз мідного кабелю 2,5 мм<sup>2</sup>.

Обираємо пристрої захисту:

- 1) запобіжник або вимикач постійного струму 6 А на лінії до драйвера;
- 2) ПЗІП типу 2 (DC) на напругу 24–36 В біля драйвера (режими L-PE, L-N).

Для опори з підвищеною ймовірністю прямих ударів блискавки рекомендовано обирати комбінований ПЗІП Т1+Т2 із підвищеним вологозахистом.

### б) PV-гілка (панелі → МРРТ)

Відповідно до схеми підключення 2 модулі з'єднані послідовно, що дозволяє отримати менший струм і, як наслідок, зменшити втрати на теплове розсіювання. Струм  $I_{PV} \approx I_{mp} = 8 - 10 \text{ A}$ .

Допустиме падіння напруги не повинно перевищувати 3 %, що при  $U_{mp} = 68 \text{ V}$  складе  $\Delta U = 68 \cdot 3/100 = 2 \text{ V}$ . При довжині лінії у одну сторону 10 м (загальна довжина 20 м), визначаємо мінімальну площу перерізу

$$S \geq \frac{2 \cdot \rho \cdot l \cdot I}{\Delta U} = \frac{2 \cdot 0,0175 \cdot 10 \cdot 10}{2} = 1,75 \text{ мм}^2.$$

Вибираємо PV-кабель перерізом 4 мм<sup>2</sup> стійкий до ультрафіолету.

Обираємо пристрої захисту: роз'єднувач DC біля МРРТ; автоматичний вимикач на 15–20 А; ПЗП типу 2 для PV DC, робоча напруга  $\geq 150 \text{ V DC}$  (з урахуванням  $U_{oc} = 98 \text{ V}$  для можливості роботи за низьких температур) – біля контролера або у коробці з'єднань на опорі.

### в) АКБ-гілка (АКБ ↔ МРРТ/контролер)

Максимальний зарядний струм складає 20–25 А за яким обираємо мідну шину перерізом 10 мм<sup>2</sup> з автоматичним вимикачем на силу струму 30–40 А DC і короткими з'єднаннями. Обов'язкове виконання заземлення опори, спільної шини захисних провідників і приєднання ПЗП до заземлювача. Для міських умов опір заземлення  $R_3 \leq 100 \text{ Ом}$ .

**Підбір обладнання СЕС.** У табл. 4.2 подано відомості щодо підбраного обладнання СЕС та системи вуличного освітлення відповідно до однолінійної електричної схеми (рис. 4.2).

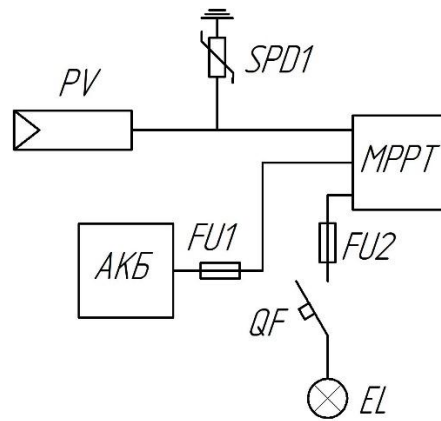


Рисунок 4.2 – Однолінійна електрична схема автономної системи вуличного освітлення з СЕС

Таблиця 4.2 – Обладнання автономної СЕС для системи вуличного освітлення з функцією димінгу

№ з/п	Маркування	Основні технічні характеристики	К-ть, шт/мп	Ціна за од., грн
1	Сонячна панель ALTEK ALM-240P (240 W)	Полікристалічний кремній; $P_{\max} = 240 \text{ Вт}$ ; $U_{mp} = 29,6 \text{ В}$ ; $I_{mp} = 8,11 \text{ А}$ ; $U_{oc} = 37,4 \text{ В}$ ; 60 елементів; 1640×992×40 мм	2	5200
2	MPPT-контролер Morningstar ProStar MPPT (PS-MPPT-40)	Макс. напруга PV 120 В; $I_{chg} = 40 \text{ А}$ ; 12/24 В; макс. вих. потужність 550 Вт	1	16600
3	АКБ LogicPower LP LiFePO4 24 В (25,6 В) – 100 А·год (Smart BMS 100 А)	Ном. енергія 2,56 кВт·год; маса 23 кг; BMS 100 А; цикл $\geq 4000$	1	27700
4	ПЗПП PV (T2) ОВО Bettermann V20-C 3PH-600 DC (5094605)	Тип 2; 3-полюсний; $U_{\max}^{DC} = 600 \text{ В}$ ; $I_n = 20 \text{ кА}$ ; $I_{\max} = 40 \text{ кА}$ ; DIN-рейка	1	3950
5	Захист лінії 24 В DC до драйвера ОВО VF24-AC/DC (5097607)	Тонкий захист Type 3 за EN 61643-11; $U_c^{DC} = 46 \text{ В}$ ; $I_n = 0,7 \text{ кА}$ ; для 35 мм DIN	1	2200

Продовження табл. 4.2

№ з/п	Маркування	Основні технічні характеристики	К-ть, шт/м.п.	Ціна за од., грн
6	Кабель PV H1Z2Z2-K 1×4 мм <sup>2</sup> (черв./чорн.)	PV-кабель 1,5 кВ DC; стійкий до УФ; -40...+90 °C	25	40/м.п.
7	Шини/кабель АКБ ПВ-3 10 мм <sup>2</sup> Cu (черв./чорн.)	Однодротяний, гнучкий; для з'єднання АКБ–MPPT/інвертор	4	72/м.п.
8	Вуличний LED-світильник класу M Philips UniStreet gen2 Solar VGP282 1×LED87-4S/740	Світловий потік 7500–8500 лм; CCT 4000 K; Ra≥70; оптика для класів M (дороги з інтенсивним рухом) DM10; клас безпеки III; IP66; 51 Вт; удароміцний корпус напруга живлення 24 В	1	18000
9	Клемники, клеми M8/M10, MC4 (по 1 парі на кожен ланцюг), автомат-захист DC, гермовводи та інші монтажні елементи	–	–	5882*
9.1	Запобіжник на лінії АКБ – DC-шина	Littelfuse MEGA 50 A і тримач	2	–
9.2	Запобіжник на лінії MPPT – DC-шина	–	–	–
9.3	DC-автомат на лінії DC-шина – інвертор	CHINT NB1-63Z DC 1P 40 A 250 VDC	1	–
<b>РАЗОМ</b>				<b>86000</b>

\* із розрахунку 5–10 % до загальної вартості елементів п. 1–8

7) **Перевірні розрахунки та чутливість.** Підвищення класу до M3:  $\bar{E}_h = 14,3 \text{ лк}$  звідки світловий потік  $\Phi = 10400 \text{ лм}$ , тоді потужність системи освітлення із розрахунку на один світильник зросте і становитиме  $P_{LED} \approx 68 \text{ Вт}$ . Добове споживання електроенергії зросте приблизно до  $E_{DC} \approx 650 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ , що вимагає використання АКБ LiFePO4 напругою 24 В 100–120 А·год і потужність

геліополя  $P_{PV} = 600 - 800 \text{ Вт}$  для умов найменшої сонячної освітленості (грудень).

Димінг дозволяє зменшити енергоспоживання на 15 %, що дозволяє зменшити потужність геліополя  $P_{PV}$  або поглиблювати димінг, наприклад, 30–35 % замість 40 %.

Якщо застосувати однобічну схему розміщення вуличних стовпів з світильниками, тоді доведеться підвищити світловий потік або зменшити  $S$  для дотримання  $U_0$ ,  $U_l$  та  $PI$ .

#### 4.2 Дослідження вимог щодо класу освітлення

**Завдання.** Оцінити, чи виконує автономна світлоточка вимоги класу освітлення проїзної частини М3/М4 відповідно до ДСТУ EN 13201 і забезпечує енергетичну автономність у «найгірший» зимовий період, визначити необхідні розміри світлового потоку, електричної потужності світильника, потрібну встановлену потужність фотоелектричних модулів і ємність АКБ для заданого графіку димінгу; порівняти кілька варіантів і обґрунтувати вибір.

**Вихідні дані.** Геометрія «клітини» розрахунку: ширина проїзної частини  $W = 14 \text{ м}$ , крок опор  $S = 30 \text{ м}$ , висота підвісу  $H = 10 \text{ м}$ , двобічна «шахова» схема  $\Rightarrow$  у клітині працює  $N = 2$  світильники. Площа  $A = W \cdot S = 14 \cdot 30 = 420 \text{ м}^2$ .

Покриття: асфальтобетон типу R3; коефіцієнт яскравості  $Q_0 \approx 0,07$ .

Коефіцієнт використання (оцінка для обраної оптики/геометрії)  $UF = 0,36$ ; коефіцієнт підтримуваності  $MF = 0,8$ .

Ефективність джерела (світильника)  $\eta_{LED} = 155 \text{ лм} / \text{Вт}$ .

ККД драйвера  $\eta_{drv} = 0,9$ ; допоміжної електроніки (контролера)  $\eta_{ctl} = 0,95$ .

Енергетика: найгірший місяць – пікові сонячні години  $PSH = 1,6 \text{ год} / \text{добу}$ ; ефективність PV ланцюга (ФЕМ  $\rightarrow$  MPPT  $\rightarrow$  DC-шина)  $\eta_{PV\text{ланцюг}} = 0,75$ ; ККД заряджання АКБ  $\eta_{chg} = 0,95$ .

Система 24 В DC; допустима глибина розряду АКБ  $DoD = 0,8$ ; зниження доступної ємності при низьких температурах – коефіцієнт 0,8.

**Варіанти досліджень:**

1) А: клас М4 4 год при освітленості 100 %, 7 год при освітленості 40 %, 2 год при освітленості 70 % (загалом 13 год/ніч).

2) В (більш суворий клас): М3 за такої самої геометрії та димінгу.

3) С (клас М4 і більш глибокий димінг): 3 год при освітленості 100 %, 8 год при освітленості 30 %, 2 год при освітленості 60 %.

**Мета дослідження:**

1) забезпечити фотометричну відповідність класу М4 (та показати, що М3 досяжний за збільшення потужності або світлового потоку);

2) підібрати мінімально достатні  $P_{pv}$  і ємність АКБ для безвідмовної роботи взимку за заданої величини димінгу;

3) показати запас автономності та чутливість до зміни сонячного ресурсу ( $PSH$ ).

**Алгоритм дослідження.** Перехід від вимоги по яскравості до середньої горизонтальної освітленості для R-покриттів,  $лк$

$$E_h \approx \frac{L_{av}}{Q_0},$$

де  $L_{av}$  – цільова середня яскравість класу М;

$Q_0$  – коефіцієнт яскравості покриття.

Метод коефіцієнта використання ( $UF$ ) для «клітини»  $A = W \cdot S$ ,  $N$  світильників

$$E_h \cdot A = \Phi_{init} \cdot UF \cdot MF \cdot N$$

звідки світловий потік світильника, *лм / світильник*

$$\Phi_{init} = \frac{E_h \cdot A}{UF \cdot MF \cdot N}.$$

Оцінка електричної потужності світильника, *Вт*

$$P_{LED} = \frac{\Phi_{init}}{\eta_{LED}}.$$

Добова енергія на клеммах драйвера з урахуванням димінгу, *Вт · год*

$$E_{LED} = \sum_i t_i \cdot P_{LED} \cdot d_i,$$

де  $t_i$  – тривалість інтервалу;

$d_i$  – відносний рівень (частка  $0 \leq d_i \leq 1$ ).

Споживання від DC-шини

$$E_{DC} = \frac{E_{LED}}{\eta_{drv} \cdot \eta_{ctl}}.$$

Потрібна встановлена потужність ФЕМ у найгірший місяць, *Вт*

$$P_{PV} = \frac{E_{DC}}{PSH \cdot \eta_{PV\text{ланцюг}} \cdot \eta_{chg}}.$$

Ємність АКБ на  $N$  ночей  $E_{AKB}$ , *Вт · год*, і  $C_{AKB}$ , *А · год*, автономної роботи з урахуванням *DoD* і зниження ємності за низьких температур:

$$E_{AKB} = \frac{N \cdot E_{DC}}{DoD \cdot 0,8}$$

$$C_{AKB} = \frac{E_{AKB}}{U_{sys}}$$

Для зручності результати числового моделювання зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати фотометричних розрахунків

Результати фотометричних розрахунків							
Варіант	$L_{av}$	$E_h$	$UF$	$MF$	$A$	$N$	$\Phi_{init}$
	$кд/м^2$	$лк$	–	–	$м^2$	$од.$	$лм/$ $світильник$
A	0,75	10,71	0,36	0,8	420,0	2	7812,5
B	1,0	14,29	0,36	0,8	420,0	2	10416,7
C	0,75	10,71	0,36	0,8	420,0	2	7812,5

Таблиця 4.4 – Результати енергетичних розрахунків

Результати енергетичних розрахунків						
Варіант	$P_{LED}$	$E_{LED}$	$E_{DC}$	$P_{PV}$	$E_{AKB}$	$C_{AKB}$
	$Вт$	$Вт \cdot год$ $за ніч$	$Вт \cdot год$ $за ніч$	$Вт$	$Вт \cdot год$	$А \cdot год$
A	50,4	413,3	483,4	424,0	1510,6	62,9
B	67,2	551,1	644,5	565,4	2014,2	83,9
C	50,4	332,7	389,1	341,3	1215,9	50,7

**Результати досліджень.** Відповідно до наведеної вище методики та результатів розрахунку для різних варіантів (табл. 4.3), на рис. 4.3–4.5 подано результати дослідження.

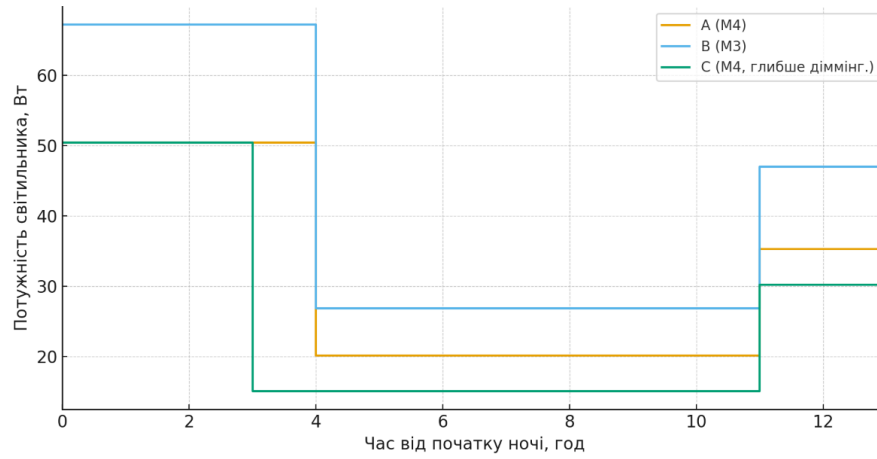


Рисунок 4.3 – Графік димінгу протягом ночі

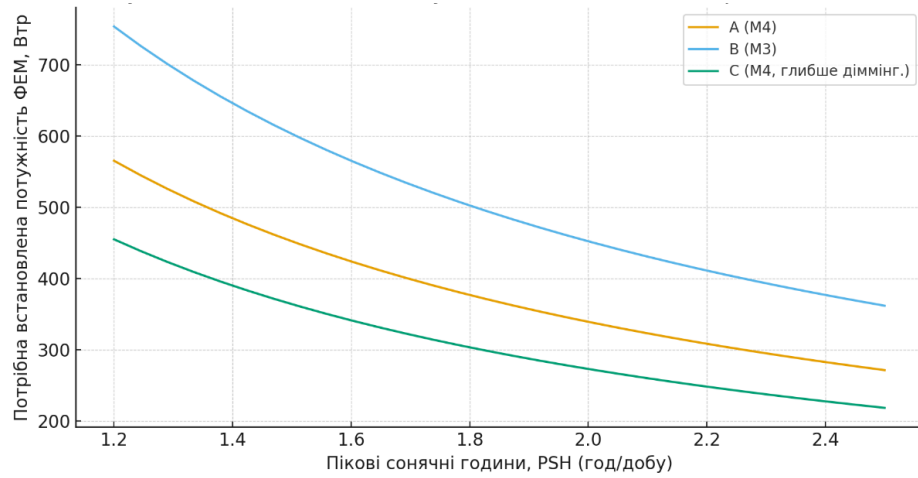


Рисунок 4.4 – Залежність необхідної потужності геліополя від PSH

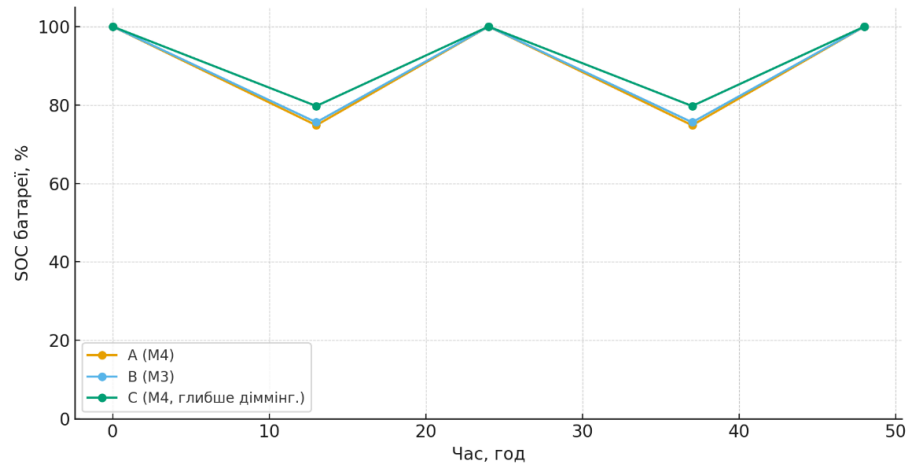


Рисунок 4.5 – Моделювання рівня заряду АКБ SOC під час роботи СЕС

Розглянемо результати числового моделювання для кожного варіанту:

1) Варіант А (базовий, клас М4):

– за фотометричними показниками клас М4 можна досягти при світловому потоці близько 7800 *лм* і електричній потужності світильника 51 *Вт*.

– з енергетичними показниками для забезпечення класу М4 при роботі від СЕС (у найгірших умовах освітленості – грудень/січень) необхідне геліополе загальною потужністю близько 425 *Вт*; прийняте рішення 2×240 *Вт* (тобто 480 *Вт*) забезпечує цю вимогу із запасом 13 %.

– обрана LiFePO<sub>4</sub> АКБ 24 В 100 А·год ( $\approx 2,4$  *кВт·год*) дозволяє отримати мінімум 2 ночі автономної роботи з комфортним резервом.

– на графіку SOC видно, що після кожної ночі SOC знижується приблизно до 75 %, а за день із  $PSH = 1,6$  год АКБ повертається до повної ємності, отже, режим роботи СЕС є самодостатнім і не накопичує дефіциту.

## 2) Варіант В (клас М3):

– клас М3 вимагає більшої яскравості, тому зростає і потрібний світловий потік та потужність (до 67 *Вт*), що впливає на збільшення енергоспоживання до 33 % від добового енергоспоживання класу М4.

– для умов з найменшою річною сонячною іррадіацією (грудень/січень) потрібна потужність геліополя складає близько 565 *Вт* (на практиці з урахуванням втрат – 600–700 *Вт*), а запас ємності АКБ доцільно підняти до  $\geq 100$  А·год.

## 3) Варіант С (клас М4, але більш глибокий димінг):

– зменшення середньої нічної потужності дозволяє отримати до 19 % економії енергоспоживання СЕС  $E_{DC}$  відносно варіанту А, тому у цьому випадку можна зменшити потужність ФЕМ до 340–400 *Вт*, а ємність АКБ – до 60–80 А·год.

– як компроміс треба перевірити забезпечення класу М4 у «мінімальному» інтервалі (30 %) за EN 13201-3/-4 за результатами натурних вимірювань.

## Обґрунтування результатів:

1) Фотометрія. Для заданої геометрії та оптики фотометричний розрахунок показує, що клас М4 забезпечується при  $P_{LED} \approx 51$  *Вт*. Остаточна перевірка та підтвердження (рівномірності  $U_0$ ,  $U_1$ , блиску  $TI$ ) підтверджується натурними вимірюваннями за ДСТУ EN 13201-4.

2) Енергетична самодостатність. За найгіршої зимової інсоляції  $PSH = 1,6 \text{ год}$  і денному ККД ланцюга  $0,75$  базовий варіант А із потужністю ФЕМ  $480 \text{ Вт}$  та ємністю АКБ  $24 \text{ В } 80 \text{ А} \cdot \text{год}$  має позитивний добовий баланс (графік  $SOC$ ), отже, система є стійкою і самодостатньою.

3) Чутливість до інсоляції  $PSH$ . Графік  $P_{PV}(PSH)$  показує сильну нелінійну залежність: при падінні  $PSH$  до  $1,2 \text{ год}$  потрібна потужність ФЕМ наближається до  $570 \text{ Вт}$ , що виправдовує закладений запас  $480 \text{ Вт}$  і практику сезонного коригування димінгу.

4) Альтернативи. Перехід до класу М3 вимагає збільшення як світлового потоку, так і енергетичних ресурсів (PV/АКБ) – це підтверджено таблицею енергобалансу (табл. 4.3). Якщо мета мінімізувати  $CAPEX$ , варіант С дозволяє суттєво зменшити потужність геліополя  $P_{PV}$  та ємність АКБ, але потребує підтвердження відповідності М4 за найнижчого рівня димінгу.

### 4.3 Дослідження впливу профілю димінгу на енергоспоживання і ресурс АКБ

Розглянемо порівняльний розрахунок профілів роботи системи зовнішнього освітлення: без димінгу і з димінгом у форматі тривалість  $\tau_i$  (відносна яскравість  $e_i$ ): 1) 4–7–2 (100–40–60 %); 2) 4–7–2 (100–40–70 %); 3) 4–7–2 (100–40–80 %); 4) 4–7–2 (100–30–60 %); 5) 4–7–2 (100–50–60 %); 6) 3–6–4 (100–40–60 %); 7) 3–7–3 (100–40–60 %); 8) 3–7–3 (100–30–60 %). Інші дані беремо відповідно до попереднього розділу: потужність LED світильника  $P_{LED} = 51 \text{ Вт}$ . Загальна тривалість роботи за добу (ніч)  $\tau_{\Sigma} = 13 \text{ год/ніч}$ . АКБ  $\text{LiFePO}_4$  номінальною напругою  $24 \text{ В}$  має номінальну ємність  $E_{AKB} = 2,56 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ . Розрахункова глибина розряду  $DoD = 80\%$  (корисна енергія одного повного циклу  $E_{цикл} = 2,048 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ ). Ресурс АКБ – 4000 циклів.

**Методика розрахунку.** Середній коефіцієнт димінгу для довільного профілю

$$k_{\text{dim}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i \cdot e_i)}{\tau_{\Sigma}}. \quad (4.17)$$

Річне споживання електроенергії без димінгу,  $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$

$$E_0 = \frac{P_{LED}}{1000} \cdot \tau_{\Sigma} \cdot 365. \quad (4.18)$$

Річне споживання електроенергії з керуванням димінгом,  $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$

$$E_1 = k_{\text{dim}} \cdot E_0. \quad (4.19)$$

Річне зменшення енергоспоживання за рахунок використання димінгу,  
 $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$

$$\Delta E = E_0 - E_1 = E_0 (1 - k_{\text{dim}}). \quad (4.20)$$

Очікувана кількість повних еквівалентних циклів АКБ:

– без димінгу

$$n_0 = E_0 / E_{\text{цикл}}; \quad (4.21)$$

– з димінгом

$$n_1 = E_1 / E_{\text{цикл}}. \quad (4.22)$$

Зменшення кількості циклів АКБ за рахунок використання димінгу

$$\Delta n = n_0 - n_1. \quad (4.23)$$

**Розрахунок** виконуємо за наведеною вище методикою для одного з профілів, а решту розрахунків виконуємо за аналогічною методикою без розгорнутого подання у пояснювальній записці, а результати заносимо до таблиць результатів.

Профіль 4–7–2 (100–40–70 %)

$$k_{\text{dim}} = \frac{4 \cdot 1 + 7 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,7}{13} = 0,63077;$$

$$E_0 = \frac{51}{1000} \cdot 13 \cdot 365 = 260,975 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік};$$

$$E_1 = 0,63077 \cdot 260,975 = 164,614 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік};$$

$$\Delta E = 260,975 - 164,614 = 96,360 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік};$$

$$n_0 = 260,975 / 2,048 = 127,43 \text{ циклів} / \text{рік};$$

$$n_1 = 164,614 / 2,048 = 80,38 \text{ циклів} / \text{рік};$$

$$\Delta n = n_0 - n_1 = 127,43 - 80,38 = 47,05 \approx 47 \text{ циклів} / \text{рік}.$$

Таблиця 4.5 – Результати числового моделювання впливу профілю димінгу

Профіль	$k_{\text{dim}}$	$E_1$	$\Delta E$	$n_1$	$\Delta n$
	–	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$	$\frac{\text{циклів}}{\text{рік}}$	$\frac{\text{циклів}}{\text{рік}}$
без димінгу	1,0	260,975	0	127,43	0
4–7–2 (100–40–60 %)	0,61538	160,600	100,375	78,42	49,01
4–7–2 (100–40–70 %)	0,63077	164,614	96,360	80,38	47,05
4–7–2 (100–40–80 %)	0,64615	168,63	92,345	82,34	45,09
4–7–2 (100–30–60 %)	0,56154	146,541	114,427	71,56	55,87
4–7–2 (100–50–60 %)	0,66923	174,652	86,322	85,28	42,15
3–6–4 (100–40–60 %)	0,600	156,582	100,375	76,46	50,97
3–7–3 (100–40–60 %)	0,58462	152,570	108,405	74,50	52,93
3–7–3 (100–30–60 %)	0,53077	138,517	122,457	67,63	59,79

Для наочності сприйняття отриманих результатів моделювання (див. табл. 4.4) подано графіки (рис. 4.6).

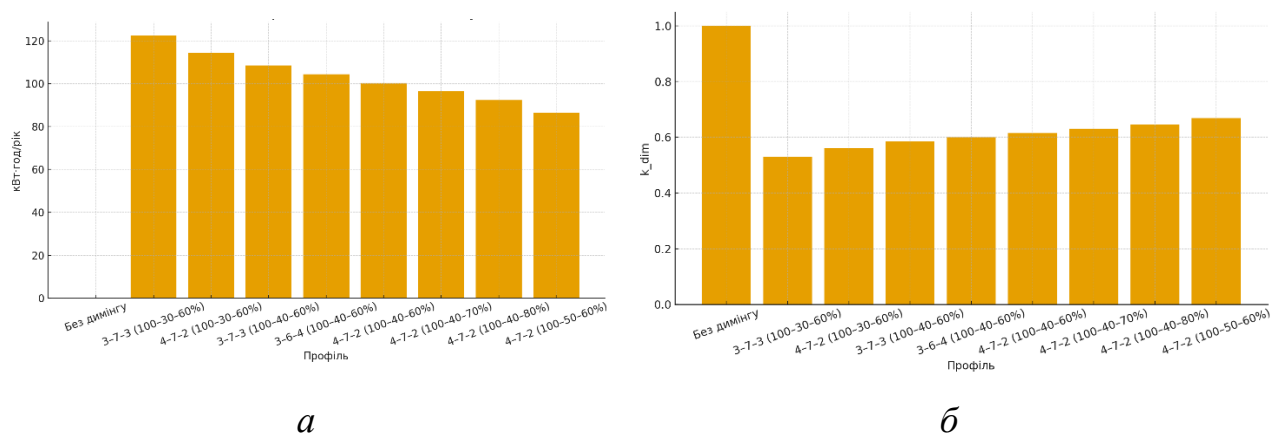


Рисунок 4.6 – Річне зменшення енергоспоживання за рахунок використання димінгу (а) і відповідний йому коефіцієнт димінгу  $k_{dim}$  (б)

Як видно з табл. 4.4 і рис. 4.6, найкращий енергезберігаючий ефект у розрізі впливу відносної освітленості очікувано дає профіль 4–7–2 (100–30–60 %), який для однакового часового діапазону має найменші відносні освітленості, тому зменшення освітленості дає гарний енергозберігаючий ефект. Однак не треба забувати, що зменшення освітленості, з іншого боку, впливає на видимість ділянки проїжджої частини дороги, що підвищує ризики виникнення аварійних ситуацій.

Якщо порівнювати вплив тривалості кожного підрежиму при однаковій відносній освітленості, то найкращий енергозберігаючий ефект дає графік 3–7–3, тому найбільшу енергоефективність можна досягнути при одночасному комбінуванні максимально можливого зменшення відносної освітленості світильника для відповідного максимального проміжку за тривалістю. При цьому досягається найбільше зменшення коефіцієнту димінгу до  $k_{dim} \rightarrow 0,5$ . Ресурс роботи АКБ при цьому зростає пропорційно.

#### Висновки з розділу 4

Для заданої ділянки та геометрії базовий варіант А (клас М4, потужність світильника 51 Вт, димінгу 4/7/2 год при 100/40/70 %) за параметрами 2×240 Вт ФЕМ, LiFePO4 АКБ 24 В ємністю 80 А·год, МРРТ 150/35, інвертор 24/375 ВА є технічно збалансованим: демонструє виконання фотометричних вимог за ескізною оцінкою, забезпечує позитивний енергобаланс у зимовий мінімум інсоляції, має дводобовий запас автономії і має потенціал масштабування до класу освітлення М3 за рахунок збільшення розмірів PV-поля і ємності АКБ.

Запровадження зазначених підходів у м. Українка доцільна поетапно. На першому етапі виконують інженерне обстеження із побудовою блок-схеми надійності «шафа – фідер – відгалуження – світильник», інвентаризують апаратуру захисту, наявність і каскадування пристроїв грозозахисту, фіксують часи виїздів та середню тривалість ремонтно-відновлювальних робіт. На другому – реалізують базову телеметрію на рівні шаф і опор у критичних дільницях з віддаленим моніторингом напруг, струмів, температури та подій. За підсумками перших двох місяців формують матрицю ризиків і карту «гарячих зон». На третьому – переглядають селективність і секціонування, застосовують структурне резервування для вузлів із високим ризик-профілем, закріплюють регламент профілактичних обходів і профілактичних заміन елементів на високоризикових ділянках мережі. На завершення – перераховують *MTBF*, *MTTR*, *A* на основі щонайменше піврічних даних, верифікують ефект і масштабують типові рішення на решту мережі. Така послідовність забезпечує відтворюваність, контроль витрат і прозоре підтвердження досягнутого виграшу у доступності освітлення.

## 5 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

Техніко-економічне обґрунтування модернізації системи зовнішнього освітлення м. Українка базується на порівнянні базового (чинного) та проектного (модернізованого) сценаріїв за сукупністю показників життєвого циклу: річне енергоспоживання, питомі витрати, витрати на експлуатацію і ремонт, втрати від аварійних відключень, а також інтегральні фінансові метрики інвестицій ( $NPV$ ,  $IRR$ , строк окупності) і скорочення викидів  $CO_2$ . Для верифікації припущень та прозорого порівняння застосовано підхід  $LCC/TCO$ , що визначає співвідношення повної вартості життєвого циклу проекту до сукупної вартості володіння відповідно до рекомендацій провідних керівництв із закупівель для дорожнього освітлення та інструментами фінансового моделювання для LED-освітлення у містах. З урахуванням українського контексту додатково розглянуті сценарії фінансування через бюджет, енергосервіс (ESCO/EPC) та грантові програми (у т.ч. за підтримки МФО/ООН), а також вимоги до тендерної документації і KPI/SLA підрядників у дусі критеріїв ЄС із екологічно орієнтованих закупівель [52].

У базовому сценарії енергоспоживання визначається поточним парком світлоточок, їх паспортними потужностями, графіком вмикання та втратами у мережі, тоді як вартісні показники включають плату за електроенергію і розподіл, планово-попереджувальні роботи, заміни ламп і драйверів, аварійно-відновлювальні виїзди. Проектний сценарій формують на підставі добору LED-світильників відповідно до світлотехнічних вимог класів M/C/P за ДСТУ EN 13201, впровадження димінг-алгоритмів (астрономічних і/або адаптивних), модернізації мережевої частини (балансування фаз, уточнення перерізів, селективності, вузлів обліку), а також каскадного грозозахисту (ПЗШ типів 1/2) із належним заземленням. Усі ці заходи мають прямий вплив на енергетику, яку можна виразити у питомому енергоспоживанні,  $kWh/год/рік$ , експлуатаційну надійність і  $LCC$ , а в частині закупівель – дають можливість

застосувати в тендерних умовах критерії на енергоефективність, вимірюваність, довговічність та ремонтно-придатність, рекомендовані ЄС [52].

### 5.1 Методика фінансового моделювання

У фінансовому моделюванні використано класичні визначення: сумарні дисконтовані витрати життєвого циклу *LCC*, чиста приведена вартість *NPV*, внутрішня норма дохідності *IRR*, простий строк окупності *PBP* і дисконтований строк окупності *DPB*. Життєвий цикл розглядається в горизонті 20 років відповідно до нормативних гарантій і очікуваної довговічності світлодіодних систем і драйверів (з урахуванням політики гарантій та граничних відмов, що закладаються у вимоги до тендерів). Методичні підходи для муніципальних проєктів вуличного освітлення підтримані практикою міжнародних організацій (World Bank/ESMAP) і критеріями ЄС *GPP*, де прямо пропонується оцінювати не лише енергоспоживання, а й показники довговічності та вимоги до вимірюваності (лічильники), що критично для наступного моніторингу економії.

Порівняння базового та проєктного сценаріїв виконують, формуючи річні грошові потоки: витрати на електроенергію і розподіл, планові експлуатаційні витрати, економію від зменшення енергоспоживання та ремонтів, капітальні інвестиції (*CAPEX*) і, за потреби, обслуговування боргу. У проєктах із LED-модернізації типовим є зниження споживання на 45–70 % відносно натрієвих систем за рахунок вищої світлової віддачі та оптимізованої оптики. Додаткові 10–25 % забезпечуються димінгом у «нічні вікна» або адаптивним керуванням, що відповідає підходам, описаним у європейських керівництвах і фінансових інструментах для міст [52].

Розрахункові залежності подаються у загальноприйнятому вигляді. Чиста приведена вартість

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}; \quad (5.1)$$

$$CF_0 = -CAPEX ; \quad (5.2)$$

$$CF_t = \Delta OPEX_t + \Delta REPEX_t - DebtServ_t, \quad (t \geq 1) \quad (5.3)$$

де  $r$  – річна ставка дисконту;

$CF_t$  – чистий грошовий потік року  $t$ , який включає економію операційних витрат  $\Delta OPEX_t$  (насамперед електроенергія та розподіл), різницю в планових замінах  $\Delta REPEX_t$ , а за умови кредитування – обслуговування боргу  $DebtServ_t$ .

Внутрішня норма дохідності  $IRR$  – це така річна ставка, за якої проєкт у підсумку виходить «у нуль» у теперішніх грошах: усі майбутні надходження, зведені до сьогодні, рівно покривають початкові вкладення. Тому якщо вартість грошей (ставка дисконту) нижча за  $IRR$  – проєкт вважається вигідним і навпаки, а межею вигідності є  $NPV = 0$ .

Простий строк окупності показує кількість років (найменше значення  $n$ ) для того, щоб накопичена економія та надходження покрили початкові капітальні витрати  $CAPEX_0$

$$PBP = \min \left\{ n \in N : \sum_{t=1}^n CF_t \geq CAPEX_0 \right\}. \quad (5.4)$$

Дисконтований строк окупності визначається виразом

$$DBP = \min \left\{ n \in N : \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq CAPEX_0 \right\}, \quad (5.5)$$

де  $N$  – горизонт аналізу (для вуличного освітлення як правило 20 років);

$n$  – порядковий номер року.

Сукупні витрати життєвого циклу

$$LCC = CAPEX + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t + REPEX_t}{(1+r)^t} - \frac{Salvage}{(1+r)^t}, \quad (5.6)$$

де  $CAPEX$  – капітальні витрати;

$OPEX_t$  – операційні (експлуатаційні) витрати року  $t$ ;

$REPEX_t$  – витрати на планові заміни/реінвестиції (капіталовкладення на відновлення) року  $t$ ;

$Salvage$  – залишкова/ліквідаційна вартість на кінець періоду.

Скорочення викидів  $CO_2$  визначається за формулою:

$$\Delta CO_2 = \Delta E \cdot EF_{e1}, \quad (5.7)$$

де  $\Delta E$  – річна економія електроенергії;

$EF_{e1}$  – чинник емісій від мережевої електроенергії ( $m CO_2/MВт \cdot год$ ).

Для українських муніципалітетів прийнятно застосовувати чинники з платформи «Covenant of Mayors» (CoM) або їх національні оновлення; орієнтовно для України задаються  $EF_{e1} \approx 0,43 mCO_2 / (MВт \cdot год)$  (CoM-EF 2020), з урахуванням того, що поточні оцінки можуть варіювати залежно від року, методології та локального співвідношення джерел генерації, тому доцільний аналіз чутливості в діапазоні  $\pm 15-20\%$  [80–82].

Показником, що зв'язує енергетику з закупівлями, виступає АЕСІ (Annual Energy Consumption Indicator) – річний індикатор споживання на одиницю мережі ( $кВт \cdot год/км$ ,  $кВт \cdot год/світлоточку$ ), який пропонується фіксувати у контракті та контролювати телеметрично лічильником відповідно до рекомендацій ЄС GPP.

Додатково доцільно застосування LCC-таблиць у тендері як критерію оцінки пропозицій [52].

Сценарії фінансування передбачають щонайменше три підходи:

1) Бюджетний – повне фінансування *CAPEX* із місцевого бюджету та субвенцій із подальшою економією на *OPEX*. Перевага – відсутність платежів за послугу, а недолік – потреба в значному авансуванні.

2) ESCO/EPC – енергосервісний контракт із погашенням інвестицій за рахунок підтвердженої економії. В Україні цей інструмент інституціоналізований і підтримується Prozorro та міжнародними організаціями, що демонструють сталий прогрес навіть в умовах воєнного часу; ризики перерозподіляються між містом та ESCO, а *CAPEX* може частково лежати на приватному партнері [83–86].

3) Грантовий/змішаний – поєднання бюджетних коштів, грантів (ЄС/ООН/МФО) і кредитних ліній. Перевага – зниження вартості капіталу, недолік – довший цикл погоджень.

Методологічно усі три сценарії можуть бути промодельовані типізованими інструментами (наприклад, CityLED/ESMAP) із порівнянням *NPV/IRR/PBP* і проведенням аналізу чутливості [52].

**План впровадження** структурується поетапно:

1) Етап інвентаризації та базового обліку (1–2 міс.) передбачає актуалізацію переліку світлоточок, вузлів обліку, потужностей, графіків роботи та витрат. Паралельно – вибір репрезентативних ділянок і розрахунки за ДСТУ EN 13201-3 із визначенням класів M/C/P та початкових АЕСІ.

2) Етап пілотного проєкту (2–4 міс.) включає монтаж тестових ділянок з різними типорозмірами оптики, налаштування димінгу, натурні вимірювання за ДСТУ EN 13201-4, тестування телеметрії й підтвердження економії.

3) Етап масштабування (6–12 міс.) – серійне впровадження, модернізація шаф, мережевих ділянок і грозозахисту, введення *KPI/SLA*, а також остаточний розрахунок економічних метрик з урахуванням фактичних цін і тарифів. У цей період формують календар-план і завдання підрядникам у форматі Gantt із

контрольними віхами «матеріали – монтаж – ПНР – вимірювання – приймання» [52].

Вимоги до тендерної документації і контрактних умов доцільно формулювати відповідно до підходів GPP:

1) конкретизувати світлотехнічну відповідність класам M/C/P, визначити обмеження сліпучої дії, перевірити вимоги до CCT/CRI та встановити цілі AECI;

2) встановити мінімальну світлову віддачу, клас IP/IK, обов'язковість інтерфейсів керування (DALI-2/D4i) та портів (ANSI C136.41/Zhaga), гарантії/RMA та вимоги до ремонтпридатності і маркування активів.

Важливо вказати формат LCC-таблиць і метод оцінки пропозицій «найкраща ціна-якість» із ваговими коефіцієнтами для енергоефективності/довговічності/сервісного обслуговування. Для контрактного управління пропонуються KPI/SLA: досягнення цільового AECI ( $kWm \cdot год/км$ ;  $kWm \cdot год/світлоточку$ ), відповідність світлотехнічних параметрів за результатами приймальних вимірювань (ДСТУ EN 13201-4), частота відмов із розрахунку на 1000  $світлоточок/рік$ , час реагування на аварійні заявки, наприклад, 4–8 год у критичних зонах), частота/успішність оновлень профілю димінгу, частка годин у «адаптивному» режимі, кількість подій SPD і час їх усунення. У вимогах до тендерної документації і контрактних умовах необхідно вказати дії за їх невиконання – штрафні відрахування або продовження гарантій [52].

Аналіз чутливості та невизначеностей виконується для ключових драйверів NPV/IRR: капітальних витрат, ціни електроенергії, вартості її розподілу, фактичної економії від димінгу, ставки дисконту, курсових коливань (для імпортованих компонентів), чинника викидів  $EF_{el}$ , а також для ризиків впровадження (затримки поставок, доступності персоналу, погодних факторів). За рекомендаціями міжнародних керівництв, корисно будувати «коридори» результатів і торнадо-діаграми (за наявності на території розміщення цього явища), що наочно показують, які припущення найбільше впливають на NPV і IRR [52]. План управління ризиками включає превентивні заходи (технічна уніфікація інтерфейсів, резервування постачань, каскадний грозозахист,

секціонування мережі), страхувальні механізми (страхування відповідальності підрядника, банківські гарантії, запаси часу у графіку) та процедурні інструменти (аудит якості, незалежні вимірювання, контроль LCC-таблиць і АЕСІ).

У практичній площині для м. Українка це означає: виконати базове моделювання і пілотні ділянки, зафіксувати в тендерній документації вимоги GPP-типу (зокрема – АЕСІ, облік електроенергії і LCC), визначити прийнятний фінансовий сценарій (бюджетний, ESCO або змішаний) і сформувавши поетапний графік із контрольними точками. Після завершення етапу пілотного проєкту забезпечити масштабувати рішення, уклавши контракт із чіткими показниками KPI/SLA, що забезпечують вимірювану енергетичну економію, відповідність ДСТУ EN 13201 і зниження експлуатаційних ризиків. Для підтвердження фінансових результатів і перевірки ризиків доцільно використати спеціалізовані інструменти оцінювання, наприклад, CityLED/ESMAP, що містять модулі сценарного аналізу та чутливості для міських проєктів освітлення [52].

## **5.2 Техніко-економічний розрахунок впровадження димінгу у автономній системі вуличного освітлення**

**Завдання.** Розрахувати простий та дисконтований строки окупності енергозберігаючого заходу – впровадження димінгу для автономної системи вуличного освітлення з живленням від сонячних панелей.

**Вихідні дані та припущення.** Розглядаються дві альтернативи для однієї світлоточки: базова система без димінгу та проєктна система з димінгом. Розрахунок ведеться паралельно («з димінгом» проти «без димінгу»), тобто оцінюється лише додаткова вигода, витрати, зумовлені саме димінгом. Базова річна ставка дисконту  $r = 0,1$ .

Початкові капітальні витрати однієї системи зовнішнього освітлення з функцією димінгу відповідно до даних табл. 5.1 складають 86000 грн.

Система без димінгу буде мати більш простий MPPT-контролер, наприклад, Victron BlueSolar MPPT 100/30 (SCC020030200) вартість якого складає 6000 грн, тому початкові витрати такої системи складуть 76000 грн.

Збільшення капітальних витрат при запровадженні енергозберігаючого заходу (димінг) за рахунок зміни МРРТ-контролер  $\Delta CAPEX = 10000 \text{ грн}$ .

Номінальна потужність світильника  $51 \text{ Вт}$ ; режим роботи  $13 \text{ год/ніч}$ .

Розрахунковий профіль димінгу:  $4 \text{ год}$  при освітленості  $100 \%$ ,  $7 \text{ год}$  при освітленості  $40 \%$ ,  $2 \text{ год}$  при освітленості  $70 \%$ .

АКБ LogicPower LP-LiFePO4 24 В 100 А·год –  $27700 \text{ грн}$ . Ресурс  $4000$  циклів при  $DoD = 80 \%$ .

Тариф на електричну енергію для комунального споживача Київської обл. з ПДВ  $C_{e/e} = 9,734 \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}$ .

Витрати на заміну LED-модуля за ресурсом  $20000 \text{ год}$  однакові в обох варіантах ( $13 \text{ год/ніч}$ , що складає близько  $4,2 \text{ року}$ ), отже при розрахунку економічного ефекту не враховуються. Інші позиції кошторису, спільні для обох варіантів, також не впливають на різницю.

Тривалість життя проекту визначається ресурсом роботи ФЕМ –  $20 \text{ років}$ .

**Розрахунок.** Середній коефіцієнт димінгу

$$f_{avg} = \frac{4 \cdot 1,0 + 7 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,7}{13} = 0,63077.$$

Річне споживання електроенергії (як еквівалент корисної енергії системи),  $\text{кВт} \cdot \text{год/рік}$

$$E_0 = \frac{51 \cdot 13 \cdot 365}{1000} = 260,98 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік};$$

$$E_{dim} = f_{avg} \cdot E_0 = 0,63077 \cdot 260,98 = 164,62 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Річна економія енергії від ЕЗЗ

$$\Delta E = E_0 - E_{dim} = 260,98 - 164,62 = 96,36 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

## Річний грошовий ефект від ЕЗЗ

$$S_{ен} = \Delta E \cdot C_{e/e} = 96,36 \cdot 9,734 = 938 \text{ грн / рік.}$$

Зниження «зношування» АКБ моделюємо через еквівалент річного списання ресурсу (4000 циклів при  $DoD = 80\%$ ). Без димінгу частка ресурсу, що витрачається за рік,  $\frac{365}{4000}$ , з димінгом –  $f_{avg} \frac{365}{4000}$ .

## Вартісна економія на ресурсі АКБ

$$S_{АКБ} = (1 - f_{avg}) \cdot \frac{365}{4000} \cdot C_{АКБ} = (1 - 0,63077) \cdot \frac{365}{4000} \cdot 27700 = 933 \text{ грн / рік.}$$

Сумарна річна вигода від скорочення енергоспоживання і збільшення ресурсу АКБ за рахунок димінгу

$$S_{рік} = S_{ен} + S_{АКБ} = 938 + 933 = 1871 \text{ грн / рік.}$$

## Простий строк окупності ЕЗЗ

$$PP = \frac{\Delta CAPEX}{S_{рік}} = \frac{10000}{1871} = 5,35 \text{ року.}$$

Дисконтований строк окупності – момент, коли кумулятивна сума дисконтованої економії витрат дорівнюватиме  $\Delta CAPEX$ . Для ануїтету з кінцевими щорічною економією витрат маємо:

$$\sum_{t=1}^n \frac{S_{рік}}{(1+r)^t} = \Delta CAPEX.$$

Результати розрахунків дисконтованої економії витрат по роках зі ставкою дисконту  $r = 10\%$  зводимо до табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – До розрахунку дисконтованого строку окупності

Рік	Недисконтований дохід	Коефіцієнт дисконтування	Дисконтований дохід	Кумулятивна (дисконтована) економія витрат
0	-10000	1,0000	-10000	-10000
1	+1871	0,9091	+1701	-8299
2	+1871	0,8264	+1546	-6753
3	+1871	0,7513	+1407	-5347
4	+1871	0,6830	+1278	-4069
5	+1871	0,6209	+1162	-2907
6	+1871	0,5645	+1056	-1851
7	+1871	0,5132	+960	-891
8	+1871	0,4665	+874	-18
9	+1871	0,4241	+794	+777
10	+1871	0,3855	+721	+1498
...	...	...	...	...
20	+1871	0,1486	+277	+7561

Перетин нуля у табл. 5.1 відбувається між 8-м і 9-м роками. Використовуючи інтерполяцію, дисконтований строк окупності ЕЗЗ складає  $DPP = 8,02$  року.

### **5.3 Економічна оцінка впливу профілю димінгу у автономній системі вуличного освітлення**

Економічну оцінку впливу профілю димінгу у автономній системі вуличного освітлення виконуємо, спираючись на результати інженерних розрахунків –

моделювання впливу профілю димінгу на енергоспоживання і ресурс АКБ (див. розділ 4.3).

Необхідні додаткові фінансово-економічні параметри обираємо з розділу 5.1 і табл. 4.2.

Визначаємо грошовий ефект від димінгу за рік як суму вартості електроенергії, що була зекономлена та заощадження від зменшення необхідної кількості циклів роботи АКБ  $\Delta n$ . Розраховуємо собівартість одного циклу АКБ:

$$c_{\text{цикл}} = \frac{C_{\text{АКБ}}}{n_{\text{циклів}}}; \quad (5.8)$$

$$c_{\text{цикл}} = \frac{27700}{4400} = 6,925 \text{ грн / цикл}.$$

Річна економія від зменшення необхідної кількості циклів роботи АКБ  $\Delta n$  при використанні димінгу:

$$\Delta G_{\text{АКБ}} = \Delta n \cdot c_{\text{цикл}}. \quad (5.9)$$

Загальна річна економія від зменшення необхідної кількості циклів роботи АКБ і зменшення загального енергоспоживання за рахунок використання димінгу

$$\Delta G = \Delta G_{\text{ел.е}} + \Delta G_{\text{АКБ}}; \quad (5.10)$$

$$\Delta G_{\text{ел.е}} = \Delta E \cdot C_{\text{е/е}}. \quad (5.11)$$

Простий термін окупності

$$PP = \frac{\Delta \text{CAPEX}}{\Delta G}. \quad (5.12)$$

Чиста приведена вартість

$$NPV = -\Delta CAPEX + \Delta G \cdot AF; \quad (5.13)$$

$$AF = \frac{1 - (1 + r)^{-N}}{r}. \quad (5.14)$$

Використовуючи наведену у розділах 5.1 і 5.3 методику та Microsoft Excel, виконаємо порівняльні економічні розрахунки з впливу профілю димінгу. Результати розрахунків заносимо до табл. 5.2 та рис. 5.1.

Таблиця – Результати економічного розрахунку впливу профілю димінгу

Профіль	$\Delta G_{AKB}$	$\Delta G$	$PP$	$NPV^*$	$IRR$	$DPB$
	грн/рік	грн/рік	років	грн	%	років
без димінгу	0	0	–	–10000	–	–
4–7–2 (100–40–60 %)	339,40	1316,45	7,60	1207,71	11,73	14,96
4–7–2 (100–40–70 %)	325,83	1263,79	7,91	759,40	11,10	16,45
4–7–2 (100–40–80 %)	312,25	1211,14	8,26	311,09	10,45	18,34
4–7–2 (100–30–60 %)	386,92	1500,76	6,66	2776,79	13,90	11,53
4–7–2 (100–50–60 %)	291,89	1132,15	8,83	–361,37	9,47	>20
3–6–4 (100–40–60 %)	352,98	1369,11	7,30	1656,01	12,36	13,76
3–7–3 (100–40–60 %)	366,55	1421,77	7,03	2104,32	12,98	12,76
3–7–3 (100–30–60 %)	414,07	1606,07	6,23	3673,4	15,1	10,23

\* для  $LCC=20$  років;  $r = 10\%$

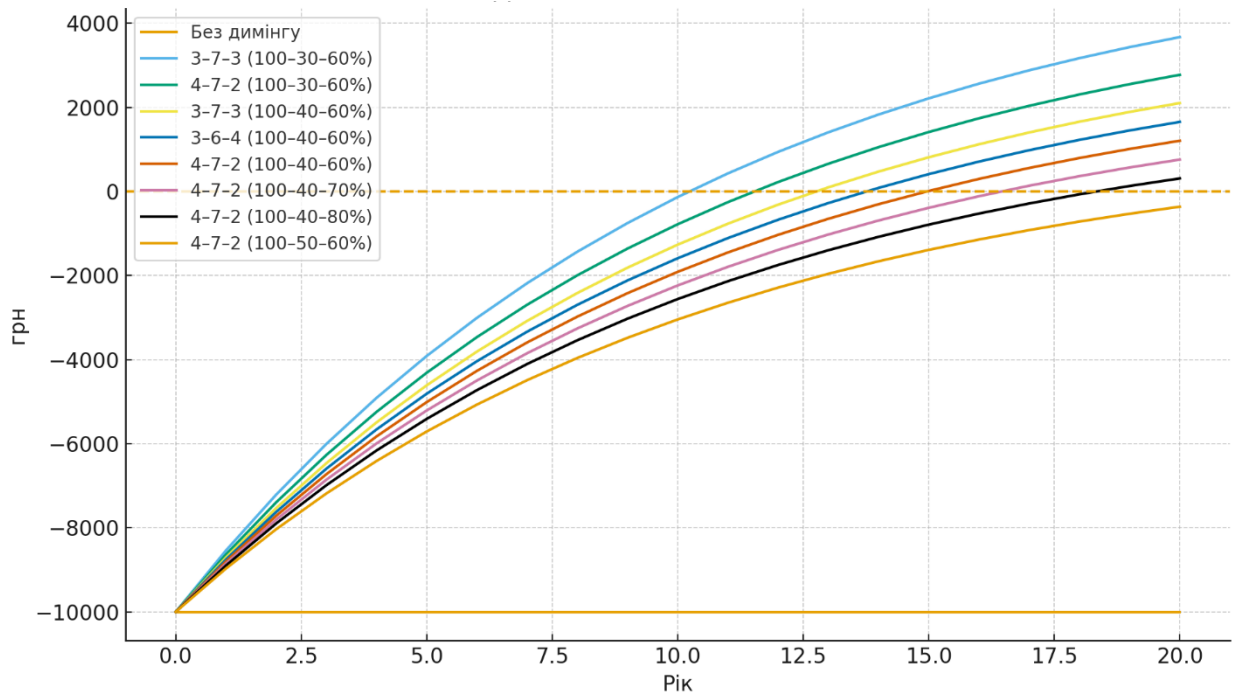


Рисунок 5.1 – Кумулятивний дисконтований грошовий потік ( $r = 10\%$ )

Відповідно до результатів розрахунків (рис. 5.1, табл. 5.2), найменший термін окупності маємо для профілю димінгу 3–7–3 (100–30–60 %), що повністю корелює з результатами моделювання, наведеними у розділі 4.3.

### Висновки з розділу 5

З урахуванням оновленої вартості АКБ 27700 грн і фактичного складу обладнання згідно кошторису (табл. 5.1), впровадження димінгу дає економію близько 1871 грн/рік на одну світлоточку, що забезпечує простий термін окупності 5,35 року і дисконтований термін окупності 8,02 року за горизонту життя проєкту 20 років. За зростання тарифу на електроенергію або вартості акумулятора економічний ефект від димінгу може бути пропорційно збільшений, що призведе до зменшення термінів окупності.

Порівняльний економічний аналіз профілів димінгу виявив, що найменший термін окупності – для профілю 3–7–3 (100–30–60 %).

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

У проєктах модернізації систем зовнішнього освітлення ключовою умовою є доведення прийнятих технічних рішень до нормативно-безпечного рівня для працівників і сторонніх осіб, а також підтвердження керованості ризиків у виробничому циклі: від підготовчих робіт і транспортування до електромонтажу на висоті, пусконаладження, експлуатації, регламентного обслуговування та аварійно-відновлювальних робіт. Формування системи управління охороною праці та цивільним захистом (ЦЗ) [87] виконується на базі чинних в Україні нормативно-правових актів і гармонізованих стандартів ЄС, що регламентують: безпечну експлуатацію електроустановок споживачів; роботи на висоті; вимоги до індивідуальних систем запобігання падінню; організацію робіт у діючих електроустановках; тимчасову організацію дорожнього руху на місцях робіт; пожежну безпеку; підготовку персоналу та дії в умовах надзвичайних ситуацій (НС).

### **6.1 Небезпечні чинники і типові ризики у системі вуличного освітлення**

Під час монтажу та експлуатації мереж вуличного освітлення виділяються чотири домінуючі групи небезпек:

1) ризики робіт на висоті:

- падіння з опор, драбин, автовишок;
- зриви при позиціюванні світильника; падіння інструменту або вузлів на осіб у зоні робіт [89];
- погодні фактори (вітер, опади, обмерзання);
- електромагнітні впливи грозових перенапруг.

Відповідно до НПАОП 0.00-1.15-07 такі роботи належать до підвищеної небезпеки, вимагають застосування систем індивідуального захисту від падіння (прив'язі повного типу, стропів або уловлювачів, енергоабсорберів) та організаційних процедур допуску, навчання і рятувальних планів. Вимоги до елементів засобів індивідуального захисту від падіння встановлюють

ДСТУ EN 361 (прив'язі), ДСТУ EN 363 (структура системи запобігання падінню), ДСТУ EN 355 (амортизатори ривка);

2) електротехнічні ризики [88]:

– ураження електричним струмом при роботі у діючих електроустановках, помилкова ідентифікація кола, неякісна перевірка відсутності напруги, відсутність заземлення робочого місця, поява напруги наведення;

– термічні та механічні дії струмів КЗ;

– небезпечні напруги кроку та дотику;

– експозиція дугового розряду.

Базові вимоги безпечної експлуатації визначені Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98 [90]), Правилами експлуатації електрозахисних засобів (НПАОП 40.1-1.07-01) та ДСТУ HD 60364-4-41 щодо автоматичного відключення живлення, улаштування систем TN/TT/IT, використання пристроїв захисного відключення (ПЗВ).

3) дорожньо-транспортні ризики у зоні робіт – наїзди транспортних засобів на працівників або техніку, вторинні зіткнення через неправильне огороження, недостатню видимість уночі чи за опадів.

Тимчасову організацію руху, схеми огороження, вибір і застосування дорожніх знаків, конусів та блоків, сигнального освітлення регламентують ДСТУ 8749:2017 [91] і ДСТУ 4100:2021. Вимоги до підтримання експлуатаційного стану доріг задля безпеки учасників руху встановлені ДСТУ 3587:2022; впровадження тимчасових схем підтверджено Єдиними правилами ремонту і утримання;

4) пожежна небезпека та НС – виконання зварювання та різання кронштейнів і шаф керування, короткі замикання в шафах і комплектних розподільчих пунктів, загоряння кабельних ліній, а також дії у разі НС (грози, шквали, повітряні тривоги, обстріли, ДТП у зоні робіт). Вимоги до пожежної безпеки містяться у НАПБ А.01.001-2014 та підзаконних актах МВС щодо програм навчання та інструктажів. Загальні засади ЦЗ [87] подано у Кодексі цивільного захисту України.

## 6.2 Оцінка ризиків і керування ними [88]

Для робіт на висоті, у діючих електроустановках та на проїжджій частині застосовується матриця ризиків, що показує ймовірність і тяжкість наслідків відповідного ризику, а для критичних елементів – визначення співвідношення *FMEA/FMECA*, тобто відношення видів і наслідків відмов (*FMEA*) до видів, наслідків і критичності відмов (*FMECA*) з рейтингом пріоритету ризику за  $RPN = S \times O \times D$ , де  $S = \text{severity}$  – тяжкість наслідків;  $O = \text{occurrence}$  – ймовірність (частота) виникнення відмов;  $D = \text{detectability}$  – можливість виявлення відмов.

Типові зниження ризику досягаються:

- 1) інженерними бар'єрами (огородження, ізоляція, заземлення, ПЗП, селективність захистів тощо);
- 2) адміністративними заходами (допуски, інструктажі, ротація, контроль погоди тощо);
- 3) засоби індивідуального захисту (EN 361/363/355);
- 4) моніторингом стану й предиктивним ремонтом;
- 5) належними технічним обслуговуванням і ремонтом електрообладнання та опор;
- 6) суворим дотриманням тимчасової організації руху [91].

## 6.3 Заходи з техніки безпеки і охорони праці [87]

**Організаційні заходи.** Організація безпечних робіт базується на системі нарядно-допускної дисципліни, визначеній ПБЕЕС (класифікація робіт; зміст наряду; склад бригади; керівник робіт; контроль; закриття), із додатковими вимогами для робіт на висоті за НПАОП 0.00-1.15-07. Персонал повинен мати підтвержені групи з електробезпеки, пройти вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі відповідно но Типових положень НПАОП 0.00-4.12-05, а для пожежної безпеки – навчання за затвердженою програмою МВС (наказ № 1021 від 05.12.2019). Обов'язкові періодичні медогляди для робіт

підвищеної небезпеки, допуск до керування автовишками та кранами, посвідчення про навчання роботі на висоті, домедична допомога, практичні тренування зі спасіння з висоти.

**Технічні заходи електробезпеки** [92]. Підготовка робочого місця у діючій електроустановці виконується послідовно:

- зняття напруги відповідними перемиканнями;
- вивішування заборонних та попереджувальних плакатів;
- перевірка відсутності напруги індикатором, придатним до класу напруги;
- встановлення переносних заземлень;
- огороження робочої зони;
- допуск бригади з фіксацією у наряді.

Вимоги до номенклатури, періодичності випробувань та використання електрозахисних засобів (діелектричні рукавиці, боти, килимки, штанги, покажчики напруги, інструмент з ізоляційним покриттям) визначені НПАОП 40.1-1.07-01.

Система захисту від непрямого дотику проектується відповідно до ДСТУ HD 60364-4-41: для систем TN перевіряють умову автоматичного відключення живлення за час  $t_a$  (як правило  $\leq 0,4$  с для 230 В у кінцевих колах), порівнюючи струм спрацювання апарата  $I_a$  з розрахунковим струмом замикання на корпус  $I_f = U_0 / Z_s$  ( $U_0$  – фазна напруга;  $Z_s$  – повний опір петлі «фаза-РЕ»). Для систем TT перевіряють  $R_A \cdot I_{\Delta n} \leq U_L$  ( $R_A$  – опір заземлювача та захисних провідників електроустановки;  $I_{\Delta n}$  – номінальний диференційний струм ПЗВ;  $U_L$  – гранично допустима напруга дотику, як правило 50 В) [92].

Захисне заземлення і повторні заземлювачі PEN-провідника на лініях освітлення виконують відповідно до вимог ПУЕ. При проектуванні та експлуатації контролюють нормативи опору заземлювальних пристроїв (у т.ч. для повторних заземлень у мережах TN-C/TN-C-S) і виконують вимірювання з порівнянням із граничними значеннями, наведеними у розд. 1.7 ПУЕ. Для практики зовнішнього освітлення часто застосовують цільові значення 30 Ом для

повторних заземлювачів на опорах, що підтверджується типовими технічними вимогами та посиланнями на ПУЕ в проєктній документації.

**Безпека дорожніх робіт.** На період виконання робіт у смузі вулиць і доріг організують тимчасові схеми руху за ДСТУ 8749:2017 [90] і ДСТУ 4100:2021: розробляють схему огороження, визначають довжини клинів звуження, робочу зону, зони безпеки, запроваджують попереджувальні знаки, бар'єри, сигнальні ліхтарі, денну/нічну видимість; передбачають сигнальні жилети високої видимості для персоналу; для робіт із частковим перекриттям – реверсивні схеми руху під наглядом регулювальника. Експлуатаційний стан дорожнього покриття, обмеження швидкості та утримання місця робіт узгоджують із вимогами ДСТУ 3587:2022 і Єдиних правил утримання доріг.

## 6.4 Інженерні розрахунки з питань охорони праці і техніки безпеки

### 6.4.1 Розрахунок необхідного «чистого прольоту» (вільної висоти) для системи запобігання падінню при роботі на опорі

**Завдання.** Монтажник працює на висоті  $H_{anchor} = 8,0\text{ м}$  від рівня землі, точка анкерування – на вершині опори. Використовується прив'язь повного типу (ДСТУ EN 361) із двогіллястим стропом і енергоабсорбером (ДСТУ EN 355). Необхідно перевірити, чи достатня висота для зупинки падіння без удару об землю.

Задаємося:

– довжина стропа  $L_s = 1,5\text{ м}$ ;

– максимальне розкриття (подовження) енергоабсорбера  $D_{abs} \leq 1,75\text{ м}$ ;

– запас на провис та з'єднувачі  $L_{slack} = 0,3\text{ м}$ ;

– антропометрична «висота» від точки кріплення D-кільця до підошов  $L_{body} = 1,5\text{ м}$ ;

– обов'язковий запас безпеки  $S = 1,0\text{ м}$ .

**Розрахунок.** Необхідна вільна висота  $H_{req}$  обчислюється як сума складових падіння

$$H_{req} = D_{ff} + D_{abs} + L_{slack} + L_{body} + S = 1,5 + 1,75 + 0,3 + 1,5 + 1,0 = 6,05 \text{ м.}$$

Фактична доступна висота до ґрунту:  $H_{aval} = H_{anchor} = 8,0 \text{ м.}$

Умова безпеки:  $H_{aval} \geq H_{req}$ , тоді умова  $8,0 > 6,05 \text{ м}$  – виконується з запасом  $1,95 \text{ м.}$

Перевірка фактору падіння  $FF$  – відношення вільної висоти до довжини стропа. Для цього розраховують три можливі сценарії залежно від величини вертикальної різниці висот анкера відносно D-кільця:

Сценарій А – анкер вище D-кільця (кращий режим),  $\Delta h = +0,5 \text{ м}$  (анкер вище D-кільця, частина «довжини» стропа вже «вибрана», тому вільний хід менший).

Вільний шлях падіння

$$\begin{aligned} D_{ff} &= \max(0; L_s - \Delta h + L_{slack}) = \\ &= \max(0; 1,5 - 0,5 + 0,3) = \max(0; 1,3) = 1,30 \text{ м.} \end{aligned}$$

Фактор падіння

$$FF = \frac{D_{ff}}{L_s} = \frac{1,3}{1,5} = 0,867 (\leq 1).$$

Необхідна «чиста висота»

$$H_{req} = D_{ff} + D_{abs} + L_{slack} + L_{body} + S = 1,3 + 1,75 + 1,5 + 1,0 = 5,55 \text{ м.}$$

Виконуємо перевірку:

$$H_{aval} \geq H_{req}; 8,0 > 5,5.$$

Умова виконується з гарним резервом.

Висновок: режим безпечний,  $FF < 1$ , пікове зусилля при гальмуванні обмежує енергоабсорбер.

Сценарій В – анкер на рівні D-кільця,  $\Delta h = 0$ , тоді

$$\begin{aligned} D_{ff} &= \max(0; L_s - \Delta h + L_{slack}) = \\ &= \max(0; 1,5 - 0 + 0,3) = \max(0; 1,8) = 1,80 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$FF = \frac{D_{ff}}{L_s} = \frac{1,8}{1,5} = 1,2 (\leq 2);$$

$$H_{req} = D_{ff} + D_{abs} + L_{slack} + L_{body} + S = 1,8 + 1,75 + 1,5 + 1,0 = 6,05 \text{ м};$$

$$H_{aval} \geq H_{req}; 8,0 > 6,05.$$

Умова виконується.

Висновок: режим допустимий (але вже  $FF > 1$ ), тому рекомендується зменшити  $L_{slack}$  або підняти анкер, щоб знизити  $FF$ .

Сценарій С – анкер нижче D-кільця (поганий режим),  $\Delta h = -1,5 \text{ м}$

$$\begin{aligned} D_{ff} &= \max(0; L_s - \Delta h + L_{slack}) = \\ &= \max(0; 1,5 - (-1,5) + 0,3) = \max(0; 3,3) = 3,30 \text{ м}; \end{aligned}$$

$$FF = \frac{D_{ff}}{L_s} = \frac{3,3}{1,5} = 2,2 (> 2);$$

$$H_{req} = D_{ff} + D_{abs} + L_{slack} + L_{body} + S = 3,3 + 1,75 + 1,5 + 1,0 = 7,55 \text{ м};$$

$$H_{aval} \geq H_{req}; 8,0 > 7,55.$$

Умова виконується.

Висновок: режим недопустимий ( $FF > 2$ ) – неприйнятно для використання звичайного стропа з амортизатором, тому рекомендується зміна технічної схеми

(інша точка анкерування або використати саморухомий пристрій на канаті чи рейці тощо).

#### 6.4.2 Перевірка умови автоматичного відключення живлення (TN-система) у кінцевому колі світильника 230 В

**Завдання.** Лінія живлення світлоточки (230 В) захищена автоматичним вимикачем типу С номіналом 10 А ( $I_n = 10\text{А}$ ), струм миттєвого спрацювання  $I_a \approx 5I_n = 50\text{А}$ . Розрахунковий опір петлі «фаза-РЕ» після монтажу –  $Z_s = 3,2\text{Ом}$ . Перевірити вимогу ДСТУ HD 60364-4-41 щодо відключення за часом  $t_a$  щодо забезпечення обмеження  $\leq 0,4\text{ с}$  для кінцевих кіл 230 В.

**Розрахунок.** Струм однофазного короткого замикання на корпус

$$I_f = U_0 / Z_s = 230 / 3,2 = 71,9\text{А}.$$

Перевіримо умову:

$$I_f \geq I_a \rightarrow 71,9\text{ А} \geq 50\text{ А} - \text{умова виконується.}$$

Отже, захист відключить коло у зонах часово-струмової характеристики, що відповідає  $t_a \leq 0,4\text{ с}$ .

**Висновок:** вимога автоматичного відключення для захисту від непрямого дотику виконується. При зростанні  $Z_s$  понад  $Z_s = U_0 / I_f = 230 / 50 = 4,6\text{Ом}$  (при  $I_f < 50\text{А}$ ), або заміні автомата на тип із вищим  $I_a$  необхідне коригування: зменшення довжини або перерізу провідників, інша уставка автоматичного вимикача або застосування ПЗВ.

## **Висновки до розділу 6**

Вбудування вимог діючої нормативної документації у процесі підготовки, виконання та супроводу робіт із зовнішнього освітлення забезпечує прийнятний рівень ризику для життя і здоров'я працівників та учасників дорожнього руху, а також знижує імовірність технологічних інцидентів. Продемонстровані інженерні перевірки для засобів індивідуального захисту від падіння, умови автоматичного відключення та ТТ-перевірка з ПЗВ є обов'язковими елементами безпечного проектування та експлуатації разом із нарядно-допускною системою, навчанням персоналу, пожежною профілактикою, планами ЦЗ і постійним моніторингом стану.

## ВИСНОВКИ

У межах поставленої мети виконано інвентаризаційно-аналітичне дослідження, розроблено алгоритм світлотехнічного моделювання для репрезентативних ділянок вулично-дорожньої мережі, розглянуто надійність основних елементів (світлодіодні модулі, драйвери, апаратура захисту, вузли керування) із оцінкою коефіцієнта готовності та відмовостійкості, електричні режими (втрати напруги, струми короткого замикання, селективність) і засоби захисту від імпульсних перенапруг та блискавкозахист. Паралельно сформовано підходи до енергетичного моделювання із нічними профілями регулювання світлового потоку (димінгу) та економічною оцінкою життєвого циклу проєктів.

Реальний стан і обсяг робіт у м. Українка кількісно окреслено за результатами інвентаризації відповідно до даних, викладених у відкритих джерелах, та оцінки методом аналізу супутникових карт місцевості: загальна протяжність критично важливих вулиць становить близько 10320 м, що відповідає близько 300 світлоточкам (з середнім кроком 35–37 м). У структурі світлоточок переважають дорожні світлодіодні світильники (близько 70 %), частка натрієвих ламп високого тиску (ДНаТ) орієнтовно 20 %, декоративні світильники – близько 5 %, автономні сонячні комплекси для переходів – близько 5 %. За 2022–2025 роки встановлено 49 автономних сонячних світильників і замінено 31 аварійну опору із переходом на оцинковані металеві – заходи, що одночасно впливають на енергоефективність і надійність.

Технічна частина роботи обґрунтовує застосування керованих світлодіодних світильників із підтримкою димінгу (аналогового 0–10 В або цифрового керування з адресацією), секціонування мереж для селективності захистів, а також багатоступеневого захисту від імпульсних перенапруг. ПЗП типу 1 встановлюють на ввідних щитах, а типу 2 – у відгалуженнях та світлоточках з узгодженням рівнів захисту.

Результати світлотехнічних розрахунків верифіковано на підставі методики ДСТУ EN 13201-3/-4 із контролем середніх величин яскравості або освітленості,

рівномірності та показників сліпучої дії для відповідних класів М/С/Р. Для пішохідних переходів рекомендовано застосування локальних фотометричних рішень з підвищенням контрасту та обмеженням дискомфорту.

Виконаний інженерний розрахунок автономного світильника зовнішнього освітлення методом коефіцієнта використання світлового потоку для типової міської вулиці з двостороннім рухом по 2 смуги в кожному напрямку, асфальтовим покриттям, з тротуарами з обох боків дозволив підібрати все необхідне обладнання, у т. ч. системи освітлення і системи автономного (на основі геліопанелей і АКБ) електроживлення. Отримані значення лягли в основу подальшого моделювання можливих профілів димінгу і вимог ДСТУ EN 13201 щодо класу освітлення. Розглядалося 3 варіанти профілів димінгу і 2 підкласи вуличного освітлення М (М3 і М4), що є характерні для руху моторизованого транспорту на лінійних ділянках (вулицях і магістралях). Було отримано, що для обраного типу і ємності АКБ (100 *A·год*), регіону розміщення розрахована автономна система освітлення буде повністю виконувати свої функції навіть у період року з мінімальною освітленістю (грудень) для розглянутих підкласів освітлення.

На основі фактичної структури світлоточок для критично важливих вулиць (приблизно 210 світлодіодних, 60 натрієвих, 15 декоративних та 15 автономних) і реалістичного режиму роботи у період дії комендантської години (приблизно шість годин уночі) розраховано зниження річного споживання електроенергії мережевою частиною системи на рівні близько 36 % у разі заміни залишкових натрієвих світильників на світлодіодні та запровадження типового нічного димінгу. За прийнятих у роботі потужностей (світлодіодні світильники 51 *Вт*; натрієві 100 *Вт*; декоративні 20 *Вт*) річне споживання мережевої частини зменшується орієнтовно з 41,4 тис. до 26,6 тис. *кВт·год*, тобто на 14,8 тис. *кВт·год/рік*. Такий результат досягається завдяки поєднанню заміни джерел світла і керованого зниження світлового потоку у нічні години за відсутності інтенсивного трафіку.

У економічному розділі розглянуто окремо автономну (сонячну) світлоточку з функцією димінгу та без неї: порівнюються варіанти без димінгу та з димінгом для різних його профілів і освітлення протягом 13 год/ніч. Додаткові капітальні витрати на контролер відстеження точки максимальної потужності (MPPT) із функцією димінгу становлять близько 10 тис. грн на світлоточку. Запропонований профіль димінгу – три години на рівні 100 % світлового потоку, сім годин на рівні 30 % і три години на рівні 60 % – дає середній коефіцієнт димінгу 0,53 і зменшення річного споживання енергії споживання з 261 до 138,5 кВт·год на одну світлоточку (економія 122,5 кВт·год/рік). З урахуванням накопичувальної дії на акумуляторну батарею (LiFePO<sub>4</sub> 24 В 100 А·год, ресурс 4000 циклів при глибині розряду 80 %) це відповідає зменшенню еквівалентної кількості повних циклів приблизно з 127 до 68 на рік. У грошовому вимірі економія на зношуванні акумулятора становить орієнтовно 0,414 тис. грн/рік на світлоточку. Грошовий ефект від зменшення енергоспоживання залежить від тарифу на електричну енергію: при діючому тарифі  $T_{ен} = 9,734 \text{ грн} \cdot \text{кВт}^{-1} \cdot \text{год}^{-1}$  він складає 1,192 тис. грн/рік на світлоточку, простий строк окупності 6,23 роки, а дисконтований – 10,23 роки, що суттєво менше тривалості життя проекту (20 років). Тому такий проєкт може бути рекомендований для впровадження.

У роботі також було виконано порівняльний техніко-економічний аналіз економічної доцільності повсюдного переходу на димінг. Результати розрахунків показали, що простий строк окупності такого заходу склав 5,35 роки, а дисконтований – 8,02 роки, що співмірно з попередніми результатами і такий перехід може бути рекомендований для впровадження.

Надійність та експлуатаційна готовність. За оцінками з експлуатації муніципальних мереж середні річні частки відмов становлять 0,3–1,5 % для світлодіодних світильників і 7–10 % для світильників із лампами ДНаТ. За наявної структури критично важливих вулиць (близько 210 світлодіодних і 60 натрієвих світильників) це відповідає очікуванню близько 2 відмов на рік у світлодіодному сегменті та близько 5 відмов для освітлення ДНаТ лампами. Після повної заміни ДНаТ ламп на LED і запровадження координації ПЗІП типів

1 і 2 очікувана кількість позаштатних відмов зменшиться переважно до пошкоджень від зовнішніх факторів, що підтверджує доцільність уніфікації парку світильників і захистів.

У розділі «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» виконано ризик-орієнтований аналіз, який засвідчив, що для систем зовнішнього освітлення критичними є електротравмонебезпека під час монтажу та експлуатації, грозові та комутаційні перенапруги, а також зниження селективності захистів у розгалужених мережах. У роботі проведено інженерні розрахунки необхідного «чистого прольоту» (вільної висоти) для системи запобігання падінню при роботі обслуговуючого персоналу на опорі, а також перевірено умови автоматичного відключення живлення для TN-системи заземлення у кінцевому колі світильника 230 В.

У підсумку робота досягає поставлених завдань: доведено, що кероване (з димінгом) світлодіодне освітлення в поєднанні з мережевою оптимізацією та повноцінним грозозахистом дозволяє знизити річне енергоспоживання, скоротити частку аварійних відмов і вартість експлуатації, а для автономної підсистеми – забезпечити додатний економічний ефект за рахунок зменшення навантаження на акумулятор та відповідних відновлювальних витрат. Місту Українка рекомендовано масштабувати наведені рішення та виконати польову верифікацію модернізованих ділянок відповідно до ДСТУ EN 13201, що забезпечить належну якість освітлення і відчутний соціально-економічний ефект.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ CEN/TR 13201-1:2016. Освітлення доріг. Частина 1. Вибірання класів освітлення (CEN/TR 13201-1:2014, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65943](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65943) (дата звернення: 14.09.2025).
2. ДСТУ EN 13201-2:2016. Вуличне освітлення. Частина 2. Технічні вимоги (EN 13201-2:2015, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65944](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65944) (дата звернення: 14.09.2025).
3. ДСТУ EN 13201-3:2016. Освітлення доріг. Частина 3. Розрахунок робочих параметрів (EN 13201-3:2015, IDT). Статус: діючий; дата початку дії: 01.07.2024; наказ від 13.11.2023 № 313. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105537](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105537) (дата звернення: 14.09.2025).
4. ДСТУ EN 13201-4:2016. Освітлення доріг. Частина 4. Методи вимірювання світлових характеристик (EN 13201-4:2015, IDT). Статус: діючий; дата початку дії: 01.07.2024; наказ від 13.11.2023 № 313. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105538](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105538) (дата звернення: 14.09.2025). Див. також наказ про прийняття: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0313774-23>.
5. ДСТУ EN 13201-5:2016. Вуличне освітлення. Частина 5. Показники енергетичної ефективності (EN 13201-5:2015, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65948](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65948) (дата звернення: 14.09.2025).
6. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. [Електронний ресурс]. Режим доступу: офіційний портал e-construction: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074958732556240833?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2) (дата звернення: 14.09.2025).

7. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Затверджені наказом Міністерства енергетики України від 21.07.2017 № 476; статус – чинний. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17> (дата звернення: 14.09.2025).

8. ДСТУ EN 60598-1:2017. Світильники. Частина 1. Загальні вимоги та випробування (EN 60598-1:2015; AC:2015; AC:2016; AC:2017, IDT; IEC 60598-1:2014, MOD; COR1:2015; COR2:2015; COR3:2017, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://splendid-ray.ua/fileman/Uploads/declaration/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3\\_EN\\_60598\\_1\\_2017.pdf](https://splendid-ray.ua/fileman/Uploads/declaration/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_EN_60598_1_2017.pdf) (дата звернення: 14.09.2025).

9. ДСТУ EN 60598-2-3:2014. Світильники. Частина 2-3. Додаткові вимоги. Світильники для освітлення вулиць і доріг (EN 60598-2-3:2003; A1:2011, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu\\_en\\_60598-2-3\\_2014.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_60598-2-3_2014.pdf) (дата звернення: 14.09.2025).

10. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електроенергії у мережах загального призначення (EN 50160, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=51529](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51529) (дата звернення: 14.09.2025).

11. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів (чинний; Зміна № 1 з 01.09.2022). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3199686959802877315?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199686959802877315?doc_type=2) (дата звернення: 14.09.2025).

12. ДСТУ EN 62305-3:2021. Блискавкозахист. Частина 3. Фізичні пошкодження будівель (споруд) та небезпека для життя (EN 62305-3:2011, IDT; IEC 62305-3:2010, MOD). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=96752](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96752) (дата звернення: 14.09.2025).

13. ДСТУ EN 61643-11:2015. Пристрої захисту від імпульсних перенапруг низьковольтні. Частина 11. Пристрої, підключені до низьковольтних електромереж. Вимоги та методи випробування (EN 61643-11:2012/A11:2018,

IDT; Зміна № 1:2019). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=95541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=95541) (дата звернення: 14.09.2025).

14. ДСТУ EN 13201-2:2016. Освітлення доріг. Частина 2. Вимоги до експлуатаційних характеристик (EN 13201-2:2015, IDT). Чинний від 01.07.2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105536](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105536) (дата звернення: 14.09.2025).

15. ДСТУ EN 13201-3:2016. Освітлення доріг. Частина 3. Розрахунок робочих параметрів (EN 13201-3:2015, IDT). Чинний; дата початку дії: 01.07.2024; наказ ДП «УкрНДНЦ» від 13.11.2023 № 313. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105537](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105537) (дата звернення: 14.09.2025).

16. ДСТУ EN 13201-4:2016. Освітлення доріг. Частина 4. Методи вимірювання світлових характеристик (EN 13201-4:2015, IDT). Чинність підтверджено наказом від 13.11.2023 № 313. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [zakon.rada.gov.ua/go/v0313774-23](https://zakon.rada.gov.ua/go/v0313774-23) (дата звернення: 14.09.2025). Довідково: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=107629](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=107629).

17. ДСТУ CEN/TR 13201-1:2016. Освітлення доріг. Частина 1. Вибір класів освітлення (CEN/TR 13201-1:2014, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65943](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65943) (дата звернення: 14.09.2025).

18. ДСТУ EN 13201-5:2016. Освітлення доріг. Частина 5. Показники енергетичної ефективності (EN 13201-5:2015, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=65948](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65948) (дата звернення: 14.09.2025).

19. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074958732556240833?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2) (дата звернення: 14.09.2025).

20. ДБН В.2.3-5:2018. Вулиці та дороги населених пунктів (зі Зміною № 1 від 01.09.2022). [Електронний ресурс]. Режим доступу: е-

[construction.gov.ua/laws\\_detail/3199686959802877315?doc\\_type=2](http://construction.gov.ua/laws_detail/3199686959802877315?doc_type=2) (дата звернення: 14.09.2025).

21. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Затверджено наказом Міністерства енергетики України від 21.07.2017 № 476. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17](http://zakon.rada.gov.ua/go/v0476732-17) (дата звернення: 14.09.2025).

23. ДСТУ EN 60598-2-3:2014. Світильники. Частина 2-3. Додаткові вимоги. Світильники для освітлення вулиць і доріг (EN 60598-2-3:2003; A1:2011, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [dnaop.com/html/62044/doc-DSTU\\_EN\\_60598-2-3\\_2014](http://dnaop.com/html/62044/doc-DSTU_EN_60598-2-3_2014) (дата звернення: 14.09.2025).

24. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010/A3:2019, IDT; із змінами). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [chernihivoblenergo.com.ua/files/consumer/law\\_docs/ДСТУ%20EN%2050160-2014-1.pdf](http://chernihivoblenergo.com.ua/files/consumer/law_docs/ДСТУ%20EN%2050160-2014-1.pdf); довідково: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105446](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105446) (дата звернення: 14.09.2025).

25. ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Електромагнітна сумісність (EMC). Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (EN 61000-4-30:2015, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=106274](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106274) (дата звернення: 14.09.2025).

26. ДСТУ EN 61643-11:2015. Пристрої захисту від імпульсних перенапруг низьковольтні. Частина 11. Вимоги та методи випробування (EN 61643-11:2012/A11:2018, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=95541](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=95541) (дата звернення: 14.09.2025).

27. ДСТУ EN 62305-3:2021. Блискавкозахист. Частина 3. Фізичні пошкодження будівель (споруд) та небезпека для життя (EN 62305-3:2011, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=96752](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96752) (дата звернення: 14.09.2025).

28. ДСТУ EN 50549-1:2022. Вимоги до генерувальних установок, призначених для паралельного під'єднання до розподільчих мереж. Частина 1. Під'єднання до розподільчої мережі низької напруги. Генерувальні установки до типу В включно (EN 50549-1:2019, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=98872](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98872); [zakon.rada.gov.ua/go/v0175774-22](https://zakon.rada.gov.ua/go/v0175774-22) (дата звернення: 14.09.2025).

29. ДСТУ EN 62446-1:2022. Фотоелектричні (PV) системи. Вимоги до тестування, документації та технічного обслуговування. Частина 1. Системи, підключені до мережі (EN 62446-1:2016/A1:2018, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=105009](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=105009) (дата звернення: 14.09.2025).

30. Dynamic Light. Handbook about interpretation of EN 13201. [Електронний ресурс]. Interreg CENTRAL EUROPE, 2019. Режим доступу: <https://www.interreg-central.eu/> (дата звернення: 14.09.2025).

31. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2013. – 160 с.

32. Мішура Ю. С., Ральченко К. В., Сахно Л. М., Шевченко Г. М. Випадкові процеси: теорія, статистика, застосування: підручник. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2023. – 496 с.

33. Бенедицький В. Б. Теорія надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної та телекомунікаційної техніки: навч. посібник. Запоріжжя: ЗНУ, 2020. – 264 с.

34. Бобало Ю. Я., Волочій Б. Ю., Лозинський О. Ю., Мандзій Б. А., Озірковський Л. Д., Федасюк Д. В., Щербаковських С. В., Яковина В. С. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 300 с.

35. Поталіцин С. Ю. Світлотехніка (вибрані розділи): навч. матеріали. Харків: ХНУМГ, 2018. – 102 с.

36. ДСТУ HD 60364-5-52:2021. Низьковольтні електричні установки. Частина 5-52. Вибірання та монтування електричного устаткування. Системи електропроводки (HD 60364-5-52:2011/A11:2017, IDT). [Електронний ресурс]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. Режим доступу: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 14.09.2025).

37. ДСТУ EN 60909-0:2022. Струми короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 0. Розрахунок струмів (EN 60909-0:2016, IDT). [Електронний ресурс]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. Режим доступу: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 14.09.2025).

38. ДСТУ EN IEC 61000-3-2:2019. Електромагнітна сумісність. Межі. Межі емісії гармонік струму для обладнання зі струмом не більше 16 А на фазу (EN IEC 61000-3-2:2019). [Електронний ресурс]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. Режим доступу: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 14.09.2025).

39. ДСТУ EN 62305-4:2012. Захист від блискавки. Частина 4. Електричні та електронні системи в спорудах (EN 62305-4:2011, IDT). [Електронний ресурс]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2012. Режим доступу: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 14.09.2025).

40. Дзядикевич Ю. В., Буряк М. В., Розум Р. І. Енергетичний менеджмент: навчальний посібник. Тернопіль: «Економічна думка», 2010. – 295 с.

41. Качула С. В. та ін. Інвестиційний менеджмент: навч. посіб. (практикум). Дніпро: Моноліт, 2022. – 204 с.

42. Лактіонова О. А. Інвестування: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ ім. В. Стуса, 2019. – 268 с.

43. Дзядикевич Ю. В., Розум Р. І., Буряк М. В. Методи оцінки ефективності інвестицій в енергозбереження // Інноваційна економіка. 2011. № 2(21). – С. 119–122.

44. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту (USAID MERP). Київ: Поліграф Плюс, 2014. – 238 с.

45. DALI Alliance. IEC 62386 (DALI-2): огляд і склад стандарту (в т.ч. Part 105 щодо оновлення ПЗ). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dali-alliance.org/> (дата звернення: 14.09.2025).

46. TE Connectivity. LUMAWISE Endurance N — роз'єм затемнення ANSI C136.41 (NEMA) для вуличного освітлення. Офіційний опис продукту. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.te.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
47. LoRa Alliance. LoRaWAN® L2 Specification v1.0.4. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lora-alliance.org/> (дата звернення: 14.09.2025).
48. G3-PLC Alliance. Specifications & User Guidelines; Hybrid PLC&RF Overview (офіційні документи). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://g3-plc.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
49. ДСТУ ISO/IEC 27001:2015. Інформаційні технології. Системи менеджменту інформаційної безпеки. Вимоги (ISO/IEC 27001:2013, IDT). [Електронний ресурс]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. Режим доступу: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
50. ДСТУ EN IEC 62443-3-2:2022; ДСТУ EN IEC 62443-4-1:2019. Безпека систем промислової автоматизації та керування (IEC 62443). [Електронний ресурс]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019–2022. Режим доступу: <https://online.budstandart.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
51. НКЦК РНБО України. Огляди та рекомендації щодо кіберстійкості, сегментації та Zero Trust для критичних сервісів (аналітичні матеріали 2024–2025). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.rnbo.gov.ua/> (дата звернення: 14.09.2025).
52. Donatello, S. та ін. Revision of the EU Green Public Procurement Criteria for Road Lighting and Traffic Signals: Technical Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. – 133 с.
53. DALI Alliance. The international IEC 62386 standard (DALI-2): офіційний опис і статус частин. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dali-alliance.org/dali/standards.html> (дата звернення: 14.09.2025).
54. DALI Alliance. D4i overview: сертифікація та функціональність D4i для інтелектуальних світильників. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dali-alliance.org/d4i/> (дата звернення: 14.09.2025).

55. TE Connectivity. LUMAWISE Endurance S – Zhaga Book 18 Connector System. Datasheet, 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.te.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
56. NEMA. ANSI C136.41-2013 – Dimming Receptacle (7-pin): зміст і сфера застосування. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.nema.org/> (дата звернення: 14.09.2025).
57. LoRa Alliance. LoRaWAN® Link Layer Specification v1.0.4, 2020. – 189 p.
58. ETSI / 3GPP. TS 23.682 – Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications (Rel-13). 2016. – 131 p.
59. G3-PLC Alliance. Specifications & User guidelines: PLC introduction for non-experts, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://g3-plc.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
60. DEHN. Surge protection concept for LED street lights. White Paper, бл. 2015. – 20 p.
61. CITEL. Surge protectors – LED lighting systems. Брошура, 2020. – 16 p.
62. CIE 150:2017 Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations. – 54 p.
63. CIE 115:2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic (2nd ed.). – 80 p.
64. Thorn Lighting. Road Lighting Handbook / Brochure. [Електронний ресурс]. 2014/2019. Режим доступу: <https://www.thornlighting.com/> (дата звернення: 14.09.2025).
65. LEDiL. Guide for street lighting optics v1.0, 2022. – 28 p.
66. Signify. DigiStreet — future-proof road and street lighting: brochure. 2018. – 24 p.
67. Thorn Lighting. R2L2 family datasheet: up to 174 lm/W, 19 types. 2023. – 12 p.
68. ДСТУ EN 61078:2022. Аналіз надійності. Блок-схеми надійності (RBD) (EN 61078:2016, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 60 с.
69. ДСТУ EN 61703:2022. Математичні вирази для надійності, готовності, ремонтпридатності та підтримуваності (EN 61703:2001, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 46 с.

70. Деркач О. О., Іванченко О. В. Технічна експлуатація електротехнічних систем: діагностика, обслуговування, надійність: навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2019. – 228 с.
71. Руденко Ю. Ф., Савінов О. М. Надійність енергетичних систем: підручник. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 352 с.
72. Камінський О. Є. Електропостачання міст: навчальний посібник. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2017. – 312 с.
73. Шидловський А. К., Сахно В. Г. Релейний захист і автоматика в електропостачанні: підручник. Київ: Наукова думка, 2012. – 496 с.
74. Мельник В. П. Низьковольтні електричні мережі та апарати: навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2018. – 210 с.
75. ДСТУ ISO 31000:2018. Управління ризиками. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 24 с.
76. ДСТУ ISO 31010:2013. Управління ризиками. Методи оцінювання ризику (ISO 31010:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2013. – 96 с.
77. Stamatis D. H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003. – 488 p.
78. Bollen M. H. J. Understanding Power Quality Problems. New York: IEEE Press / Wiley, 2000. – 544 p.
79. Холод О. І., Мазур І. І. Електричні мережі низької напруги: розрахунок струмів КЗ і вибір захистів: навчальні матеріали. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2021. – 120 с.
80. Koffi B., Cerutti A. та ін. CoM Default Emission Factors for the Member States of the European Union. JRC, 2017. – 44 p.
81. DiXi Group. GHG Emission Factors for Electricity Generation and Consumption in Ukraine. Policy Note, 2025. – 4 p.
82. European Environment Agency (EEA). Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in the EU (indicator brief), 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.eea.europa.eu/> (дата звернення: 14.09.2025).

83. OECD. Enhancing Competitiveness in Ukraine through a Sustainable Framework for Energy Service Companies (ESCOs). Paris: OECD, 2019. – 64 p.
84. UNDP Ukraine. Project Lessons-Learned Report: ESCO in the Public Sector. 2025. – 40 p.
85. UNEP Copenhagen C2E2. ESCO in Ukraine: 8 Years of Progress and Resilience Amid War. 2025. – 24 p.
86. World Bank / ESMAP. CityLED Streetlight Financing Tool – User’s Manual. April 2017. – 19 p.
87. Мартинюк В.С., Гончарук І.В. Охорона праці та цивільний захист: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2021. – 312 с.
88. Мельничук О.В., Мацюк Ю.П. Безпека робіт на висоті: навчальний посібник. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2020. – 180 с.
89. Коцюбинський В.В., Романенко О.М. Електробезпека в електроустановках споживачів: підручник. Харків: ХНУМГ ім. О.М.Бекетова, 2019. – 256 с.
90. Granata S., Bracale A., Caramia P. Risk Assessment for Power Systems Field Operations: A Review. Safety Science. 2022;148:105648. DOI:10.1016/j.ssci.2022.105648.
91. Литвин В.В., Дорошенко О.П. Організація дорожнього руху при виконанні дорожніх робіт: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2021. – 164 с.
92. НПАОП 40.1-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ: Міненерго, 1998 (чинна ред.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/>