

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ
НАВЧАЛЬНОГО КОРПУСУ УНІВЕРСИТЕТУ ШЛЯХОМ ПЕРЕХОДУ НА
LED-ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ЗЕЕМ-23ск

Ігор ТАРАСОВ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

ТАРАСОВ Ігор Веніамінович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Підвищення енергоефективності системи освітлення навчального корпусу університету шляхом переходу на LED-технології та автоматичне керування».

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: метою роботи є підвищення енергоефективності системи освітлення навчального корпусу університету шляхом заміни люмінесцентних світильників світлодіодними та впровадження автоматичного керування за умови дотримання нормативних вимог до якості освітлення. Завдання роботи: проаналізувати стан і нормативну базу освітлення навчальних закладів; виконати огляд світлодіодних технологій та систем автоматичного керування; виконати світлотехнічний розрахунок коридору й аудиторії з порівнянням варіантів світильників; здійснити математичне моделювання розподілу освітленості та прогноз показників; розробити систему автоматичного керування, електричні схеми модернізації та програмовану логіку; оцінити енергоефективність і виконати техніко-економічне обґрунтування.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити): проаналізувати сучасний стан і проблеми освітлення навчальних корпусів, люмінесцентні та світлодіодні технології, нормативну базу проєктування й системи автоматичного керування; виконати світлотехнічний розрахунок коридору та аудиторії, порівняти варіанти типу й компонування світильників, перевірити рівномірність; виконати розрахунок річного електроспоживання, оцінку енергоефективності та техніко-економічне обґрунтування з визначенням терміну окупності; провести математичне моделювання розподілу освітленості наявної та запропонованої систем, деградації світлового потоку й прогноз енергоспоживання на перспективу; розробити електричні схеми модернізації (однолінійну схему живлення, схему підключення світильників і шини DALI) та програмовану логіку керування (FBD, LD) за IEC 61131-3.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): структурна схема люмінесцентного світильника та принцип роботи світлодіода; план розміщення світильників коридору й аудиторії; розрахункова схема приміщення; діаграми порівняння світлової віддачі, строку служби та встановленої потужності; карти розподілу освітленості наявної та запропонованої систем; структурна схема й алгоритм системи автоматичного керування; однолінійна електрична схема живлення; схема підключення світильників і шини DALI; функціональна (FBD) та релейно-контактна (LD) схеми логіки керування; графіки споживання електроенергії, окупності та прогнозу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
IV	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
V	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Добір і аналіз літературних джерел, нормативних документів та готових рішень з енергоефективного освітлення будівель	12 травня 2026 р.
2	Формування структури роботи, визначення мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження	15 травня 2026 р.
3	Написання першого розділу: аналіз стану, технологій (ЛЛ і LED), нормативної бази та систем автоматичного керування	18 травня 2026 р.
4	Збір вихідних даних про навчальний корпус (коридори, аудиторія) та характеристик наявного освітлення	22 травня 2026 р.
5	Світлотехнічний розрахунок коридору й аудиторії, порівняння варіантів світильників і компонування (розділ 2)	25 травня 2026 р.
6	Розробка системи автоматичного керування, розрахунок річного електроспоживання та техніко-економічне обґрунтування (розділ 3)	29 травня 2026 р.
7	Математичне моделювання розподілу освітленості, деградації потоку та прогноз показників (розділ 4)	02 червня 2026 р.
8	Розробка електричних схем модернізації та програмованої логіки керування — FBD, LD (розділ 5)	05 червня 2026 р.
9	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу, висновків, списку джерел та підготовка роботи до перевірки	08 червня 2026 р.

Дата видачі завдання 12 травня 2025 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ігор ТАРАСОВ

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Підвищення енергоефективності системи освітлення навчального корпусу університету шляхом переходу на LED-технології та автоматичне керування»: **47 с., 25 рис., 16 табл., 19 джерел.**
ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10

Досліджуваний об'єкт — система штучного освітлення навчального корпусу університету (коридори та навчальна аудиторія), що підлягає модернізації шляхом заміни люмінесцентних світильників світлодіодними та впровадження автоматичного керування з метою підвищення енергоефективності за дотримання нормативних вимог до якості освітлення.

Метою роботи є підвищення енергоефективності системи освітлення навчального корпусу шляхом переходу на світлодіодні джерела світла й автоматичне керування.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан і проблеми освітлення навчальних закладів, порівняно люмінесцентні та світлодіодні технології, розглянуто нормативну базу проєктування й системи автоматичного керування; обґрунтовано доцільність переходу на LED-технології.

У другому розділі виконано світлотехнічний розрахунок коридору й аудиторії методом коефіцієнта використання, порівняно варіанти типу та компоновки світильників (LED-панелі й лінійні світильники), перевірено рівномірність освітлення та визначено кількість світильників і встановлену потужність.

У третьому розділі розроблено систему автоматичного керування на основі датчиків руху й освітленості та протоколу DALI, розраховано річне споживання електроенергії, оцінено енергоефективність і виконано техніко-економічне обґрунтування з визначенням терміну окупності.

У четвертому розділі виконано математичне моделювання розподілу освітленості наявної та запропонованої систем, моделювання деградації світлового потоку, а також прогноз енергоспоживання, економічного (NPV) та екологічного ефекту на перспективу.

У п'ятому розділі розроблено технологічне рішення модернізації — електричні схеми живлення (однолінійну схему, схему підключення світильників і шини DALI) та програмовану логіку керування (FBD, LD) згідно з IEC 61131-3.

Результати роботи підтверджують, що перехід на світлодіодне освітлення з автоматичним керуванням забезпечує нормовану освітленість, знижує річне споживання електроенергії приблизно на 46 % за орієнтовного простого терміну окупності близько 4 років.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ОСВІТЛЕННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СВІТЛОДІОД, ЛЮМІНЕСЦЕНТНА ЛАМПА, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, DALI, СВІТЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК, ТЕРМІН ОКУПНОСТІ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Реферат	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Тарасов І.					5	1
Перевірів		Пересунько І						
Н. Контр.		Пересунько І				КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.		Пересунько І						

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	8
1.1. Сучасний стан та проблеми систем штучного освітлення навчальних корпусів.....	8
1.2. Люмінесцентні джерела світла та їх характеристики.....	9
1.3. Світлодіодні технології як засіб підвищення енергоефективності.....	10
1.4. Нормативно-правова база проєктування освітлення.....	12
1.5 Системи автоматичного керування освітленням.....	13
1.6 Постановка задачі та висновки до розділу 1.....	14
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СВІЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ.....	16
2.1. Характеристика об'єкта дослідження.....	16
2.2. Методика та вихідні дані світлотехнічного розрахунку.....	16
2.3. Світлотехнічний розрахунок коридору.....	19
2.4. Світлотехнічний розрахунок аудиторії.....	21
2.5. Моделювання розподілу освітленості та оцінка рівномірності.....	22
2.6. Порівняння варіантів і висновки до розділу 2.....	23
РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	25
3.1 Система автоматичного керування освітленням об'єкта.....	25
3.2 Розрахунок річного споживання електроенергії.....	27
3.3 Оцінка енергоефективності запропонованих рішень.....	28
3.4 Техніко-економічне обґрунтування.....	29
3.5 Висновки до розділу 3.....	31
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ.....	33
4.1 Постановка задачі математичного моделювання.....	33
4.2 Математична модель розподілу освітленості.....	33
4.3 Моделювання деградації світлового потоку та строку служби.....	35
4.4 Прогнозування енергоспоживання, економічного та екологічного ефекту.....	36
4.5 Висновки до розділу 4.....	38
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РІШЕННЯ: ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ТА ПРОГРАМОВАНА ЛОГІКА КЕРУВАННЯ.....	39
5.1 Структура технічного рішення модернізації.....	39
5.2 Електрична схема живлення та розподілу.....	40
5.3 Схема підключення світильників та системи керування.....	42
5.4 Програмована логіка керування.....	43
5.5 Висновки до розділу 5.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Тарасов І				Зміст	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І						6	1
						КНУ		
Н. Контр.	Пересунько І					гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І							

ВСТУП

Раціональне використання енергетичних ресурсів є одним із пріоритетних завдань сучасної економіки України, що закріплено на законодавчому рівні та узгоджено з європейською політикою енергоефективності [1; 2]. Будівлі закладів освіти належать до споживачів зі значним і нерівномірним добовим навантаженням, а системи штучного освітлення формують суттєву частку їхнього електроспоживання, працюючи протягом усього навчального дня в коридорах, рекреаціях, аудиторіях і лабораторіях.

У більшості навчальних корпусів, споруджених у попередні десятиліття, освітлення базується на люмінесцентних світильниках із лампами типу Т8 потужністю 36 Вт і електромагнітною пускорегулювальною апаратурою (ПРА). Такі установки мають низку недоліків: помірну світлову віддачу, додаткові втрати потужності в ПРА, підвищений коефіцієнт пульсації світлового потоку, обмежений строк служби та потребу в утилізації ламп, що містять ртуть [3; 6]. Як наслідок, фактичні витрати електроенергії на освітлення часто перевищують економічно доцільний рівень за одночасно недостатньої або нерівномірної освітленості робочих поверхонь.

Перспективним напрямом підвищення енергоефективності є перехід на світлодіодні (LED) джерела світла у поєднанні з системами автоматичного керування. Сучасні світлодіодні світильники забезпечують світлову віддачу понад 100 лм/Вт, тривалий строк служби, миттєвий запуск, відсутність ртуті та можливість плавного регулювання світлового потоку [7]. Доповнення системи датчиками присутності й освітленості дає змогу вмикати та регулювати освітлення лише за потреби, що додатково знижує споживання, особливо у приміщеннях із періодичним перебуванням людей, таких як коридори.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Тарасов І.			Вступ	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І						
							7	1
Н. Контр.		Пересунько І				КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.		Пересунько І						

Метою роботи є підвищення енергоефективності системи освітлення навчального корпусу університету шляхом заміни люмінесцентних світильників світлодіодними та впровадження автоматичного керування за умови дотримання нормативних вимог до якості освітлення.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі задачі:

- 1) проаналізувати наявну систему освітлення навчального корпусу та виявити її недоліки;
- 2) виконати огляд світлодіодних технологій і нормативної бази проєктування освітлення;
- 3) розглянути системи автоматичного керування освітленням та оцінити їхній потенціал енергозбереження;
- 4) виконати світлотехнічний розрахунок і порівняти варіанти типу та компонування світильників для коридору й аудиторії;
- 5) оцінити енергоефективність запропонованих рішень та виконати їх техніко-економічне обґрунтування.

Об'єкт дослідження — система штучного освітлення навчального корпусу університету (коридори та навчальна аудиторія).

Предмет дослідження — світлотехнічні та енергетичні характеристики системи освітлення при переході на світлодіодні джерела світла й автоматичне керування.

Методи дослідження: метод коефіцієнта використання світлового потоку, точковий метод розрахунку освітленості, комп'ютерне світлотехнічне моделювання та техніко-економічний аналіз [3; 5].

Практичне значення роботи полягає в отриманні обґрунтованих проєктних рішень щодо модернізації освітлення навчального корпусу, які можуть бути використані під час реконструкції освітлювальних установок закладів освіти.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СТАНУ СИСТЕМ ОСВІТЛЕННЯ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

1.1. Сучасний стан та проблеми систем штучного освітлення навчальних корпусів

Штучне освітлення є невід'ємною складовою інженерного забезпечення навчального корпусу й безпосередньо впливає на зорову працездатність, самопочуття та безпеку студентів і працівників. Водночас освітлювальні установки є постійним споживачем електроенергії: коридори й рекреації освітлюються майже впродовж усього робочого дня, а аудиторії — під час занять незалежно від рівня природного освітлення. Тому модернізація освітлення розглядається як один із найдоступніших заходів підвищення енергоефективності будівлі [1; 3].

Узагальнювальною характеристикою ефективності джерела світла є світлова віддача — відношення випромінюваного світлового потоку до спожитої потужності:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, \text{ лм/Вт} \quad (1.1)$$

де Φ — світловий потік джерела, лм; P — спожита електрична потужність, Вт. Чим вище значення η , тим менше електроенергії потрібно для створення однакового світлового потоку, що безпосередньо визначає економічність установки [6].

Для значної частини існуючих навчальних корпусів характерне застосування люмінесцентних світильників з електромагнітною ПРА. Основними недоліками таких установок є: помірна світлова віддача системи «лампа + ПРА»; додаткові втрати потужності в дроселі; підвищений коефіцієнт

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Тарасов І.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І							

пульсації освітленості; поступова деградація світлового потоку та зниження якості кольоропередавання впродовж строку служби; вміст ртуті, що ускладнює утилізацію [3; 6]. Структуру типового люмінесцентного світильника наведено на рис. 1.1.

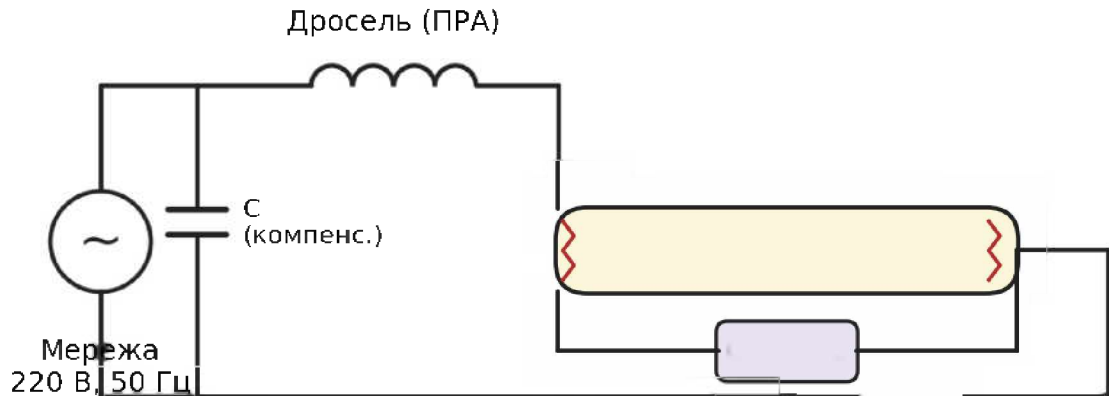


Рисунок 1.1 — Структурна схема люмінесцентного світильника з електромагнітною ПРА

1.2. Люмінесцентні джерела світла та їх характеристики

Люмінесцентна лампа — це газорозрядне джерело світла низького тиску, у якому ультрафіолетове випромінювання ртутного розряду перетворюється люмінофором у видиме світло. Для роботи лампи необхідна пускорегулювальна апаратура, що забезпечує запалювання й обмеження струму розряду. Електромагнітна ПРА (дросьель зі стартером) є найпростішою, проте вносить додаткові втрати потужності та зумовлює пульсацію світлового потоку з подвоєною частотою мережі [6].

У досліджуваному корпусі застосовано світильники з двома лампами Philips TL-D 36W/54-765. Згідно з технічним описом виробника, така лампа має світловий потік 2500 лм, корельовану колірну температуру близько 6200 К та індекс кольоропередавання $R_a = 72$ [8]. Отже, потік одного світильника становить

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

близько 5000 лм, а сумарна потужність ламп — 72 Вт; з урахуванням втрат в електромагнітній ПРА ($\approx 18\text{--}20\%$) повна потужність світильника досягає приблизно 90 Вт.

Якість освітлення характеризують також коефіцієнтом пульсації освітленості, що визначається за виразом:

$$K_{\Pi} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{\text{сер}}} \cdot 100, \% \quad (1.2)$$

де $E_{\max}$, $E_{\min}$, $E_{\text{сер}}$ — відповідно максимальне, мінімальне та середнє значення освітленості за період коливань, лк. Для навчальних приміщень нормативне значення K_{Π} обмежене, а підвищена пульсація люмінесцентних установок з електромагнітною ПРА є їх суттєвим недоліком [3; 6].

1.3. Світлодіодні технології як засіб підвищення енергоефективності

Світлодіод — це напівпровідниковий прилад, що випромінює світло під час проходження прямого струму через р–п перехід. Білі світлодіоди освітлювального призначення зазвичай побудовані за схемою «синій кристал + люмінофор», що дає змогу отримувати різні значення колірної температури. Спрощену будову та принцип роботи світлодіода наведено на рис. 1.2 [7].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

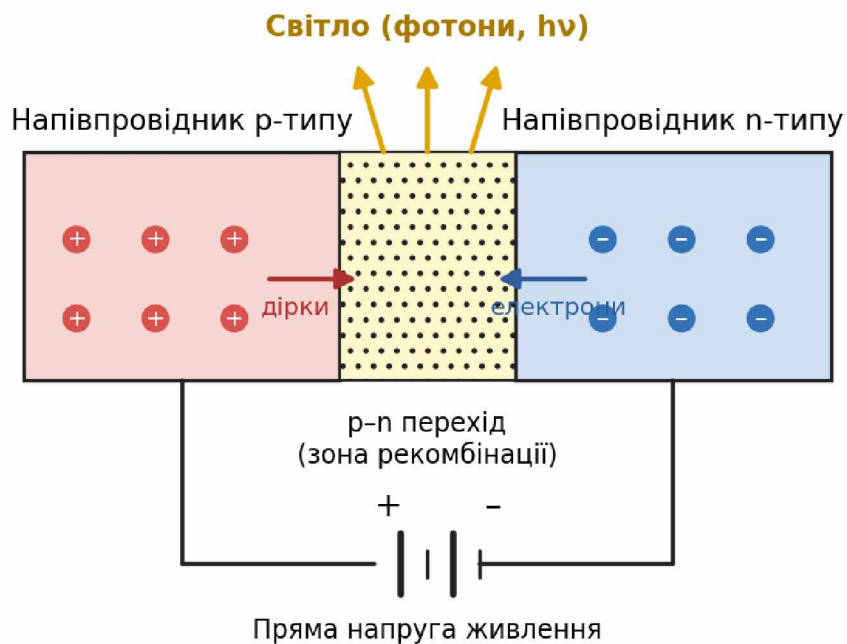


Рисунок 1.2 — Принцип роботи світлодіода (інжекція носіїв у р-n переході та випромінювальна рекомбінація)

Порівняно з традиційними джерелами світла світлодіодні мають істотно вищу світлову віддачу та значно більший строк служби. Узагальнене порівняння цих показників для основних типів джерел наведено на рис. 1.3 і рис. 1.4.

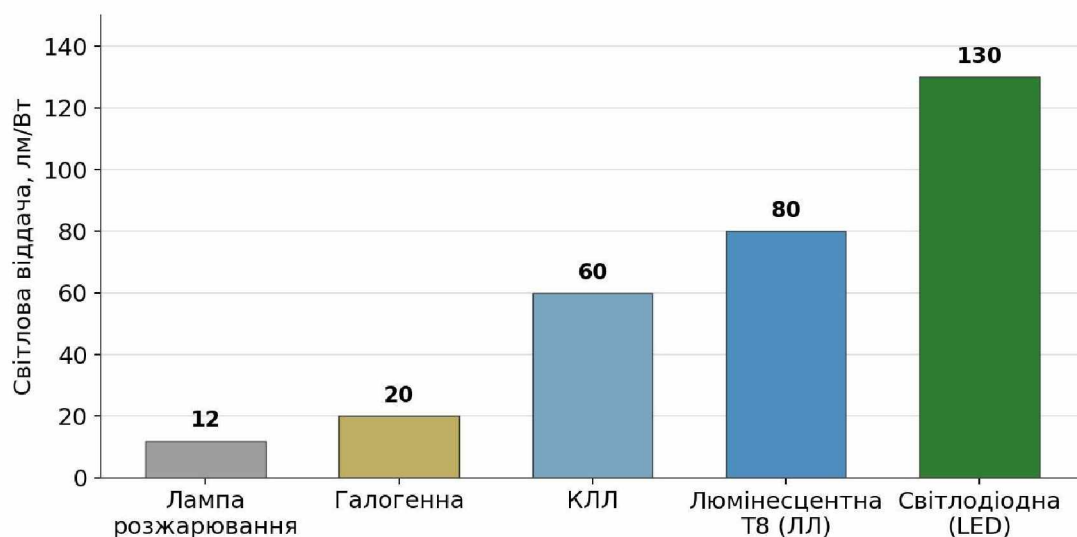


Рисунок 1.3 — Порівняння світлової віддачі джерел світла

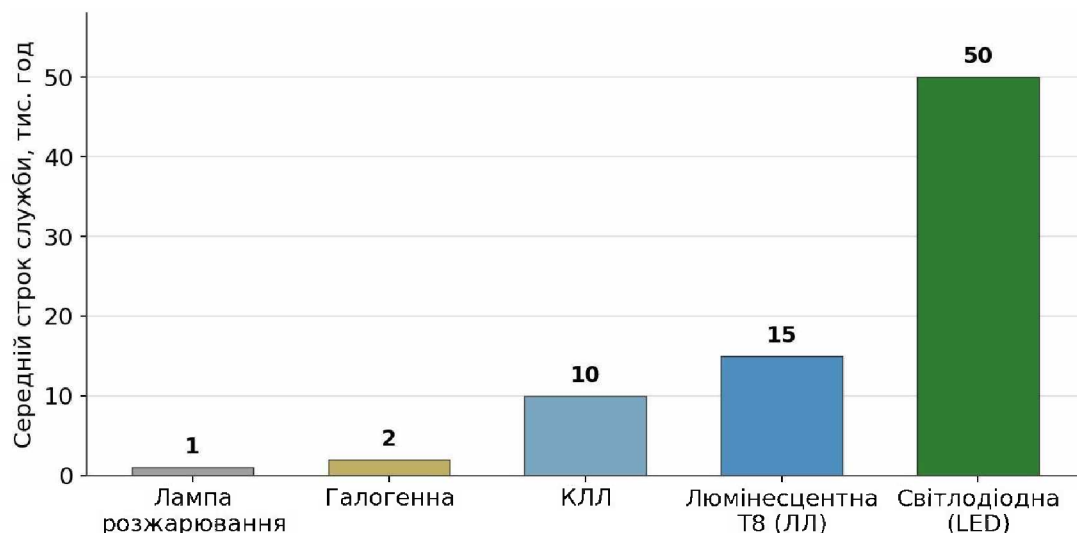


Рисунок 1.4 — Порівняння середнього строку служби джерел світла

Основними перевагами світлодіодних світильників є: світлова віддача понад 100 лм/Вт; строк служби до 50 000 год; миттєвий запуск без розгоряння; відсутність ртуті; стійкість до частих комутацій; можливість плавного регулювання світлового потоку (дімування), що є передумовою для автоматичного керування [7]. Водночас слід урахувувати залежність характеристик світлодіодів від теплового режиму та якість драйвера, що визначає коефіцієнт пульсації й строк служби виробу.

Важливою особливістю нормування є те, що для світлодіодних джерел нормована середня освітленість залежить від колірної температури і має зростати зі збільшенням останньої [3]. Це безпосередньо впливає на вибір між варіантами 4000 К, 5000 К та 6500 К і враховуватиметься під час світлотехнічного розрахунку в подальших розділах.

1.4. Нормативно-правова база проектування освітлення

Проектування штучного освітлення в Україні регламентується ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення», який встановлює нормовані значення

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

освітленості, показники якості освітлення (коефіцієнт пульсації, показник дискомфорту, рівномірність) та особливості нормування для світлодіодних джерел [3]. Для будівель закладів освіти додатково застосовують вимоги ДБН В.2.2-3:2018 «Будинки і споруди. Заклади освіти» [4]. Гармонізовані з європейською практикою вимоги до освітлення робочих місць наведено в EN 12464-1 [5].

Орієнтовні нормовані значення для приміщень, що розглядаються в роботі, узагальнено в табл. 1.1; остаточні значення приймаються за відповідними таблицями ДБН на етапі розрахунку.

Таблиця 1.1 – Нормовані показники освітлення приміщень навчального корпусу (за ДБН В.2.5-28:2018)

Приміщення	Ен, лк	Площина нормування	Ra	Кп, %
Коридор (рекреаційно-комунікаційний)	150	підлога	—	≤ 20
Навчальна аудиторія	400	Г-0,8 (горизонтальна)	≥ 80	≤ 10
Класна (аудиторна) дошка	500	вертикальна	≥ 80	≤ 10

Оформлення бібліографічних посилань у роботі виконано згідно з ДСТУ 8302:2015, що забезпечує коректне цитування джерел і запобігає академічному плагіату [11].

1.5 Системи автоматичного керування освітленням

Автоматичне керування дає змогу узгодити роботу освітлювальної установки з фактичною потребою в освітленні та наявністю людей у приміщенні. Основними засобами є: датчики присутності й руху, що вмикають освітлення лише за наявності людей; датчики освітленості, які регулюють світловий потік з урахуванням природного світла (так зване підтримання сталої освітленості);

таймери та програмовані сценарії; а також зонування приміщень на незалежно керовані групи.

Для побудови керованих освітлювальних мереж широко застосовують цифрові протоколи, зокрема DALI (стандарт IEC 62386), що забезпечує адресне керування й дімування окремих світильників, та системи на основі KNX (ISO/IEC 14543-3) для комплексної автоматизації будівель [9; 10]. Поєднання світлодіодних світильників із такими системами особливо ефективно в коридорах із періодичним перебуванням людей, де потенціал зниження споживання є найбільшим [7]. Узагальнену структуру системи автоматичного керування освітленням наведено на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 — Узагальнена структурна схема системи автоматичного керування освітленням (датчики — контролер — драйвери світильників)

1.6 Постановка задачі та висновки до розділу 1

Виконаний аналіз показав, що наявна люмінесцентна система освітлення навчального корпусу характеризується помірною світловою віддачею, додатковими втратами в електромагнітній ПРА та підвищеною пульсацією, що

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

зумовлює завищене споживання електроенергії за недостатньої якості освітлення. Перехід на світлодіодні світильники у поєднанні з автоматичним керуванням є обґрунтованим напрямом підвищення енергоефективності за дотримання нормативних вимог [3; 5].

Кількісну оцінку доцільності модернізації зручно виконувати за відносним зниженням установленої потужності:

$$\delta P = \frac{P_{\text{ЛЛ}} - P_{\text{LED}}}{P_{\text{ЛЛ}}} \cdot 100, \% \quad (1.3)$$

де $P_{\text{ЛЛ}}$ і P_{LED} — установлена потужність освітлення до та після модернізації відповідно, Вт. Конкретні значення цих величин будуть отримані у наступному розділі за результатами світлотехнічного розрахунку та порівняння варіантів компонування світильників.

Таким чином, у подальших розділах необхідно: виконати світлотехнічний розрахунок коридору й аудиторії; порівняти варіанти типу та розміщення світильників (LED-панелі та лінійні світильники); визначити досягнуту освітленість, рівномірність і кількість світильників; обґрунтувати систему автоматичного керування та оцінити енергоефективність запропонованих рішень.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА СВІЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ

2.1. Характеристика об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження є система штучного освітлення навчального корпусу університету. Корпус має п'ять поверхів; на кожному поверсі розташований протяжний коридор, що виконує комунікаційно-рекреаційну функцію, а також навчальні аудиторії. Для розрахунку обрано два характерні приміщення: типовий поверховий коридор та навчальну аудиторію [4].

Коридор має довжину 320 м, ширину 3,10 м і висоту 3,25 м; робочою поверхнею для коридору вважається підлога. Навчальна аудиторія має розміри 11×8 м (площа 88 м²) і висоту 3,25 м; нормованою є горизонтальна робоча поверхня на рівні 0,8 м (Г-0,8), а також вертикальна поверхня класної дошки.

Наявне освітлення побудоване на світильниках із двома люмінесцентними лампами 36 Вт і електромагнітною ПРА (повна потужність світильника близько 90 Вт). Коридор кожного поверху обладнано приблизно 53 світильниками, аудиторію — 12 світильниками. Як буде показано нижче, фактична освітленість таких установок не досягає нормованих значень, що додатково обґрунтовує доцільність модернізації [3].

2.2. Методика та вихідні дані світлотехнічного розрахунку

Розрахунок загального рівномірного освітлення виконано методом коефіцієнта використання світлового потоку, який враховує геометрію приміщення та відбивні властивості поверхонь [6]. Для перевірки рівномірності додатково застосовано точковий метод, а просторовий розподіл освітленості

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Тарасов І.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І							

може уточнюватися засобами комп'ютерного моделювання (DIALux) [13].

Розрахункова висота підвісу світильників над робочою поверхнею визначається за виразом:

$$h_p = H - h_{rp} - h_{cv} \quad (2.1)$$

де H — висота приміщення; h_{rp} — висота робочої поверхні над підлогою; h_{cv} — звис світильника від стелі. Для коридору (робоча поверхня — підлога, світильники стельові) $h_p = 3,25$ м; для аудиторії $h_p = 3,25 - 0,8 = 2,45$ м.

Індекс приміщення, що характеризує його геометрію, обчислюється за формулою:

$$i = \frac{A \cdot B}{h_p \cdot (A + B)} \quad (2.2)$$

де A , B — довжина і ширина приміщення, м. Для коридору $i = (320 \cdot 3,10) / (3,25 \cdot (320 + 3,10)) \approx 0,95$; для аудиторії $i = (11 \cdot 8) / (2,45 \cdot (11 + 8)) \approx 1,9$. За значеннями i та коефіцієнтами відбиття стелі, стін і підлоги (70/50/20 %) за таблицями коефіцієнта використання прийнято $\eta = 0,50$ для коридору та $\eta = 0,64$ для аудиторії [6].

Необхідна кількість світильників визначається за виразом:

$$N = \frac{E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{\Phi_{cv} \cdot \eta} \quad (2.3)$$

де E_n — нормована освітленість, лк; S — площа приміщення, м²; K_z — коефіцієнт запасу; Z — коефіцієнт нерівномірності ($Z = 1,1$); Φ_{cv} — світловий потік одного світильника, лм; η — коефіцієнт використання. Фактично досягнута середня освітленість перевіряється за оберненим виразом:

$$E_\phi = \frac{N \cdot \Phi_{cv} \cdot \eta}{S \cdot K_z \cdot Z} \quad (2.4)$$

Вихідні дані для розрахунку обох приміщень узагальнено в табл. 2.1, а технічні характеристики наявних і запропонованих світильників — у табл. 2.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для світлотехнічного розрахунку

Параметр	Коридор	Аудиторія
Розміри Д×Ш×В, м	320×3,10×3,25	11×8×3,25
Площа S, м ²	992	88
Робоча площа	підлога (0 м)	Г-0,8 м
Розрахункова висота h _р , м	3,25	2,45
Індекс приміщення і	0,95	1,9
Нормована освітленість E _н , лк	150	400 (дошка 500)
Коефіцієнт запасу K _з	1,4 (LED)	1,4 (LED)
Коефіцієнт Z	1,1	1,1
ρ стелі/стін/підлоги, %	70/50/20	70/50/20
Коефіцієнт використання η	0,50	0,64

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики світильників

Показник	Наявний ЛЛ 2×36 Вт	LED-панель (А)	LED лінійний (Б)
Тип / модель	2×TL-D 36W/54	RC132V 600×600	BN124C 1200 мм
Потужність, Вт	90 (з ЕмПРА)	36	38
Світловий потік, лм	5000	3600	4100
Світлова віддача, лм/Вт	≈55	100	108
Колірна t°, К	6200	4000	4000
R _a	72	80	80
Ресурс, год	≈13 000	50 000	50 000
Коефіцієнт пульсації	високий	<5 %	<5 %

Розрахункову схему визначення параметрів приміщення (висот і коефіцієнтів відбиття) наведено на рис. 2.2.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

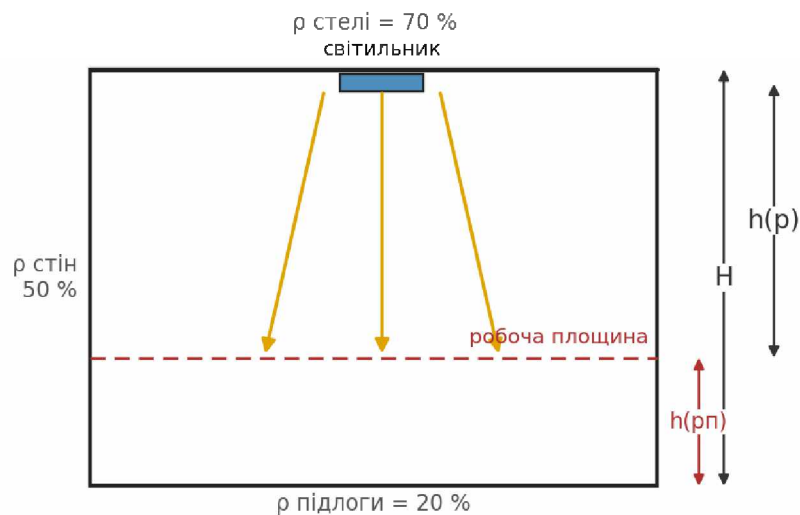


Рисунок 2.2 — Розрахункова схема приміщення (визначення h_p , H та коефіцієнтів відбиття)

2.3. Світлотехнічний розрахунок коридору

Спочатку оцінено фактичну освітленість наявної установки. Для 53 люмінесцентних світильників ($\Phi_{\text{св}} = 5000$ лм, $\eta = 0,48$, $K_z = 1,5$) за виразом (2.4) середня освітленість становить $E_{\text{ф}} = (53 \cdot 5000 \cdot 0,48) / (992 \cdot 1,5 \cdot 1,1) \approx 78$ лк, що значно нижче за нормовані 150 лк. Отже, наявне освітлення коридору не відповідає вимогам ДБН [3].

Для заміни розглянуто два варіанти світлодіодних світильників: варіант А — панель 600×600 (RC132V, 3600 лм) [14]; варіант Б — лінійний світильник 1200 мм (BN124C, 4100 лм) [15]. Кількість світильників за виразом (2.3):

— варіант А: $N = (150 \cdot 992 \cdot 1,4 \cdot 1,1) / (3600 \cdot 0,50) \approx 128$ шт; встановлена потужність $128 \cdot 36 = 4608$ Вт;

— варіант Б: $N = (150 \cdot 992 \cdot 1,4 \cdot 1,1) / (4100 \cdot 0,50) \approx 112$ шт; встановлена потужність $112 \cdot 38 = 4256$ Вт.

Обидва варіанти забезпечують нормовану освітленість (перевірка за (2.4) дає $E_{\text{ф}} \approx 150$ лк). Для протяжного коридору доцільнішим є варіант Б: лінійні

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

світильники утворюють майже неперервну світлову лінію вздовж осі, забезпечують кращу поздовжню рівномірність і потребують меншої кількості виробів та меншої потужності. Тому для коридору приймаємо лінійні світлодіодні світильники (варіант Б) — 112 шт на поверх з кроком близько 2,86 м. План розміщення наведено на рис. 2.1.

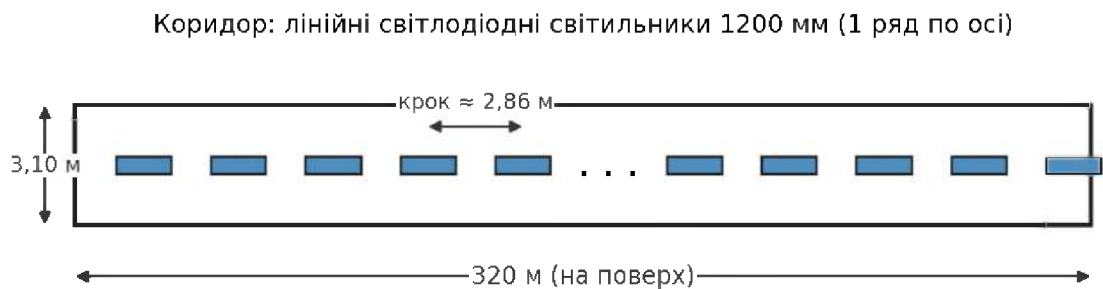


Рисунок 2.1 — План коридору з розміщенням лінійних світлодіодних світильників (1 ряд по осі)

Для коректного порівняння енергоефективності виконано також умовний розрахунок люмінесцентного варіанта, що забезпечує ту саму нормовану освітленість 150 лк: $N = (150 \cdot 992 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / (5000 \cdot 0,48) \approx 103$ світильники потужністю по 90 Вт, тобто 9270 Вт на поверх. Зведені результати розрахунку коридору (на один поверх) наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати світлотехнічного розрахунку (на один поверх / аудиторію)

Варіант	N, шт	E_ф, лк	P, Вт	p, Вт/м²
Коридор: наявна ЛЛ	53	78	4770	4,8
Коридор: ЛЛ до норми	103	151	9270	9,3
Коридор: LED-панель (А)	128	151	4608	4,6
Коридор: LED лінійний (Б)*	112	150	4256	4,3
Аудиторія: наявна ЛЛ	12	248	1080	12,3
Аудиторія: ЛЛ до норми	20	413	1800	20,5
Аудиторія: LED-панелі (А)	24	408	864	9,8

* обраний варіант для коридору.

2.4. Світлотехнічний розрахунок аудиторії

Фактична освітленість наявної установки аудиторії (12 світильників, $\Phi_{\text{св}} = 5000$ лм, $\eta = 0,60$, $K_z = 1,5$) за (2.4) становить $E_{\text{ф}} = (12 \cdot 5000 \cdot 0,60) / (88 \cdot 1,5 \cdot 1,1) \approx 248$ лк, що нижче нормованих 400 лк [3; 4].

Для аудиторії як основне освітлення прийнято світлодіодні панелі 600×600 (варіант А), які зручно розміщувати регулярною сіткою у стелі та які забезпечують рівномірне освітлення горизонтальної робочої поверхні. Кількість панелей за виразом (2.3): $N = (400 \cdot 88 \cdot 1,4 \cdot 1,1) / (3600 \cdot 0,64) \approx 24$ шт. Панелі розміщують сіткою 6×4 ; перевірка за (2.4) дає $E_{\text{ф}} = (24 \cdot 3600 \cdot 0,64) / (88 \cdot 1,4 \cdot 1,1) \approx 408$ лк ≥ 400 лк. Встановлена потужність загального освітлення $24 \cdot 36 = 864$ Вт.

Для класної дошки, де нормується вертикальна освітленість 500 лк, передбачено два спеціалізовані світлодіодні світильники асиметричного світлорозподілу сумарною потужністю близько 70 Вт. План розміщення світильників аудиторії наведено на рис. 2.3.

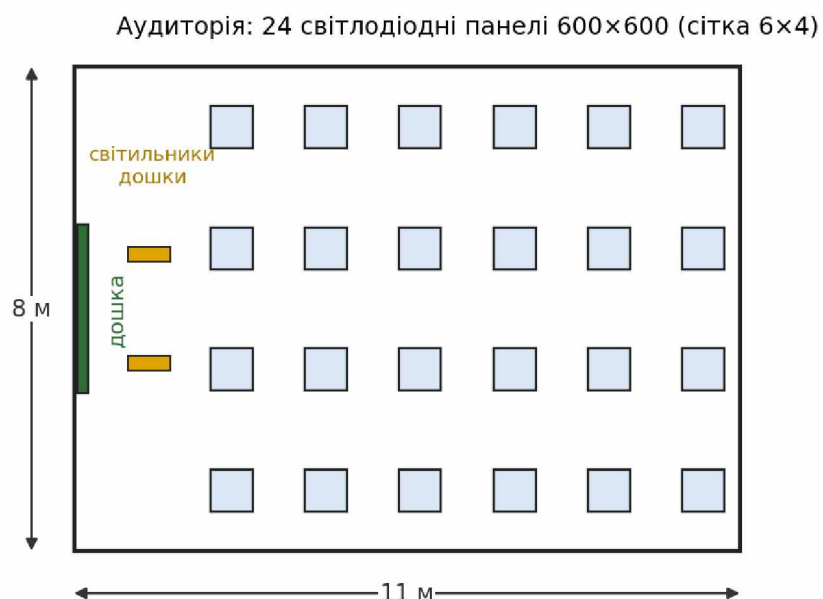


Рисунок 2.3 — План аудиторії з розміщенням світлодіодних панелей (сітка 6×4) та світильників дошки

Для порівняння люмінесцентний варіант, що забезпечує 400 лк, потребує $N = (400 \cdot 88 \cdot 1,5 \cdot 1,1) / (5000 \cdot 0,60) \approx 20$ світильників по 90 Вт (1800 Вт). Результати наведено в табл. 2.3.

2.5. Моделювання розподілу освітленості та оцінка рівномірності

Рівномірність освітлення коридору перевірено точковим методом. Горизонтальна освітленість у розрахунковій точці від світильника визначається за виразом:

$$E_r = \frac{I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h_p^2} \quad (2.5)$$

де I_α — сила світла світильника в напрямі до точки під кутом α до вертикалі, кд; α — кут між віссю світильника та напрямом на точку; h_p — розрахункова висота, м. Сумарна освітленість у точці визначається як сума внесків усіх найближчих світильників.

Розрахунок освітленості вздовж осі коридору для прийнятого розміщення лінійних світильників (крок 2,86 м, $h_p = 3,25$ м) показує, що освітленість змінюється у вузьких межах (приблизно 148–152 лк), тобто поздовжня нерівномірність незначна, а відношення $E_{\min}/E_{\text{сер}}$ становить близько 0,99. Це задовольняє нормативні вимоги до рівномірності; інтегральну нерівномірність по площі враховано коефіцієнтом $Z = 1,1$. Змодельований розподіл освітленості наведено на рис. 2.4; детальніший просторовий розрахунок з урахуванням відбиттів може виконуватися у DIALux [13].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

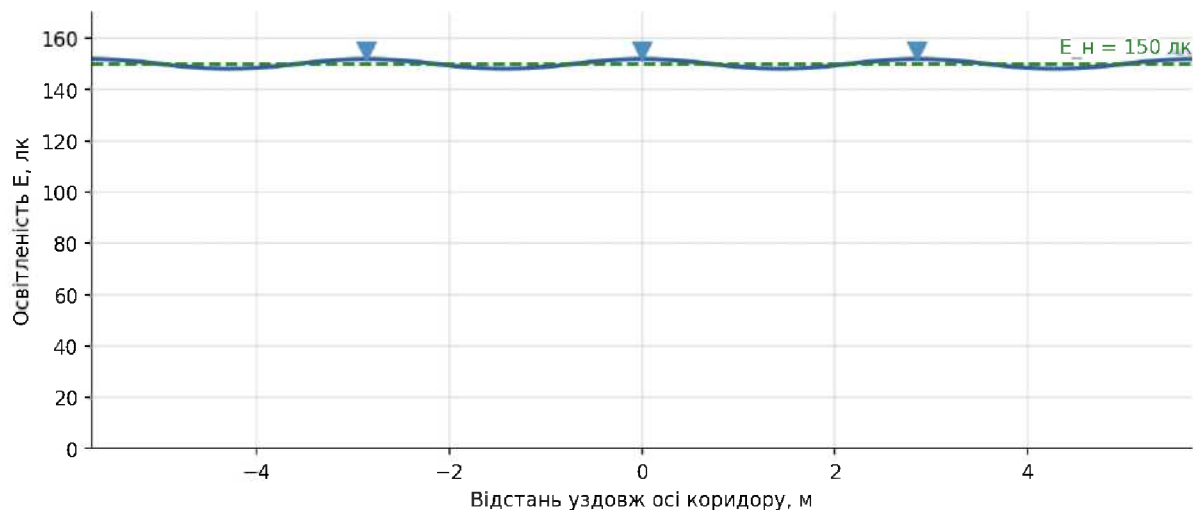


Рисунок 2.4 — Розрахунковий розподіл освітленості вздовж осі коридору (точковий метод; ▼ — положення світильників)

2.6. Порівняння варіантів і висновки до розділу 2

Зведене порівняння систем освітлення навчального корпусу (п'ять коридорів та одна аудиторія) для трьох сценаріїв — наявна люмінесцентна установка, люмінесцентна установка, доведена до норми, і запропонована світлодіодна установка — наведено в табл. 2.4 та на рис. 2.5.

Таблиця 2.4 – Зведене порівняння систем освітлення корпусу

Показник	Наявна	ЛЛ до норми	LED до норми
Кількість світильників, шт	277	535	586
Встановлена потужність, кВт	24,93	48,15	22,21
Освітленість коридор/ауд, лк	78/248	≈150/400	150/408
Коефіцієнт пульсації	високий	високий	<5 %
Зниження потужності vs ЛЛ	—	—	≈54 %

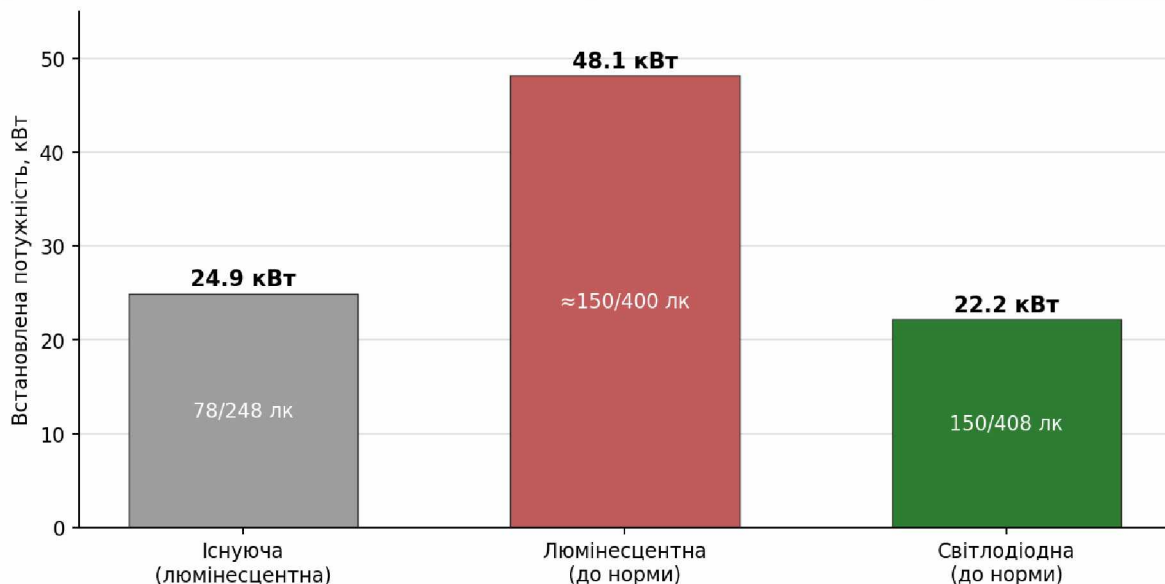


Рисунок 2.5 — Порівняння встановленої потужності освітлення корпусу за сценаріями

Аналіз результатів показує, що наявна люмінесцентна установка не забезпечує нормованої освітленості (78 лк у коридорі та 248 лк в аудиторії за норм 150 і 400 лк). Доведення люмінесцентної системи до норми потребувало б встановленої потужності близько 48,2 кВт, тоді як світлодіодна установка забезпечує нормовану (і навіть дещо вищу) освітленість за встановленої потужності лише 22,2 кВт. Це відповідає зниженню встановленої потужності приблизно на 54 % порівняно з рівноцінним люмінесцентним рішенням, а питома потужність освітлення коридору зменшується з 9,3 до 4,3 Вт/м² [3; 5].

Додатково світлодіодний варіант забезпечує коефіцієнт пульсації менш як 5 %, вищий індекс кольоропередавання та значно більший строк служби, а лінійні світильники у коридорі гарантують високу поздовжню рівномірність. Отримані значення встановленої потужності й кількості світильників є вихідними даними для оцінки річного споживання електроенергії та техніко-економічного обґрунтування, що виконується в розділі 3.

РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

3.1 Система автоматичного керування освітленням об'єкта

Запропонована світлодіодна установка доповнюється системою автоматичного керування, що узгоджує роботу освітлення з реальною потребою. Для досліджуваного об'єкта прийнято такі принципи керування: у коридорах — увімкнення та підтримання освітленості за наявності людей (датчики руху) з переходом у черговий режим зниженої яскравості за їх відсутності, а також зниження потоку поблизу вікон з урахуванням природного світла; в аудиторії — вимкнення освітлення за відсутності людей і підтримання сталої освітленості з урахуванням денного світла, із можливістю ручного вибору сценаріїв [7].

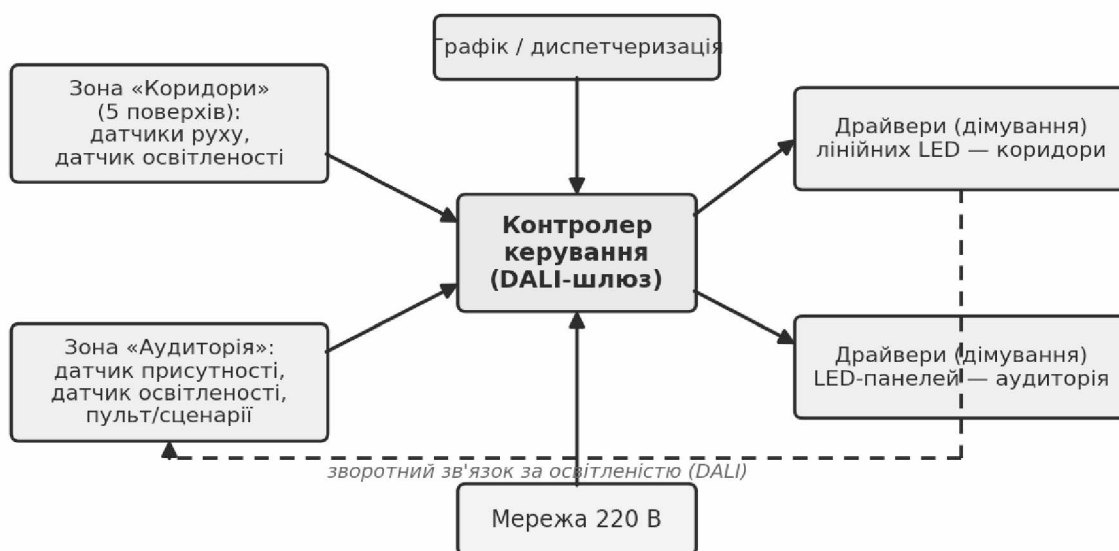


Рисунок 3.1 — Структурна схема системи автоматичного керування освітленням об'єкта

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Тарасов І.				Розділ		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив	Пересунько І								
Н. Контр.	Пересунько І						КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І								

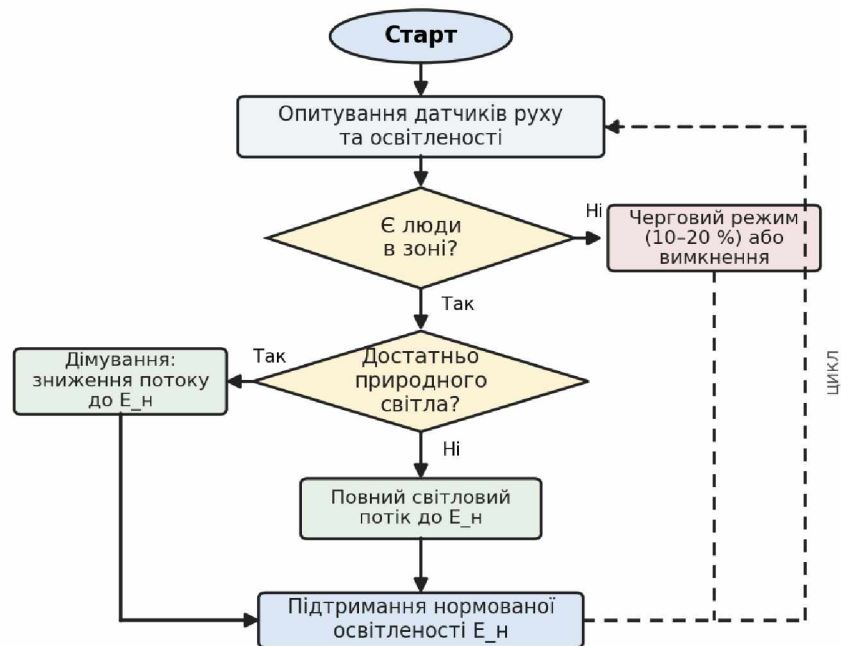


Рисунок 3.2 — Алгоритм роботи системи автоматичного керування освітленням

Керування реалізується на основі цифрового протоколу DALI, який забезпечує адресне дімування окремих світильників і груп, а також зчитування стану датчиків [9]. Для інтеграції з іншими інженерними системами будівлі може застосовуватися шина KNX [10]. Структурну схему системи керування об'єкта наведено на рис. 3.1, а алгоритм її роботи — на рис. 3.2.

Орієнтовний склад технічних засобів системи керування наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Склад системи автоматичного керування освітленням

Компонент	Призначення	К-сть, шт
Датчик руху / присутності	увімкнення за наявності людей, черговий режим	≈160
Датчик освітленості	дімування з урахуванням природного світла	≈15
Контролер / DALI-шлюз	керування групами світильників, логіка	6

DALI-драйвери світильників	дімування окремих світильників	586
Пульти / панель сценаріїв	ручний вибір режимів в аудиторії	1

3.2 Розрахунок річного споживання електроенергії

Річне споживання електроенергії системою освітлення визначається сумою добутків встановленої потужності груп світильників на тривалість їх роботи:

$$W = \sum P_i \cdot t_i \quad (3.1)$$

де P_i — потужність i -ї групи світильників, кВт; t_i — річна тривалість роботи цієї групи, год. Для систем з автоматичним керуванням споживання зменшується на коефіцієнт використання керування k_i , що враховує вимкнення/дімування за відсутності людей та використання природного світла:

$$W_{\text{кер}} = \sum P_i \cdot t_i \cdot k_i \quad (3.2)$$

Прийнято режими роботи: коридори — 3500 год/рік, аудиторія — 1500 год/рік. На підставі літературних даних автоматичне керування дає змогу знизити споживання на освітлення на 20–60 % залежно від типу приміщення [16]. Для коридорів із періодичним перебуванням людей прийнято коефіцієнт зниження 40 % ($k = 0,60$), для аудиторії — 30 % ($k = 0,70$). Результати розрахунку для трьох сценаріїв наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок річного споживання електроенергії на освітлення

Сценарій / зона	P, кВт	t, год/рік	k	W, кВт·год
Наявна — коридори	23,85	3500	1,0	83 475
Наявна — аудиторія	1,08	1500	1,0	1 620
Наявна — разом	—	—	—	85 095
LED без керування — коридори	21,28	3500	1,0	74 480
LED без керування — аудиторія	0,93	1500	1,0	1 401
LED без керування — разом	—	—	—	75 881

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

LED + керування — коридори	21,28	3500	0,60	44 688
LED + керування — аудиторія	0,93	1500	0,70	981
LED + керування — разом	—	—	—	45 669

Графічне порівняння річного споживання наведено на рис. 3.3.

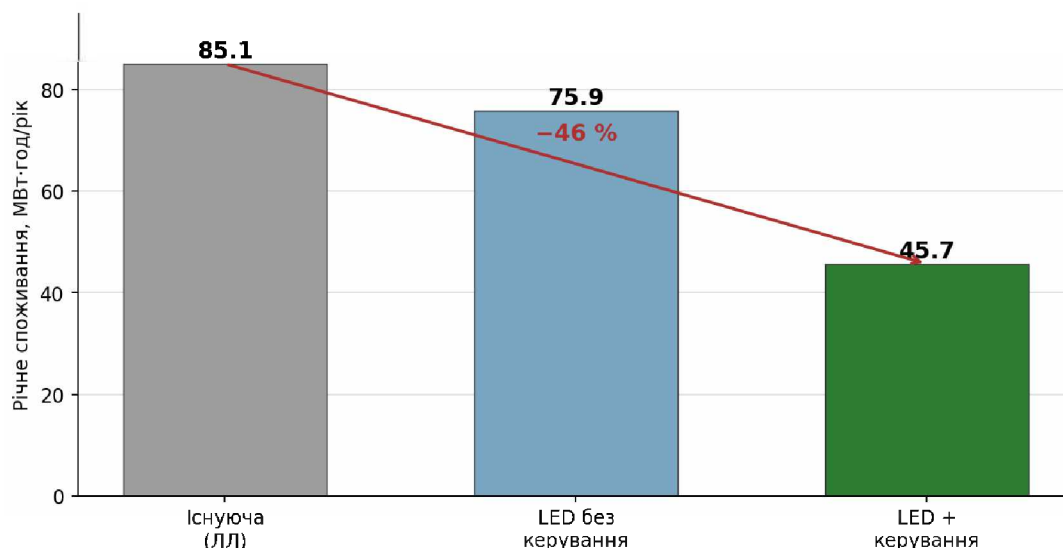


Рисунок 3.3 — Річне споживання електроенергії на освітлення за сценаріями

3.3 Оцінка енергоефективності запропонованих рішень

Абсолютна річна економія електроенергії визначається як різниця споживання базового та запропонованого варіантів:

$$\Delta W = W_{\text{баз}} - W_{\text{LED}} \quad (3.3)$$

Порівняно з наявною установкою (85 095 кВт·год/рік) запропонована світлодіодна система з автоматичним керуванням споживає 45 669 кВт·год/рік, тобто річна економія становить $\Delta W \approx 39\,426 \text{ кВт} \cdot \text{год} \approx 39,4 \text{ МВт} \cdot \text{год}$, або близько 46 %. Важливо, що ця економія досягається одночасно з підвищенням освітленості до нормованих значень; за умови рівноцінного (нормованого) люмінесцентного рішення відносна економія була б ще більшою [3].

Для оцінки енергоефективності використано також питому річну енергоемність освітлення — відношення річного споживання до площі

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

приміщень (показник, узгоджений з підходом EN 15193) [16]. За сумарної площі коридорів і аудиторії близько 5048 м² питома енергоємність знижується з $\approx 16,9$ кВт·год/(м²·рік) для наявної установки до $\approx 9,0$ кВт·год/(м²·рік) для запропонованої, тобто майже вдвічі. Поряд із цим зменшується питома встановлена потужність освітлення коридору (з 9,3 до 4,3 Вт/м²), знижується коефіцієнт пульсації (до рівня менш як 5 %) та подовжується строк служби джерел світла.

3.4 Техніко-економічне обґрунтування

Капітальні витрати на впровадження включають вартість світлодіодних світильників, засобів автоматичного керування та монтажу. Орієнтовні витрати (за ринковими цінами; уточнюються за комерційними пропозиціями постачальників) наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Орієнтовні капітальні витрати на впровадження

Стаття витрат	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн
Лінійні LED-світильники 1200 мм	560	1 200	672 000
LED-панелі 600×600	24	1 100	26 400
Світильники дошки	2	1 500	3 000
Датчики руху / освітленості	175	450	78 750
Обладнання керування (DALI)	—	—	80 000
Монтаж і пусконаладження (≈ 25 %)	—	—	215 038
Разом капітальні витрати, К	—	—	1 075 188

Структуру капітальних витрат наведено на рис. 3.5; основну частку (близько 62 %) становлять світильники коридорів.

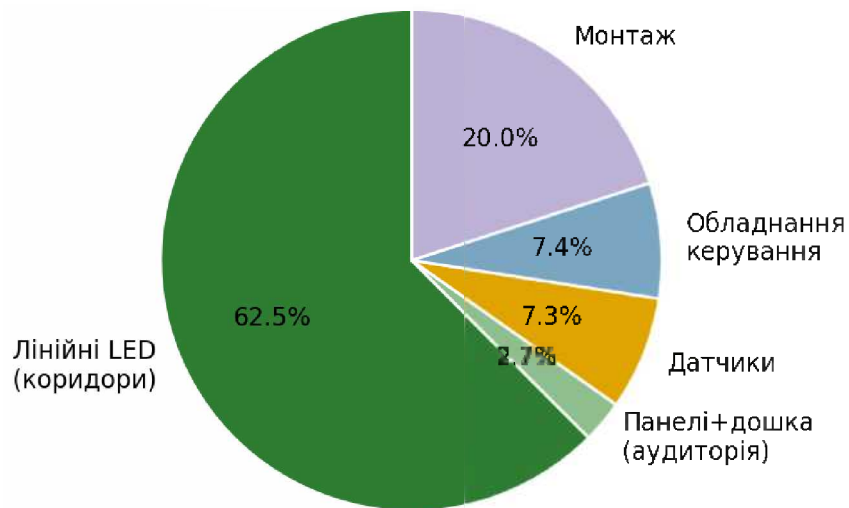


Рисунок 3.5 — Структура капітальних витрат на впровадження

Річна економія коштів від зниження споживання електроенергії визначається за виразом:

$$E_p = \Delta W \cdot \text{Ц} \quad (3.4)$$

де Ц — тариф на електроенергію (прийнято 6,0 грн/кВт·год; уточнюється за рахунком закладу). Тоді економія на електроенергії становить $E_p = 39\,426 \cdot 6,0 \approx 236,6$ тис. грн/рік. З урахуванням економії на обслуговуванні (заміна ламп, стартерів та ПРА) близько 25 тис. грн/рік сумарна річна економія становить приблизно 261,6 тис. грн.

Простий термін окупності капітальних витрат визначається за виразом:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_p} \quad (3.5)$$

Підставляючи значення, отримуємо $T_{\text{ок}} = 1\,075\,188 / 261\,600 \approx 4,1$ року, що є прийнятним для проєктів модернізації освітлення. Динаміку накопиченого грошового потоку наведено на рис. 3.4. Узагальнені показники економічної ефективності зведено в табл. 3.4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

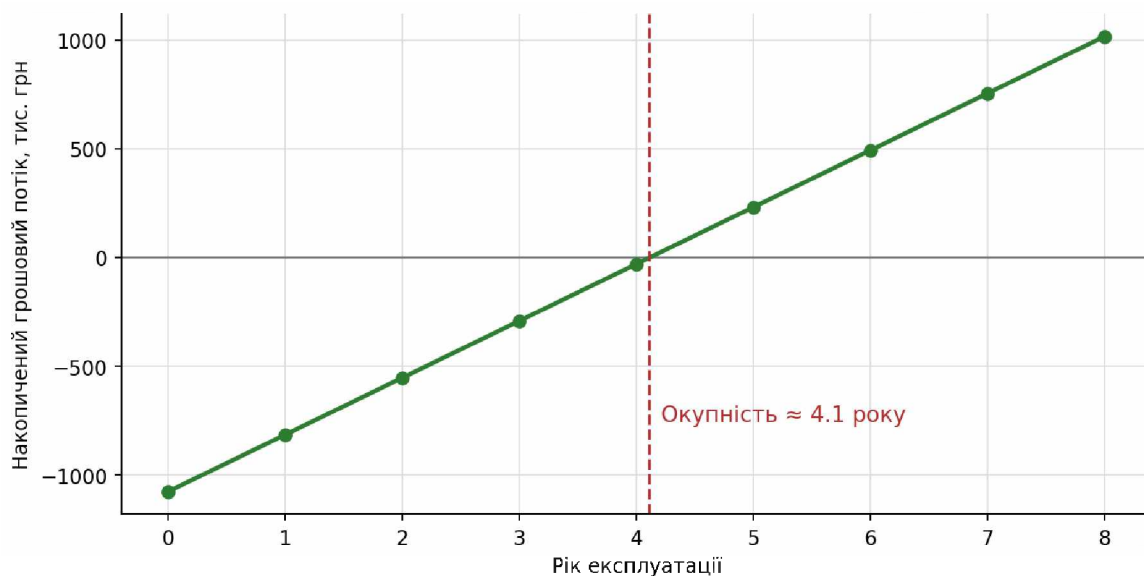


Рисунок 3.4 — Накопичений грошовий потік і термін окупності проєкту

Таблиця 3.4 – Показники економічної ефективності проєкту

Показник	Значення
Капітальні витрати К, тис. грн	≈ 1 075
Річна економія електроенергії, МВт·год	39,4 (≈46 %)
Тариф на електроенергію, грн/кВт·год	6,0
Річна економія коштів (енергія), тис. грн	236,6
Економія на обслуговуванні, тис. грн/рік	≈25
Сумарна річна економія E _р , тис. грн	≈261,6
Простий термін окупності T _{ок} , років	≈4,1

3.5 Висновки до розділу 3

Запропоновано систему автоматичного керування освітленням на основі датчиків руху й освітленості та протоколу DALI, що забезпечує увімкнення й дімування світильників відповідно до наявності людей і рівня природного світла. Розрахунок показав, що поєднання світлодіодних світильників з автоматичним керуванням знижує річне споживання електроенергії на освітлення з 85,1 до 45,7 МВт·год, тобто приблизно на 46 %, за одночасного доведення освітленості до нормованих значень [1; 16].

Питома річна енергоємність освітлення зменшується майже вдвічі (з $\approx 16,9$ до $\approx 9,0$ кВт·год/(м²·рік)). Орієнтовні капітальні витрати на впровадження становлять близько 1,08 млн грн, річна економія коштів — близько 261,6 тис. грн, а простий термін окупності — приблизно 4,1 року. Отримані результати підтверджують технічну доцільність та економічну ефективність переходу на світлодіодне освітлення з автоматичним керуванням у навчальному корпусі [1; 3].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ

4.1 Постановка задачі математичного моделювання

Для обґрунтування прийнятих рішень виконано математичне моделювання, яке охоплює три задачі: побудову та порівняння моделей розподілу освітленості наявної та запропонованої систем; моделювання деградації світлового потоку джерел протягом строку служби; прогнозування річного споживання електроенергії, економічного й екологічного ефекту на перспективу [16].

Розподіл освітленості моделюється точковим методом на сітці розрахункових точок робочої поверхні; деградація світлового потоку описується експоненційною моделлю збереження потоку (lumen maintenance); прогноз економічної ефективності виконується методом дисконтованих грошових потоків. Просторовий розрахунок може уточнюватися у спеціалізованому програмному забезпеченні DIALux [13].

4.2 Математична модель розподілу освітленості

Освітленість у кожній точці робочої поверхні визначається як сума внесків усіх світильників. У наближенні ламбертового джерела горизонтальна освітленість у точці з координатами (x, y) обчислюється за виразом:

$$E(x, y) = \sum \frac{I_0 \cdot h^2}{(h^2 + d_k^2)^2} \quad (4.1)$$

де I_0 — осьова сила світла світильника, кд; h — висота підвісу над робочою поверхнею, м; d_k — горизонтальна відстань від точки до проєкції k -го світильника, м (знаменник дорівнює $(h^2 + d_k^2)^2$). Рівномірність освітлення оцінюється коефіцієнтом:

$$U_0 = \frac{E_{\min}}{E_{\text{сеп}}} \quad (4.2)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Тарасов І.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Затвердж.	Пересунько І							

Моделювання виконано для ділянки коридору завдовжки 18 м і завширшки 3,10 м на сітці 260×70 точок. Результати моделювання для наявної люмінесцентної та запропонованої світлодіодної систем наведено в табл. 4.1, а відповідні карти розподілу освітленості — на рис. 4.1 і рис. 4.2 (шкала освітленості однакова для зіставлення).

Таблиця 4.1 – Результати моделювання розподілу освітленості коридору

Показник	Наявна (ЛЛ)	Запропонована (LED)
Середня освітленість $E_{\text{сер}}$, лк	78	150
Мінімальна освітленість E_{min} , лк	50	122
Максимальна освітленість E_{max} , лк	114	169
Коефіцієнт рівномірності U_0	0,64	0,81
Відповідність нормі 150 лк	ні	так

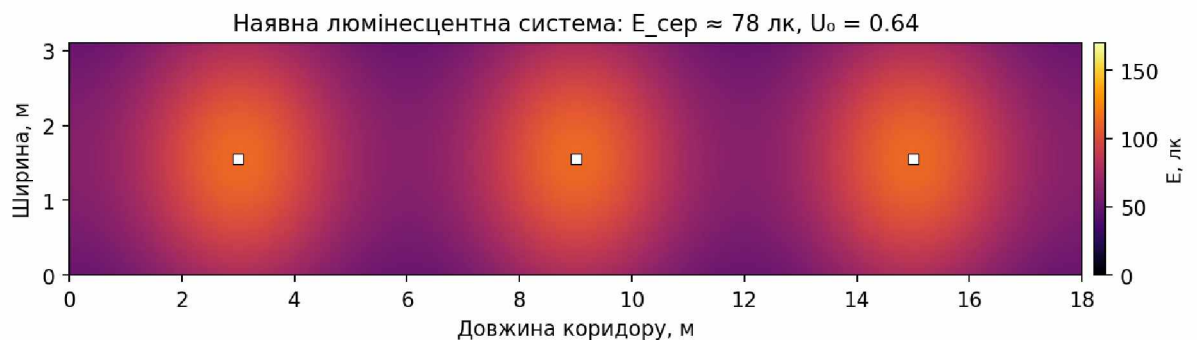


Рисунок 4.1 — Змодельований розподіл освітленості наявної люмінесцентної системи ($E_{\text{сер}} \approx 78$ лк, $U_0 = 0,64$)

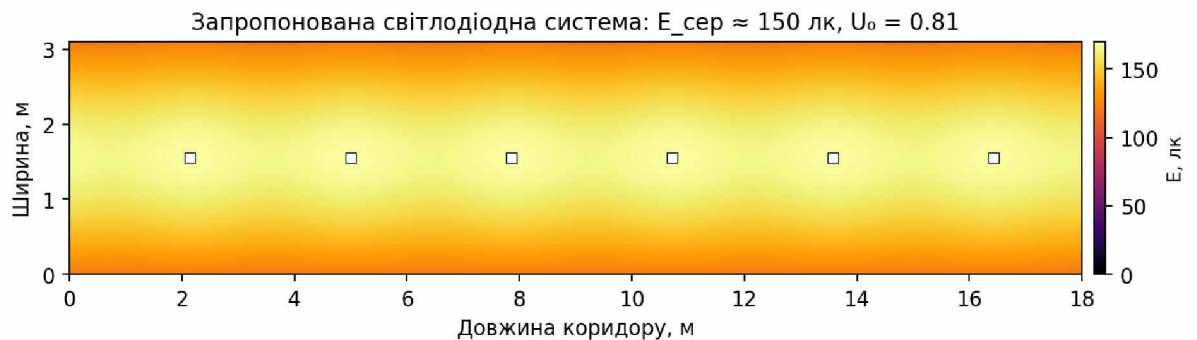


Рисунок 4.2 — Змодельований розподіл освітленості запропонованої світлодіодної системи ($E_{\text{сер}} \approx 150$ лк, $U_0 = 0,81$)

Моделювання підтверджує, що наявна установка не лише не досягає нормованої освітленості (78 лк проти 150 лк), а й має гіршу рівномірність ($U_0 = 0,64$). Запропонована світлодіодна система забезпечує нормовану освітленість за вищої рівномірності ($U_0 = 0,81$) [3; 6].

4.3 Моделювання деградації світлового потоку та строку служби

Світловий потік джерел світла з часом зменшується. Для світлодіодів збереження потоку описується експоненційною моделлю:

$$\Phi(t) = \Phi_0 \cdot L^{\frac{t}{t_L}} \quad (4.3)$$

де Φ_0 — початковий світловий потік; L — нормований рівень збереження потоку наприкінці ресурсу (для прийнятих світильників $L = 0,8$ — рівень L80); t — напрацювання, год; t_L — ресурс до досягнення рівня L (50 000 год). За режиму роботи коридорів 3500 год/рік рівень L80 досягається приблизно через 14 років.

На відміну від світлодіодів, люмінесцентні лампи деградують швидше і потребують періодичної заміни (ресурс $\approx 13\,000$ год, тобто близько 3,7 року), після кожної з яких потік відновлюється. Змодельовану динаміку збереження світлового потоку наведено на рис. 4.3, а характерні значення — у табл. 4.2 [7; 17].

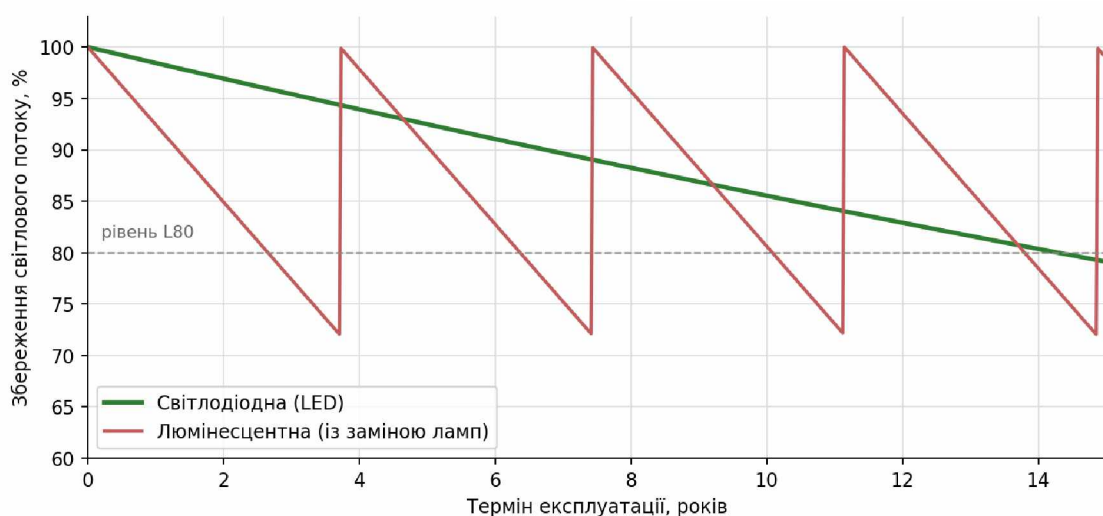


Рисунок 4.3 — Моделювання збереження світлового потоку джерел світла з часом

Таблиця 4.2 – Збереження світлового потоку за роками експлуатації

Термін, років	Світлодіодна, %	Люмінесцентна, %*
0	100	100
5	92	72
10	86	72
14	80 (L80)	72

* перед черговою заміною ламп (кожні $\approx 3,7$ року потік відновлюється до 100 %).

Моделювання підтверджує доцільність прийнятого нижчого коефіцієнта запасу для світлодіодної установки ($K_z = 1,4$ проти 1,5) та відсутність потреби в частій заміні джерел світла, що зменшує експлуатаційні витрати.

4.4 Прогнозування енергоспоживання, економічного та екологічного ефекту

На основі отриманих значень річної економії електроенергії (39,4 МВт·год) виконано прогноз на 10 років. За сталого тарифу сумарна економія електроенергії становить близько 394 МВт·год, а економія коштів — близько 2,6 млн грн. Оскільки тариф на електроенергію має тенденцію до зростання, розглянуто також сценарії його підвищення на 5 % і 10 % щороку; накопичену економію за цими сценаріями наведено на рис. 4.4.

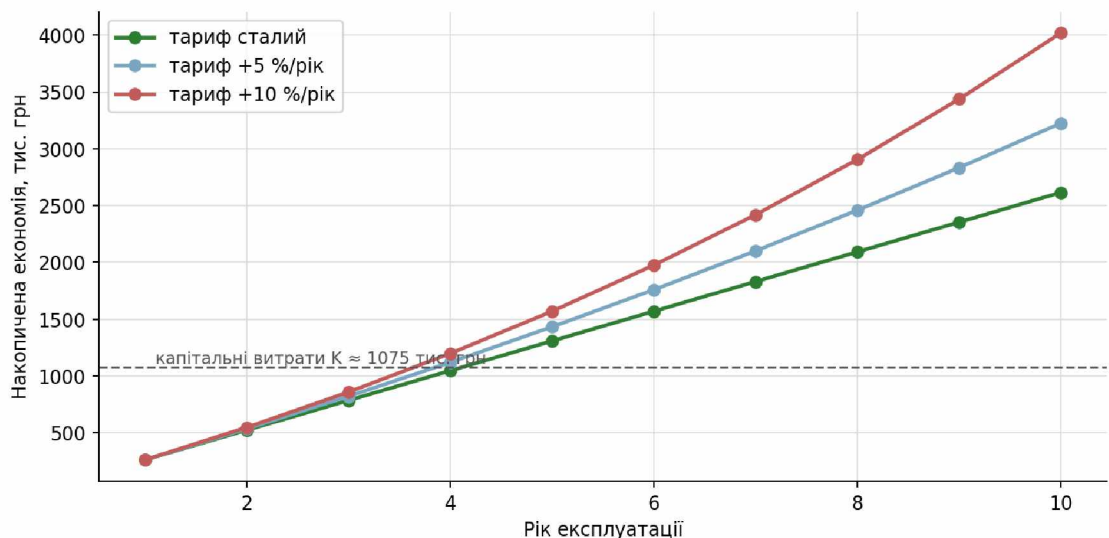


Рисунок 4.4 — Прогноз накопиченої економії коштів за сценаріями зміни тарифу

Екологічний ефект оцінено через зниження викидів вуглекислого газу. За усередненого коефіцієнта емісії для енергосистеми (приблизно 0,43 кг CO₂/кВт·год) річне зниження викидів становить $\Delta M = \Delta W \cdot e_{\text{ф}} \approx 17 \text{ т CO}_2$, або близько 170 т за 10 років [16].

Для врахування вартості грошей у часі економічний ефект оцінено методом чистої приведеної вартості (NPV):

$$NPV = \sum \frac{E_p}{(1+r)^y} - K \quad (4.4)$$

де E_p — річна економія коштів; r — ставка дисконтування; K — капітальні витрати; y — рік. За ставки $r = 10\%$ і періоду 10 років чиста приведена вартість становить $NPV \approx +532$ тис. грн (додатне значення підтверджує економічну доцільність), а дисконтований термін окупності — близько 5,6 року. Порівняння сукупної вартості володіння (ТСО) наявної та запропонованої систем наведено на рис. 4.5: криві перетинаються приблизно на 4,1 році, після чого світлодіодна система стає вигіднішою, а за 10 років сукупні витрати на неї приблизно на 1,5 млн грн менші.

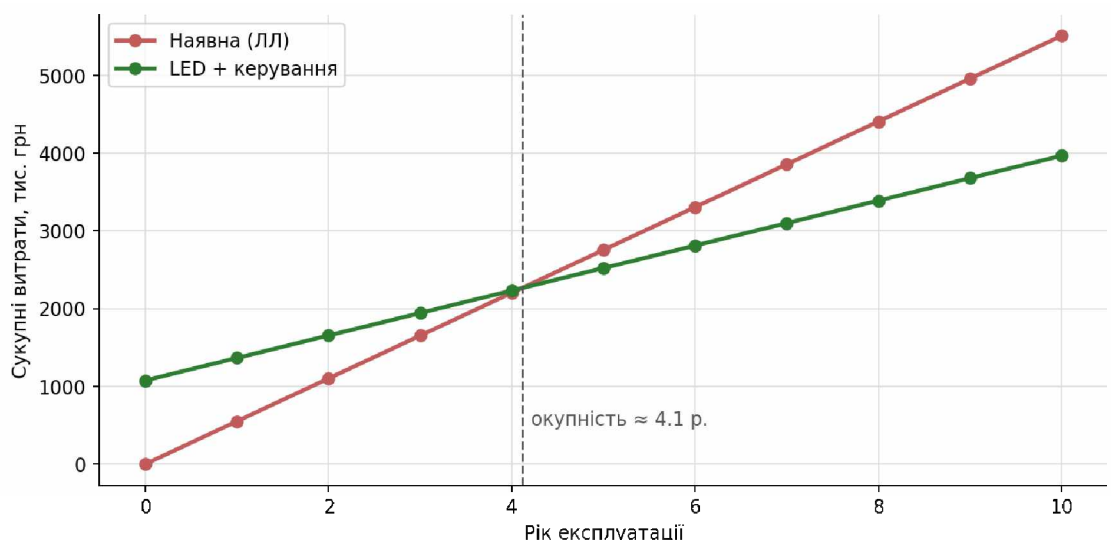


Рисунок 4.5 — Прогноз сукупної вартості володіння (ТСО) системами освітлення

Таблиця 4.3 – Прогнозні показники на 10 років

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Показник	Значення
Сумарна економія електроенергії, МВт·год	≈ 394
Сумарна економія коштів (сталій тариф), тис. грн	$\approx 2\,616$
Зниження викидів CO ₂ , т/рік (за 10 років)	$\approx 17 (\approx 170)$
Чиста приведена вартість NPV ($r = 10\%$), тис. грн	$\approx +532$
Дисконтований термін окупності, років	$\approx 5,6$

4.5 Висновки до розділу 4

Математичне моделювання розподілу освітленості підтвердило, що наявна люмінесцентна система не відповідає нормам ні за рівнем (78 лк проти 150 лк), ні за рівномірністю ($U_0 = 0,64$), тоді як запропонована світлодіодна система забезпечує нормовану освітленість за вищої рівномірності ($U_0 = 0,81$). Моделювання деградації світлового потоку показало перевагу світлодіодів за стабільністю характеристик і відсутністю потреби в частій заміні джерел [3; 7].

Прогноз на 10 років підтвердив суттєвий і стійкий ефект: сумарна економія електроенергії близько 394 МВт·год, економія коштів близько 2,6 млн грн (за сталого тарифу — більше за умови його зростання), зниження викидів CO₂ приблизно на 170 т, додатна чиста приведена вартість ($\approx +532$ тис. грн) та дисконтований термін окупності близько 5,6 року. Отримані результати моделювання підтверджують технічну та економічну обґрунтованість запропонованих рішень [1; 16].

\

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РІШЕННЯ: ЕЛЕКТРИЧНІ СХЕМИ ТА ПРОГРАМОВАНА ЛОГІКА КЕРУВАННЯ

5.1 Структура технічного рішення модернізації

Технологічне рішення модернізації охоплює силову частину (живлення та розподіл електроенергії до груп світильників) і частину керування (контролер, шина DALI, датчики). Електроживлення подається від мережі 380/220 В через ввідно-розподільний пристрій (ВРП) з обліком, ввідним автоматом і пристроєм захисного вимкнення (ПЗВ) до поверхових групових щитків, від яких живляться групи світлодіодних світильників коридорів і аудиторії. Паралельно контролер із блоком живлення керує світильниками по шині DALI, отримуючи сигнали від датчиків руху й освітленості [3; 9]. Узагальнену структуру рішення наведено на рис. 5.1.

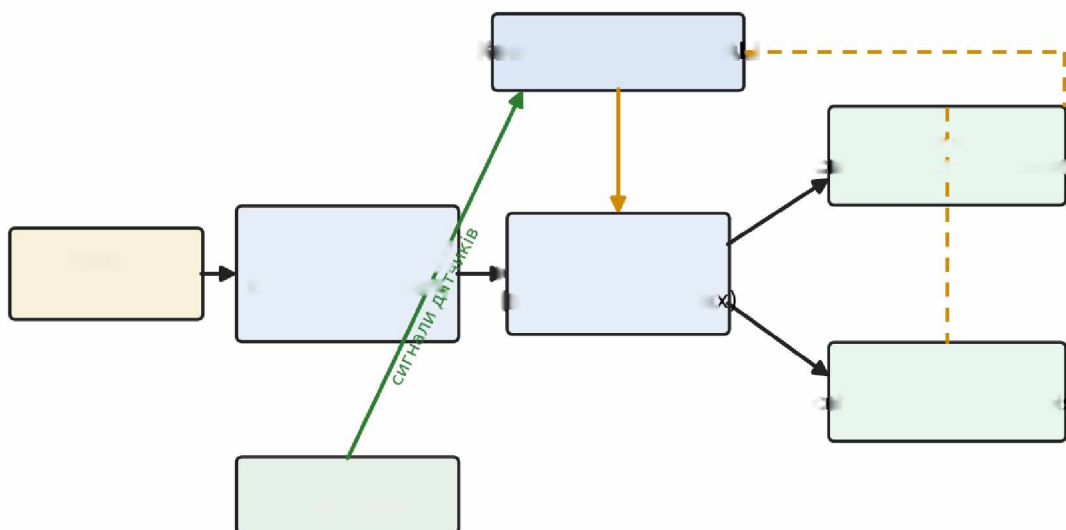


Рисунок 5.1 — Структурна схема технічного рішення модернізації освітлення

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Тарасов І.				КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск		
Перевірів	Пєресунько І						
Н. Контр.	Пєресунько І						
Затвердж.	Пєресунько І						

5.2 Електрична схема живлення та розподілу

Живлення системи освітлення виконано за трифазною схемою з рівномірним розподілом груп по фазах. Однолінійну схему наведено на рис. 5.2: після лічильника встановлено ввідний автоматичний вимикач QF0 (3P, C40) і ПЗВ (40 А, 300 мА), від спільних шин відходять групові лінії з автоматами QF1...QF7 [18].

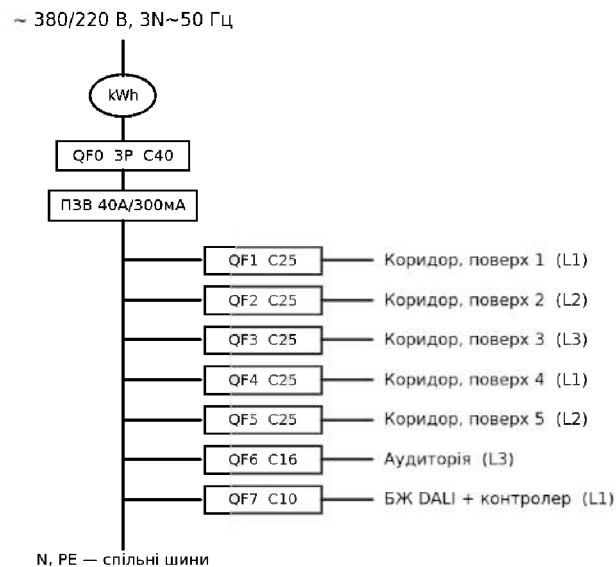


Рисунок 5.2 — Однолінійна електрична схема живлення системи освітлення

Розрахунковий струм групи визначається за виразом:

$$I_p = \frac{P_{гр}}{U \cdot \cos \varphi} \quad (5.1)$$

де $P_{гр}$ — потужність групи, Вт; U — напруга, В; $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності (для світлодіодних драйверів $\approx 0,92$). Для групи коридору одного поверху ($P_{гр} = 4256$ Вт) струм становить $I_p = 4256 / (230 \cdot 0,92) \approx 20,1$ А. Апарат захисту й переріз кабелю обираються за умовою:

$$I_p \leq I_{ном} \leq I_{доп} \quad (5.2)$$

де $I_{ном}$ — номінальний струм автомата; $I_{доп}$ — тривало допустимий струм кабелю. Для прийнято автомат C25 і кабель перерізом 6 мм^2 ($20,1 \leq 25 \leq 46$). Апарати захисту й комутації наведено в табл. 5.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.1 – Апарати захисту та комутації

Позначення	Тип / номінал	Призначення
QF0	автомат 3P, C40	ввідний вимикач
ПЗВ	40 А, 300 мА, тип АС	захист від витоку (протипожежний)
QF1–QF5	автомат 1P, C25	групи освітлення коридорів (по поверхах)
QF6	автомат 1P, C16	освітлення аудиторії
QF7	автомат 1P, C10	живлення контролера та БЖ DALI

Оскільки коридор має значну довжину, важливо обмежити втрату напруги, яка для лінії визначається за виразом:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot I_p \cdot L \cdot \rho}{S \cdot U} \cdot 100, \% \quad (5.3)$$

де L — довжина лінії, м; ρ — питомий опір міді (0,0175 Ом·мм²/м); S — переріз жили, мм². Щоб утримати ΔU у межах 5 %, освітлення коридору живлять від поверхового щитка, розташованого приблизно посередині коридору, двома лініями (по ≈ 80 м у кожен бік) кабелем перерізом 6 мм²: $\Delta U = (2 \cdot 20,1 \cdot 80 \cdot 0,0175) / (6 \cdot 230) \cdot 100 \approx 4,1 \% < 5 \%$. Прийняту кабельну продукцію наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Кабельна продукція

Ділянка	Кабель / переріз	I _{доп} , А (орієнт.)
Ввідна лінія	ВВГ 5×10	≈ 57
Групи коридорів (поверх)	ВВГ 3×6	≈ 46
Група аудиторії	ВВГ 3×2,5	≈ 27
Коло керування / БЖ	ВВГ 3×1,5	≈ 21
Шина DALI	кабель 2×1,5	—

5.3 Схема підключення світильників та системи керування

Світлодіодні світильники з вбудованими DALI-драйверами підключаються до силової лінії (L, N, PE) групового щитка та до двопровідної шини керування DALI. Шина DALI підключається до клем драйверів паралельно (полярність вільна), що спрощує монтаж; до однієї лінії DALI можна під'єднати до 64 адрес. Контролер із блоком живлення формує сигнал керування за даними датчиків. Схему підключення наведено на рис. 5.3 [9; 15].

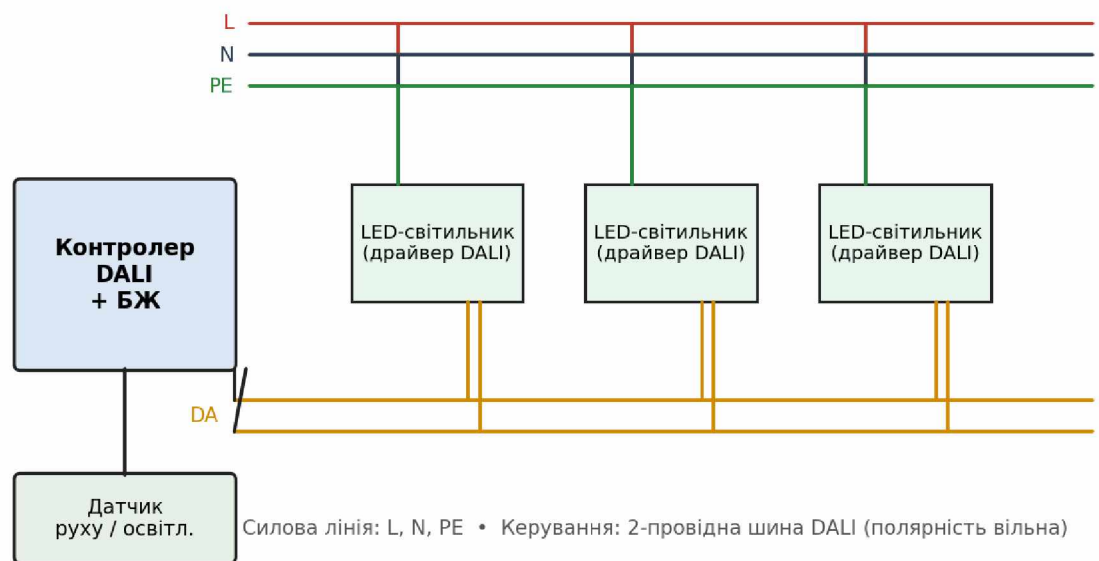


Рисунок 5.3 — Схема підключення світлодіодних світильників і шини DALI

За потреби інтеграції з іншими інженерними системами будівлі застосовують шлюз DALI–KNX [10]. Перелік входів і виходів контролера наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Перелік входів і виходів контролера

Позначення	Тип	Призначення
DI1 (Presence)	дискретний вхід	датчик руху / присутності
AI1 (E_прир)	аналоговий вхід	датчик освітленості (природне світло)
DI2 (Графік)	дискретний вхід	сигнал розкладу / диспетчеризації
DI3 (Ручний)	дискретний вхід	пульт / ручний режим (аудиторія)

DALI-1	вихід DALI	група світильників коридору
DALI-2	вихід DALI	група світильників аудиторії

5.4 Програмована логіка керування

Логіку керування реалізовано засобами програмованого контролера мовами стандарту IEC 61131-3 — функціональних блоків (FBD) та релейно-контактних (драбинних) схем (LD) [19]. Функціональну блок-схему наведено на рис. 5.4: сигнал присутності проходить через таймер затримки вимкнення (TON), компаратор (LT) порівнює природну освітленість із заданою, блок логіки режиму визначає стан, а PI-регулятор підтримує сталу освітленість дімуванням; результат (рівень 0–100 %) подається на вихід DALI.

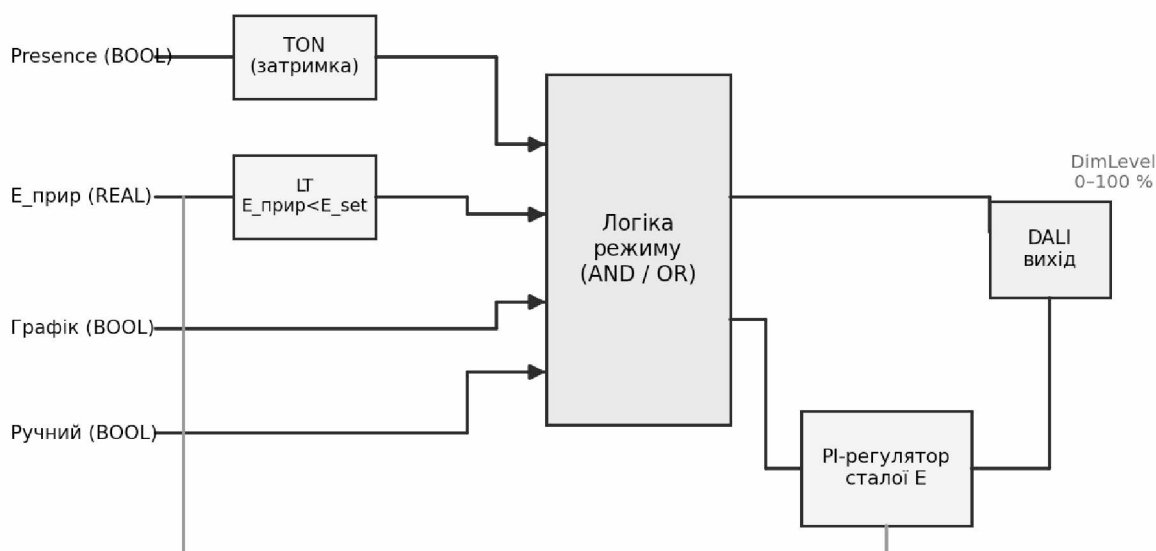


Рисунок 5.4 — Функціональна блок-схема (FBD) логіки керування освітленням

Ту саму логіку подано релейно-контактною (драбинною) схемою на рис. 5.5, де контакти відповідають вхідним сигналам, а котушки — вихідним станам (повний потік, дімування, черговий режим).

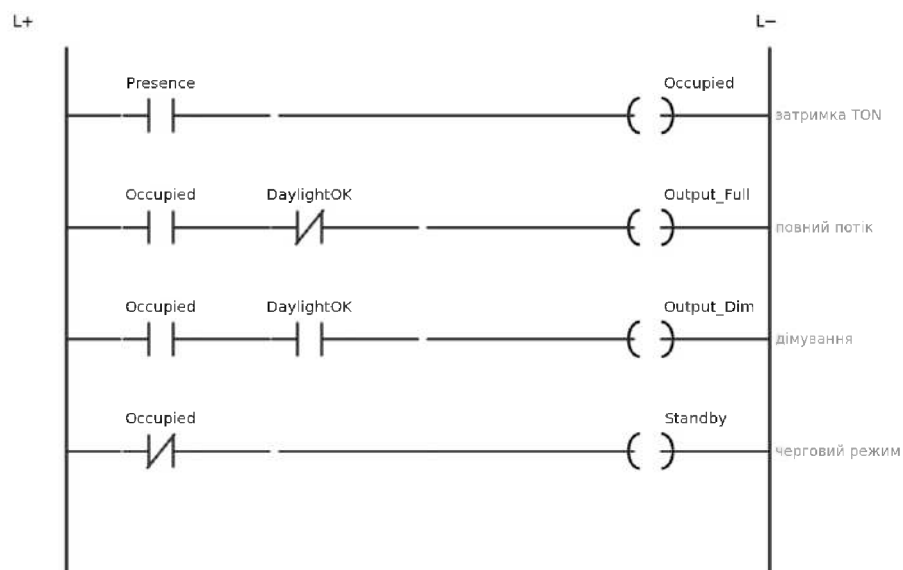


Рисунок 5.5 — Релейно-контактна (драбинна) схема (LD) реалізації логіки керування

Узагальнено логіку керування описує таблиця істинності (табл. 5.4): стан освітлення визначається наявністю людей у зоні та рівнем природного світла [9].

Таблиця 5.4 – Таблиця істинності логіки керування

Наявність людей	Достатнє природне світло	Режим / світловий потік
немає	—	черговий режим (10–20 %) або вимкнено
є	ні	повний потік (підтримання E _н)
є	так	дімування (зниження потоку до E _н)

5.5 Висновки до розділу 5

Розроблено технологічне рішення модернізації освітлення на рівні монтажних і програмних схем. Запропоновано трифазну схему живлення з обліком, ввідним автоматом, ПЗВ і груповими автоматами; виконано вибір апаратів захисту (QF0 3P C40, групові C25/C16/C10) та кабельної продукції за розрахунковим струмом і допустимою втратою напруги, з урахуванням значної

довжини коридору (живлення від щитка посередині, переріз 6 мм², $\Delta U \approx 4,1 \%$) [18].

Систему керування реалізовано на основі шини DALI з підключенням драйверів світильників і датчиків до контролера. Логіку керування описано засобами ІЕС 61131-3 у вигляді функціональної блок-схеми (FBD) та драбинної схеми (LD), а також таблиці істинності. Розроблені схеми придатні для безпосереднього використання під час робочого проєктування та монтажу системи [9; 19].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20> (дата звернення: 16.06.2026).
2. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency. Official Journal of the European Union. 2012. L 315. P. 1–56.
3. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.
4. ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти. Київ : Мінрегіон України, 2018. 57 с.
5. EN 12464-1:2021. Light and lighting — Lighting of work places — Part 1: Indoor work places. Brussels : CEN, 2021. 70 p.
6. Андрійчук В. А. Світлотехніка : підручник. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2014. 357 с.
7. Назаренко Л. А., Колесник А. І. Фізика і техніка світлодіодів : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. ISBN 978-966-695-560-2.
8. TL-D 36W/54-765 1SL/25 : технічний опис виробу / Signify (Philips). URL: <https://www.signify.com/global/prof/conventional-lamps-and-tubes/fluorescent-lamps-and-starters/tl-d> (дата звернення: 16.06.2026).
9. IEC 62386. Digital addressable lighting interface (DALI) : international standard. Geneva : IEC, 2018.
10. ISO/IEC 14543-3. Information technology — Home electronic systems (HES) architecture (KNX). Geneva : ISO/IEC, 2006.
11. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.251с-17		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Тарасов І.			Список використаних джерел	Літ.	Арк.
Перевірів		Пересунько І.					Акрушів
Н. Контр.		Пересунько І.				47	2
Затвердж.		Пересунько І.				КНУ гр. ЗЕЕМ-23ск	

12. Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи : матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конф. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2018. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/23462> (дата звернення: 16.06.2026).
13. DIALux evo : програмне забезпечення для проєктування освітлення / DIAL GmbH. Lüdenschaid, 2024. URL: <https://www.dialux.com/> (дата звернення: 16.06.2026).
14. CoreLine Panel RC132V LED36S/840 : технічний опис виробу / Signify (Philips). 2023. URL: <https://www.signify.com/> (дата звернення: 16.06.2026).
15. CoreLine Batten BN124C LED41S/840 : технічний опис виробу / Signify (Philips). URL: <https://www.signify.com/> (дата звернення: 16.06.2026).
16. EN 15193-1:2017. Energy performance of buildings — Energy requirements for lighting — Part 1: Specifications. Brussels : CEN, 2017. 92 p.
17. IEC 62717:2014. LED modules for general lighting — Performance requirements. Geneva : IEC, 2014.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.25.248с-10	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47