

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Вадим КОВАЛЬ
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електроенергетика
(шифр і назва спеціальності)
студенту Кизимі Максиму Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз шляхів забезпечення оптимального світлового середовища у спеціалізованих закладах освіти

Керівник роботи Костик Любов Миколаївна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року №4/7-966.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Тип об'єкта для освітлення – різні приміщення спеціалізованої школи із змінними даними природного освітлення, зайнятості, типом зорових робіт.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)
Аналіз особливостей вимог до освітлювальних установок спеціалізованих закладів освіти.
Методи керування світловим потоком освітлювальних установок. Схеми керування освітлювальними установками спеціалізованої школи. Моделювання освітлювальних установок для різних приміщень з врахуванням інтелектуальної системи керування освітленням

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Вимоги до параметрів світлового середовища приміщень різного призначення.
Блок-схеми систем інтелектуального керування освітленням.
Розроблена схема керування освітлювальними установками школи.
Результати моделювання освітлювальних установок для різних приміщень з врахуванням інтелектуальної системи керування освітленням.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та БНС	Гурик О.Я., к.т.н., доц.		
	Теслюк В.М., проректор з АГРБ		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., доц., зав.каф.ЕІ		

7. Дата видачі завдання 12.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Кизима М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Костик Л.М.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм–61. - Т.: ТНТУ, 2024. Стор. 66; рис. 21; табл. 4; використаних джерел 10; додатків 0.

Мета роботи — аналіз шляхів оптимізації параметрів світлового середовища спеціального закладу освіти з цілодобовим перебуванням дітей та розробка комплексної енергоефективної системи електроосвітлення, що базується на впровадженні сучасних LED-технологій та інтелектуального керування за протоколом DALI, для створення адаптивного світлового середовища, яке сприяє покращенню зорового комфорту, підтримці циркадних ритмів вихованців та забезпечує умови для ефективної корекційно-розвиткової роботи.

Ключові слова: ЕЛЕКТРООСВІТЛЕННЯ, СПЕЦІАЛЬНИЙ ЗАКЛАД ОСВІТИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, LED-ТЕХНОЛОГІЇ, КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ, ЦИРКАДНІ РИТМИ, СВІТЛОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	9
1.1 Особливості спеціальних закладів освіти	9
1.2 Вимоги до освітлення спеціальних закладів освіти повного дня	13
1.3 Висновки до розділу 1	15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	16
2.1 Методи керування світловим потоком освітлювальних установок	16
2.1.1 Фазове димінгування	17
2.1.2 Димінгування 0/1-10 вольт	20
2.1.3 ШІМ димінгування	22
2.1.4 Димінгування за протоколом DALI	24
2.1.5 Димінгування за протоколом DMX512	27
2.1.6 Порівняння методів димінгування	29
2.1.7 Керування колірною температурою світильників	31
2.2 Висновки до розділу 2	32
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	34
3.1 Класифікація приміщень школи та вимоги до світлового середовища	34
3.2. Вибір світлотехнічного обладнання та схеми керування	39
3.3. Моделювання адаптивного світлового середовища ігрової кімнати	41
3.3.1 Характеристика ігрової кімнати	41
3.3.2 Характеристика світильника	42
3.3.3 Опис мультисенсора	44
3.3.4 Результати комп'ютерного моделювання та аналіз динамічних світлових сценаріїв	45
3.3.5 Визначення енергоефективності впроваджених заходів у ігровій кімнаті	49
3.4. Моделювання адаптивної системи освітлення спальної кімнати	51
3.4.1 Характеристика спальної кімнати та світлотехнічного обладнання	51

3.4.2 Створення та розрахунок динамічних сценаріїв освітлення спальної кімнати	51
3.5 Моделювання сценарію освітлення з різною колірною температурою у кімнаті відпочинку	55
3.6 Висновки до розділу 3	57
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	58
4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів і заходи з електробезпеки при експлуатації освітлювальних установок	58
4.2 Організація цивільного захисту та безпека в умовах надзвичайних ситуацій	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	63
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА	65

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна стратегія розвитку інклюзивної освіти в Україні вимагає створення безбар'єрного та адаптивного середовища для дітей з особливими освітніми потребами. Одним із ключових чинників, що впливає на ефективність навчання, реабілітації та психоемоційний стан вихованців спеціальних шкіл, є світлове середовище. Світло в таких закладах перестає бути просто утилітарним інструментом і перетворюється на засіб корекційної педагогіки.

На відміну від загальноосвітніх шкіл, Голенищівська спеціальна школа функціонує як заклад з цілодобовим перебуванням дітей, що поєднує в собі класи для навчання, кабінети індивідуальної корекції та житлові блоки (спальні). Це зумовлює необхідність проектування систем освітлення, які не лише відповідають жорстким санітарним нормам, а й підтримують природні біоритми дитини (циркадні ритми), забезпечують візуальний комфорт при підвищеній світлочутливості та сприяють концентрації уваги. Використання застарілих рішень призводить до швидкої зорової втоми та надмірного енергоспоживання. Тому впровадження інтелектуальних систем керування на базі LED-технологій та протоколу DALI є актуальним науково-технічним завданням, що дозволяє поєднати комфортне середовище з принципами сталого енергозбереження.

Об'єкт дослідження – процеси функціонування та проектування системи внутрішнього електроосвітлення спеціального закладу освіти з цілодобовим перебуванням дітей (на прикладі Голенищівської спеціальної школи Хмельницької обласної ради).

Предмет дослідження – технічні засоби, методи розрахунку та автоматизовані сценарії керування освітленням, що забезпечують

енергоефективність та оптимальні психофізіологічні показники світлового середовища.

Мета роботи – підвищення якості освітлювального середовища та енергоефективності спеціальної школи шляхом розробки комплексної системи штучного освітлення з адаптивним інтелектуальним керуванням.

Завдання дослідження:

1. Дослідити специфіку організації навчального та побутового простору в спеціальних закладах освіти для виявлення зон з особливими вимогами до світла.

2. Проаналізувати вплив параметрів освітлення на зорову працездатність та психоемоційний стан дітей з особливими потребами.

3. Обґрунтувати вибір сучасного світлотехнічного обладнання та порівняти ефективність різних протоколів керування світлом (димування, датчики присутності, сценарії).

4. Виконати світлотехнічне моделювання та розрахунки в спеціалізованому програмному комплексі DIALux evo для верифікації проектних рішень.

5. Розробити унікальні сценарії освітлення для різних функціональних зон.

6. Розрахувати техніко-економічні показники проекту та потенціал енергозбереження при впровадженні автоматизації.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використано: аналітичний метод (вивчення нормативної бази та літератури), метод математичного моделювання (світлотехнічні розрахунки в DIALux evo), методи порівняльного аналізу та прогнозування енергоспоживання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у:

- удосконаленні концепції «світлової ізоляції» для кабінетів індивідуальної корекції, що дозволяє мінімізувати вплив відволікаючих факторів через акцентування світлових потоків;

- обґрунтуванні алгоритмів динамічної зміни колірної температури в житлових блоках інтернатного типу для підтримки природних механізмів сну та неспання;
- застосуванні комплексного підходу до інтеграції систем безпеки та комфорту в єдину структуру керування освітленням спеціального закладу.

Практичне значення. Розроблені світлотехнічні моделі та алгоритми керування можуть бути використані як типові рішення при реконструкції та будівництві інклюзивних центрів, реабілітаційних установ та інтернатів. Впровадження запропонованої системи дозволяє знизити витрати на електроенергію на 30–40% при одночасному покращенні умов для навчання та відпочинку вихованців.

Апробація результатів роботи. Отримані результати дослідження представлені на Міжнародна науково-технічна конференція „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2025) [9].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Особливості спеціальних закладів освіти

Спеціальні заклади освіти функціонують як навчальні заклади, діяльність яких спрямована на забезпечення комплексної підтримки дітей з особливими освітніми потребами. Дана робота виконувалась на прикладі Голенищівська спеціальна школа Хмельницької обласної ради. Специфіка даної школи полягає у поєднанні кількох функціональних складових: освітньої, корекційно-розвиткової та соціально-побутової. Такий мультифункціональний підхід формує складну структуру енергоспоживання та висуває унікальні вимоги до інженерних мереж, зокрема до системи електроосвітлення. На відміну від типових загальноосвітніх шкіл, де освітлювальні установки працюють переважно у першу зміну, даний заклад функціонує в цілодобовому режимі, що кардинально змінює підхід до розрахунку надійності електропостачання та вибору світлотехнічного обладнання.

Освітня складова діяльності закладу передбачає організацію навчального процесу відповідно до державних стандартів, проте з суттєвою адаптацією під психофізіологічні можливості учнів. З технічної точки зору, це означає необхідність створення світлового середовища, яке б мінімізувало зорову втому при тривалих навантаженнях. Оскільки учні можуть мати вади зору або підвищену чутливість до подразників, стандартні норми освітленості тут є лише базовим мінімумом. Критично важливими параметрами стають якісні показники світла: відсутність стробоскопічного ефекту, рівномірність розподілу яскравості в полі зору та правильна передача кольору, що безпосередньо впливає на ефективність сприйняття навчального матеріалу.

Невід'ємною частиною роботи закладу є корекційно-розвиткова складова. Вона реалізується через систему спеціально організованих занять з дефектологами,

логопедами та психологами. У цьому контексті світлове середовище перестає бути просто фактором видимості, а стає інструментом терапевтичного впливу. Для забезпечення ефективної корекційної роботи необхідне створення адаптивних умов, де параметри освітлення можуть змінюватися залежно від типу заняття та емоційного стану дитини. Наприклад, для роботи над концентрацією уваги потрібен вищий рівень освітленості з нейтральною колірною температурою, тоді як для зняття сенсорного перенавантаження необхідне м'яке, дифузне світло.

Соціально-побутова складова зумовлена режимом інтернату. Оскільки учні перебувають у закладі цілодобово, школа стає для них тимчасовим домом. Це накладає на систему освітлення завдання імітації природного добового циклу. Штучне світло у вечірній час не повинно блокувати вироблення мелатоніну, тому спектральний склад випромінювання джерел світла у житлових зонах має бути зміщений у теплу область спектра. Організація побутового супроводу, харчування та дозвілля вимагає надійного функціонування освітлювальних установок у вечірні та нічні години, що суттєво збільшує річний фонд часу використання встановленої потужності.

Матеріально-технічна база Голенищівської спеціальної школи сформована з урахуванням вищезазначеного комплексного характеру діяльності. Аналіз архітектурно-планувальних рішень показує наявність широкого спектра приміщень, кожне з яких має відмінні вимоги до світлотехнічних параметрів. Розглянемо детальніше специфіку основних груп приміщень, що визначає вибір проектних рішень.

Значну частину площі займають стандартні навчальні класи та кабінети. У цих приміщеннях відбуваються основні академічні активності: читання, письмо, робота з дидактичними матеріалами. Головною вимогою тут є забезпечення нормованого рівня освітленості на робочих поверхнях. Однак, враховуючи особливості контингенту, необхідно забезпечити підвищений зоровий комфорт, зокрема знизити показник дискомфорту. Також важливим є правильне поєднання природного та штучного освітлення, що вимагає аналізу орієнтації вікон та можливого застосування систем автоматичного регулювання світлового потоку.

Особливу групу приміщень становлять кабінети для корекційно-педагогічних занять, де проводяться індивідуальні сесії з логопедами, дефектологами та психологами. Специфіка роботи вимагає високої точності візуального контролю, особливо при роботі над артикуляцією та мімікою. Освітлення дзеркал та робочих зон має бути організоване таким чином, щоб унеможливити утворення тіней та спотворень візуального сприйняття. Загальна атмосфера в таких кабінетах має сприяти зниженню стресу та підтримці психологічного комфорту.

Ігрові кімнати є важливим елементом інфраструктури, призначеним для соціалізації та психологічного розвантаження учнів. Тут вимоги до середовища зміщуються в бік безпеки та варіативності використання простору. Оскільки активність дітей може бути високою, усе обладнання повинно мати надійне кріплення та бути стійким до зовнішніх впливів. З точки зору організації простору, тут доцільно використовувати гнучке зонування, яке дозволяє виділяти як яскравіші зони для активних ігор, так і приглушені куточки для тихого відпочинку.

Оскільки школа забезпечує цілодобове перебування, спальні приміщення та житлові блоки набувають критичного значення. У цих зонах створюється середовище, яке сприяє релаксації та біологічній підготовці до сну. Загальне освітлення тут проектується з меншою інтенсивністю, ніж у навчальних класах, і має підтримувати природні циркадні ритми учнів.

Окремі вимоги висуваються до приміщень харчоблоку та їдальні. Харчоблок — це виробниче приміщення, що характеризується підвищеною вологістю та температурою. У цій зоні освітлення безпосередньо впливає на безпеку праці персоналу та необхідність гігієнічного контролю за процесом приготування їжі. У свою чергу, обідня зала виконує естетичну функцію, сприяючи створенню спокійної та комфортної атмосфери під час прийому їжі.

Кімнати відпочинку використовуються для вільного часу та дозвілля, вони облаштовані м'якими меблями та мультимедійною технікою. Тут застосовується багаторівневе освітлення, де верхнє світло забезпечує загальний фон, а локальні джерела створюють затишок. Надзвичайно важливо врахувати розташування екранів, щоб уникнути відблисків, які можуть викликати зорове напруження та дискомфорт.

Майстерні та кабінети трудового навчання є зонами підвищеної небезпеки. Робота з інструментами та механізмами вимагає чіткої видимості робочих поверхонь та повного запобігання спотворенню сприйняття руху механізмів, що є критичним для безпеки.

Медичний пункт та ізолятор забезпечують надання первинної допомоги та контроль за станом здоров'я учнів. Умови освітлення тут необхідні для точної візуальної діагностики медичним персоналом. Крім того, всі приміщення та обладнання мають бути стійкими до регулярної санітарної обробки дезінфікуючими засобами.

Аналізуючи сукупність наведених факторів, можна стверджувати, що наявність великої кількості спеціалізованих приміщень у школі створює складну задачу для проектування електроосвітлення. У різних зонах учні виконують кардинально відмінні зорові завдання: від напруженої роботи з текстом до релаксації. Для дітей з особливими освітніми потребами параметри світлового середовища — рівень освітленості, пульсація, спектральний склад, розподіл яскравості — є факторами, що безпосередньо впливають на здоров'я та самопочуття.

Особливу роль освітлення відіграє в контексті енергетичного менеджменту закладу. Цілодобове перебування учнів означає, що споживання електроенергії на потреби освітлення відбувається майже безперервно. Вдень у навчальних кабінетах світло використовується для компенсації недостатнього природного освітлення, особливо в похмуру погоду або в зимовий період. Увечері та вночі навантаження переміщується на житлові блоки, коридори та зовнішнє освітлення території.

Такий режим роботи робить об'єкт енергоємним і актуалізує питання впровадження енергоефективних технологій. Використання застарілих джерел світла в умовах цілодобової експлуатації призводить до значних фінансових витрат. Тому модернізація системи повинна базуватися не лише на заміні ламп, а й на впровадженні інтелектуальних систем керування. Зонування освітлення, використання датчиків присутності в прохідних зонах, застосування димування в спальних та ігрових кімнатах — це технічні рішення, які дозволять адаптувати світлове середовище під конкретні потреби користувачів та забезпечити раціональне використання

енергоресурсів. Забезпечення оптимального світлового середовища в Голенищівській спеціальній школі є комплексною інженерною задачею, що вимагає урахування нормативних, гігієнічних, технологічних та економічних аспектів.

1.2 Вимоги до освітлення спеціальних закладів освіти повного дня

Розробка проєкту системи електроосвітлення спеціалізованого навчального закладу, що функціонує в режимі цілодобового перебування, вимагає глибокого аналізу та неухильного дотримання технічних та санітарно-гігієнічних критеріїв, встановлених національною нормативною базою. Освітлювальна установка об'єкта, що є предметом даної роботи, має забезпечувати не тільки економічну ефективність та надійність експлуатації, але й відповідати підвищеним ергономічним стандартам для контингенту учнів з особливими освітніми потребами. Фундаментальними регулюючими документами, на яких ґрунтується проєктування, залишаються ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»[1] та Державні санітарні норми і правила «Санітарний регламент для закладів загальної середньої освіти» (ДСанПіН)[3]. Комплексність функціональних зон зумовлює необхідність диференційованого підходу до нормування світлотехнічних показників.

Оцінка якості освітлення розпочинається з кількісних параметрів, головним з яких є нормована освітленість ($E_{\text{норм}}$), вимірювана в люксах (лк). У навчальних класах та кабінетах, де відбувається основне зорове навантаження, $E_{\text{норм}}$ на поверхнях які використовуються для роботи повинен підтримуватися в діапазоні 400-500 лк. Цей показник має критичне значення для підтримки концентрації та зниження ризику акомодативної втоми. Для кабінетів трудового навчання, які, незважаючи на відсутність великих виробничих майстерень, вимагають високої точності при роботі з дрібними деталями та ручними інструментами, мінімальна освітленість також фіксується на рівні 400 лк.

Одночасно з інтенсивністю світлового потоку, інженерний розрахунок мусить враховувати якісні характеристики, особливо важливі для нервової системи учнів. Одним із найсуворіше нормованих показників є коефіцієнт пульсації освітленості

(K_p), що визначає амплітуду коливань світлового потоку в часі. Згідно з ДСанПіН, для навчальних зон K_p не повинен перевищувати 10%. Однак, у зонах, де є тривала робота з моніторами або відбувається залучення дрібної моторики, цей поріг знижується до 5% [3]. Таке посилення вимог має пряме відношення до безпеки та гігієни зору, оскільки навіть невидиме мерехтіння негативно впливає на стомлюваність мозку та може спричиняти ілюзію нерухомості рухомих елементів.

Критерії оцінки візуального комфорту включають показник дискомфорту (UGR), який має бути не вище 19 для класів, що вимагає використання растрових або опалових світлорозсіювачів, які мінімізують пряме засліплення. Також важливим є індекс передачі кольору (R_a), який для більшості приміщень встановлений на мінімальному рівні 80. У той же час, для кабінетів корекційно-педагогічних занять та медичних пунктів цей показник набуває критичного значення і повинен бути підвищений до $R_a \geq 90$ для забезпечення точної візуальної діагностики та розрізнення відтінків шкірних покривів.

Через функціонування закладу в цілодобовому режимі, ключовим параметром виступає корельована колірна температура (T_c), що регулює біологічний годинник учнів. У спальних приміщеннях та у вечірні години в зонах відпочинку необхідно використовувати винятково світло теплого спектра. Це рішення є фізіологічно обґрунтованим, оскільки світло з T_c вище 4000 К пригнічує секрецію мелатоніну, що призводить до порушення сну та регенерації. Відповідно, у спальнях загальна освітленість мінімізована до 150 лк, але може доповнюватись системою чергового (нічного) освітлення, яке забезпечує безпечне пересування по проходах.

Ігрові кімнати та зали активного дозвілля вимагають $E_{\text{норм}}$ у межах 400 лк. З огляду на інтенсивність використання, світильники повинні мати високу стійкість до механічних пошкоджень, а їхня конструкція має виключати ризик травмування учнів. У цих зонах, а також у кімнатах відпочинку, які обладнані мультимедійною технікою, необхідне впровадження систем димування та багаторівневого керування для адаптації світла під різні сценарії: від яскравого для групових ігор до приглушеного для перегляду фільмів. У кімнатах відпочинку $E_{\text{норм}}$ може бути знижено до 150 лк, але

UGR має бути особливо низьким, а світловий потік має бути м'яким, щоб уникнути відблисків на екранах моніторів, що можуть спричинити зоровий дискомфорт.

Для харчоблоку, медичного пункту та ізолятора ключові вимоги стосуються гігієни та електробезпеки. Світильники в цих зонах повинні мати високий ступінь захисту від проникнення вологи та пилу, мінімум IP54, та бути стійкими до хімічних реагентів, що використовуються для санітарної обробки. У їдальні освітленість має бути не менше 200 лк, а спектр світла повинен сприяти приємній атмосфері.

Електротехнічна частина проєкту вимагає обов'язкового врахування енергоефективності. Використання LED-світильників зі світловою віддачею понад 100 лм/Вт та впровадження автоматизованих систем керування є необхідною умовою раціонального споживання енергетичних ресурсів. Крім того, інженерна мережа має забезпечувати евакуаційне освітлення, яке, згідно з ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту»[10], повинно функціонувати протягом щонайменше 1 години після відключення основного живлення. При всіх розрахунках необхідно застосовувати коефіцієнт запасу не менше 1.4 для врахування природного зниження світлового потоку ламп з часом.

1.3 Висновки до розділу 1

На основі аналізу особливостей функціонування спеціальних шкіл приведено основні вимог до освітлювальних установок з врахуванням різних видів зорової роботи у приміщеннях різного призначення та особливостей контингенту здобувачів освіти.

Окреслено основні напрямки розробки освітлювальних установок для спеціальних закладів освіти для отримання безпечного, комфортного, енергоефективного та екологічного освітлення.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Методи керування світловим потоком освітлювальних установок

Еволюція світлотехнічних комплексів на сучасному етапі науково-технічного прогресу характеризується фундаментальною зміною парадигми: переходом від утилітарного забезпечення нормативних рівнів освітленості до створення високотехнологічних, адаптивних світлових середовищ. Стрімкий розвиток напівпровідникових джерел випромінювання у поєднанні з цифровізацією інженерних мереж докорінно трансформував підходи до проектування та експлуатації систем штучного освітлення. Сьогодні освітлювальна установка розглядається не як сукупність окремих електротехнічних пристроїв, а як цілісна інтелектуальна екосистема, що є невід'ємною складовою концепції автоматизації будівель та розумної інфраструктури.

Актуальність впровадження передових методів керування світловим потоком зумовлена необхідністю вирішення комплексу взаємопов'язаних завдань. По-перше, це глобальні вимоги до енергоефективності та сталого розвитку, які диктують необхідність мінімізації енергоспоживання шляхом раціонального використання ресурсів лише у необхідний час та з необхідною інтенсивністю. По-друге, зростає увага до ергономіки візуального середовища та його впливу на психофізіологічний стан людини, її працездатність та біологічні ритми. Забезпечення динамічного керування параметрами освітлення дозволяє адаптувати штучне середовище до природних змін та індивідуальних потреб користувача. Таким чином, дослідження принципів побудови та функціонування систем керування освітленням є критично важливим етапом у створенні сучасної, енергоефективної та комфортної інфраструктури.

2.1.1 Фазове димінгування

Метод фазового димінгування полягає у зміні яскравості світлодіода, змінюючи значення напруги живлення. Існує два типи цього методу.

Димінгування по передньому фронтонаі.

Технологія димування за переднім фронтом базується на використанні схемотехнічних рішень із застосуванням тиристорів. Алгоритм роботи полягає у відсіканні частини вхідної напруги змінного струму, починаючи з нульової фази (рис. 2.1). До моменту відкриття тиристора подача напруги на навантаження блокується. Технічна сутність методу зводиться до зміни кута провідності у кожному напівперіоді синусоїди, що призводить до варіації середньоквадратичного значення напруги та, як наслідок, зміни інтенсивності світлового потоку.

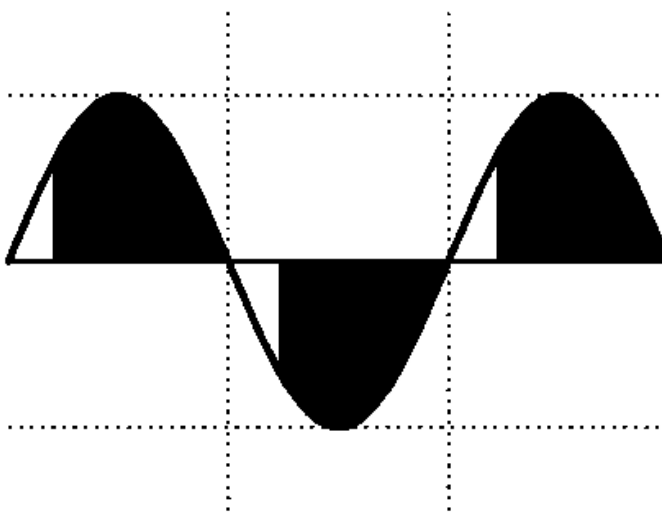


Рисунок 2.1 - Димінгування по передньому фронтонаі.

Завдяки високій точності регулювання, енергоефективності, компактним габаритам та можливості дистанційного керування, димери даного типу займають домінуючі позиції на ринку світлотехнічного обладнання. Оскільки основним комутуючим елементом виступає тиристор, такі пристрої часто класифікують як тиристорні регулятори. Ключовими перевагами інтеграції FPC-димерів у системи

світлодіодного освітлення є низька собівартість реалізації та повна сумісність з існуючою електропроводкою, що виключає необхідність модернізації мереж, характерну для систем регулювання за заднім фронтом.

Водночас технологія FPC має низку експлуатаційних обмежень. До недоліків відносять звужений діапазон регулювання яскравості та проблеми сумісності, коли мінімальне навантаження димера перевищує номінальну потужність підключених LED-ламп. Специфіка тиристора як напівкерovanого ключа унеможливорює повне розмикання ланцюга: навіть у стані "вимкнено" через пристрій протікає залишковий струм витоку. Враховуючи високу чутливість світлодіодів до мікрострумів, це провокує явище паразитного світіння, мерехтіння або слабкого світла, після відключення живлення, що є суттєвою технічною проблемою при впровадженні бездротових систем керування.

Сферою практичного застосування таких димерів переважно є житловий сектор та малі архітектурні форми з обмеженою кількістю точок освітлення. Найбільш доцільним є використання даної системи для керування малопотужними світлодіодними світильниками.

Димінгування по задньому фронті.

Технологія димування із фазовим відсіканням за заднім фронтом (рис. 2.2) функціонально реалізується із застосуванням повністю керованих напівпровідникових комутуючих елементів, таких як польові транзистори (FET) або біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT). Як правило, у цих пристроях використовується MOSFET-транзистор, через що їх також називають MOSFET-димерами або, у професійному середовищі, "MOS-трубками". Принципова перевага MOSFET полягає в його здатності до повного контролю як вмикання, так і вимикання струму, що кардинально усуває проблему залишкового струму, характерну для тиристорних регуляторів, і гарантує повне припинення світіння світлодіодів. Крім того, схемотехніка на основі MOSFET краще адаптована для керування ємнісним навантаженням порівняно з тиристорами. Попри ці технічні переваги, висока вартість компонентів та складність

забезпечення стабільності керуючої схеми обмежують широке розповсюдження цієї методики, залишаючи переважну частку ринку за оптичними пристроями.

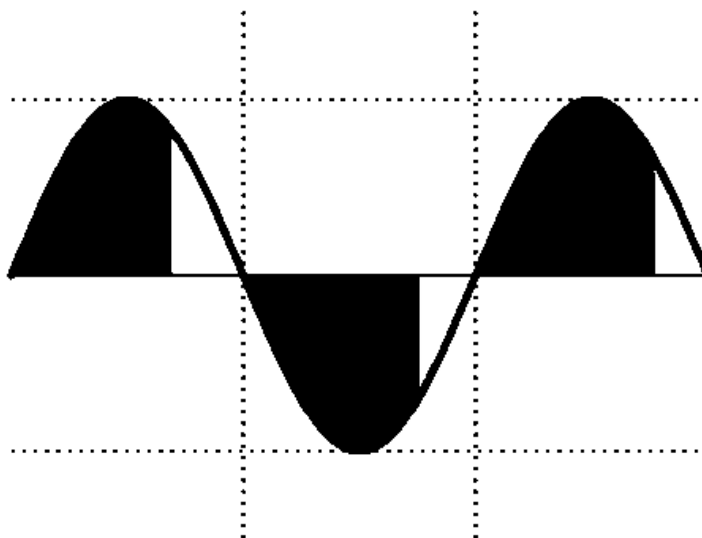


Рисунок 2.2 - Димінгування по задньому фронті

У контексті LED-освітлення, регулятори заднього фронту перевершують регулятори переднього фронту, оскільки вони не висувають вимог до мінімального навантаження, забезпечуючи ефективне димування навіть для одиночних світильників або мінімальних груп. Однак, через обмежене використання MOSFET-пристроїв у великих інженерних проектах, де вони переважно представлені як прості поворотні перемикачі для однієї лампи, виникає системна проблема: виробники часто тестують свої драйвери саме на таких системах, тоді як на об'єктах встановлюють тиристорні (Leading-edge) системи. Ця невідповідність між методами димування призводить до критичних наслідків, включаючи мерехтіння світла та швидке пошкодження як блоку живлення, так і самого димера. Як правило, LED-лампи, точкові та трекові світильники, що використовуються у побутовому, комерційному та магазинному освітленні, є основною сферою застосування цих регуляторів. Загалом, фазове димування не вимагає перекладання електропроводки, що робить його вкрай зручним і вигідним для проектів, де не планується значна реконструкція і відсутні надмірні вимоги до глибини та якості димування.

2.1.2 Димінгування 0/1-10 вольт

Система аналогового керування освітленням 0-10V є одним із найнадійніших і найстаріших рішень. Цей метод керування, що використовує низьковольтний сигнал постійного струму, працює досить просто: на спеціалізований драйвер подається зовнішня змінна напруга в діапазоні від 0V до 10V. Драйвер, у свою чергу, пропорційно модулює вихідний струм, який живить світлодіоди, і таким чином ми отримуємо плавне регулювання яскравості (рис. 2.3). Наприклад, коли регулятор виставлений на 10V, світильник працює на повну потужність (100% струму), а при 0V струм повністю припиняється і світло вимикається. Важливо розрізняти цей метод від 1-10V димування, де мінімальний 1V не дозволяє повністю вимкнути світло, залишаючи його на мінімальній яскравості.



Рисунок 2.3 – Схема підключення димера 0/1-10V.

Конструктивно система передбачає наявність двох абсолютно незалежних електричних ланцюгів. Перший – це стандартний високовольтний ланцюг живлення, необхідний для роботи освітлювального обладнання. Другий – це окремий низьковольтний ланцюг, який слугує лише для передачі опорної напруги

керування. Існує два підходи до реалізації: активний, коли сам контролер подає напругу, і пасивний, коли драйвер подає 10V, а димер лише "поглинає" частину цього струму. В останньому випадку, якщо керуючий провід з якоїсь причини обривається, світильник продовжує працювати на максимальній яскравості. Завдяки інтеграції спеціальних схем керування в сучасні LED-драйвери, ця технологія, яка історично використовувалася для люмінесцентних ламп, сьогодні чудово справляється з керуванням великою кількістю світлодіодних приладів.

Головна перевага системи 0-10V – це її простота та висока надійність. Відсутність складних цифрових протоколів значно спрощує монтаж, не вимагає програмування і робить її відносно недорогою у впровадженні. Система забезпечує якісне і плавне затемнення, а також легко інтегрується з датчиками руху та іншими сенсорними панелями. Проте, як і будь-яка технологія, вона має свої обмеження. Основним недоліком є необхідність прокладання тієї самої додаткової пари керуючих дротів, що збільшує обсяг монтажних робіт. Крім того, це одностороння система зв'язку, тобто контролер не отримує жодної інформації про стан світильника, що ускладнює діагностику, на відміну від сучасних цифрових аналогів.

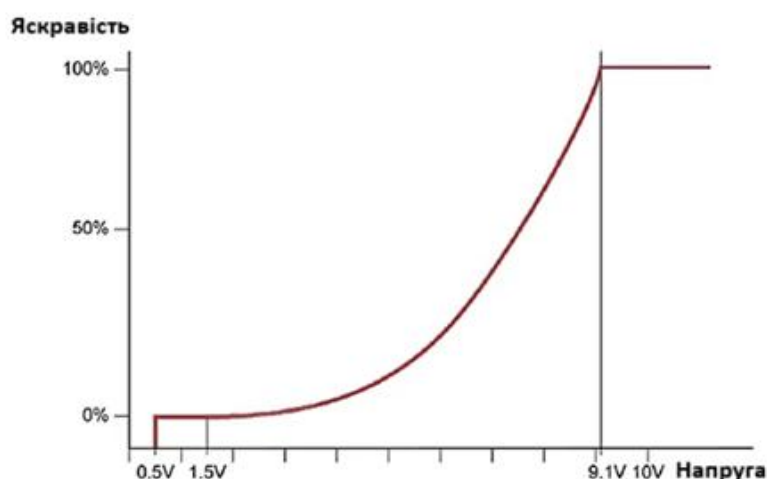


Рисунок 2.4 – Графік залежності яскравості % від напруги V.

Завдяки своїй масштабованості та надійності, 0-10V є ідеальним вибором для великих комерційних об'єктів. Сюди відносяться офісні будівлі, великі

супермаркети, навчальні заклади та лікарні, де масово використовуються LED-панелі, даунлайти та трекові світильники, і де найважливішим є забезпечення стабільної та простої системи освітлення.

2.1.3 ШІМ димінгування

ШІМ димінгування є поширеним та ефективним методом регулювання яскравості світлодіодів, який працює не шляхом зміни потужності струму, що надходить до діода, а шляхом його швидкого, циклічного вмикання та вимикання. Яскравість контролюється через коефіцієнт заповнення (duty cycle), що являє собою співвідношення часу, коли світлодіод увімкнений, до загальної тривалості циклу. Чим довший час увімкнення в кожному циклі, тим вищою буде сприйнята яскравість (рис 2.5). Людське око, завдяки інерції зору, не здатне помітити ці надзвичайно швидкі перемикання (які відбуваються на високих частотах), і тому сприймає це як плавне зниження інтенсивності світла.

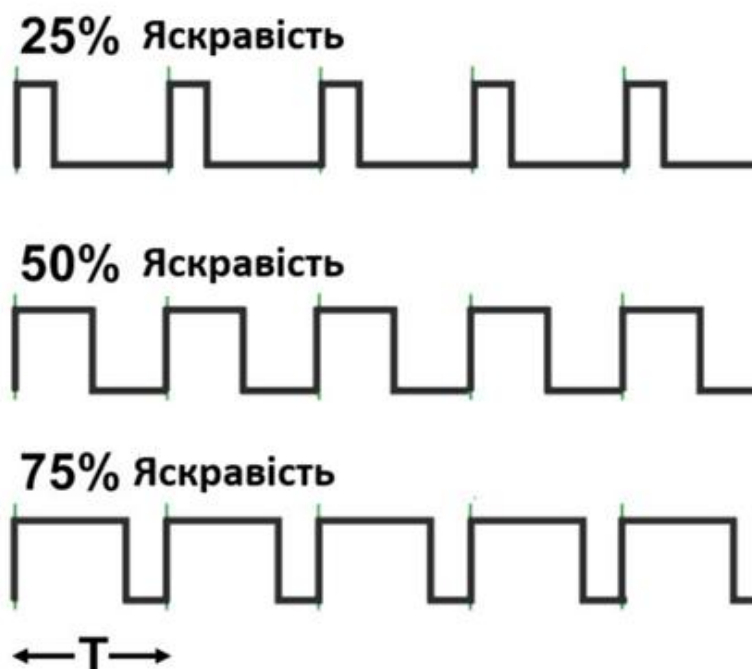


Рисунок 2.5 – Діаграма залежності яскравості від часу ввімкнення.

Ключова перевага ШІМ-димінгування, що відрізняє його від аналогового димінгування, полягає у збереженні кольору та ефективності світлодіода. При аналоговому димінгуванні, коли напруга або струм знижуються, світлодіод працює на меншій потужності, що часто призводить до небажаного зміщення кольору (Color Shift) — світло може ставати "холоднішим" або "теплішим". Натомість, оскільки ШІМ-метод завжди подає на світлодіод повний струм у момент "увімкнено", він зберігає його колір та світлову віддачу, забезпечуючи сталу якість освітлення навіть при низькій яскравості. Це робить ШІМ кращим вибором для застосувань, де необхідний точний контроль яскравості та збереження кольорової температури.

Ще одним важливим порівнянням є зі способом Constant Current Reduction — Зниження Постійного Струму. У той час як ШІМ-димінгування швидко перемикає світлодіод між станами "увімкнено" та "вимкнено", CCR зменшує фактичний безперервний струм, що протікає через світлодіод, змушуючи його тьмяніти без блимання. Перевага CCR полягає у повній відсутності мерехтіння, що є комфортнішим для чутливих до мерехтіння людей та ідеально підходить для відеозйомки. Однак, CCR також може, як і DC Dimming, викликати незначне зміщення кольору при дуже низьких рівнях яскравості. Вибір між цими двома методами часто залежить від пріоритетів: ШІМ для точності кольору, а CCR — для відсутності мерехтіння.

Незважаючи на переваги, ШІМ-димінгування має і свої недоліки. Насамперед, якщо частота перемикання є недостатньо високою, вона може викликати дискомфорт та напругу очей у чутливих користувачів. Також ШІМ-димінгування вимагає інтеграції складніших електронних схем у драйвер порівняно з аналоговими рішеннями, що може вплинути на загальну вартість та сумісність. Проте його застосування є надзвичайно широким: від професійного LED-освітлення (де важлива енергоефективність та точне регулювання) до дисплейних екранів (телевізори, телефони), де він забезпечує динамічний контроль яскравості із збереженням кольорової точності.

2.1.4 Димінгування за протоколом DALI

Протокол DALI (Digital Addressable Lighting Interface) є міжнародним стандартом, який був розроблений як цифрова заміна старих, менш гнучких аналогових систем керування освітленням, зокрема, протоколу 0/1-10 В. Це двонаправлений протокол зв'язку, спеціально створений для керування пристроями освітлення, такими як електронні баласты, драйвери світлодіодів та аварійні світильники. Стандарт DALI визначає чітку, уніфіковану мережеву архітектуру, яка дозволяє пристроям різних виробників безперешкодно працювати разом, що значно підвищує сумісність у рамках однієї освітлювальної системи, що є однією з його ключових переваг (рис 2.6)[7].

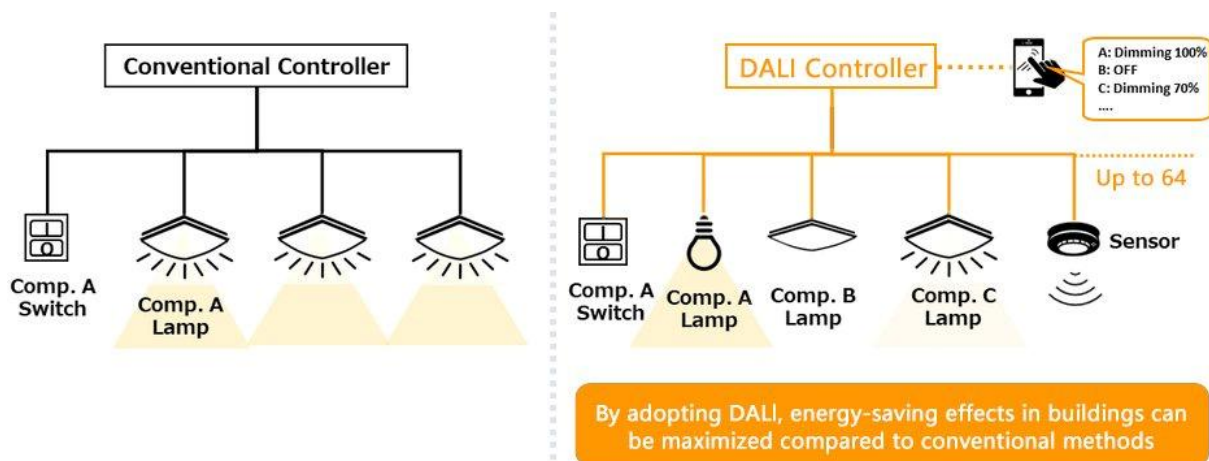


Рисунок 2.6 – Порівняння аналогового контролера та протоколу Dali.

Типова мережа DALI є відносно невеликою за своїми технічними параметрами. Вона здатна вмістити максимум 64 пристрої керування, які можуть бути незалежно адресовані. Це обмеження стало стандартним для однієї "шини" DALI. Додатково, для гнучкої конфігурації освітлення, ці 64 пристрої можуть бути об'єднані у 16 груп, а також система дозволяє зберігати 16 світлових сцен. Таке групування є однією з найсильніших сторін DALI, оскільки дозволяє змінювати функціональність освітлювальних зон програмно, не втручаючись у фізичну електропроводку. На практиці, інженери часто рекомендують керувати дещо

меншою кількістю пристроїв, зазвичай від 40 до 50 ламп, щоб забезпечити оптимальну стабільність та швидкість відгуку системи.

Керування DALI здійснюється за допомогою окремої двожильної шини керування, яка, на відміну від силових ліній, використовує безпечну низьку напругу, часто неізолювану. Це є значною перевагою порівняно зі старими системами, проте це все ще вимагає прокладання додаткової сигнальної лінії, що збільшує початкові інсталяційні витрати. Швидкість обміну даними у мережі DALI є відносно невисокою, зазвичай обробляється близько 30-40 інструкцій керування за секунду. Ця швидкість достатня для плавного, статичного димінгування, що дозволяє контролеру подавати приблизно дві команди димінгування на групу освітлення за секунду. Незважаючи на те, що DALI не є істинною мережею "точка-точка" у класичному IT-розумінні, його цифрова природа забезпечує значну перевагу над аналоговою системою 0/1-10 В, де напруга керування могла ослабнути на довгих відстанях, впливаючи на точність димінгування. Цифровий сигнал DALI є більш стійким до завад та ослаблення, хоча для надійної роботи на практиці дистанція шини все ще не повинна перевищувати 200 метрів.

Однією з найбільш цінних функцій DALI, що кардинально відрізняє його від аналогових попередників, є двонаправлений зв'язок. Це означає, що не лише контролер може надсилати команди (наприклад, "зменшити яскравість до 50%"), але й самі пристрої освітлення (драйвери, баласты) можуть надсилати інформацію назад до контролера. Це дозволяє в режимі реального часу відстежувати стан обладнання, зокрема, отримувати дані про несправності лампи, кількість годин роботи або поточний рівень яскравості. Цей функціонал значно спрощує обслуговування великих інсталяцій та забезпечує високий рівень надійності системи. Додатковою перевагою, яку часто виділяють, є точна адресація: кожен пристрій має унікальний адресний код, що дає можливість керувати навіть однією окремою лампою у великій групі.

Проте, незважаючи на свої сильні сторони, DALI має свої чіткі обмеження, особливо в контексті динамічного LED-освітлення та великих проєктів. Стандарт

був розроблений з акцентом на традиційне керування освітленням, пріоритетом якого є надійність, стабільність та сумісність. Ця орієнтація на статичні сценарії створює проблему, коли мова заходить про керування повнокольоровими світлодіодними системами (RGB/RGBW). Оскільки керування кольором вимагає використання окремих каналів (червоний, зелений, синій), кожному з яких потрібна окрема адреса DALI, обмеження в 64 пристрої дуже швидко вичерпується. Наприклад, мережа DALI може ефективно керувати лише близько 21 повнокольоровою лампою, що недостатньо для художнього освітлення чи великої медіа-фасадної інсталяції.

Сьогодні масштаб світлодіодних систем освітлення часто значно перевищує можливості єдиної мережі DALI, оскільки сучасні світлові інсталяції вимагають необмежених можливостей розширення та високої динаміки оновлення сцен, що більше підходить для таких протоколів як DMX. Через це, системи DALI часто функціонують як підсистема у великих комерційних проектах. Вони інтегруються в загальну систему керування будівлею (наприклад, через протоколи KNX або BACnet), де DALI виконує своє основне завдання — точне та надійне керування димінгуванням і моніторинг стану освітлювальних приладів у межах своєї шини, тоді як головний контролер керує сценами на рівні всієї будівлі. Слід також відзначити, що одним із практичних недоліків є необхідність енергоспоживання в режимі очікування: сучасний драйвер DALI завжди вимагає мінімального живлення для підтримки активності мікроконтролера, що дозволяє йому миттєво реагувати на команду "увімкнути", але це означає, що світлодіодний світильник ніколи не є повністю знеструмленим.

Застосування DALI є оптимальним у великих комерційних центрах, офісних будівлях та готелях, де потрібна гнучкість, точність та функція зворотного зв'язку. Він ідеально підходить для керування світлодіодними трековими світильниками та панельними світильниками, створюючи надійну, стандартизовану інфраструктуру освітлення.

2.1.5 Димінгування за протоколом DMX512

Протокол DMX512 є визнаним міжнародним промисловим стандартом, розробленим та опублікованим Американською асоціацією сценічного освітлення (USITT) у 1990 році. Цей протокол є основоположним елементом цифрової передачі даних між централізованими світловими контролерами та кінцевими виконавчими пристроями освітлення. Сфера застосування DMX512 охоплює не лише сценічне та театральне освітлення, а й великомасштабні інсталяції архітектурної підсвітки, а також професійні студійні комплекси, де потрібне високоточне та динамічне керування світловими параметрами. Структурно, стандарт DMX512 комплексно визначає електричні характеристики, протоколи комунікації та формати даних, що забезпечує високий рівень сумісності обладнання від різних виробників.

Ключова технічна особливість протоколу полягає у його здатності керувати значною кількістю каналів з високою роздільною здатністю. Один фізичний інтерфейс DMX512, відомий як "всесвіт", підтримує підключення та індивідуальну адресацію до 512 каналів керування. Ця ємність є критично важливою перевагою у складних інсталяціях, де кожен прилад або його функція вимагає виділеного каналу. Протокол здійснює димінгування, розділяючи діапазон інтенсивності світла від 0% до 100% на 256 дискретних рівнів (або 8-бітну шкалу, від 0 до 255). Ця деталізація забезпечує необхідну плавність переходів (градієнтів) яскравості, що є фундаментальною вимогою для якісного сценічного та телевізійного освітлення, усуваючи візуально помітні кроки димінгування.

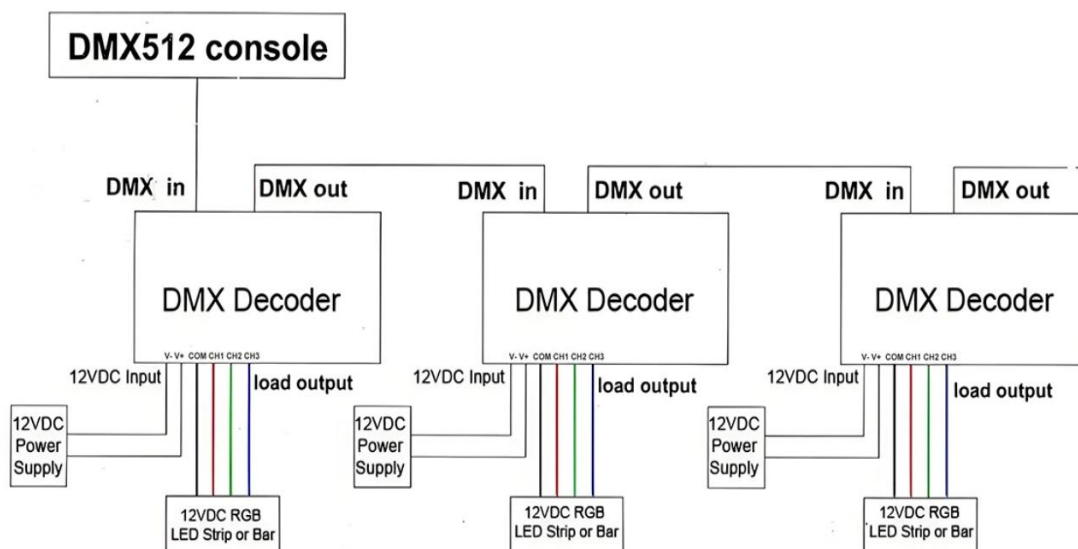


Рисунок 2.7 – Схема керування світловими приладами за протоколом DMX512.

Для реалізації повнокольорового керування, DMX512 ефективно використовує три окремі канали на один світловий прилад — по одному для керування інтенсивністю червоного, зеленого та синього кольорів відповідно. Завдяки наявності 256 рівнів на кожен колірний канал, система спроможна відтворювати понад 16.7 мільйонів колірних відтінків. Це дозволяє здійснювати прецизійне керування не лише загальною яскравістю, а й контрастністю та хроматичністю відеосигналу. Структурно, керуюча система обробляє ці параметри окремо, регулюючи рівень аналогового вихідного сигналу через цифровий потенціометр (на рівні декодера) для точного встановлення необхідного світлового ефекту.

Передача керуючого сигналу здійснюється з використанням стандарту RS-485 через диференціальну сигналізацію. Цей метод комунікації забезпечує високу стійкість до електромагнітних завад та шумів, що є типовим для промислових та концертних середовищ, тим самим гарантуючи надійність передачі даних. Теоретична максимальна довжина передачі сигналу може досягати 200 метрів. Проте, у практичних інженерних додатках, для мінімізації впливу затухання сигналу та зовнішніх перешкод, загальноприйнятою практикою є включення

репітерів (підсилювачів сигналу) приблизно через кожні 40 метрів кабельної траси. Це критично важливо для підтримки цілісності даних на великих дистанціях.

Архітектура системи DMX512 складається з трьох основних функціональних блоків: Майстер-контролер DMX (джерело команд, наприклад, світлова консоль), DMX-декодер (пристрій, що інтерпретує цифровий протокол та перетворює його у фізичні сигнали керування, наприклад, ШІМ) та кінцеві світлодіодні пристрої. Цифрова система освітлення, заснована на DMX512, є потужним інструментом, який значно розширив можливості архітектурного освітлення, нічної підсвітки, а також комплексних світлових рішень для великих кіно- та телестудій, завдяки своїй здатності до потужного і швидкого динамічного керування.

Однак, слід зазначити й певні інженерні та економічні аспекти, що обмежують універсальність DMX512. У великомасштабних проектах, де потрібне керування освітленням, що перевищує ємність одного "всесвіту", необхідна інтеграція множинних контролерів, що вимагає розробки значно складнішого керуючого програмного забезпечення. Крім того, інсталяційний процес є відносно трудомістким через необхідність прокладання великої кількості керуючих кабелів. Ці фактори, зокрема складна архітектура керування та великий обсяг кабельних робіт, призводять до підвищення початкових інвестиційних витрат, а також до високих операційних витрат на подальше обслуговування системи. Незважаючи на ці обмеження, DMX512 залишається де-факто стандартом для будь-яких освітлювальних рішень, де критично важливі швидкість, точність та динамічне керування кольором.

2.1.6 Порівняння методів димінгування

Для подальшої розробки схеми керування освітленням школи проведемо порівняння вище описаних методів керування (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Порівняння методів димінгування.

Метод димінгування	Комфорт освітлення	Енергоефективність	Гнучкість керування	Складність системи
1. Фазове	Низький. Високий ризик мерехтіння	Низька. Значні втрати на димері	Низька. Тільки зональне	Середня. Проста схема
2.0/1-10 В.	Середній. Плавний перехід	Середня. Добре інтегрується з базовими датчиками освітленості.	Середня. Фізичне групуван-ня	Середня. Потрібна додаткова керуюча лінія.
3. ШІМ	Найвищий. Найкраща точність і плавність димінгування	Висока. Мінімізує втрати на низьких рівнях яскравості	Висока. Використовується як внутрішня технологія драйвера	Середня. Вимагає якісного контролера та драйвера
4. DALI	Високий. Логарифмічна крива димінгування для комфорту ока	Найвища. Оптимальне керування, моніторинг енергоспоживання	Найвища. Програмне адресне керування, легке створення сцен	Висока. Складніше налаштування, але легка діагностика та обслуговування
5. DMX512	Дуже високий. Дуже висока швидкість оновлення	Низька. Не призначений для задач енергозбереження.	Висока. Канальне керування для складних ефектів.	Дуже Висока. Спеціалізоване обладнання та проводка

2.1.7 Керування колірною температурою світильників.

Регульоване біле освітлення (*Tunable White*) є однією з ключових інновацій у сфері інтелектуальних світлодіодних систем, надаючи можливість точного контролю над корельованою колірною температурою джерела світла. Ця функція, відома також як освітлення зі змінною білою або освітлення з власною температурою, дозволяє оперативно регулювати відтінок білого світла у визначеному діапазоні – від теплого до нейтрального та холодного. Діапазон CCT у світлодіодній галузі може сягати від 1800K до 7000K, і чим вищий цей показник, тим більша частка синього спектра присутня у світлі. Технологія TW виступає фундаментальною основою для реалізації концепції освітлення, орієнтованого на людину, метою якої є підтримка циркадних ритмів мешканців та оптимізація функціонального середовища в освітніх, комерційних та промислових приміщеннях.

Функціональність TW-систем ґрунтується на використанні світлодіодних світильників, оснащених як мінімум двома незалежно керованими комплектами чіпів: тепло-білих та холодно-білих. Регулювання CCT досягається шляхом зміни співвідношення потужності, що подається на ці два канали. Наприклад, для отримання нейтрального $4000K$ драйвер змішує світло від обох каналів приблизно в рівних пропорціях. Саме незалежність керування яскравістю від колірної температури є ключовою відмінністю TW-освітлення від категорії затемнення до теплого, де зниження інтенсивності завжди супроводжується автоматичним зміщенням CCT до тепліших відтінків, імітуючи лампи розжарювання. На відміну від цього, TW дозволяє користувачеві зберегти обрану CCT навіть при зменшенні інтенсивності світла.

Для реалізації незалежного керування TW-системи вимагають використання керуючих протоколів, здатних передавати дві окремі команди на один світильник. Традиційні методи, такі як аналогове керування 0/1-10V, вимагають прокладки двох незалежних ліній, що значно ускладнює монтаж. Натомість, сучасні цифрові протоколи пропонують більш елегантні рішення. Протокол DALI використовує

спеціальний тип пристрою – DALI Type 8. Використання DT8 дозволяє керувати двома незалежними вихідними каналами за допомогою лише однієї спільної адреси на шині DALI. Це значно спрощує проектування, зменшує кількість необхідних драйверів та адрес, а також спрощує подальше введення системи в експлуатацію. Протокол DMX512 також застосовується для TW, особливо у випадках, що вимагають високої швидкості та точності реакції, наприклад, у театральних чи медичних інсталяціях, де важлива відсутність затримки між подачею команди та реакцією освітлення.

Впровадження TW-освітлення забезпечує значні переваги, які є особливо важливими. Шляхом маніпуляції світлом, TW-системи можуть точно імітувати природний добовий цикл, підтримуючи внутрішній біологічний годинник людини. Наприклад, використання яскравого холодного світла вдень підвищує когнітивні функції, пильність та продуктивність, тоді як перехід до теплого, тьмяного світла увечері сприяє виробленню мелатоніну та підготовці до сну. Крім біологічного комфорту, TW-системи пропонують гнучкість у створенні різних атмосфер для різних подій чи видів діяльності та сприяють енергозбереженню, оскільки дозволяють точно регулювати світловий потік відповідно до фактичних потреб приміщення. Таким чином, TW-освітлення є не лише елементом комфорту, але й інструментом для підвищення ефективності використання енергії та оптимізації самопочуття людини.

2.2 Висновки до розділу 2

1. Проведено аналіз динаміки розвитку світлотехнічних комплексів від простого забезпечення нормативних рівнів освітленості до створення інтелектуальних адаптивних екосистем, інтегрованих у концепцію «розумної» інфраструктури, що дозволяє не лише економити енергію, а й позитивно впливати на психофізіологічний стан людини та її біологічні ритми.
2. Аналіз фазового димінгування (по передньому та задньому фронту) показав, що попри низьку вартість та сумісність зі старою проводкою, ці методи мають

суттєві обмеження: ризик мерехтіння, вузький діапазон регулювання та наявність залишкових струмів у тиристорних регуляторах.

3. Переваги аналогових та цифрових систем:

- Система 0/1-10V визначена як надійне та просте рішення для великих комерційних та навчальних закладів завдяки масштабованості та відсутності складного програмування.
- Протокол DALI виявлений як найбільш ефективний для створення гнучких сценаріїв освітлення завдяки двонаправленому зв'язку, можливості адресації кожного світильника та спрощенню обслуговування через зворотний зв'язок про стан обладнання.
- Протокол DMX512 є незамінним у випадках, що потребують високої швидкості реакції та точного динамічного керування кольором (RGB/RGBW), хоча він і потребує складнішої інфраструктури та вищих інвестиційних витрат.

4. Визначено, що метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) є оптимальним для збереження кольорової точності та стабільності світлової віддачі світлодіодів при будь-яких рівнях яскравості, що критично важливо для професійних систем освітлення.

5. Доведено, що впровадження технології регульованого білого світла є фундаментом концепції Human Centric Lighting (освітлення, орієнтоване на людину). TW-системи дозволяють імітувати природний добовий цикл, що підвищує концентрацію та продуктивність у навчальних закладах вдень і сприяє релаксації у вечірній час.

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Класифікація приміщень школи та вимоги до світлового середовища

Для забезпечення нормованих показників освітленості та створення комфортного візуального середовища у спеціалізованих навчальних закладах, необхідно класифікувати приміщення за функціональним призначенням, тривалістю перебування дітей та характером зорової роботи.

Специфіка спеціалізованого закладу вимагає врахування не лише кількісних показників (рівень освітленості), але й якісних характеристик: спектрального складу світла, відсутності пульсацій та можливості динамічного керування (Human Centric Lighting). Це особливо важливо для приміщень, де діти перебувають цілодобово або тривалий час (інтернати, санаторні школи).

У даній роботі розглянуто наступний перелік приміщень:

1. **Навчальні класи та кабінети** — основні приміщення для здобуття освіти.
2. **Кабінети для корекційно-педагогічних занять** — зони індивідуальної роботи з дефектологами/логопедами.
3. **Ігрові кімнати** — зони для активної діяльності та соціалізації.
4. **Спальні приміщення** — зони нічного відпочинку та денного сну.
5. **Кімнати відпочинку** — зони психологічного розвантаження.
6. **Харчоблок та їдальня.**
7. **Майстерні та кабінети трудового навчання.**
8. **Медичний пункт та ізолятор.**

Узагальнені вимоги до світлового середовища та вибору обладнання для кожної групи приміщень зведено в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Вимоги до світлового середовища та технічні рішення

Приміщення	Особливості (тривалість роботи, завдання)	Тип світильників	Тип керування та розміщення датчиків
Навчальні класи та кабінети	Час: 4–6 год. Завдання: Висока точність (читання, письмо), розрізнення кольорів.	LED панелі з мікропризматичним розсіювачем. Асиметричні світильники для дошки.	Протокол DALI. Реалізація сценаріїв «Навчання», «Екзамен», «Мультимедіа». Датчики присутності та постійної освітленості
Кабінети корекційно-педагогічних занять	Час: 30–45 хв. Завдання: Концентрація уваги, робота з дрібними предметами, зоровий контакт.	Вбудовані світильники з глибоким розташуванням джерела для уникнення засліплення.	Фазове димінгування. Ручне керування яскравістю для створення довірливої атмосфери. Локальне підсвічування дзеркал.

Продовження таблиці 3.1

Ігрові кімнати	Час: 1–2 год. Завдання: Рухливі ігри, робота з конструкторами.	Світильники розсіяного світла (щоб не сліпити при погляді вгору), можна використати декоративне RGB підсвічування.	Протокол DALI або DMX512. Використання кольорових сценаріїв для активізації дітей. Датчики руху з широким кутом охоплення.
Спальні приміщення	Час: 8–10 год (ніч) + денний сон. Завдання: Орієнтація в темряві, пробудження.	LED-світильники + приліжкові бра	DALI Функція «Світанок» (плавне наростання яскравості). Керування з місця вихователя та біля входу.

Продовження таблиці 3.1

Кімнати відпочинку	Час: 30–60 хв. Завдання: Релаксація, зняття напруги.	LED-світильники, приховане закарнизне освітлення, торшери, світлові колони або фібероптика	DALI або DMX512. Повільна динаміка зміни яскравості/кольору. Сенсорна панель для вибору сценарію розслаблення.
Харчоблок та їдальня	Час: 20–30 хв. Завдання: Розрізнення якості страв, гігієна.	Вологозахищені (IP54/IP65) світильники з гладким розсіювачем для легкого миття.	Керування 1-10V або On/Off. Датчики присутності для економії електроенергії в неробочий час.

Продовження таблиці 3.1

Майстерні та трудове навчання	Час: 45–90 хв. Завдання: Безпека праці, робота з інструментом.	Промислові лінійні LED світильники. Обов'язкове місцеве освітлення верстатів.	Протокол 1-10V. Роздільне керування загальним та місцевим освітленням.
Медичний пункт / Ізолятор	Час: Цілодобово (ізолятор) / Короткочасно. Завдання: Огляд шкірних покривів, діагностика.	Світильники з "чистим" спектром. Бактерицидні опромінювачі.	Ручне керування. Окремі групи для загального та оглядового світла.

3.2. Вибір світлотехнічного обладнання та схеми керування

Для створення цілісної, енергоефективної та надійної системи освітлення спеціалізованого закладу прийнято рішення про побудову уніфікованої системи керування на базі протоколу DALI.

Вибір єдиного протоколу для всіх груп приміщень (Ігрова, Спальня, Кімната відпочинку) обумовлений наступними перевагами:

1. **Універсальність:** Всі світильники, датчики та панелі керування підключаються до однієї двопровідної шини, що значно спрощує електромонтаж та зменшує кількість кабельних трас.
2. **Підтримка кольору:** Сучасні драйвери DALI DT8 дозволяють керувати як колірною температурою, так і кольором використовуючи лише одну адресу на шині, що робить використання складного протоколу DMX512 у даному випадку надлишковим.
3. **Двосторонній зв'язок:** Система дозволяє моніторити стан кожного світильника, що критично важливо для швидкого виявлення несправностей у закладах з постійним перебуванням дітей.

Характеристика схем керування за типами приміщень:

- **Ігрова кімната:** Використовуються світильники з підтримкою зміни колірної температури. Система автоматично підлаштовує спектр під час доби, а датчики комбінованого типу забезпечують функцію *Constant Light Output* (підтримка постійного рівня освітленості незалежно від забруднення світильників чи погоди за вікном).
- **Спальне приміщення:** Ключовою вимогою є якість драйвера, що забезпечує глибоке димінгування без мерехтіння. Це дозволяє реалізувати сценарій «Ніч», коли загальне світло вимикається, а орієнтуюча підсвітка працює на мінімальній яскравості, не заважаючи сну. Протокол DALI дозволяє задати швидкість зміни яскравості, забезпечуючи дуже плавне вмикання для м'якого пробудження.

- **Кімната відпочинку:** Для сенсорного розвантаження використовуються RGB-світильники. Керування здійснюється через DALI DT8. На відміну від динамічних сцен, сцени тут використовуються повільні цикли зміни кольорів, з якими шина DALI справляється ідеально. Керування сценаріями доступне персоналу через настінну сенсорну панель.

Таблиця 3.2- Технічні характеристики обладнання та конфігурація

Приміщення	Тип світильників	Особливості драйвера (DALI)	Функціонал системи керування
Ігрова кімната	LED-панелі	DALI DT8. Підтримка зміни колірної температури 2700K-6500K.	Автоматичний: Датчики присутності та денного світла. Ручний: Панель вибору сцен
Спальне приміщення	LED-світильники + LED-стрічка (нічна)	DALI DT6. Діапазон димінгування 1-100%. Плавний пуск	Автоматичний: Таймер "Світанок/Захід". Ручний: Майстер-вимикач у вихователя. Нічний режим за датчиком руху.
Кімната відпочинку	LED-світильники, RGB-прожектори, фіброоптика	DALI DT8 (RGBW). Керування кольором через одну адресу.	Сценарний: Виклик попередньо записаних статичних або повільних динамічних кольорових сцен через контролер.

3.3. Моделювання адаптивного світлового середовища ігрової кімнати

3.3.1 Характеристика ігрової кімнати

Для моделювання в DIALux evo ми розглядаємо ігрову кімнату прямокутної форми з габаритами 6,0 м у довжину та 4,5 м у ширину (загальна площа 27 м²). Висота приміщення становить 2,8 м, що є оптимальним для рівномірного розсіювання світла при використанні обраних світлодіодних панелей.

Особливістю архітектури є розташування двох вікон на одній із довгих сторін, що забезпечує інтенсивне природне освітлення вдень. На протилежній довгій стіні знаходяться двері, що визначає основну зону руху. Така конфігурація дозволяє розділити освітлення на дві групи керування DALI: «біля вікна» та «вглиб кімнати», що важливо для енергозбереження.

Для точного розрахунку в програмі встановлені наступні коефіцієнти відбивання поверхонь:

- Стеля — 70% (0.70): біла матова поверхня, що забезпечує м'яке відбите світло;
- Стіни — 50% (0.50): світле оздоблення, що зберігає візуальний простір;
- Підлога — 20% (0.20): стандартний коефіцієнт для світлого лінолеуму.

У таку модель ми інтегруємо 6 світильників ESYLUX CELINE-2 PNL 600 DDP OP 3800 8TW[5], які мають мікропризматичну оптику для запобігання засліпленню. Для керування світильниками використовуємо мультисенсор DALI MSensor 02 5DPI 41rs[6].

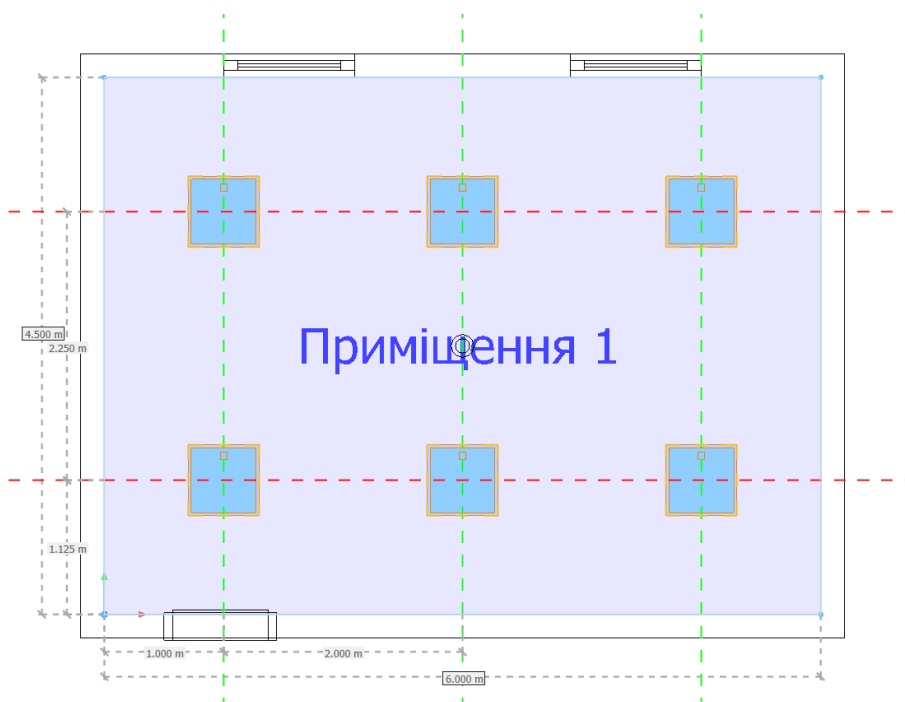


Рисунок 3.1 – Схема ігрової кімнати із світильниками та датчиком

3.3.2 Характеристика світильника

Світильник ESYLUX CELINE-2 PNL 600 DDP OP 3800 8TW IP20 ELC — це професійна світлодіодна панель для вбудованого монтажу в підвісні стелі, призначена для систем інтелектуального керування освітленням[5].



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд світильника ESYLUX CELINE-2 PNL 600 DDP OP 3800 8TW IP20 ELC

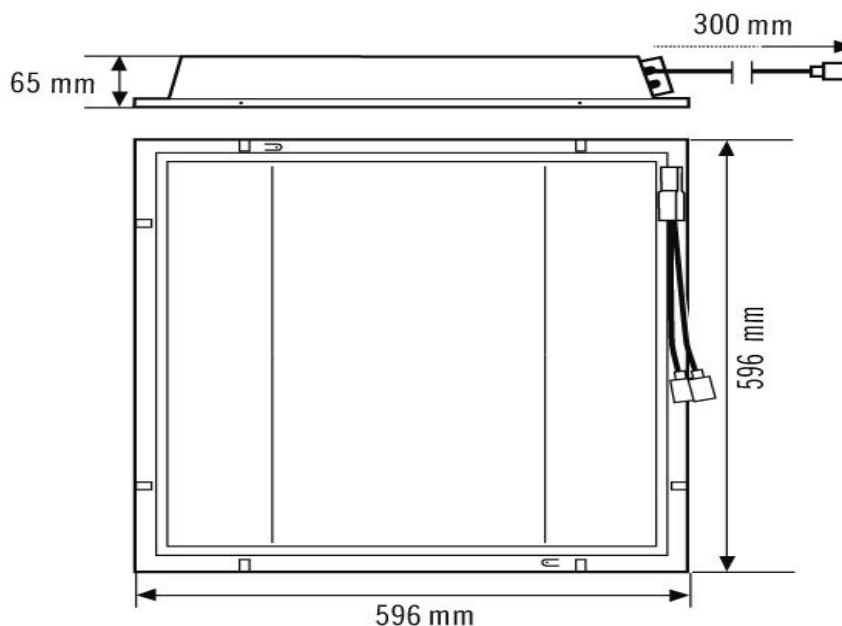


Рисунок 3.3 – Основні розміри світильника

Основними технічними характеристиками пристрою є:

- **Технологія Tunable White (8TW):** Можливість плавної зміни колірної температури в діапазоні від 2700 К до 6500 К. Це дозволяє створювати освітлення, що імітує природний світловий цикл.
- **Оптична система:** Поєднання мікропризматичного розсіювача та опалового покриття забезпечує високий візуальний комфорт із низьким показником засліплення. Це унеможливорює пряме засліплення дітей, навіть якщо вони дивляться на світильник знизу.
- **Світловий потік:** Потужний вихід у 3800 лм дозволяє ефективно освітлювати великі площі з мінімальною кількістю приладів.
- **Якість світла:** Високий рівень передачі кольору та відсутність пульсацій, що мінімізує втому очей та навантаження на нервову систему.
- **Захист та виконання:** Ступінь захисту IP20 розрахований на використання всередині сухих приміщень, а металевий корпус забезпечує ефективне відведення тепла від світлодіодів, продовжуючи термін їхньої служби.

Цей світильник є оптимальним рішенням для ігрової кімнати, оскільки він поєднує функцію енергозбереження з можливістю психоемоційного впливу на дітей через зміну спектра світла.

3.3.3 Опис мультисенсора

Tridonic DALI MSensor 02 5DPI 41rs[6] — це компактний багатофункціональний сенсор нового покоління, який є інтелектуальним центром керування в системах DALI-2. Він поєднує в собі детекцію присутності та вимірювання рівня природного освітлення.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд мультисенсора Tridonic DALI MSensor 02 5DPI 41rs

Основні технічні характеристики та можливості датчика:

- **Мультисенсорна технологія:** Пристрій об'єднує в одному корпусі пасивний інфрачервоний датчик руху та цифровий люксметр. Це дозволяє реалізувати функцію Constant Light Control — автоматичну підтримку заданого рівня освітленості шляхом димінгування світильників залежно від яскравості сонячного світла з вікон.

- **Зона виявлення:** Сенсор має кругову діаграму спрямованості 360°. При монтажі на висоті 2,8–3,0 м зона виявлення руху становить до 7 метрів у діаметрі, що дозволяє одному пристрою повністю контролювати простір ігрової кімнати площею 27 м².
- **Інтерфейс DALI:** Повна сумісність із протоколом DALI гарантує стабільну роботу зі світильниками ESYLUX та можливість індивідуальної адресації пристроїв у системі.
- **Конструктивне виконання:** Дана модель призначена для прихованого монтажу в підвісну стелю. Завдяки мінімалістичному дизайну та компактним розмірам він залишається майже непомітним в інтер'єрі.
- **Дистанційне керування:** Вбудований інфрачервоний приймач дозволяє вихователю або персоналу змінювати налаштування освітлення або обирати світлові сцени за допомогою пульта дистанційного керування.
- **Енергоефективність:** Живлення датчика здійснюється безпосередньо через шину DALI, а його використання дозволяє скоротити споживання електроенергії на 30–50% завдяки автоматичному вимкненню світла за відсутності дітей у кімнаті.

Цей мультисенсор забезпечує повну автоматизацію ігрової кімнати: він не лише вмикає світло при вході, а й динамічно підлаштовує яскравість світильників CELINE-2 протягом дня, забезпечуючи зоровий комфорт та економію ресурсів.

3.3.4 Результати комп'ютерного моделювання та аналіз динамічних світлових сценаріїв

Основним етапом проєктування інтелектуальної системи освітлення є верифікація обраних технічних рішень у спеціалізованому програмному середовищі DIALux evo. Моделювання ігрової кімнати дозволяє не лише підтвердити відповідність нормативним показникам освітленості, а й наочно продемонструвати роботу алгоритмів енергозбереження та адаптації спектрального складу світла.

Для аналізу було розроблено три базові світлові сцени, що відображають різні режими експлуатації приміщення протягом доби.

Сценарій 1: Моделювання за умов повної відсутності природного світла (Штучне освітлення)

Цей сценарій є базовим для визначення максимального енергетичного навантаження системи та перевірки рівномірності світлового поля в темний час доби або при закритих світлонепроникних шторах.

- **Технічні параметри:** Усі 6 світильників ESYLUX CELINE-2 працюють у режимі 100% потужності. Згідно з концепцією біодинамічного освітлення, для вечірнього часу в програмі встановлена колірна температура 4000 К, що забезпечує комфортну видимість без надмірної стимуляції нервової системи.
- **Аналіз результатів:** Розрахунок показав, що середня освітленість на рівні підлоги становить 460 лк, що на 12% перевищує нормативний мінімум, створюючи необхідний «запас на забруднення».



Рисунок 3.5 - Розподіл світла при штучному освітленні.

Сценарій 2: Комбіноване освітлення в умовах похмурої погоди (Хмарний день)

У даному режимі досліджується взаємодія мультисенсора Tridonic 5DPI з групами світильників за наявності помірного дифузного випромінювання з вікон. Це найбільш розповсюджений режим роботи системи в осінньо-зимовий період.

- **Алгоритм роботи DALI:** У DIALux evo змодельовано стан неба «Overcast Sky». Внутрішній фотодатчик мультисенсора фіксує рівень природної освітленості біля вікон та ініціює алгоритм Constant Light Control. Система автоматично димує світильники, розташовані в безпосередній близькості до віконних прорізів (Група «Вікна»), до рівня 60%, тоді як світильники в глибині кімнати (Група «Стіна») працюють на 75% потужності для компенсації світлового градієнта.
- **Енергоефективність:** Моделювання підтвердило можливість зниження миттєвого енергоспоживання приблизно на 30% у порівнянні з базовим сценарієм, при цьому сумарна освітленість на робочих поверхнях стабільно утримується в межах 400–420 лк.



Рисунок 3.6 - Розподіл світла в хмарний день

Сценарій 3: Максимальна інсоляція та інтелектуальне енергозбереження (Сонячний день)

Сценарій демонструє роботу системи в умовах надлишкового природного світла, коли пряма інсоляція забезпечує високий рівень освітленості біля вікон.

- **Логіка системи:** Датчик виявляє надлишок світла і подає команди по шині DALI на глибоке димування.
- **Режим димування:** Світильники першої лінії димуються до 40%, щоб уникнути різкого контрасту між яскравим вікном та світильником. Друга лінія працює на рівні 55% потужності, лише доповнюючи світловий потік у зонах, віддалених від вікон.
- **Результати аналізу:** Сумарне енергоспоживання освітлювальної установки в цьому режимі становить 45% від номінального. Моделювання в DIALux чітко візуалізує економію.



Рисунок 3.7 – Розподіл світла в сонячний день

Результати комп'ютерного моделювання підтверджують, що впровадження протоколу DALI та мультисенсорного керування дозволяє не лише досягти високого

візуального комфорту, а й забезпечити суттєве зниження експлуатаційних витрат на електроенергію.

3.3.5 Визначення енергоефективності впроваджених заходів у ігровій кімнаті

Для розрахунку енергоефективності, проведемо дослідження в програмі DIALux evo, де перевіримо при якій яскравості будуть працювати світильники зимою у різний час доби у хмарний та сонячний день, результати занесемо до таблиці 4.3.

Таблиця 3.3 – Яскравість світильників у різних умовах та в різний час.

Час доби	Група «вікна»		Група «стіна»	
	Хмарний день	Сонячний день	Хмарний день	Сонячний день
	Яскравість %	Яскравість %	Яскравість %	Яскравість %
9:00	70	55	85	70
12:00	60	50	75	65
15:00	65	55	75	70
18:00	75	70	90	85

Ігрова кімната в середньому використовується 4 години на добу, проведемо порівняння використання електроенергії при повністю штучному освітлені протягом 4 годин та комбінованого із димінгуванням у хмарний і сонячний день у різні проміжки часу: 9:00-10:00, 12:00-13:00, 15:00-16:00, 18:00-19:00. Прийmemo, що зі зменшенням яскравості відповідно на такий же відсоток буде зменшуватись і потужність світильника. Визначимо електроспоживання світильників у різний час за формулою:

$$W_{4 \text{ год}} = P_{\text{гр.в}} * B_1 \% + \dots + P_{\text{гр.в}} * B_n \% + P_{\text{гр.ст}} * B_1 \% + \dots + P_{\text{гр.ст}} * B_n \%$$

де: $W_{4 \text{ год}}$ – електроспоживання світильників протягом 4 год.

$P_{гр.в}$ – потужність групи світильників біля вікна, потужність одного світильника 33 Вт., у групі 3 таких світильника, отже потужність становить 99Вт.

$P_{гр.ст}$ – потужність групи світильників біля стіни, потужність одного світильника 33 Вт., у групі 3 таких світильника, отже потужність становить 99Вт.

$B_n\%$ - яскравість світильників у % у різний час.

$P_{дат}$ – потужність датчика 0,1 Вт, при повністю штучному освітлені не використовується.

Проведемо розрахунок для повністю штучного освітлення:

$$W_{4 год} = 99 * 100\% * 4 + 99 * 100\% * 4 = 792Вт/4год$$

Проведемо розрахунок для комбінованого освітлення у хмарний день:

$$W_{4 год} = 99 * 70\% + 99 * 60\% + 99 * 65\% + 99 * 75\% + 99 * 85\% + 99 * 75\% + 99 * 75\% + 99 * 90\% + 0,1 * 4 = 589Вт/4год$$

Проведемо розрахунок для комбінованого освітлення у сонячний день:

$$W_{4 год} = 99 * 55\% + 99 * 50\% + 99 * 55\% + 99 * 70\% + 99 * 70\% + 99 * 65\% + 99 * 70\% + 99 * 85\% + 0,1 * 4 = 515Вт/4год$$

Порівняння електроспоживання продемонструємо у діаграмі

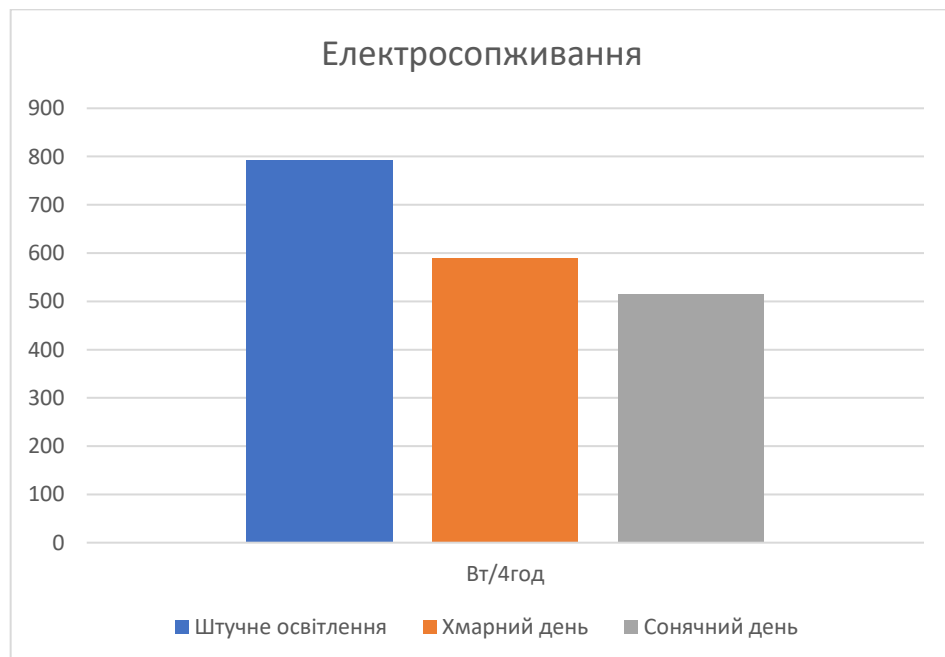


Рисунок 3.8 – Діаграма електроспоживання

3.4. Моделювання адаптивної системи освітлення спальної кімнати

3.4.1 Характеристика спальної кімнати та світлотехнічного обладнання

Спальне приміщення має значну площу та складну конфігурацію природного освітлення:

- **Геометричні параметри:** Довжина — 8,0 м, ширина — 6,5 м $S = 52\text{м}^2$. Висота стелі — 2,8 м.
- **Світлові прорізи:** П'ять вікон (три на довгій стороні та два на короткій). Таке кутове розташування вікон забезпечує високий рівень інсоляції, що потребує гнучкого багатозонного керування DALI.
- **Коефіцієнти відбивання:** Залишаються стандартними для забезпечення світлового затишку: стеля — 70%, стіни — 50%, підлога — 20%.
- **Розрахункова площа:** 0,0 м (рівень підлоги) та 0,5 м (рівень ліжок).

Для підтримання єдиної екосистеми та дизайну використовуються ті ж компоненти, що і в ігровій кімнаті:

1. **Світильники:** ESYLUX CELINE-2 PNL 600 DDP OP 3800 8TW. Для такої площі (52 м^2) у DIALux evo встановлюється 12 світильників (сітка 3x4). Це дозволяє досягти як високої яскравості для прибирання, так і глибокого димування для відпочинку.
2. **Керування:** Мультисенсори Tridonic DALI MSensor 02 5DPI 41rs. Через велику довжину приміщення (8 м) рекомендується встановлення двох сенсорів, об'єднаних в одну шину DALI, для повного покриття зони присутності.

3.4.2 Створення та розрахунок динамічних сценаріїв освітлення спальної кімнати

Сцена 1: "Ранкове пробудження та стабілізація нормованої освітленості"
(07:00 ранку)

Ця сцена моделює роботу системи в момент підйому дітей. О 7:00 ранку, особливо в осінньо-зимовий період, рівень природного освітлення є мінімальним або недостатнім, тому основне навантаження лягає на штучне освітлення.

Логіка роботи та технічні параметри:

- **Мета:** Досягнення нормованого значення **150 лк** на рівні ліжок (0,5 м від підлоги) з урахуванням ранкових сутінків.
- **Функція "Світловий будильник":** Система програмується на плавне наростання яскравості протягом 10–15 хвилин. Це дозволяє уникнути стресового впливу різкого ввімкнення світла на сітківку ока дитини.
- **Робота мультисенсора Tridonic:** Датчик фіксує перші промені сонця з п'яти вікон кімнати. Оскільки вікна розташовані на двох стінах, освітленість у кімнаті розподіляється нерівномірно. Мультисенсор коригує потужність 12-ти світильників так, щоб у глибині кімнати та біля вікон сумарно було рівно 150 лк.

Параметри димування в DIALux evo:

- **Групи біля вікон :** Працюють на потужності 60%, оскільки сонячне світло на світанку вже дає близько 20–40 лк внеску.
- **Центральна та пристінна групи:** Працюють на потужності 75-85% для досягнення цільового показника в 150 лк у зонах, куди ранкове світло ще не проникло.

З допомогою застосування даного методу димінгування та вибору відповідного світлотехнічного обладнання можна досягти рівномірного розподілу освітлення на рівні ліжок (рис 4.9).



Рисунок 3.9 – Рівномірність розподілу ізоліній на висоті ліжок 0,5 м.

Сцена 2: «Денний сон в умовах хмарної погоди»

Другий сценарій моделює роботу системи під час «тихої години». Це критично важливий режим, де головним завданням автоматики є створення заспокійливої атмосфери для відпочинку при збереженні мінімально необхідного рівня видимості для персоналу.

- **Умови природного освітлення:** У програмі DIALux evo встановлено тип неба «Overcast sky». Попри відсутність прямих сонячних променів, наявність п'яти вікон на двох суміжних стінах створює специфічний світловий розподіл: кутова зона кімнати отримує значно більше природного світла, ніж центральна частина та зона біля вхідних дверей.
- **Логіка керування DALI:** У цьому режимі мультисенсор Tridonic переходить у режим фонового моніторингу. Система ігнорує стандартну норму у 150 лк і переходить до глибокого димування для створення напівтемряви.

- **Світлові параметри та налаштування груп:**

- **Група «Кутова» світильники біля перетину вікон:** Повністю вимикаються (0%) або димуються до технологічного мінімуму (1%). Природного дифузного світла з п'яти вікон достатньо для забезпечення безпечного рівня видимості в цій зоні без витрат електроенергії.
- **Група «Центральна» та «Периферійна»:** Димуються до рівня 5–10% від номінальної потужності. Це створює м'яке, ледь помітне підсвічування в глибині кімнати.

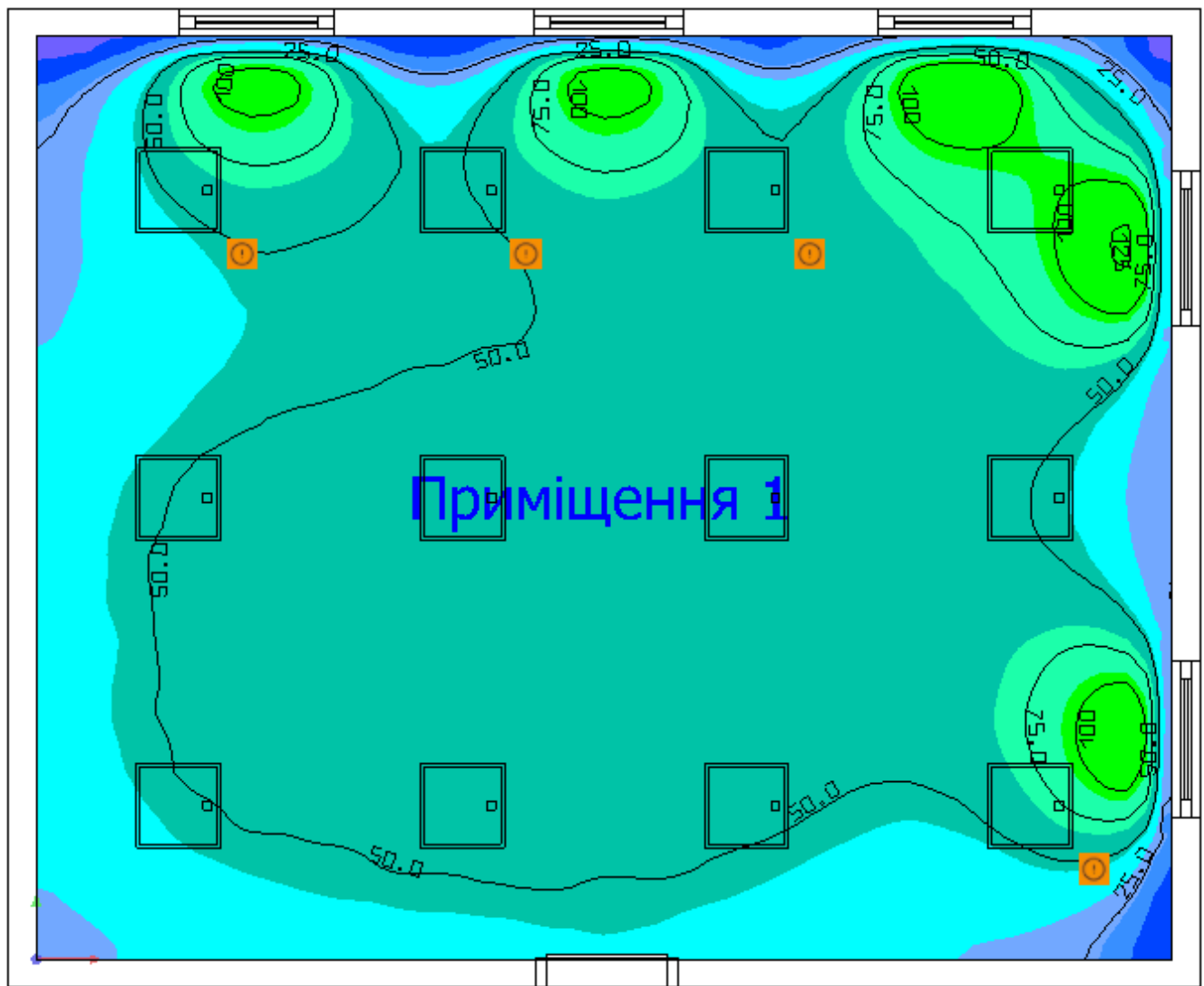


Рисунок 3.10 – Розподіл ізоліній при денному сні.

3.5 Моделювання сценарію освітлення з різною колірною температурою у кімнаті відпочинку

Сценарій «Світловий острів: Концентрація та зоровий фокус»

Даний сценарій розроблений для специфічних умов експлуатації кімнати відпочинку, коли приміщення використовується для індивідуальних занять з педагогом, логопедом або психологом. Основною метою сценарію є використання світла як інструменту керування увагою дитини.

Технічна концепція та алгоритм керування

В основі сценарію лежить метод світлового зонування без застосування фізичних перегородок. Завдяки індивідуальній адресації світильників за протоколом DALI, 9 стельових панелей розподіляються на дві незалежні функціональні групи:

1. Група «Робоча зона» (Центральний острів):

- **Склад:** Світильник, розташований безпосередньо над столом для занять.
- **Параметри:** Максимальна інтенсивність (80–100%) та холодна колірна температура (5000 K – 6000 K).
- **Ефект:** Висока освітленість стимулює когнітивні функції, а холодний спектр сприяє концентрації, пригнічуючи розсіювання уваги на периферійні об'єкти.

2. Група «Фонова зона» (Периферія):

- **Склад:** Решта світильників по периметру кімнати.
- **Параметри:** Глибоке димування до рівня 10–15% та перехід у теплий спектр 2700 K.
- **Ефект:** Візуальне «відсікання» решти простору кімнати. Темніший та тепліший фон створює психологічний комфорт, але не спонукає до активного вивчення оточення.

Світлотехнічні розрахунки в DIALux evo

При моделюванні сценарію було досягнуто наступних показників:

- **Освітленість у робочій зоні:** 300 лк, що відповідає нормам для читання та письма.

- Освітленість у фоновій зоні: 50 лк.

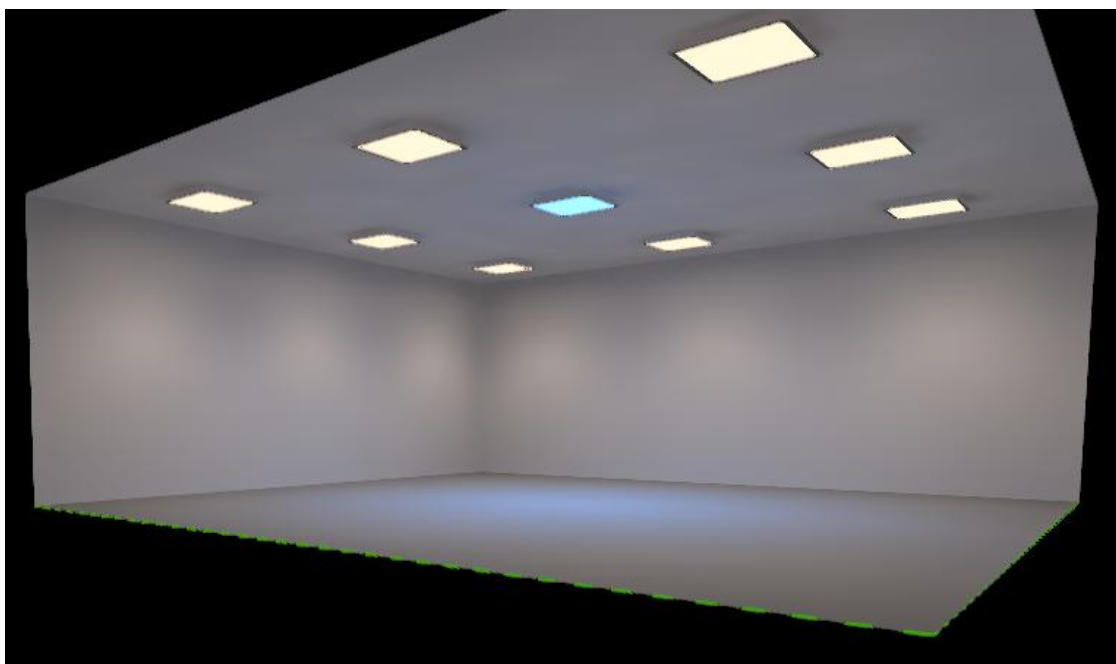


Рисунок 3.11 – Створення центрального острова за допомогою зміни колірної температури світильників

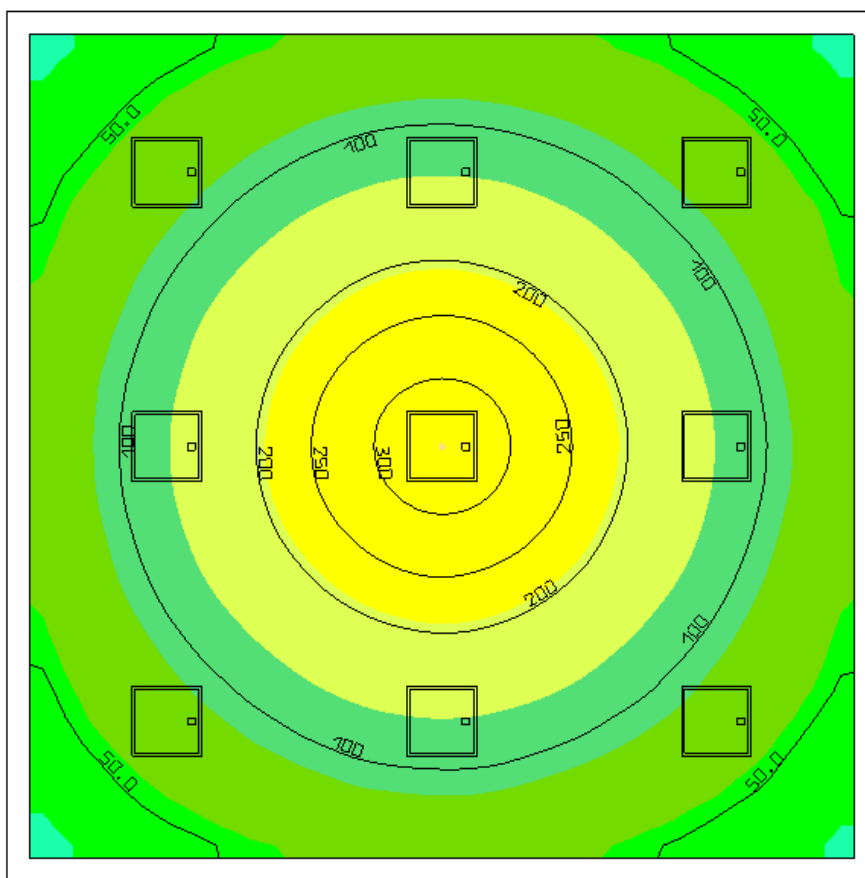


Рисунок 3.12 – Розподіл ізоліній освітлення

3.6 Висновки до розділу 3

1. Визначено, що для спеціалізованих закладів критично важливо розділяти приміщення не лише за нормами освітленості, а й за характером психофізіологічного впливу світла. Виділено окремі вимоги для навчальних класів, кабінетів корекційної роботи, зон відпочинку та спальних приміщень.

2. Для реалізації концепції Human Centric Lighting обрано сучасні світлодіодні панелі з підтримкою технології Tunable White та протоколу керування DALI. Встановлено, що використання світильників з високим індексом кольоропередачі та мінімальним коефіцієнтом пульсації є обов'язковою умовою для запобігання зоровій втоми учнів.

3. Проведене у середовищі DIALux моделювання приміщення ігрової кімнати площею 27 м² показало, що запропонована конфігурація з 6 світильників забезпечує середню освітленість на рівні 460 лк при нормі 400 лк. При цьому досягнуто високої рівномірності освітлення, що повністю відповідає вимогам ДБН.

4. Обґрунтовано та розроблено систему адаптивних світлових сценаріїв, які на базі протоколу DALI та із використанням технології Tunable White, що дозволяють динамічно змінювати параметри світлового середовища відповідно до психофізіологічних потреб учнів, забезпечуючи ефективне керування їхньою увагою та підтримку природних циркадних ритмів.

5. Для кабінетів індивідуальної корекційної роботи запропоновано алгоритм «світлового острова». Він дозволяє за допомогою акцентного освітлення робочої зони та глибокого димування периферії фокусувати увагу дитини на педагогові або навчальному об'єкті, що є особливо ефективним у роботі з дітьми, які мають розлади уваги або гіперактивність.

6. Доведено, що поєднання LED-технологій з інтелектуальним керуванням DALI дозволяє не лише створити комфортне середовище, а й знизити енергоспоживання системи освітлення на 30-50% за рахунок димування та використання датчиків присутності/освітленості.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів і заходи з електробезпеки при експлуатації освітлювальних установок

Розробка заходів з охорони праці для освітнього закладу, що функціонує в режимі цілодобового перебування, ґрунтується на вимогах чинного національного законодавства про працю та безпеку і галузевих нормативних актів, які регулюють безпеку в електроенергетиці. Специфіка об'єкта, де контингент учнів має особливі потреби, вимагає не просто механічного дотримання мінімальних критеріїв, а створення надбезпечного, інженерно-продуманого електричного середовища. У цьому контексті інженерні рішення щодо системи освітлення повинні виступати як превентивний інструмент запобігання травматизму. Це накладає на фахівців обов'язок передбачати не лише очікувані, але й малоймовірні сценарії виникнення небезпеки.

При аналізі умов праці електротехнічного персоналу та умов перебування учнів необхідно першочергово ідентифікувати потенційні шкідливі та небезпечні виробничі фактори, відповідно до загальнодержавних стандартів. Найкритичнішим для електротехнічної спеціальності є ризик ураження електричним струмом. Ця загроза розглядається у двох фундаментальних аспектах. По-перше, прямий дотик до струмопровідних частин, який може виникнути через порушення правил техніки безпеки персоналом під час обслуговування, або, що є неприпустимим, через доступ дітей до неізольованих елементів. Для боротьби з цим, усі доступні елементи повинні мати високий ступінь захисту оболонки. По-друге, непрямий дотик — контакт із металевими корпусами світильників або розподільчих щитів, які опинилися під небезпечним електричним потенціалом внаслідок пошкодження ізоляції. Ця ситуація є найбільш підступною, оскільки вона не має зовнішніх проявів до моменту фактичного контакту. У вологих та агресивних середовищах, наприклад, у технічних приміщеннях чи харчоблоці, цей ризик зростає багаторазово через зниження електричного опору ізоляції обладнання та шкірних покривів людини.

Для мінімізації цих ризиків, правила улаштування електроустановок вимагають впровадження ефективних технічних заходів захисту, ключовим з яких є автоматичне вимкнення живлення у разі аварії. Проект передбачає використання передової системи заземлення, де нульовий захисний провідник і нульовий робочий провідник функціонують роздільно. Це вимагає створення надійної системи захисного заземлення, де всі неструмопровідні металеві частини приєднуються до захисного провідника, створюючи умови для швидкого та надійного спрацювання автоматичних апаратів захисту при виникненні струму короткого замикання на корпус. Додатковим, незамінним заходом, є використання пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ), які здатні відключити мережу при виявленні мінімального диференційного струму витоку. Ці пристрої, з номінальним диференційним струмом спрацювання, що не перевищує загальноприйнятий поріг чутливості, є останньою лінією захисту, яка реагує на пошкодження, що ще не переросло у коротке замикання. Згідно з будівельними нормами, що регламентують проектування електрообладнання, захист за допомогою ПЗВ є обов'язковим для всіх кінцевих споживачів, що забезпечує багаторівневий, інтегрований захист.

Окрім ризиків, пов'язаних з електричним потенціалом, суттєва небезпека виникає при виконанні робіт на висоті. Обслуговування освітлювальних приладів у великих приміщеннях, як-от спортивна чи актова зала, класифікується як роботи підвищеної небезпеки, згідно з правилами виконання робіт на висоті. Це вимагає використання не лише сертифікованих засобів підмошування, але й суворого дотримання організаційних процедур та використання страхувальних систем. Організаційні заходи також включають систематичне навчання персоналу, проведення інструктажів та перевірку знань з електробезпеки, що є основою безпечної експлуатації.

До шкідливих факторів, які безпосередньо впливають на здоров'я, належать чинники, пов'язані з якістю світлового середовища. Хоча сучасні системи прагнуть до ергономічності, критично важливим є усунення пульсації світлового потоку, особливо в умовах тривалого перебування та зорових навантажень. Цей невидимий ефект, спричинений неякісними електронними компонентами, може викликати

хронічну зорову втому, головний біль та зниження психофізіологічної стійкості. Впровадження світлодіодних технологій з високоякісними драйверами дозволяє практично повністю нівелювати цей фактор. Також важливою складовою гігієни праці та навколишнього середовища є утилізація відходів. Перехід на LED-освітлення дозволяє виключити з обігу ртутьвмісні люмінесцентні лампи, що покращує загальну екологічну безпеку та спрощує процедуру поводження з відходами. Таким чином, інженерна модернізація системи освітлення є не лише економічним заходом, але й фундаментальним внеском у безпеку та охорону здоров'я всіх учасників освітнього процесу.

4.2 Організація цивільного захисту та безпека в умовах надзвичайних ситуацій

Питання організації цивільного захисту та забезпечення безпеки учасників освітнього процесу в умовах надзвичайних ситуацій набуло статусу абсолютного пріоритету, згідно з чинним законодавством про цивільний захист. Цілодобовий режим функціонування школи-інтернату та необхідність забезпечення потреб вразливого контингенту учнів вимагають формування багаторівневої, надійної та стійкої системи готовності до НС різного генезису, включаючи пожежі, технологічні аварії та тривалі відключення електроенергії. У всіх цих критичних сценаріях система електроосвітлення є не просто допоміжним елементом, а стає життєво важливою системою безпеки, від надійності якої залежить успішність евакуаційних заходів та збереження життя.

Пожежна безпека тісно пов'язана з електропостачанням, оскільки несправності в електромережі залишаються однією з найбільш поширених причин займань. Тому при проектуванні електромережі школи особлива увага приділяється вибору кабельно-провідникової продукції та їх ізоляційним характеристикам. Для прокладання ліній живлення, особливо на шляхах евакуації, необхідно використовувати кабелі, які відповідають високим вимогам пожежної безпеки: вони повинні мати властивість не поширювати горіння та мати низьке димо- та

газовиділення. Це є критичним, оскільки в умовах пожежі чадний газ та втрата видимості через задимлення становлять більшу небезпеку, ніж саме полум'я. Для критично важливих мереж, що живлять системи оповіщення та аварійне освітлення, необхідно застосовувати вогнестійкі кабелі, які здатні зберігати свою працездатність під час дії високих температур протягом необхідного для евакуації часу.

Центральне місце у системі безпеки посідає аварійне освітлення. Згідно з будівельними нормами, що стосуються систем протипожежного захисту та штучного освітлення, воно має функціональне розділення. Евакуаційне освітлення призначене для безпечного виведення людей з приміщень при раптовому зникненні основного світла, забезпечуючи мінімальну, але достатню освітленість на рівні підлоги. Ця освітленість повинна бути не нижче загальноприйнятого мінімального рівня вздовж осі проходу. Це дозволяє учням, зокрема тим, хто має проблеми з орієнтацією, бачити перешкоди та напрямок руху. Додатково передбачається антипанічне освітлення для великих приміщень, яке створює рівномірний світловий фон, запобігаючи хаотичним рухам та скупченню людей. Його нормована освітленість також відповідає мінімально допустимому рівню для зон відкритого простору. Технічна реалізація системи вимагає використання незалежних джерел живлення — світильників із вбудованими акумуляторними батареями (рисунок 4.1) або централізованого ДБЖ (рисунок 4.2), здатних забезпечити роботу системи протягом нормованого часу.



Рисунок 4.1- Аварійний світильник з вбудованим акумулятором



Рисунок 4.2 – Централізоване ДБЖ

Важливим елементом є також чіткість світлових показників виходу. Для спеціалізованої школи необхідно гарантувати, що ці показники будуть ефективними не тільки в стандартних умовах, але й в умовах задимлення та для осіб з обмеженими можливостями сприйняття. Сучасні світлодіодні показники повинні мати високу контрастність та бути інтегровані з системою пожежної сигналізації.

В умовах зовнішніх загроз, надійна експлуатація захисних споруд є невід'ємною частиною функціонування школи. Згідно з будівельними нормами, що стосуються захисних споруд цивільного захисту, освітлення в укриттях проектується за принципом абсолютної автономності з двома незалежними джерелами живлення. Резервне освітлення повинно забезпечувати комфортні умови для тривалого перебування, тому до спектрального складу світла також висуваються вимоги, що мінімізують психологічний дискомфорт.

Для захисту всієї інженерної мережі від природних та техногенних аварій, проект включає систему блискавкозахисту, яка регламентується державними стандартами щодо блискавкозахисту. Вона складається із зовнішнього захисту та внутрішнього – пристроїв захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП). Встановлення ПЗІП є інженерною необхідністю для захисту чутливої електроніки, такої як LED-драйвери та системи керування. Це гарантує, що інвестиції у сучасне освітлювальне обладнання будуть захищені від руйнівного впливу стрибків напруги, тим самим забезпечуючи безперебійну роботу систем безпеки у найвідповідальніші моменти. Комплексне впровадження цих інженерних та організаційних заходів формує стійку, безпечну та адаптовану до будь-яких надзвичайних ситуацій інфраструктуру.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу нормативних документів встановлено, що на відміну від типових шкіл, спеціалізовані заклади потребують цілодобового та адаптивного освітлення. Обґрунтовано, що параметри світла тут мають враховувати не лише норми ДБН, а й психофізіологічний стан учнів, схильність до сенсорного перевантаження та потребу в підтримці біологічних ритмів.

2. Доведено, що оптимальним рішенням для модернізації є перехід на інтелектуальні LED-системи. Вибір технології Tunable White у поєднанні з цифровим протоколом DALI визначено як ключову умову для створення динамічного освітлення, що не має шкідливих пульсацій та дозволяє плавно змінювати колірну температуру.

3. Теоретично обґрунтовано та запропоновано технічні рішення розробки освітлювальних установок, орієнтованих на людину. Це дозволяє синхронізувати штучне світло з природним добовим циклом, що сприяє активізації когнітивних процесів учнів у першій половині дня та природному заспокоєнню у вечірній час.

4. За допомогою середовища DIALux evo верифіковано проєктні рішення для основних зон закладу. Розрахунки підтвердили досягнення нормованих рівнів освітленості та рівномірності розподілу освітлення, що створює стабільне візуальне поле без різких контрастів та тіней.

5. Розроблено унікальний сценарій для кабінетів індивідуальної корекції. Завдяки створенню яскравого акценту над робочою зоною та димуванню периферії вдалося реалізувати метод світлової ізоляції, який допомагає дітям з розладами уваги краще фокусуватися на навчальному матеріалі.

6. Підтверджено, що використання світильників з високим індексом кольоропередачі та мінімальним коефіцієнтом пульсації є ефективним засобом профілактики зорової втоми та підтримки нервової системи учнів у закладах з тривалим перебуванням.

7. Встановлено, що інтеграція датчиків присутності та автоматизованих сценаріїв димування дозволяє знизити споживання електроенергії системою

освітлення на 30-40%. Це забезпечує швидку окупність системи та її відповідність сучасним стандартам енергозбереження.

8. Розроблені методики та сценарії освітлення мають універсальний характер і можуть бути масштабовані на інші інклюзивні та реабілітаційні центри. Створена модель є фундаментом для подальшої інтеграції в автоматизовані системи керування будівлею.

9. Визначено ключові заходи із забезпечення безпечних умов праці та цивільного захисту персоналу й учнів спеціалізованого закладу в надзвичайних ситуаціях.

Використана література

1. ДБН В.2.5 – 28 – 2018. Природне і штучне освітлення.– К.: Мінрегіон України, 2018.– 137 с.
2. ДБН В.2.2-3:2018 "Заклади освіти"..– К.: Мінрегіон України, 2018.– 57 с.
3. Санітарний регламент для закладів загальної середньої освіти. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1111-20#Text>
4. Державні санітарні правила і норми влаштування, утримання загальноосвітніх навчальних закладів та організації навчально-виховного процесу ДСанПіН 5.5.2.008-01. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0063588-01#Text>
5. ESYLUX CELINE-2 PNL 600 DDP OP 3800 8TW IP20 ELC. URL: <https://www.esylux.com/products/indoor-lighting/recessed-lights/celine-2/eq10132322>
6. Tridonic DALI MSensor 02 5DPI 41rs. URL: https://www.tridonic.com/en/int/product/28000894?srsId=AfmBOope_P6-O39NEM5TKY00Gvet14Np1TnhUouNTvYsEXXESX7UegEd&tab=0
7. DALI Alliance. URL: <https://www.dali-alliance.org/alliance/>
8. Бедрій І.Я., Нечай В.Я. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник. – Львів: Манголія 2006, 2007. 400 с.
9. Кизима М.В. Забезпечення оптимального світлового середовища у спеціалізованих закладах освіти / Міжнародна науково-технічна конференція „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (2025)// Матеріали МНТК „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, Тернопіль, 28-29 травня 2025 року. 2025. С. 251.
10. ДБН В.2.5-56-2014 “Системи протипожежного захисту” URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/dbn_v_2_5_56_2014_sistemi_protipozhezhnogo_zakhistu/1-1-0-1204
11. Коваль, В. П., Тарасенко, М. Г., Буняк, О. А., & Мовчан, Л. Т. (2024). Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів

другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

12. Andriychuk, V., Kostyk, L., Filiuk, Y., Nakonechnyi, M., & Babiuk, S. (2024). Microprocessor Control of the Electric Drive of Variable Radiation Installation and Ensuring of Operation Reliability. *Science and Innovation*, 20(5), 62-70.

13. Філюк, Я., Андрійчук, В., Наконечний, М., Костик, Л., & Осадца, Я. (2025). Аналіз параметрів імпульсного живлення та потоку випромінювання світлодіодних джерел світла. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 349(2), 28-32.

14. Андрійчук, В. А., Костик, Л. М., Наконечний, М. С., & Філюк, Я. О. (2024). Кінетика спадання світлового потоку при імпульсному живленні світлодіодів. *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи “*, 5-6.

15. Киянчук, Т. Л., & Костик, Л. М. (2024). Налаштування контролю інтелектуальної системи керування освітленням. *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи “*, 41-42.

16. Костик, Л. М., & Каплан, Ю. Ю. (2023). Підвищення енергоефективності освітлювальних установок шляхом впровадження Smart технологій. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “*, 256-257.