

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ,  
ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

КАФЕДРА СВІТЛОТЕХНІКИ І ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

**РОЗРОБКА АДАПТИВНОЇ  
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ**

**Бакалаврська кваліфікаційна робота**

**Здобувач:**

Андрій ЦИБУЛЬНИК

гр. СДС 2022-1

**Керівник:**

Віталій ГЕРАСИМЕНКО

к.т.н., доцент

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра світлотехніки і джерел світла

Освітній рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Світлотехніка та дизайн світлового середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СДС

Віталій ГЕРАСИМЕНКО

«22» червня 2026 р.

## ЗАВДАННЯ

### до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Цибульник Андрій Вікторович

**1 Тема роботи:** Розробка адаптивної системи керування освітленням

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Герасименко В. А., к.т.н., доцент кафедри СДС

затверджені наказом університету № 440-03 від «22» травня 2026 р.

**2 Строк подання студентом бакалаврської кваліфікаційної роботи:**  
20.06.2026 р.

**3 Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:**

Матеріали переддипломної практики. Структура систем керування освітленням.

**4 Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи** (перелік питань, які потрібно розробити):

**4.1 Аналітична частина** (огляд, аналіз, оцінка) Аналіз технологічних рішень при проєктуванні систем керування. Огляд стандартів та протоколів керування в освітлювальних системах.

**4.2 Світлотехнічна частина** (вибір параметрів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення) Обґрунтування та вибір периферійного обладнання. Реалізація та архітектура мікроконтролерної системи автоматизації.

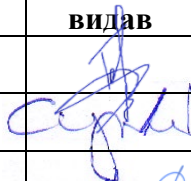
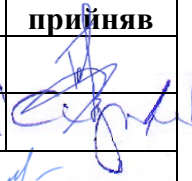
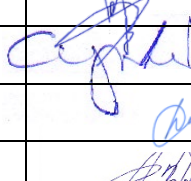
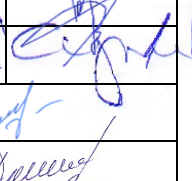
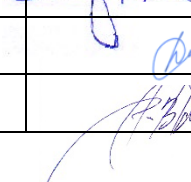
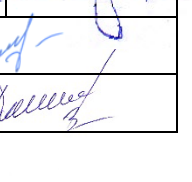
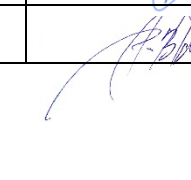
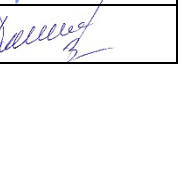
**4.3 Електротехнічна частина** (напрями удосконалення, результати проведеної роботи) Синтез алгоритмічної структури та програмного забезпечення.

#### 4.4 Охорона праці.

#### 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових слайдів):

Актуальність, мета та задачі роботи. Розвиток систем адаптивного освітлення. Персоналізація в адаптивних системах освітлення. Структура адаптивної системи освітлення. Електрична схема. Алгоритм роботи. Висновки проведеної роботи.

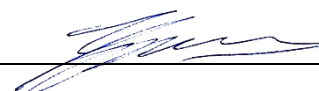
#### 6 Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

| Розділ          | Ім'я, прізвище та посада консультанта | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|-----------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |                                       | завдання видав                                                                      | завдання прийняв                                                                    |
| Основна частина | Віталій ГЕРАСИМЕНКО, доцент           |  |  |
| Охорона праці   | Яків СЕРІКОВ, доцент                  |  |  |
| Антиплагіат     | Олена ДІДЕНКО, ст. викладач           |  |  |
| Нормоконтроль   | Роман ВОРОНОВ, доцент                 |  |  |

#### 7. Дата видачі завдання 11.05.2026 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи        | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Аналітична частина                                       | 11.05.26 – 23.05.26           |          |
| 2     | Світлотехнічна частина                                   | 24.05.26 – 07.05.26           |          |
| 3     | Електротехнічна частина                                  | 01.06.26 – 10.06.26           |          |
| 4     | Охорона праці                                            | 08.06.26 – 15.06.26           |          |
| 5     | Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу | 15.06.26 – 20.06.26           |          |
| 6     | Підготовка доповіді та презентації                       | 15.06.26 – 20.06.26           |          |

Здобувач  Андрій ЦИБУЛЬНИК

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи  Віталій ГЕРАСИМЕНКО

## АНОТАЦІЯ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто комплексний процес розробки, апаратного проєктування та схемотехнічного моделювання інтелектуальної системи адаптивного керування освітленням на базі технологій Інтернету речей (IoT).

**У першій частині роботи** проведено глибокий аналітичний огляд сучасного стану смарт-систем зовнішнього та внутрішнього освітлення. Досліджено технології детекції присутності (піроелектричні сенсори, мікрохвильові радари) та комунікаційні мережі зв'язку. Виконано порівняльний аналіз ключових цифрових протоколів керування освітленням.

**У другій частині роботи** формалізовано математичні моделі кількісної оцінки візуального комфорту та ймовірності присутності. Здійснено схемотехнічне проєктування мікропроцесорного вузла керування.

**У третій частині роботи** синтезовано алгоритмічну структуру та розроблено програмне забезпечення мікроконтролера мовою C. Здійснено віртуальне прототипування та успішну симуляцію роботи апаратно-програмного комплексу.

**У розділі «Охорона праці»** ідентифіковано шкідливі та небезпечні виробничі фактори на робочому місці інженера-проектанта систем освітлення.

**Основними результатами роботи** є створення готової до практичної реалізації моделі адаптивного системи керування освітленням, яка гнучко поєднує мультисенсорний моніторинг простору з жорсткими програмними алгоритмами енергозбереження.

**Ключові слова (5-6 слів):** адаптивне освітлення, мікроконтролер, цифрові протоколи, Інтернет речей, інфрачервоний датчик.

**Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить:** сторінок – 78; формул – 8; рисунків – 28; таблиць – 4; літературних джерел – 30; слайдів – 12.

## ЗМІСТ

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП_____                                                                                   | 6  |
| 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА _____                                                                   | 8  |
| 1.1 Сучасні тенденції розвитку адаптивних систем освітлення ____                             | 8  |
| 1.2 Аналіз технологічних рішень при проектуванні систем<br>керування _____                   | 12 |
| 1.3 Стандарти та протоколи керування в освітлювальних системах                               | 20 |
| 2 СВІТЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА _____                                                               | 28 |
| 2.1 Персоналізація світлового середовища в системах керування _                              | 28 |
| 2.2 Використання датчиків присутності в адаптивних системах<br>освітлення _____              | 31 |
| 2.3 Схемотехнічна реалізація та архітектура мікроконтролерної<br>системи автоматизації _____ | 33 |
| 2.4 Обґрунтування та вибір периферійного обладнання _____                                    | 41 |
| 3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА _____                                                              | 55 |
| 3.1 Синтез алгоритмічної структури та програмного забезпечення                               | 55 |
| 3.2 Віртуальне прототипування та програмно-апаратне<br>моделювання системи керування _____   | 59 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ _____                                                                        | 63 |
| 4.1 Організаційно-правове забезпечення охорони праці _____                                   | 63 |
| 4.2 Розробка заходів з охорони праці _____                                                   | 64 |
| 4.3 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів _____                                 | 66 |
| 4.4 Розрахунок параметрів захисного заземлювального пристрою _                               | 69 |
| 4.5 Забезпечення пожежної безпеки об'єкта _____                                              | 71 |
| 4.6 Висновки до розділу _____                                                                | 73 |
| ВИСНОВКИ _____                                                                               | 74 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ _____                                                             | 75 |

## ВСТУП

В епоху глобальної цифровізації, стрімкого розвитку інфраструктури «розумних міст» та концепції Інтернету речей (IoT), інтелектуальні системи автоматизації стають невід'ємною складовою сучасного архітектурного простору. За даними міжнародних досліджень, на потреби штучного освітлення припадає близько 19 % світового споживання електроенергії. В умовах дефіциту енергоресурсів та посилення екологічних вимог щодо зниження викидів парникових газів, підвищення енергоефективності світлотехнічних установок є критично важливим економічним та екологічним імперативом.

Водночас сучасна парадигма проєктування відходить від жорстких алгоритмів економії на користь концепції людино-орієнтованого освітлення. Це вимагає створення систем, які не просто вмикають чи вимикають світло, а динамічно адаптують світлове середовище до фізіологічних потреб людини, враховуючи просторову активність, рівень природної інсоляції та індивідуальні критерії візуального комфорту. Незважаючи на наявність на ринку промислових стандартів (DALI, KNX), завдання розробки локальних, економічно доступних та надійних мікроконтролерних систем адаптивного керування залишається актуальною науково-практичною задачею.

**Актуальність роботи** зумовлена необхідністю впровадження енергоефективних та інтелектуальних рішень у сучасну інфраструктуру для забезпечення сталого розвитку урбанізованих та архітектурних просторів.

**Мета бакалаврської кваліфікаційної роботи** полягає у розробці апаратно-програмного комплексу інтелектуальної системи адаптивного керування освітленням, здатної оптимізувати енергоспоживання за умови автоматичного підтримання заданих параметрів візуального комфорту користувачів.

**Об'єкт роботи:** процес автоматизованого адаптивного керування режимами роботи світлотехнічного обладнання.

**Предмет дослідження:** апаратне та програмне забезпечення мікроконтролерної системи моніторингу та керування освітленням простору.

**Задачі бакалаврської кваліфікаційної роботи:**

1. Виконати аналітичний огляд сучасного стану, топологій та цифрових протоколів систем інтелектуального керування освітленням.
2. Здійснити обґрунтований вибір елементної бази та виконати схемотехнічне проектування мікропроцесорного вузла керування.
3. Розробити алгоритмічну структуру для мікроконтролера.
4. Розробити комплекс заходів з охорони праці під час проектування та експлуатації системи.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Сучасні тенденції розвитку адаптивних систем освітлення

На тлі інтенсивного соціально-економічного поступу, переходу до принципів «зеленої» економіки та підвищення стандартів якості життя спостерігається стрімке зростання вимог суспільства до розумних систем як муніципального, так і побутового освітлення. Значення світлотехніки у глобальному розвитку інфраструктури є загальноновизнаним. Зважаючи на те, що активність людей у темну пору доби є невід'ємною складовою сучасного ритму життя, зовнішнє освітлення відіграє критично важливу роль. Воно не лише забезпечує видимість у громадських місцях вночі, але й формує сприятливе, психологічно комфортне візуальне середовище в житлових зонах, що спирається на принципи людино-орієнтованого освітлення [1].

Проте актуальний стан більшості традиційних мереж міського освітлення характеризується низкою суттєвих недоліків. Серед них виділяються низький ступінь автоматизації, превалювання ручного або застарілого керування світловими приладами, надмірне споживання електроенергії, часті збої в роботі ліній живлення, а також низька оперативність реагування ремонтних служб через відсутність зворотного зв'язку. Усе це свідчить про недостатній рівень інтелектуалізації інфраструктури. Разом з тим, соціум уже не здатний повноцінно функціонувати без надійного штучного світла. Сьогоднішні урбаністичні вимоги диктують необхідність створення ергономічного середовища, що вкотре підкреслює гостру потребу у впровадженні інновацій у світлотехнічній галузі, зокрема шляхом використання сучасних протоколів керування на кшталт DALI для локальних об'єктів або масштабованих бездротових мереж.

Функціонування мереж зовнішнього освітлення має нерозривний зв'язок із загальною життєдіяльністю міського простору. Раціонально спроектована світлотехнічна інфраструктура здатна надавати послуги найвищої якості, підтримуючи безпечний та впорядкований перебіг нічної



активності мегаполісу, а також гарантуючи здоров'я та безпеку всіх учасників дорожнього руху. Як фундаментальний компонент міського благоустрою, ця система виконує ключову місію із захисту та навігації населення. Це вимагає її постійної адаптації до урбаністичної еволюції та безперервної інтеграції процесів інтелектуальної модернізації. При цьому особливу увагу приділяють біологічному впливу спектрального складу світла на циркадні ритми людини [1], що дозволяє мінімізувати негативний вплив нічного освітлення на фізіологію.

Окрім цього, реформування міських світлотехнічних комплексів має багатоаспектне значення. По-перше, постійне зростання суспільних запитів зумовлює потребу в інтеграції смарт-функцій [2], які б забезпечували автономне адаптивне регулювання: автоматичне ввімкнення освітлення з настанням сутінків та його вимкнення на світанку. Це дозволяє мінімізувати ручну працю та повною мірою задовольнити потреби громади. По-друге, перехід до розумного керування є потужним інструментом зниження енергоспоживання. Сучасні смарт-системи димірування нерозривно пов'язані зі світлодіодними джерелами світла і виступають фундаментом світових концепцій «Smart City» та екологічної стійкості. Світлодіодні технології володіють унікальними перевагами: високою світловою віддачею, експлуатаційною безпекою, екологічністю, тривалим терміном служби, миттєвою швидкодією та відмінним індексом кольоропередачі, поступово повністю замінюючи традиційні газорозрядні лампи.

Ключовою відмінністю системи смарт-освітлення є здатність до гнучкого, інтелектуального керування рівнем яскравості. Для прикладу, у години мінімального трафіку базовий рівень освітленості на міських дорогах може підтримуватися на зниженому рівні. Проте, у разі наближення транспортного засобу чи пішохода до певної ділянки, система автоматично підвищує яскравість світлового потоку, а після відновлення звичайних умов – повертає її до фонових значень. Такий алгоритм запобігає нераціональному

марнотратству ресурсів, суттєво зменшує загальне споживання електроенергії та одночасно гарантує комфорт і безпеку мешканців.

По-третє, адаптивна система освітлення громадських просторів має бути оснащена точними функціями геопозиціювання та віддаленого управління. Завдяки безперервній еволюції інформаційних технологій з'явилася можливість реалізувати високоточну діагностику кожного вузла мережі. Це забезпечує миттєву передачу даних про аварії чи збої до диспетчерських центрів, що суттєво оптимізує роботу обслуговуючого персоналу. Своєчасний моніторинг несправних світильників та ліній електропередач є запорукою підтримки максимально комфортних умов життя містян.

Незалежно від першочергових мотивів – чи то стимулювання економічного зростання через енергозбереження, чи підвищення повсякденного комфорту – впровадження інтелектуальних архітектур є об'єктивною необхідністю. Сучасні реалії, посилені розвитком технологій Інтернету речей (IoT), периферійних (Edge) та хмарних обчислень, а також розгортанням мереж 5G, створюють ідеальні передумови для реалізації повноцінних адаптивних освітлювальних комплексів [2].

Справжній прорив у наукових дослідженнях міських смарт-систем стався в контексті становлення концепції Інтернету речей. Фундаментальна сутність IoT полягає в безперервному обміні даними між сенсорними пристроями та глобальною мережею, що знаходить широке застосування в інфраструктурі «розумних» міст і будівель. Саме розвиток IoT-інфраструктури забезпечив міські системи освітлення необхідним технологічним базисом для їхньої глибинної модернізації [2]. На рис. 1.1 наведено узагальнену структурну схему, яка застосовується під час проєктування сучасних адаптивних систем освітлення на базі технологій Інтернету речей.

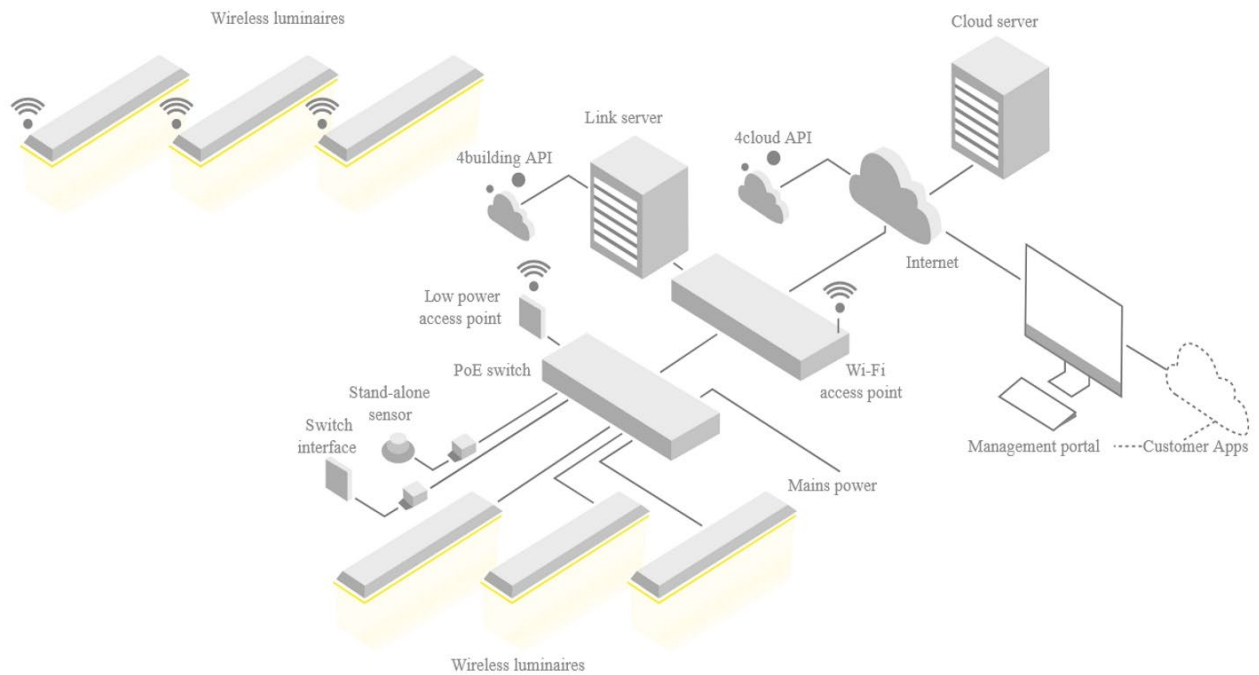


Рисунок 1.1 – Базова архітектура смарт-системи зовнішнього освітлення на основі технологій IoT

Варто відзначити, що інтерес наукової спільноти до проблематики інтелектуалізації муніципального освітлення неухильно зростає. Наприклад, у роботі [3] обґрунтовано доцільність застосування комунікаційної технології RS-SI для надійної реалізації адаптивного керування режимами роботи світильників. Автори дослідження [4] на практиці підтвердили суттєве зниження експлуатаційних витрат та обсягів споживаної електроенергії після оптимізації освітлення. Крім класичних досліджень, найновіші праці фокусуються на глибокій інтеграції освітлювальних приладів з міськими сенсорними вузлами. Керовані IoT смарт-системи вуличного освітлення [2] стрімко еволюціонують від простих енергоощадних рішень до багатофункціональних екологічних платформ, які збирають дані про трафік у реальному часі та допомагають адаптувати міське середовище для сталого розвитку.

## 1.2 Аналіз технологічних рішень при проєктуванні систем керування

Головним завданням технологій виявлення руху в системах розумного освітлення є фіксація присутності пішоходів або транспортних засобів у зоні дії світильника та миттєва передача керуючого сигналу до контролера. Для вирішення цього завдання в інженерній практиці найчастіше застосовують електромагнітні петлі (індукційні датчики), пасивні інфрачервоні сенсори (PIR), мікрохвильові радары на основі ефекту Доплера та системи відеоаналітики.

Принцип дії термоперетворювальних інфрачервоних сенсорів (PIR) ґрунтується на використанні піроелектричного ефекту. Суть цього фізичного явища полягає у зміні спонтанної поляризації певних анізотропних кристалічних матеріалів (найчастіше – титанату алюмінію-кобальту) під впливом температурних коливань. Конструктивно такий кристал має дві протилежні площини, на які подається електричний заряд різної полярності, причому верхня грань вкривається спеціальним поглинальним шаром чорного кольору. Коли на цю поверхню потрапляє теплове інфрачервоне випромінювання, вона нагрівається. Виникла різниця температур  $\Delta T$  провокує мікроскопічні зсуви атомів усередині кристалічної ґратки, що генерує заряд спонтанної поляризації. У результаті між верхньою та нижньою гранями кристала виникає електрична напруга  $\Delta U$ .

Зважаючи на базові фізичні принципи роботи, PIR-датчик здатен реагувати виключно на рухомі об'єкти, теплове випромінювання яких корелює з температурою людського тіла. З огляду на це, ефективність його функціонування критично залежить від температурного фону навколишнього середовища. Якщо температурний контраст між об'єктом (наприклад, корпусом автомобіля) і фоном є мінімальним, детекція стає ускладненою або неможливою. У сучасних адаптивних системах освітлення цей недолік нівелюється шляхом комплексування PIR-сенсорів з іншими датчиками (наприклад, мікрохвильовими), створюючи мультисенсорні вузли. Такі вузли здатні надійно передавати телеметричні дані по дротових протоколах (зокрема

DALI чи KNX) або через бездротові IoT-мережі безпосередньо до ядра системи управління.

Алгоритм детекції реалізується наступним чином. За відсутності джерел теплового випромінювання заряди на обох чутливих елементах сенсора знаходяться в стані рівноваги, струм у колі дорівнює нулю, а вихідний сигнал відсутній. Коли в зону видимості потрапляє інфрачервоне джерело, але воно залишається нерухомим, на обидва піроелектричні елементи надходить ідентична кількість теплової енергії з протилежними знаками. Внаслідок цього фотоструми компенсують один одного. Проте, як тільки людина починає рухатися, перетинаючи оптичні зони чутливості датчика, баланс ІЧ-випромінювання порушується. Фотоструми перестають повністю компенсуватися, що викликає появу слабкого імпульсу напруги на виході приладу.

Важливою характеристикою PIR-сенсорів є їхня стійкість до повільних змін природної інсоляції. Сонячне світло, яке поступово змінює свою інтенсивність, створює симетричне нагрівання елементів, що призводить до повної компенсації сигналів у колі. Крім того, низькочастотний відгук приладу (зазвичай менше 10 Гц) робить його нечутливим до подібних температурних дрейфів, а вузький оптимізований спектральний діапазон (5–15 мкм) ефективно відсікає оптичні завади.

Сам по собі піроелектричний кристал генерує надзвичайно слабкий сигнал, оскільки енергія ІЧ-випромінювання від людини, спричинена повільним рухом, є мінімальною. Без застосування додаткової оптики такий датчик має низьку чутливість, значну затримку спрацьовування, а його радіус дії не перевищує 2 метрів, що є абсолютно недостатнім для реальних завдань освітлення.

Для кардинального збільшення дальності дії необхідно підвищити співвідношення сигнал/шум сприйнятого теплового випромінювання. На практиці це завдання вирішується за допомогою інтеграції мультисегментної лінзи Френеля. Вона виготовляється зі спеціального поліетилену і

встановлюється безпосередньо перед сенсором, виконуючи роль оптичного фільтра: лінза вільно пропускає лише ІЧ-хвилі цільового діапазону (характерного для людини), ефективно пригнічуючи теплові шуми з інших діапазонів середовища. Використання масиву лінз Френеля дозволяє розширити ефективну дальність детекції рухомих об'єктів до 10 метрів і більше, роблячи ці сенсори енергоефективним фундаментом сучасних архітектур розумного освітлення [5].

Мікрохвильові датчики руху, що функціонують на базі ефекту Доплера (також відомі як радіолокаційні детектори безперервного випромінювання), забезпечують високу точність фіксації просторового зміщення та кінематичних параметрів об'єктів. В інженерній практиці проєктування систем автоматизації зовнішнього освітлення найчастіше застосовуються три стандартизовані частотні діапазони: *X*-діапазон (10,525 ГГц), *K*-діапазон (24,125 ГГц) та *Ka*-діапазон (33,1 ГГц). Для пристроїв першого типу максимальна межа вимірюваних швидкостей зазвичай охоплює від 200 до 300 км/год. Системи, що працюють у більш високочастотних спектрах, відрізняються зниженою потужністю випромінювання та звуженою зоною чутливості, проте демонструють суттєво вищу просторову роздільну здатність і значну стійкість до сторонніх електромагнітних завад.

Фізичний механізм роботи такого детектора полягає у безперервному генеруванні монохроматичного високочастотного сигналу за допомогою приймально-передавального антенного модуля. Під час взаємодії мікрохвильового променя з ціллю відбувається відбиття електромагнітної хвилі, причому частота ехо-сигналу зазнає трансформації залежно від вектора руху об'єкта (рис. 1.2). За умови абсолютної нерухомості цілі у зоні покриття датчика, частотні характеристики випроміненої та відбитої хвиль залишаються ідентичними. Якщо ж швидкість об'єкта спрямована у бік радіолокаційного вузла, частота відбитого сигналу пропорційно зростає, перевищуючи базове значення. Навпаки, у разі віддалення об'єкта від джерела випромінювання спостерігається відповідне зниження частоти ехо-сигналу.

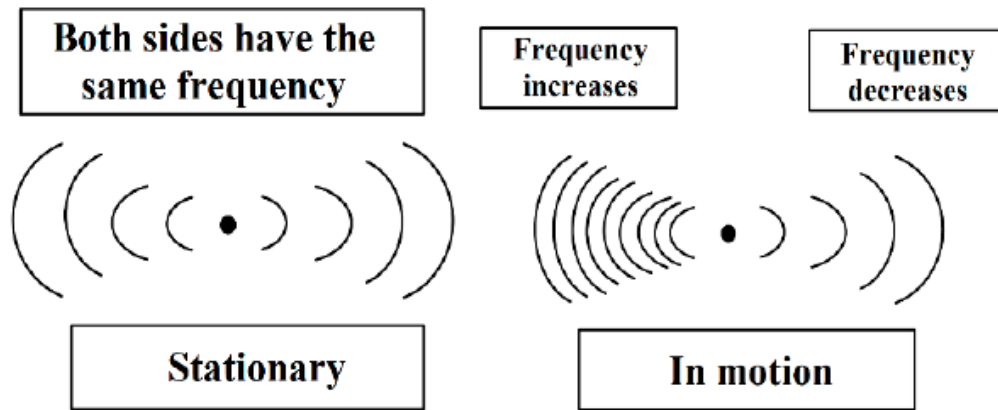


Рисунок 1.2 – Принципова схема формування доплерівського зсуву частоти під час детекції рухомих об'єктів

Математично цей процес описується прямою залежністю доплерівського зсуву від швидкості цілі. Аналіз таких частотних флуктуацій дозволяє мікропроцесорному ядру смарт-системи не лише фіксувати факт присутності, а й визначати вектор руху транспортних засобів. Незважаючи на беззаперечну ефективність, мікрохвильовим радарам притаманні певні апаратні обмеження щодо максимального радіуса дії та граничної швидкості однозначного вимірювання, які зумовлені фізичним затуханням сигналу. Тим не менш, завдяки повній незалежності від температурного фону навколишнього середовища, доплерівські радары є оптимальним рішенням для зовнішніх вуличних магістралей. Зібрані ними телеметричні дані ефективно опрацьовуються контролерами та передаються через цифрові шини управління (зокрема по протоколах DALI або KNX), дозволяючи реалізувати предиктивне регулювання яскравості на шляху прямування автомобільного потоку [6].

Обмін телеметричною інформацією та керуючими сигналами між апаратними вузлами системи може будуватися на фізичних (дротових) або радіочастотних (бездротових) каналах зв'язку. Хоча класичні дротові шини управління, зокрема спеціалізовані протоколи DALI або системи автоматизації будівель KNX, забезпечують еталонну стабільність, високу пропускну здатність та мінімальний час відгуку без електромагнітних

перешкод, їх імплементація в масштабах міської інфраструктури пов'язана зі значними ускладненнями. Розгортання кабельних ліній вимагає суттєвих капіталовкладень та масштабних земляних робіт. Натомість бездротові архітектури пропонують вищий рівень масштабованості та адаптивності, дозволяючи оперативно реконфігурувати мережу відповідно до поточних урбаністичних потреб.

У типових інженерних сценаріях максимальна дистанція комунікації між датчиком та індивідуальним драйвером світильника не перевищує 100 метрів. Аналіз сучасних протоколів бездротового зв'язку малого радіуса дії (табл. 1.1) демонструє, що технологія ZigBee володіє найбільш збалансованими техніко-економічними показниками. Вона поєднує достатню дальність передачі сигналу з екстремально низьким енергоспоживанням, здатністю підтримувати масивні кластери вузлів та низькою вартістю апаратної реалізації. Альтернативні стандарти поступаються або за показниками автономності та вартості (Wi-Fi), або за радіусом дії та місткістю абонентської бази (Bluetooth, NFC).

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз бездротових технологій зв'язку малого радіуса дії для систем IoT

| Характеристика / Протокол    | ZigBee        | Wi-Fi        | Bluetooth          | UWB               | NFC         |
|------------------------------|---------------|--------------|--------------------|-------------------|-------------|
| Орієнтовна вартість модуля   | 4 \$          | 25 \$        | 5 \$               | 20 \$             | 4 \$        |
| Рівень енергоспоживання      | Низький       | Високий      | Середній / Високий | Низький           | Високий     |
| Ефективна дальність дії      | 10-100 м      | 0-100 м      | 0-10 м             | 1-10 м            | 0-0,2 м     |
| Пропускна здатність          | 10-250 Кбіт/с | до 54 Мбіт/с | 1 Мбіт/с           | 53,3-80 Мбіт/с    | 424 Кбіт/с  |
| Максимальна кількість вузлів | 65000         | ~20          | до 8               | не регламентовано | точка-точка |

Побудований на базі міжнародної специфікації IEEE 802.15.4, протокол ZigBee [7] належить до класу енергоефективних персональних радіомереж



(WPAN). Упровадження комірчастої (mesh) маршрутизації дозволяє кожному локальному контролеру світильника обмінюватися даними з множиною сенсорів, що створює гнучку розподілену інфраструктуру. Окрім вільного додавання та вилучення вузлів без зупинки системи, до ключових переваг стандарту належать: ультранизке споживання енергії, високий рівень криптографічного захисту, апаратна надійність та робота у неліцензованих частотних діапазонах. Низька швидкість передачі даних у цьому контексті є інженерною перевагою, оскільки вона оптимізує енерговитрати мікроконтролерів, не перевантажуючи канал зайвим трафіком.

Мережевий стек ZigBee [7] підтримує три фундаментальні топології організації зв'язку: радіальну («зірка»), ієрархічну (деревоподібну) та повнозв'язну комірчасту (рис. 1.3).

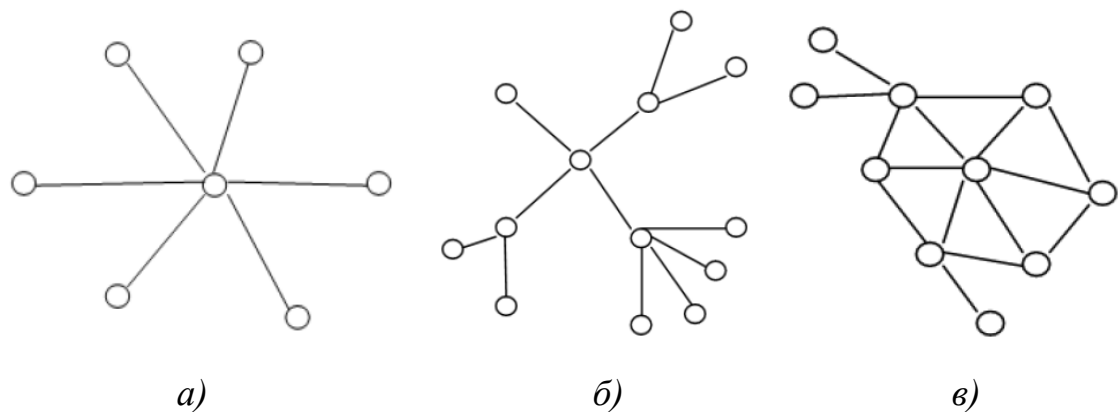


Рисунок 1.3 – Базові архітектурні топології бездротових сенсорних мереж стандарту ZigBee (*а – радіальна; б – деревоподібна; в – комірчаста*)

Радіальна топологія відрізняється простотою розгортання та економічністю компонентів, проте її недоліком є вразливість центрального вузла-координатора та обмежена зона радіопокриття. Деревоподібна архітектура масштабує радіус дії системи завдяки проміжним маршрутизаторам, але має високу чутливість до відмов магістральних ліній зв'язку. Найоптимальнішою для вуличного освітлення є комірчаста (mesh) топологія. Незважаючи на складніші алгоритми маршрутизації, вона забезпечує найвищий рівень відмовостійкості. У разі виходу з ладу одного

світильника система автоматично перенаправляє пакети даних через сусідні активні вузли.

Для організації магістрального зв'язку між сегментними концентраторами та центральною хмарною платформою застосовуються технології глобального радіуса дії. Визначальним стандартом тут є мережа NB-IoT [8], що належить до класу LPWAN (енергоефективних мереж широкого радіуса дії). Завдяки високій проникаючій здатності радіосигналу та гарантованій мінімальній затримці, інтегрований у стільникову інфраструктуру NB-IoT ідеально відповідає вимогам безперервного телеметричного моніторингу систем освітлення.

Водночас еволюція інфраструктури від звичайних ліхтарів до багатофункціональних «розумних опор» кардинально змінює вимоги до центрального каналу зв'язку. Інтеграція додаткових модулів – станцій контролю якості повітря, точок доступу Wi-Fi, зарядних пристроїв для електромобілів та камер відеоаналітики – генерує масивні потоки даних (Big Data). З огляду на це, забезпечення високої швидкості та пропускну здатності на рівні магістрального зв'язку (із застосуванням технологій 4G/LTE та 5G) стає критичним фактором для успішної інтеграції систем освітлення у глобальну цифрову екосистему «розумного міста».

Серед існуючих стандартів дротової комунікації технологія гігабітних пасивних оптичних мереж (GPON) виступає оптимальним рішенням для побудови магістрального рівня обміну даними в архітектурі інтелектуальних світлотехнічних комплексів. Головною її перевагою є безпрецедентно висока пропускна здатність та максимальна ефективність трансляції інформації. У своїй базовій конфігурації GPON гарантує асиметричну швидкість передачі: до 2,488 Гбіт/с у низхідному напрямку (від магістралі до кінцевого вузла) та 1,233 Гбіт/с у висхідному (від контролера до сервера управління).

Використання оптичних ліній зв'язку забезпечує надійне передавання телеметричних даних на значні відстані, що критично підвищує завадостійкість та інформаційну безпеку міської інфраструктури. Окрім цього,

інфраструктура GPON характеризується топологічною гнучкістю та здатністю підтримувати мультисервісні потоки. На практиці оптичні мережеві термінали (ONT), розташовані в шафах управління зовнішнім освітленням або безпосередньо всередині багатофункціональних «розумних» опор, виконують роль високошвидкісних шлюзів. Вони конвертують масивний оптичний трафік у цифрові сигнали локальних стандартів диспетчеризації (таких як DALI, DMX512 або KNX), забезпечуючи безшовну взаємодію хмарних серверів із кінцевими світлодіодними драйверами.

Як передовий стандарт пасивних інтегрованих мереж, технологія GPON формує фундаментальний технічний базис для надання ширококутових послуг і комплексної цифровізації урбаністичного простору. Розгортання таких архітектур вимагає суворого дотримання апаратних вимог та прецизійного розрахунку оптичних бюджетів трас. У мережевих застосуваннях загальна пропускна здатність може бути суттєво масштабована завдяки імплементації технологій спектрального ущільнення каналів (WDM). Це дає змогу одночасно передавати декілька незалежних інформаційних потоків на різних довжинах хвиль (зокрема в діапазонах 1360 нм та 1500 нм) по одному оптичному волокну. Для оптимізації висхідного трафіку та запобігання колізіям пакетів даних застосовуються протоколи динамічного розподілу смуги пропускання (DBA), що сприяє раціональному використанню апаратних ресурсів та зниженню експлуатаційних витрат.

Об'єднуючи високу надійність послуг на рівні «від кінця до кінця», мінімальну мережеву затримку та абсолютну стійкість до електромагнітних перешкод, GPON дозволяє повною мірою реалізувати потенціал адаптивних систем. З огляду на стрімку еволюцію телекомунікаційної галузі, наразі відбувається активне впровадження оптоволоконних мереж доступу нового покоління (NG-PON). Технології XGS-PON (симетрична швидкість 10 Гбіт/с) та 10G-EPON поступово стають галузевим стандартом. Здешевлення компонентної бази робить економічно доцільним розгортання систем WDM-

PON безпосередньо до вузлів керування зовнішнім освітленням, що значно розширює їхні функціональні можливості.

Зважаючи на колосальну кількість точок вуличного освітлення в сучасних містах та експоненційне зростання обсягів даних, які вони генерують у реальному часі (особливо при інтеграції відеоаналітики та кліматичних датчиків), високошвидкісні волоконно-оптичні мережі є безальтернативним рішенням для формування магістрального рівня комунікації. Вони гарантують стабільне транспортування масивів інформації, створюючи надійний фундамент для безперебійного функціонування систем розумного міста.

### **1.3 Стандарти та протоколи керування в освітлювальних системах**

Для забезпечення адаптивних функцій зміни яскравості традиційно застосовуються спеціалізовані контролери, що підтримують аналоговий інтерфейс керування (1...10 В) або працюють за допомогою цифрових протоколів. Сьогодні домінуючим галузевим стандартом у сфері інтелектуального освітлення став протокол DALI, а також його вдосконалені версії DALI-2 та розширення D4i для повноцінної інтеграції з Інтернетом речей (IoT).

Одним із найстаріших і найпростіших апаратних підходів до регулювання світлового потоку був метод аналогового керування напругою в діапазоні 0–10 В, де інтенсивність випромінювання змінювалася лінійно залежно від прикладеного потенціалу. Головною технічною перевагою цього методу вважалася мінімалістична архітектура – для передачі керуючого впливу достатньо було прокласти лише дві слабкоструміві лінії, сигнальну та зворотну. Крім того, існували автономні схеми, здатні самостійно формувати керуючий сигнал за допомогою зовнішніх потенціометрів без підключення до централізованої шини.

Незважаючи на апаратну простоту, аналогова парадигма керування виявилася абсолютно непридатною для сучасних масштабованих смарт-систем через низку фундаментальних недоліків. По-перше, для інтеграції

великого масиву світильників (десятків чи сотень одиниць) у єдину мережу вимагалось прокладання колосальної кількості індивідуальних кабельних трас. Це експоненційно підвищувало вартість інсталяції, ускладнювало інженерні роботи та робило систему негнучкою. У таких мережах практично неможливо оперативно проводити діагностику та локалізувати апаратні відмови.

По-друге, аналоговий сигнал зазнає суттєвого падіння напруги під час трансляції на великі дистанції. Це призводило до явища розсинхронізації – віддалені драйвери отримували занижений рівень напруги, що спричиняло нерівномірну яскравість освітлювальної установки. До того ж, аналогові лінії є вкрай чутливими до електромагнітної інтерференції (ЕМІ), наведених шумів та контурів заземлення. Сукупність цих факторів не гарантує стабільності роботи та, що найголовніше, не підтримує двонаправлену комунікацію для зчитування телеметрії.

Іншим застарілим методом є керування яскравістю шляхом фазового відсікання напруги безпосередньо в силовій мережі живлення (симісторне димування). Цей принцип будується на обмеженні амплітуди мережевої синусоїди по передньому або задньому фронту і раніше широко застосовувався у побутовому секторі для ламп розжарювання.

Однак у сучасній світлотехніці застосування фазових регуляторів для керування світлодіодними масивами вважається технічно неефективним та ризикованим з таких причин:

- суттєва невідповідність за узгодженням потужностей;
- схильність світлодіодних драйверів до генерування високих пускових струмів під час комутації груп світильників;
- виникнення помітного стробоскопічного ефекту на низьких рівнях димірування через нестабільність корисної вихідної потужності;
- одноступенева топологія таких драйверів часто генерує пульсації струму на другій гармоніці, що провокує деградацію кристалів і скорочує термін служби світильника;

- висока залежність плавності регулювання від апаратної якості самого регулятора.

Саме через ці технологічні бар'єри сучасні адаптивні комплекси переходять на цифрові рішення. Цифрові інтерфейси забезпечують прецизійне логарифмічне димірування, індивідуальну адресацію кожного пристрою та можливість інтеграції з магістральними протоколами автоматизації (наприклад, KNX) через шлюзи [9]. Це створює надійний фундамент для побудови енергоефективної міської інфраструктури з повним віддаленим моніторингом.

Протокол DMX-512A, стандартизований як ANSI E1.11, первинно розроблявся для потреб індустрії сценічного освітлення, проте сьогодні він масово імплементується в архітектурних та інтелектуальних освітлювальних мережах для прецизійного керування світлодіодними джерелами світла. На фізичному рівні передача даних ґрунтується на використанні диференціального сигналу стандарту EIA-485 (RS-485). У своїй базовій архітектурі комунікація відбувається виключно в симплексному (односторонньому) режимі – керуючі пакети даних передаються від центрального контролера до підпорядкованих пристроїв без апаратного зворотного зв'язку, алгоритмів підтвердження доставки чи корекції помилок.

Широка інтеграція стандарту DMX-512A в сучасні інженерні проекти зумовлена низкою вагомих переваг:

- високим рівнем архітектурної простоти реалізації;
- експлуатаційною надійністю та стійкістю до зовнішніх електромагнітних завад;
- можливістю синхронного керування розгалуженою мережею світильників із використанням лише трипровідної комутаційної магістралі (Data+, Data- та загальний екран);
- низькою собівартістю апаратної компонентної бази;
- обов'язковою гальванічною (оптичною) ізоляцією інтерфейсу керування, що гарантує захист електроніки від високовольтних імпульсів.

Основними технічними специфікаціями протоколу передбачено:

- логічна ємність одного фізичного порту становить рівно 512 незалежних каналів керування;
- масштабування системи вільно здійснюється шляхом встановлення додаткових DMX-портів, контролерів або сплітерів;
- в межах одного сегмента магістралі (без застосування репітерів) можливе підключення до 32 фізичних вузлів (пристроїв);
- максимальна протяжність кабельної лінії становить до 1000–1200 метрів за умови використання узгоджувальних термінаторів;
- кожен інформаційний канал передає 8-бітне значення (від 0 до 255 градацій), а повний цикл оновлення пакета для 512 каналів займає близько 23 мс (частота оновлення становить приблизно 44 Гц), що забезпечує абсолютну плавність світлодинамічних ефектів, непомітну для людського ока.

Фундаментальним недоліком класичного інтерфейсу DMX-512A довгий час вважалася саме його однонаправленість, яка унеможлилювала моніторинг стану світильників та діагностику апаратних відмов. Однак у сучасній практиці проектування ця проблема повністю вирішується завдяки імплементації надбудови RDM (стандарт ANSI E1.20). Технологія RDM функціонує поверх існуючої фізичної лінії DMX, трансформуючи її у напівдуплексний канал двостороннього зв'язку. Це дозволяє центральній системі не лише надсилати команди, але й виконувати автоматичний пошук підключених пристроїв, віддалено призначати їм DMX-адреси та зчитувати телеметричну інформацію (статус живлення, температуру тощо) у режимі реального часу, перетворюючи систему на повноцінний елемент Інтернету речей.

Протокол DALI являє собою міжнародний відкритий стандарт двонаправленого цифрового зв'язку (затверджений нормативом IEC 62386). Історично розроблений для інтелектуального керування електронними баластами люмінесцентних ламп, цей стандарт згодом був масштабований та

оптимізований для повноцінної інтеграції з напівпровідниковими (світлодіодними) джерелами світла.

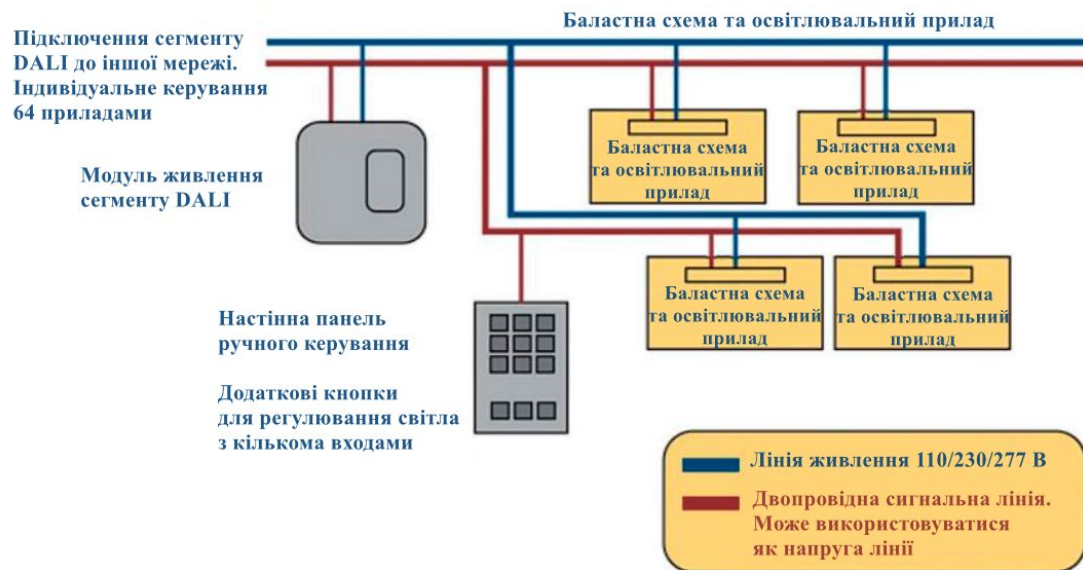


Рисунок 1.4 – Структурна схема передачі даних у мережевій архітектурі DALI

До фундаментальних архітектурних та експлуатаційних переваг цифрового інтерфейсу DALI належать:

- здатність індивідуально керувати масивом до 64 незалежних вузлів (драйверів світильників або мультисенсорних датчиків) у межах однієї фізичної підмережі;
- гнучка логіка масштабування: підтримка об'єднання пристроїв у 16 апаратних груп та можливість збереження до 16 попередньо запрограмованих світлових сценаріїв безпосередньо в енергонезалежній пам'яті драйверів;
- децентралізована топологія підключення, за якої сигнальні провідники приєднуються безпосередньо до драйвера за топологією «лінія», «зірка» або «дерево», що радикально спрощує монтажні роботи в мультizonних просторах;



- використання логарифмічної кривої димування, яка точно корелює з фізіологічними властивостями людського зору, забезпечуючи рівномірне та візуально плавне зниження яскравості аж до 0,1 % від номінального світлового потоку;
- двосторонній характер зв'язку, що гарантує безперервний зворотний зв'язок (зчитування статусів роботи, підтвердження команд та локалізація помилок).

Однак на практиці реалізація надглибокого димірування (нижче 1 %) стикається з фізичними обмеженнями базової електронної бази LED-драйверів. Більшість стандартних пристроїв, що працюють за принципом лінійного амплітудного регулювання, мають мінімальний поріг стабільного робочого струму на рівні 5–6 мА (що еквівалентно приблизно 1,5 % для розповсюджених драйверів із номіналом 350 мА). Для подолання цього бар'єра та досягнення межі у 0,1 % виробники змушені застосовувати гібридні алгоритми живлення або переходити на високочастотну широтно-імпульсну модуляцію на нижніх етапах димування.

Тривалий час головним стримуючим фактором масової імплементації DALI вважалася відносно висока капітальна вартість контролерів порівняно з аналоговими системами 1–10 В. Проте еволюція стандарту до версії DALI-2 та впровадження спеціалізованого розширення D4i (Data for IoT) докорінно змінили економічну та технічну доцільність таких рішень. Сучасні смарт-системи, що будуються на архітектурі Zhaga-D4i, перетворюють кожен опору освітлення на повноцінний вузол Інтернету речей. Такі драйвери не лише виконують команди керування, а й акумулюють критично важливі експлуатаційні метрики (реальне енергоспоживання, температурні режими кристалів, години напруження) і стандартизовано передають їх до хмарних платформ «розумного міста», суттєво оптимізуючи операційні витрати.

Стандарт KNX (раніше відомий як EIB) являє собою децентралізований мережевий протокол (стандартизований згідно з ISO/IEC 14543), розроблений для комплексної автоматизації будівель, включно з керуванням інженерними

мережами та освітленням. Фундаментальна архітектурна відмінність систем на базі KNX полягає у фізичному розділенні силових ліній живлення та слабострумівих інформаційних магістралей. Силова проводка прокладається виключно від розподільних щитів з виконавчими пристроями (актуаторами, релейними модулями, димерами) до безпосередніх споживачів (світильників). Водночас усі сенсорні елементи (датчики присутності, освітленості, панелі керування) об'єднуються окремою сигнальною шиною. Такий підхід мінімізує протяжність кабельних трас, суттєво знижує електромонтажні витрати, зменшує тепловтрати і ризик виникнення пожежі внаслідок коротких замикань, а також підвищує загальну надійність електричного кола.

Ключовою перевагою KNX є його децентралізована топологія «рівний-рівному». Мережа не потребує центрального сервера чи комп'ютера для маршрутизації команд. Вся логіка керування зберігається безпосередньо в енергонезалежній пам'яті самих пристроїв. Це означає, що вихід з ладу одного компонента не призводить до паралічу всієї системи, гарантуючи її виняткову відмовостійкість – будь-який вузол можна замінити або перепрограмувати без зупинки інших сегментів. Завдяки програмному середовищу ETS, зміна функцій обладнання або переналаштування світлових сценаріїв під час перепланування приміщень здійснюється оперативно і без фізичного втручання в проводку.

У сучасному контексті сталого розвитку KNX виступає потужним інструментом оптимізації. Інтеграція алгоритмів підтримання постійної освітленості з урахуванням природного світла та мультисенсорів присутності дозволяє досягти зниження споживання електроенергії на освітлення до 60 %, що гарантує швидку окупність інвестицій в інфраструктуру.

Стек протоколу є апаратно-незалежним, що дозволяє об'єднувати обладнання від сотень різних виробників. Передача телеметрії може здійснюватися через декілька фізичних середовищ: виту пару (KNX TP, швидкість 9600 біт/с), існуючу силову мережу (KNX PL, 1200 біт/с),

радіоканал (KNX RF, 868 МГц), а також через сучасні IP-мережі (KNX IP) з використанням Ethernet-інфраструктури [10].

З огляду на глобальну тенденцію до інтеграції систем Інтернету речей та хмарних обчислень, технології передавання даних на базі IP-протоколів стрімко інтегруються в масштабні проєкти освітлення. Передовим стандартом у цьому напрямі є архітектура ACN (сертифікована як ANSI E1.17) та її оптимізована, більш поширена модифікація sACN (Streaming ACN, стандарт ANSI E1.31). [11]

Протокол sACN спеціально розроблений для ефективної інкапсуляції та транспортування поточкових пакетів керуючих даних (зокрема DMX512) поверх стандартних комп'ютерних мереж UDP/IP та TCP/IP. Використання IP-орієнтованих мережевих рішень у сучасній світлотехніці забезпечує низку беззаперечних техніко-економічних переваг:

1. Екстремальна пропускна здатність та масштабованість. Завдяки використанню алгоритмів багатоадресної маршрутизації та високій швидкості сучасних Ethernet-з'єднань, протокол sACN здатен одночасно та без затримок обслуговувати до 63999 незалежних DMX-всесвітів в межах однієї мережі.

2. Оптимізація інфраструктурних витрат. Для побудови комунікаційного середовища використовується стандартне ІТ-обладнання: маршрутизатори, мережеві комутатори, оптоволоконні магістралі та стандартні кабелі категорії Cat5e/Cat6. Це суттєво здешевлює монтажні роботи порівняно з прокладанням десятків кілометрів спеціалізованих DMX-кабелів.

3. Глобальна сумісність та віддалена диспетчеризація. Імплементация стандартного мережевого стека дозволяє здійснювати безшовний моніторинг, конфігурування та керування з будь-якої точки світу

4. Висока надійність та резервування. Використання сучасних топологій гарантує високу стійкість системи до апаратних відмов або обривів кабелю, забезпечуючи безперебійне надходження керуючих сигналів до драйверів. [11]

## 2 СВІЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

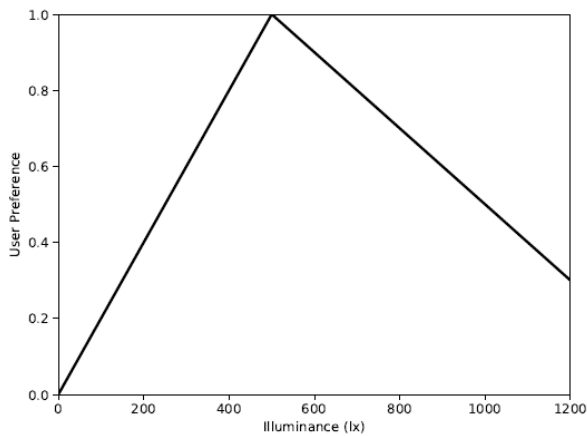
### 2.1 Персоналізація світлового середовища в системах керування

В епоху стрімкого розвитку технологій штучного інтелекту (ШІ) концепція автоматизації глибоко трансформувала більшість інженерних галузей. Проте, незважаючи на глобальний прогрес, рівень інтеграції інтелектуальних алгоритмів безпосередньо у системи архітектурного та міського освітлення залишається порівняно низьким, що формує значний простір для науково-практичного вдосконалення таких комплексів.

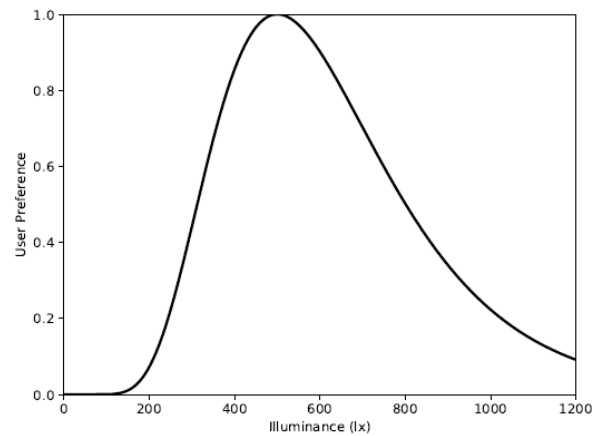
Хоча базова анатомія зорового апарату є універсальною, кожна людина має унікальні фізіологічні особливості. Наприклад, щільність та топологія розподілу фоторецепторів на сітківці ока різняться, що зумовлює індивідуальні пороги світлочутливості та специфічні візуальні потреби. У межах локальних проєктів (наприклад, для індивідуальних робочих місць) інженери-світлотехніки здатні здійснити ручне прецизійне калібрування параметрів світильників під конкретного користувача. Проте в масштабах громадських просторів, що одночасно обслуговують тисячі людей, такий підхід є неможливим. Традиційно індивідуальні фізіологічні відмінності нівелюються, і всі реципієнти отримують усереднений рівень освітленості, регламентований загальними державними стандартами. Справжня адаптивна система нового покоління повинна бути здатною до динамічної персоналізації середовища, де кожен користувач автоматично отримує суб'єктивно найкомфортніші умови. Фундаментальним кроком для апаратно-програмної реалізації такого керування є формалізація задачі як багатофакторної математичної проблеми, що вимагає створення кількісної моделі задоволеності користувача.

Трансформація суб'єктивних людських відчуттів у чіткі числові коефіцієнти становить складне наукове завдання. Для цього пропонувалося використовувати спрощену лінійну функцію. Згідно з нею (рис. 2.1, а), рівень задоволеності користувача спадає прямо пропорційно до величини відхилення

фактичної освітленості від його бажаного (цільового) значення. Однак пізніше, як більш досконалий та фізіологічно обґрунтований підхід, було запропоновано логарифмічно-нормальну математичну модель (рис. 2.1, б).



*а) лінійна модель*



*б) логарифмічно-нормальна модель*

Рисунок 2.1 – Порівняння математичних моделей кількісної оцінки візуального комфорту (для цільового рівня освітленості 500 лк)

Порівняно з лінійним алгоритмом, логарифмічно-нормальна залежність має низку принципових переваг:

- крива функції характеризується високою плавністю в околі оптимального значення, що максимально точно відображає інерційність нашого повсякденного візуального досвіду;
- вона повністю підпорядковується психофізичному закону Вебера-Фехнера, який доводить, що інтенсивність суб'єктивного відчуття прямо пропорційна логарифму інтенсивності фізичного стимулу;
- область допустимих значень моделі обмежена математичним інтервалом  $[0; 1]$  для всього спектра додатних рівнів освітленості. Це дозволяє органічно інтерпретувати рівень задоволеності як імовірність прийняття умов освітлення, тоді як лінійна функція може генерувати логічно некоректні від'ємні значення за умов надмірної яскравості.

Під час синтезу комплексного світлового середовища недостатньо оперувати лише кількісними показниками освітленості на робочій поверхні.

Для досягнення повноцінного комфорту адаптивна система повинна аналізувати низку додаткових критеріїв:

1. Просторова рівномірність розподілу світла. Наявність жорстких світлотіньових градієнтів змушує зіницю ока до постійної переадаптації, що провокує стрімку зорову втоми. Якість розподілу традиційно оцінюється співвідношеннями мінімальної освітленості до максимальної ( $E_{\min}/E_{\max}$ ) та мінімальної до середньої ( $E_{\min}/E_{\text{avg}}$ ).

2. Коефіцієнт пульсації (видиме мерехтіння). Зоровий апарат людини здатен фіксувати стробоскопічний ефект на частотах до 50 Гц, при цьому діапазон 10–25 Гц є найбільш подразнюючим [12]. Для усунення цього явища сучасні системи вимагають використання електронних драйверів із високочастотною модуляцією струму.

3. Блискіткість. Поява у полі зору джерел світла, яскравість яких багатократно перевищує яскравість фону адаптації (наприклад, відкриті матриці світильників або відблиски від вікон), викликає засліплення. Цей параметр жорстко контролюється за допомогою узагальненого показника дискомфорту UGR.

4. Тінеутворення. Перекриття спрямованого світлового потоку непрозорими перешкодами формує тіні. Для мінімізації глибоких тіней необхідно проєктувати системи з високою часткою дифузно відбитого світла та достатньою циліндричною освітленістю.

Філософія проєктування інтелектуальних систем ґрунтується на пошуку компромісу між двома конфліктними вимогами. З одного боку, критичним є питання енергоефективності. З іншого боку – пріоритет зорового комфорту згідно з парадигмою людино-орієнтованого освітлення [1]. Працівникам вкрай складно підтримувати високу продуктивність за умов засліпленості, мерехтіння чи низького контрасту. Для подолання цього бар'єра найсучасніші смарт-системи, інтегровані в інфраструктуру Інтернету речей, почали впроваджувати алгоритми глибокого навчання з підкріпленням. Завдяки збору даних із мультисенсорів такі системи безперервно навчаються, знаходячи

ідеальний баланс – вони радикально мінімізують споживання електроенергії, суворо дотримуючись при цьому індивідуальних параметрів візуального та фізіологічного комфорту користувачів. [12]

## 2.2 Використання датчиків присутності в адаптивних системах освітлення

У сучасних адаптивних системах освітлення фундаментальним компонентом зворотного зв'язку є мультисенсорна інфраструктура, зокрема датчики присутності, які безперервно аналізують стан зайнятості приміщення. На рис. 2.2 наведено найпоширеніші топології сенсорів: пасивні інфрачервоні (PIR), ультразвукові та мікрохвильові (радіохвильові).

Принцип дії PIR-сенсорів ґрунтується на реєстрації теплового (інфрачервоного) випромінювання, що генерується тілом людини під час перетину оптичних зон лінзи Френеля. Натомість ультразвукові та мікрохвильові датчики належать до активного типу і функціонують на базі ефекту Доплера: вони генерують високочастотні акустичні або електромагнітні імпульси та аналізують зсув частоти у відбитому сигналі. Якщо хвильова картина в зоні спостереження зазнає динамічних змін, система реєструє просторову активність.



*а) пасивний інфрачервоний    б) ультразвуковий    в) мікрохвильовий*

Рисунок 2.2 – Базові типи датчиків присутності в архітектурі  
адаптивного освітлення

Незважаючи на технологічний прогрес, моносенсорні системи характеризуються певним рівнем експлуатаційної похибки. Найбільш критичною проблемою є детекція нерухомих користувачів: класичні мікрохвильові та ультразвукові датчики часто їх ігнорують, класифікуючи як елементи фону. У зв'язку з цим ядро інтелектуальної системи стикається з класичною оптимізаційною дилемою – алгоритм може помилково вимкнути світло за наявності нерухомих людей (що створює різкий психологічний дискомфорт), або ж підтримувати номінальний рівень освітленості в абсолютно порожньому просторі, що нівелює принципи енергозбереження.

Для вирішення цього завдання в сучасному проектуванні, зокрема при інтеграції з магістралями DALI або KNX, застосовують імовірнісний математичний апарат. Розглянемо модель освітлювальної установки, яка отримує від сенсорного вузла ймовірність фізичної присутності людини – параметр  $p$ . На основі цього значення контролер встановлює первинний рівень освітленості  $x$ . Якщо користувач відчуває візуальний дискомфорт (вважає рівень  $x$  недостатнім), він здійснює мануальне або голосове втручання, активуючи номінальний рівень освітленості  $x_0$ . Головна задача автоматизованого керування полягає у пошуку такої стратегії димірування, яка мінімізуватиме загальне очікуване енергоспоживання з урахуванням фактора людського втручання.

Логіка моделі наступна: якщо зона вільна від людей, втручання не відбувається, і драйвер підтримує заданий рівень  $x$ . Якщо ж приміщення зайняте, вводиться функція  $q(x)$ , що описує ймовірність незадоволеності користувача (будуючись на логарифмічно-нормальних кривих візуального комфорту). З імовірністю  $q(x)$  людина підвищить яскравість до рівня  $x_0$ , а з імовірністю  $(1 - q(x))$  – сприйме поточний черговий рівень  $x$  як достатній.

Для приміщення з ймовірністю присутності  $p$ , очікуваний показник освітленості  $E(x)$  після можливого коригування користувачем розраховується за формулою:

$$E(x) = x_0 \cdot p \cdot q(x) + x \cdot (1 - p \cdot q(x)) \quad (2.1)$$



Відповідно, математичне сподівання загального енергоспоживання системи  $C(x)$  визначається як лінійна функція від очікуваної освітленості:

$$C(x) = \alpha \cdot E(x) + E_0 \quad (2.2)$$

де  $E(x)$  – очікуваний інтегральний рівень освітленості;

$\alpha$  – апаратний коефіцієнт масштабування (відображає світлову віддачу матриці);

$E_0$  – базове енергоспоживання (витрати драйвера та комунікаційного модуля в режимі очікування).

За умови, що апаратна ефективність системи  $\alpha$  є константою у всьому діапазоні димірування, оптимальний базовий рівень освітленості  $x^*$ , який система повинна встановити для мінімізації витрат, розраховується як аргумент глобального мінімуму функції:

$$x_* = \arg \min_x C(x) = \arg \min_x E(x) \quad (2.3)$$

### 2.3 Схемотехнічна реалізація та архітектура мікроконтролерної системи автоматизації

Цей розділ кваліфікаційної роботи присвячено розробці функціонального апаратно-програмного комплексу адаптивного освітлення. Запропоноване інженерне рішення є універсальним: воно може бути імплементоване у базові екосистеми «розумного будинку», а після відповідного апаратного масштабування – застосоване на об'єктах комерційної інфраструктури чи в промислових просторах. Інтелектуальна парадигма розробленої системи ґрунтується на реалізації чотирьох фундаментальних функцій:

1. Автоматична комутація на базі детекції присутності. Комплекс безперервно збирає телеметричні дані щодо просторової активності за допомогою піроелектричного інфрачервоного сенсора (PIR). Аналізуючи теплові сигнатури, мікроконтролер ідентифікує присутність людини в зоні

спостереження. Це дозволяє реалізувати предиктивне керування комутацією, що гарантує високий рівень енергозбереження та виключає марнотратне споживання електроенергії у порожніх приміщеннях.

2. Адаптивне дворівневе димірування. Система володіє алгоритмічною базою для аналізу поточного рівня фонові освітленості та автоматичного підбору оптимального світлового сценарію. У межах проєкту реалізовано два базові рівні інтенсивності штучного світла: «High» (максимальний) та «Low» (мінімальний). Ґрунтуючись на нормативних показниках (за якими стандартна освітленість офісних та рекреаційних зон варіюється в межах 300–750 лк), логіка керування налаштована наступним чином: при реєстрації фону від 300 до 750 лк активується режим «High»; при падінні освітленості в діапазон від 0 до 300 лк вмикається режим «Low». Водночас, з метою максимізації енергоефективності, у разі перевищення природним світлом порогу в 750 лк усі світильники примусово знеструмлюються.

3. Гібридне керування (дуальний режим). Архітектура передбачає безшовне поєднання автоматичного (сенсорного) та ручного (мануального) режимів керування. Користувач має змогу апаратно перемикати пріоритети керування залежно від поточних потреб, що підвищує загальну ергономіку експлуатації.

4. Візуалізація системних параметрів. Для забезпечення зручного людино-машинного інтерфейсу (НМІ) в систему інтегровано символічний рідкокристалічний дисплей LCD 1602. Його головне завдання полягає у виведенні поточних експлуатаційних метрик: зафіксованого рівня освітленості, активного режиму керування та статусу присутності.

На рис. 2.3 наведено узагальнену функціональну блок-схему запропонованого світлотехнічного комплексу.



Рисунок 2.3 – Узагальнений алгоритм функціонування адаптивного світлотехнічного комплексу

Для верифікації розроблених алгоритмів у середовищі схемотехнічного моделювання як фізичне навантаження використано матрицю з чотирьох світлодіодів, які імітують світлові прилади. У режимі «High» контролер активує всі чотири елементи, формуючи максимальний світловий потік. У режимі «Low» напруга подається лише на два світлодіоди. У реальних промислових проєктах цей вузол масштабується за допомогою силових реле або ШІМ-драйверів для керування повноцінними LED-панелями.

Для глибокого розуміння архітектури систему було декомпозиційовано на логічні блоки. Структурна модель, що ілюструє взаємодію ключових вузлів, представлена на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 – Структурна декомпозиція апаратних модулів пристрою керування

Загальна апаратна топологія охоплює сім інтегрованих модулів: модуль центрального процесора (на базі мікроконтролера AT89S51), модуль піроелектричної детекції (PIR), модуль аналого-цифрового перетворення для фотодатчика, модуль символьного дисплея LCD 1602, силовий модуль керування навантаженням (світильниками), модуль ручної комутації режимів та блок стабілізованого живлення системи (рис. 2.5).

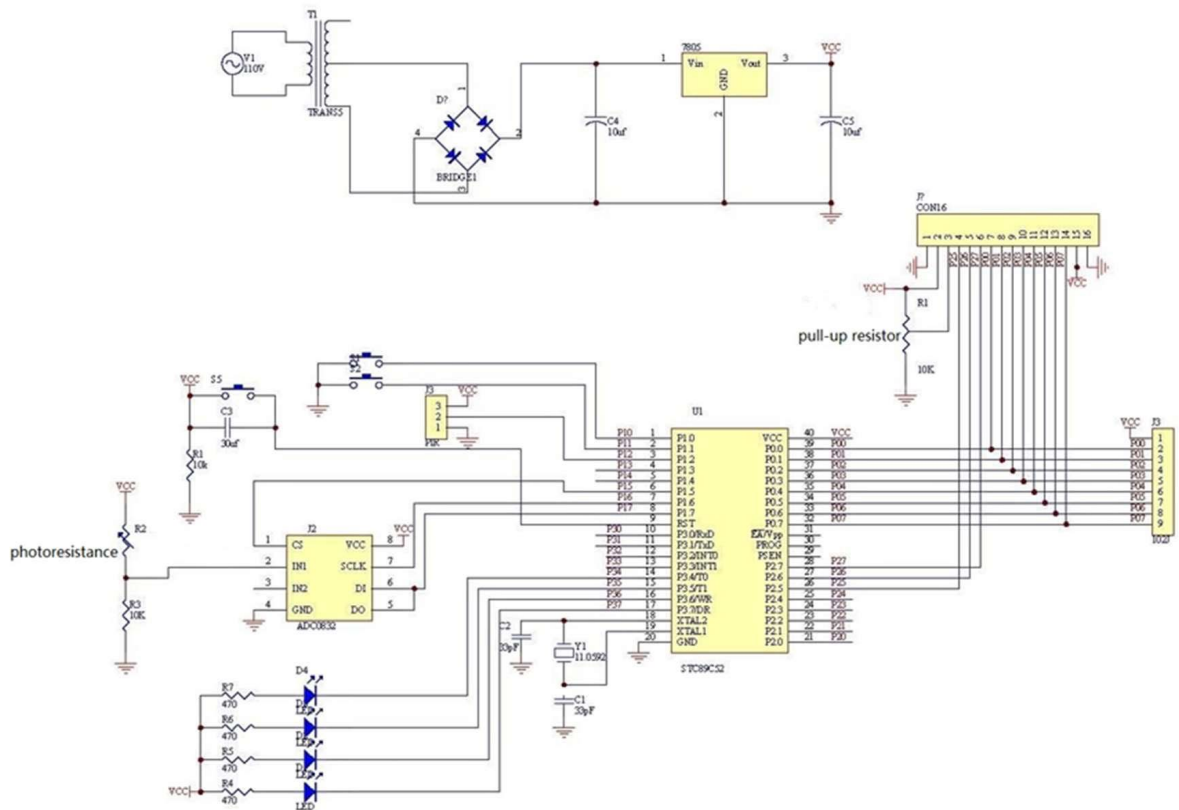


Рисунок 2.5 – Принципова електрична схема  
інтелектуального блоку автоматики

Серцем обчислювального блоку обрано мікроконтролер AT89S51, що будується на класичній гарвардській архітектурі MCS-51 від компанії Atmel (Microchip) [13]. Хоча сьогодні в складних IoT-рішеннях часто застосовуються 32-бітні ядра, для задач детермінованого керування локальним освітленням надійність, низьке енергоспоживання та економічна доступність 8-бітних CMOS-контролерів роблять їх абсолютно релевантним вибором. Спроектowana обв'язка процесора включає ланцюги живлення, вузол апаратного скидання та схему тактового генератора (рис. 2.6).

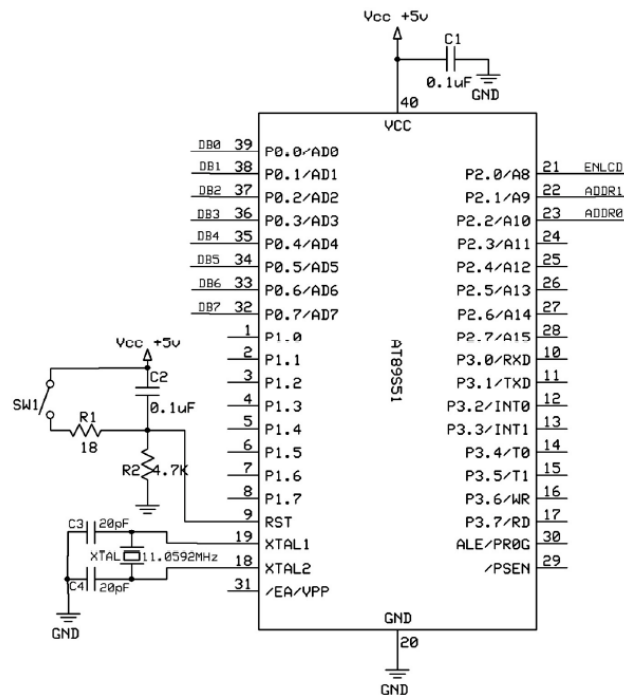


Рисунок 2.6 – Схемотехнічне рішення обв’язки центрального процесорного ядра

Мікроконтролер AT89S51 оснащений 4 КБ вбудованої Flash-пам’яті програм з підтримкою технології внутрішньосистемного програмування (ISP), що дозволяє оновлювати мікрокод без демонтажу чипа з плати. Сумісність із промисловим стандартом 80C51, наявність гнучкого 8-бітного ALU та енергонезалежної пам’яті високої щільності формують надійну платформу для керування інженерними системами. Конфігурація та призначення виводів корпусу (у форматі PDIP) наведено на рис. 2.7.

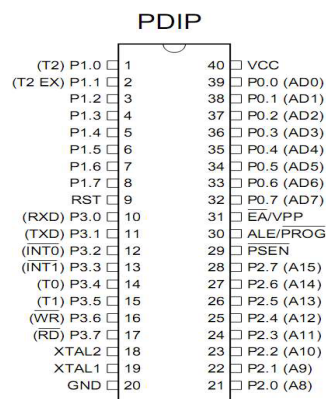


Рисунок 2.7 – Топологія та функціональне призначення виводів мікроконтролера AT89S51

Ключові експлуатаційні параметри кристала систематизовано у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні та експлуатаційні параметри базового обчислювального ядра AT89S51

| Апаратна характеристика        | Значення / Опис                                    |
|--------------------------------|----------------------------------------------------|
| Сумісність архітектури         | Повна підтримка системи команд MCS-51              |
| Діапазон робочої напруги       | 4,0 В ... 5,5 В                                    |
| Обсяг Flash-пам'яті (ROM)      | 4 КБ                                               |
| Оперативна пам'ять (RAM)       | 128 × 8 біт (внутрішня)                            |
| Порти введення-виведення (I/O) | 32 програмовані лінії                              |
| Робоча частота                 | Статична операція: від 0 Гц до 33 МГц              |
| Внутрішня периферія            | Два 16-бітні таймери/лічильники, Watchdog-таймер   |
| Система переривань             | Шість векторних джерел переривань                  |
| Комунікаційні інтерфейси       | Повнодуплексний апаратний UART (послідовний канал) |
| Режими енергозбереження        | Low-power Idle та Power-down                       |

Для забезпечення стабільної роботи ядро AT89S51 живиться від шини 5 В. Для фільтрації високочастотних електромагнітних завад (шумів) безпосередньо біля виводів живлення ( $VCC$  та  $GND$ ) встановлюється керамічний блокувальний конденсатор номіналом  $C1 = 0,1$  мкФ.

Критично важливим етапом роботи будь-якої цифрової схеми є ініціалізація. Під час подання напруги, доки живлення не стабілізується на номінальному рівні, регістри процесора знаходяться у невизначеному (перехідному) стані. Щоб гарантувати коректний старт виконання програми з нульового вектора (адреса 0000H), застосовується супервізор скидання (Reset). Запуск процедури скидання в AT89S51 вимагає утримання високого логічного рівня на виводі RST щонайменше протягом двох машинних циклів. У проєкті реалізовано комбіновану схему скидання: автоматичне при увімкненні живлення та примусове ручне.

Принцип дії RC-ланцюга наступний. У момент подання живлення (перемикач  $K1$  розімкнутий) конденсатор  $C_2$  починає заряджатися,

пропускаючи імпульс струму до шини *GND*. На резисторі  $R_2$  виникає падіння напруги, що формує на виводі RST високий логічний рівень, ініціюючи скидання. Коли конденсатор повністю заряджається, струм припиняється, напруга на RST падає до нуля, і мікроконтролер переходить у робочий режим. При натисканні кнопки *K1* конденсатор  $C_2$  миттєво розряджається, і цикл скидання повторюється примусово.

Тривалість імпульсу скидання (постійна часу) розраховується за класичною формулою:

$$T_{rst} = 1,2 \cdot R \cdot C \quad (2.4)$$

Згідно з номіналами схеми:  $R = R_2 = 4,7 \text{ кОм}$ ;  $C = C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$ .

Отримане значення (564 мкс) із величезним запасом перекидає вимогу у два машинні цикли (що для типової частоти становить близько 2 мкс), гарантуючи абсолютну надійність старту системи.

Для синхронізації роботи арифметико-логічного пристрою та периферії необхідний тактовий генератор. Робочий цикл системи визначається періодом тактових імпульсів (чергуванням дискретних рівнів 0 та 1), епюра яких наведена на рис. 2.8.

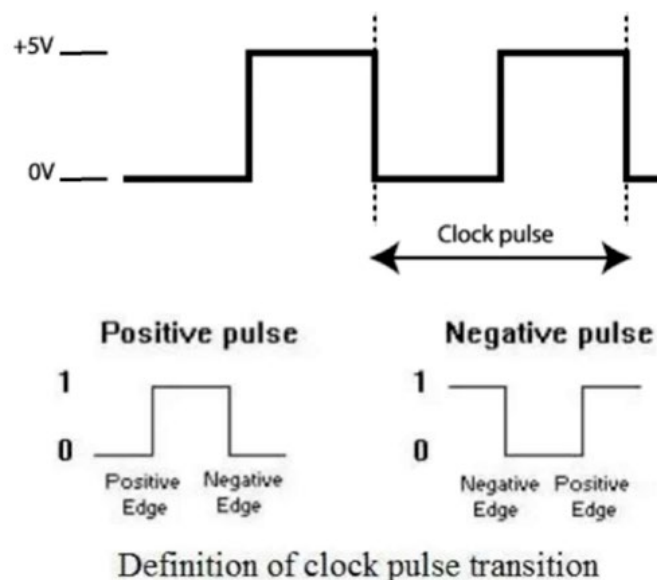


Рисунок 2.8 – Епюра синхронізуючого тактового імпульсу



Вбудований інвертуючий підсилювач мікроконтролера використовується для побудови кварцового осцилятора [14]. П'єзоелектричний резонатор підключається між виводами *XTAL1* та *XTAL2* (рис. 2.9). У даній схемі застосовано резонатор *Y* з частотою  $f_{crystal} = 11,0592$  МГц (стандартна частота для безпомилкової генерації швидкостей UART) та навантажувальні конденсатори  $C_3, C_4 = 20$  пФ.

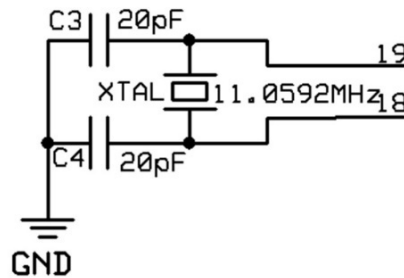


Рисунок 2.9 – Конфігурація підключення п'єзоелектричного резонатора до тактового генератора

## 2.4 Обґрунтування та вибір периферійного обладнання

Людське тіло в процесі життєдіяльності є природним джерелом теплового інфрачервоного випромінювання, спектральний максимум якого припадає на довжину хвилі близько 9,4–10 мкм. Саме на прецизійній реєстрації цього вузькоспрямованого теплового фону ґрунтується фізичний принцип роботи пасивних інфрачервоних сенсорів (PIR).

Конструктивно класичний PIR-датчик містить три ключові компоненти – пару симетричних піроелектричних кристалів, польовий транзистор для узгодження імпедансу та оптичний фільтр. Внутрішня архітектура сенсора будується на використанні двох збалансованих пластин зі спеціального піроелектричного матеріалу, кожна з яких контролює власну просторову півсферу детекції. Коли джерело тепла перетинає зону видимості, воно спочатку опромінює перший елемент. Це порушує загальний тепловий баланс системи та індукує позитивний диференціальний сплеск напруги. Під час

подальшого руху об'єкт покидає першу зону і потрапляє в другу, що генерує аналогічний, але вже негативний імпульс. Вимірювальна мікросхема фіксує саме цю знакозмінну різницю потенціалів, ігноруючи стабільний фоновий нагрів (рис. 2.10).

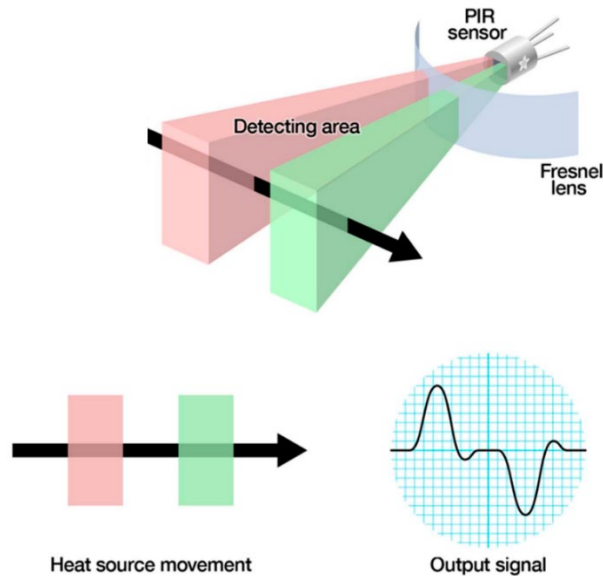


Рисунок 2.10 – Фізичний принцип формування диференціального сигналу в двохелементному PIR-датчику

Для захисту прецизійних внутрішніх компонентів від зовнішніх електромагнітних завад застосовується герметичний металевий екран. На його фронтальній площині розташоване прямокутне оптичне вікно, закрите спеціальним матеріалом на основі кремнію. Цей фільтр відсікає видимий спектр світла, конвекційні потоки повітря та вологу, гарантуючи безперешкодне проходження виключно довгохвильового ІЧ-випромінювання. Як еталонний компонент для проектування систем автоматики в межах даної роботи було обрано сенсор RE200B, що є визнаним промисловим стандартом у сфері інтелектуального керування освітленням (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Конструктивне виконання піроелектричного сенсора моделі RE200B

Оскільки базовий кут огляду кристала є відносно вузьким, для розширення робочої зони та фокусування розсіяних ІЧ-променів безпосередньо на піроелектричну матрицю обов’язково застосовуються лінзи Френеля.

Зважаючи на фізичні обмеження дальності та кута огляду (навіть за наявності мультисегментної лінзи), один датчик не здатен гарантувати відсутність «сліпих зон» у приміщеннях зі складною геометрією. Тому для надійного трекінгу вимагається розподілене встановлення кількох детекторів у кожній зоні. У рамках моделювання поточного комплексу аналізується одна охоронна зона. Поява людини супроводжується фіксацією теплового випромінювання, після чого схема переводить логічний вихід у стан високого рівня. Важливо враховувати вектор руху – сенсор демонструє максимальну чутливість під час тангенціального переміщення (поперек секторів лінзи) і значно гірше реагує на радіальний рух (безпосередньо на датчик). Цей геометричний аспект має вирішальне значення під час вибору місця монтажу (рис. 2.12).

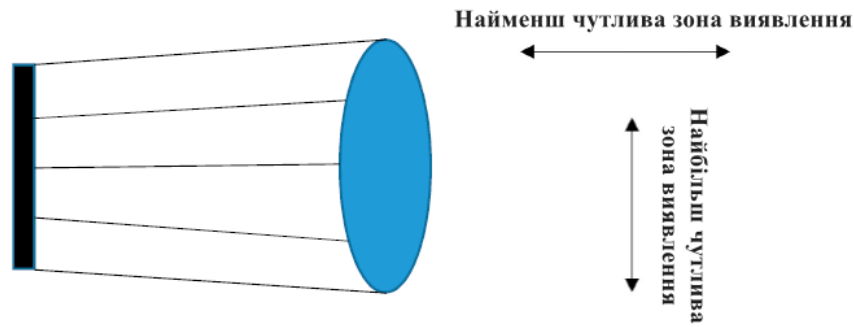


Рисунок 2.12 – Діаграма зон радіальної та тангенціальної чутливості PIR-датчика

Первинний аналоговий сигнал від піроелементів є екстремально слабким (його амплітуда зазвичай не перевищує 1 мВ). Тому перед подачею на цифровий порт мікроконтролера він вимагає обов'язкової апаратної обробки. Модуль кондиціювання сигналу здійснює двокаскадне підсилення та фільтрацію з подальшим пропусканням через віконний компаратор. Цей ланцюг перетворює слабкі аналогові флуктуації на чіткі прямокутні цифрові імпульси транзисторно-транзисторної логіки, придатні для обробки процесором (рис. 2.13).

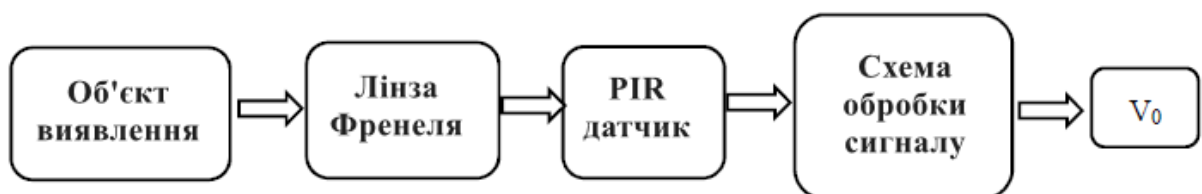


Рисунок 2.13 – Структурна блок-схема апаратної обробки сигналу PIR-детектора

Сучасні керівництва з проєктування електронних систем підтверджують, що використання якісних схем формування сигналу зі строгими RC-фільтрами критично знижує кількість хибних спрацювань у системах керування освітленням [15]. На практиці інженери найчастіше інтегрують готові модулі з розширеним функціоналом, які оснащені

підстроювальними резисторами для регулювання чутливості та часу затримки (рис. 2.14).

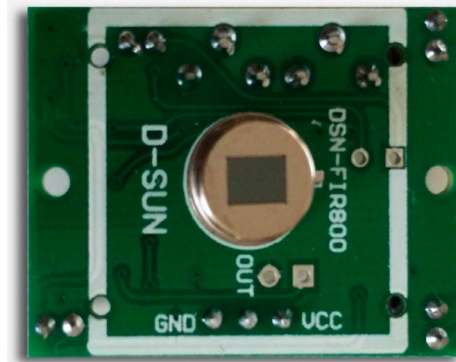


Рисунок 2.14 – Топологія друкованої плати PIR-модуля з регульованими параметрами

Згідно з розробленою принциповою схемою пристрою (рис. 2.15), для придушення високочастотного шуму між сигнальним виводом 2 та загальним виводом 1 встановлено керамічний конденсатор ємністю 680 пФ. Інформаційний вихід датчика під'єднується безпосередньо до порту P3.3 мікроконтролера AT89S51 із застосуванням підтягувального резистора номіналом 100 кОм. Такий схемотехнічний підхід гарантує високу стабільність передачі цифрового сигналу та стійкість системи до електромагнітних наведень.

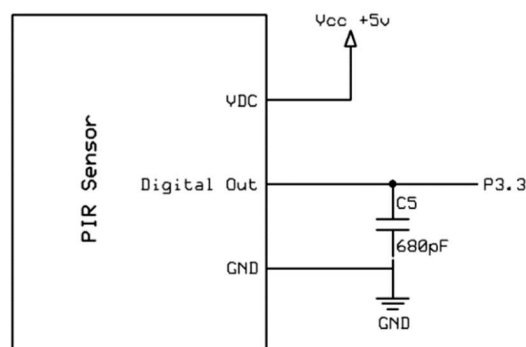


Рисунок 2.15 – Електрична схема узгодження та підключення PIR-датчика до керуючого мікроконтролера

Для об'єктивної оцінки параметрів світлового середовища в адаптивних системах застосовуються спеціалізовані сенсори освітленості. Сучасна номенклатура радіоелектронних компонентів пропонує надзвичайно широкий спектр таких пристроїв. Одним із ключових інженерних завдань під час проєктування є вибір оптичного датчика, який забезпечує прецизійну точність вимірювань, стійкість до завад та має оптимальну економічну доцільність.

Історично базовим рішенням у цій сфері були фоторезистори (LDR). Їхній принцип дії ґрунтується на явищі внутрішнього фотоефекту – опір напівпровідника змінюється обернено пропорційно до інтенсивності падаючого на нього світла. У класичних аналогових схемах фоторезистор інтегрується в ділник напруги, зміна параметрів якого фіксується компаратором. Отримана напруга порівнюється із заданим (опорним) порогом, після чого формується керуючий сигнал для світлодіодних драйверів. Однак такі рішення мають суттєві недоліки – високу температурну нестабільність, нелінійність характеристик та схильність до деградації.

Більш досконалі сучасні цифрові датчики освітленості виконують пряме перетворення оптичного потоку у фотострум, який безпосередньо на кристалі оцифровується за допомогою високоточного аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Наявність вбудованого АЦП повністю усуває потребу у зовнішніх мікросхемах конвертації, що мінімізує вплив електромагнітного шуму на аналогові лінії, спрощує топологію друкованої плати та суттєво підвищує загальну надійність комплексу.

Враховуючи вимоги до стабільності, енергоефективності та низької вартості, у даній бакалаврській кваліфікаційній роботі як базовий компонент вимірювального модуля обрано цифрову мікросхему OPT3002 [16] виробництва Texas Instruments. На відміну від стандартних люксметрів, які імітують виключно криву чутливості людського ока, датчик OPT3002 є повноцінним оптичним вимірювачем потужності. Він має надзвичайно широкий спектральний діапазон (від 300 нм до 1000 нм), що охоплює не лише видиме світло, але й ближній ультрафіолетовий (UV) та інфрачервоний (IR)

спектри. В архітектурі розумного освітлення ця особливість дозволяє системі аналізувати спектральний склад фону (відрізнати природне сонячне світло з високою часткою ІЧ-випромінювання від штучного світлодіодного), оптимізуючи алгоритми керування згідно з принципами Human-Centric Lighting. [1]

Датчик володіє унікальною архітектурою з автоматичним вибором діапазону, забезпечуючи ефективний динамічний діапазон у 23 біти. Усі результати апаратно компенсуються щодо впливу «темнового» струму та температурних дрейфів кристала. Систематизовані технічні параметри приладу наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні технічні та експлуатаційні характеристики цифрового оптичного сенсора OPT3002

| Характеристика                              | Значення / Опис                                                                       |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Широкий оптичний спектр чутливості          | від 300 нм до 1000 нм                                                                 |
| Діапазон вимірювання оптичної потужності    | від 1,2 нВ/см <sup>2</sup> до 10 мВт/см <sup>2</sup>                                  |
| Ефективна розрядність (динамічний діапазон) | 23 біти (завдяки автоматичному масштабуванню)                                         |
| Алгоритм вимірювання                        | Апаратний автоматичний вибір повної шкали (12 діапазонів), похибка узгодження < 0,2 % |
| Робочий струм споживання (активний стан)    | 1,8 мкА (типове значення)                                                             |
| Температурний діапазон експлуатації         | від –40°C до +85°C                                                                    |
| Діапазон робочої напруги живлення           | 1,6 В ... 3,6 В                                                                       |
| Цифровий інтерфейс                          | I <sup>2</sup> C / SMBus                                                              |
| Додаткові можливості                        | Гнучка система програмування переривань                                               |
| Габарити корпусу                            | Ультракомпактний: 2,0 мм × 2,0 мм × 0,65 мм                                           |

Внутрішня архітектура сенсора є максимально оптимізованою для інтеграції в мікроконтролерні системи. Конфігурацію виводів та типову схему їхнього функціонального призначення наведено на рис. 2.16.

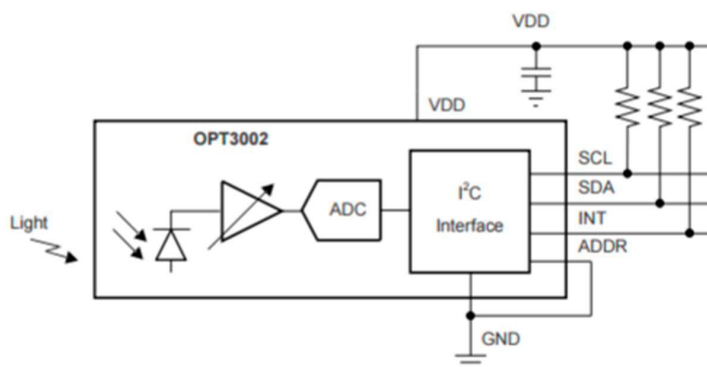


Рисунок 2.16 – Топологія виводів та базова електрична схема включення датчика OPT3002

Інформаційний обмін між сенсором OPT3002 та центральним процесором відбувається по послідовній двопровідній шині I<sup>2</sup>C. Оскільки базовий 8-бітний мікроконтролер AT89S51 не оснащений апаратним модулем I<sup>2</sup>C, протокол реалізується методом програмної емуляції. Для цього задіюються два універсальні порти введення-виведення (GPIO): лінія тактування SCL підключається до виводу P2.3, а двонаправлена лінія даних SDA – до P2.4.

Фундаментальною особливістю шини I<sup>2</sup>C є архітектура «відкритий стік». Відповідно до цього, для формування стабільного високого логічного рівня (логічної «1») обидві інформаційні магістралі (SDA і SCL) в обов'язковому порядку підтягуються до шини живлення за допомогою зовнішніх резисторів. У запропонованій схемі їхній номінал становить 10 кОм, що гарантує надійну цифрову комунікацію без надмірного споживання струму (рис. 2.17).



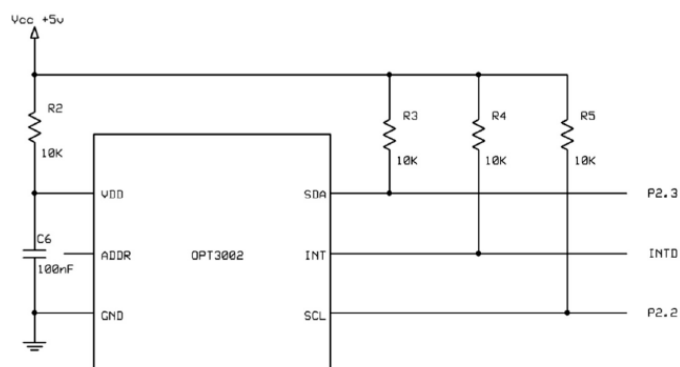


Рисунок 2.17 – Схемотехнічне рішення інтерфейсу зв'язку (I<sup>2</sup>C) між оптичним сенсором OPT3002 та мікроконтролером AT89S51

Окрему увагу приділено стабільності живлення вимірювального тракту. Для нівелювання імпульсних наведень та запобігання похибкам АЦП паралельно виводу  $V_{DD}$  (максимально близько до корпусу мікросхеми OPT3002) встановлюється керамічний шунтувальний конденсатор номіналом 100 нФ (0,1 мкФ). Цей схемотехнічний захід є стандартом для прецизійної цифрової мікроелектроніки.

Для забезпечення зручної візуалізації поточних експлуатаційних параметрів системи розроблено модуль локального дисплея. Головною функцією цього вузла є виведення у реальному часі текстової інформації про статус комутації світильників, активний режим керування (автоматичний алгоритм або ручне перехоплення) та класифікований рівень освітленості (висока/низька інтенсивність або енергозбереження).

Як базовий компонент візуалізації застосовано енергоефективний символьний рідкокристалічний дисплей (РКД) моделі LCD 1602 (побудований на базі класичного контролера HD44780 або його сумісних аналогів). Цей модуль здатен відображати матричні символи у форматі 2 рядків по 16 знакомісць у кожному (рис. 2.18). Його номінальна робоча напруга знаходиться в межах від 4,7 В до 5,3 В, що забезпечує ідеальну апаратну сумісність із 5-вольтовою шиною живлення мікроконтролера без необхідності використання додаткових конвертерів логічних рівнів.



Рисунок 2.18 – Зовнішній вигляд символьного  
рідкокристалічного дисплея QC1602A

Незважаючи на існування сучасних I<sup>2</sup>C-адаптерів (послідовних шин) для економії виводів, у даній архітектурі реалізовано класичне паралельне підключення дисплея до мікроконтролера AT89S51 (рис. 2.19). Такий підхід гарантує максимальну швидкодію оновлення екрана та повністю розвантажує обчислювальне ядро від програмної емуляції протоколів. Схемотехнічна інтеграція є базовою – 8-бітна двонаправлена шина даних дисплея (виводи DB0–DB7) підключається безпосередньо до універсального порту введення-виведення P1 (виводи P1.0–P1.7) мікроконтролера.

Керуючі лінії дисплея узгоджено наступним чином:

- лінію вибору регістра RS з'єднано з портом P2.0;
- лінію вибору напрямку передавання даних R/W (Read/Write) підключено до P2.1;
- лінію тактового імпульсу E (Enable) з'єднано з P2.2.

Важливою інженерною деталлю є апаратне налаштування контрастності рідкокристалічної матриці (вивід  $V_o$ ). Традиційно для цього використовують підстроювальний потенціометр, проте на основі серії практичних випробувань конкретної апаратної ревізії дисплеїв було визначено оптимальне константне значення опору. У фінальній принциповій схемі між виводом  $V_o$  та загальним проводом (GND) встановлено фіксований резистор номіналом 18 Ом, що

забезпечує максимальну чіткість і читабельність символів за будь-яких кутів огляду без ризику перевантаження.

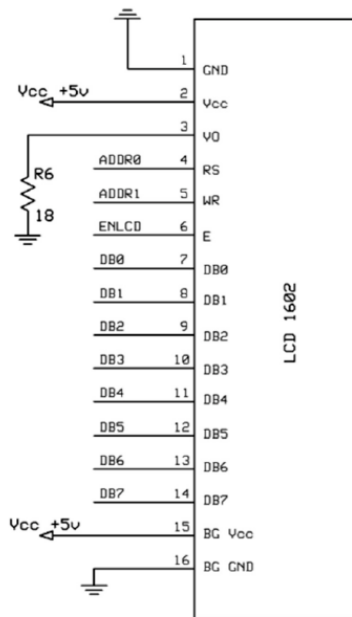


Рисунок 2.19 – Принципова електрична схема паралельної інтеграції дисплейного модуля LCD 1602 з мікроконтролером

Для забезпечення безперебійної та стабільної роботи центрального обчислювального ядра, сенсорних вузлів та засобів індикації розроблено модуль живлення постійного струму. Його першочерговим завданням є формування фіксованого потенціалу номіналом 5 В із низьким коефіцієнтом пульсацій. Апаратною основою цього блока обрано класичний трививідний монолітний лінійний стабілізатор напруги серії L7805CV у термостійкому корпусі TO-220.

Максимально допустима вхідна напруга для мікросхеми L7805CV становить 35 В, проте для забезпечення штатного режиму стабілізації (без переходу в режим обмеження струму) величина вхідного потенціалу повинна перевищувати вихідний щонайменше на величину напруги насичення, яка для даної серії становить близько 2 В. З урахуванням цієї вимоги та з метою мінімізації теплових втрат на кристалі, номінальну вхідну напругу на стабілізаторі встановлено на рівні 9 В. Первинне перетворення здійснюється

за допомогою зовнішнього імпульсного або трансформаторного адаптера AC/DC, який знижує стандартну побутову напругу мережі 230 В змінного струму до 9 В постійного струму.

Вихідний інтерфейс адаптера приєднується до вхідного каскаду модуля живлення. Процес формування номінальних 5 В охоплює етапи первинного згладжування, лінійної стабілізації та фінішної фільтрації високочастотних перешкод за допомогою шунтувальних конденсаторів. Для візуального контролю наявності напруги в системі інкорпоровано індикаторний світлодіод із послідовно підключеним струмообмежувальним резистором (рис. 2.20).

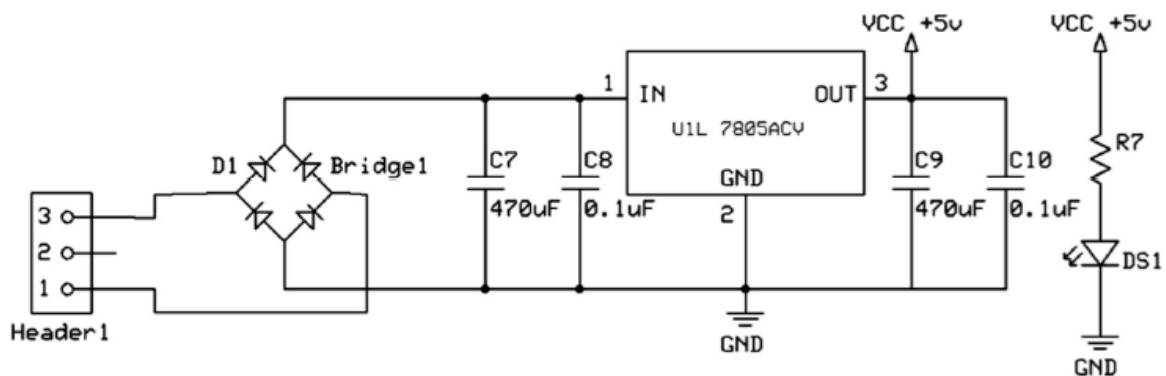


Рисунок 2.20 – Принципова електрична схема інтегрованого модуля живлення на базі стабілізатора L7805CV

Загальний тракт енергозабезпечення пристрою реалізує послідовну схему – пониження амплітуди, випрямлення, вхідне згладжування, прецизійне регулювання лінійним інтегральним стабілізатором та вихідне придушення шумів. Отриманий потенціал 5 В розподіляється між цифровою частиною (мікроконтролер, дисплей, оптичний датчик) та виконавчими напівпровідниковими приладами.

У промислових адаптивних системах освітлення перехід від стандартної мережі 230 В до живлення LED-масивів вимагає встановлення спеціалізованих драйверів струму з вихідною напругою 12–24 В DC. Проте в рамках створення демонстраційного макета та математичного моделювання

архітектури реалізовано низьковольтний світлодіодний модуль (рис. 2.21), що безпосередньо імітує роботу каналів димірування.

Живлення на аноди світлодіодів подається від загальної шини +5 В. Колекторне керування кожним окремим напівпровідниковим джерелом здійснюється за допомогою логічних виводів мікроконтролера AT89S51. Порти процесора налаштовані за схемою зі втікаючим струмом – для активації відповідного каналу світла контролер програмно встановлює на відповідному виводі низький логічний рівень (логічний «0», потенціал заземлення GND), замикаючи електричне коло. Для захисту кристалів світлодіодів від теплового пробою та обмеження робочого струму до безпечного номіналу (10–15 мА) в кожен канал послідовно впроваджено балластні резистори R8–R11.

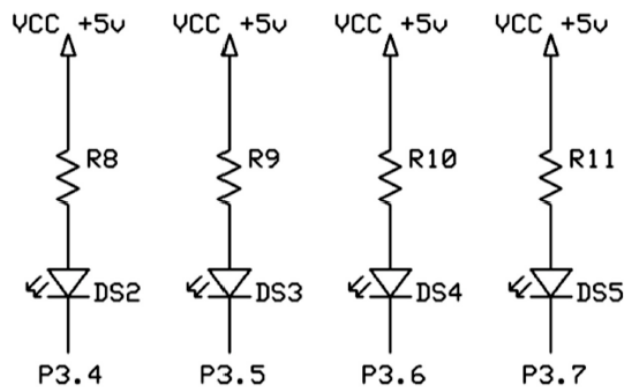


Рисунок 2.21 – Електрична схема вузла комутації світлодіодного навантаження

Для забезпечення гнучкого інтерфейсу взаємодії та реалізації пріоритетного мануального перехоплення в архітектуру пристрою додано модуль комутації режимів роботи. Наявність ручного керування є обов’язковою вимогою для компенсації непередбачуваних умов середовища, коли автоматичний алгоритм на базі сенсорів не може стовідсотково задовольнити суб’єктивні візуальні потреби користувача.

Електричне рішення вузла побудоване на базі тактових кнопок (клавiш), підключених за схемою з апаратним або програмним підтягуванням до високого рівня (рис. 2.22). За замовчуванням програма мікроконтролера

ініціює автоматичний режим, що спирається на дані від PIR-детектора RE200B та люкметра OPT3002. При натисканні *Клавіші 1* генерується імпульс низького рівня, що переводить систему в режим ручного керування, де яскравість фіксується користувачем. Повторне повернення до предиктивного енергоощадного алгоритму здійснюється шляхом замикання *Клавіші 2*.

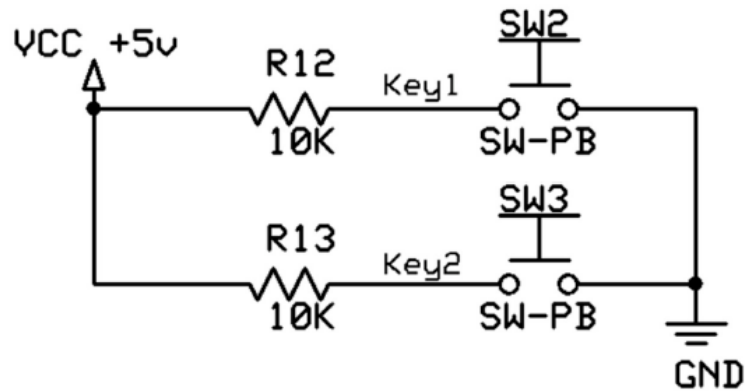


Рисунок 2.22 – Схемотехнічне рішення модуля вибору режимів роботи (Auto/Manual)

### 3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Синтез алгоритмічної структури та програмного забезпечення

Ключовим компонентом, що координує роботу апаратно-програмного світлотехнічного комплексу, є головний програмний алгоритм безперервного моніторингу та диспетчеризації. Базуючись на дискретних та аналогових сигналах, які надходять від вимірювальних пристроїв (оптичного сенсора та детектора присутності), мікроконтролер обробляє інформацію за детермінованими логічними правилами. Сформовані керівні впливи транслуються на виконавчі драйвери навантаження, а поточні експлуатаційні метрики одночасно виводяться на рідкокристалічний модуль індикації LCD 1602.

Для прецизійного та безаварійного функціонування всього комплексу критично важливим етапом є процедура стартового самотестування та ініціалізації апаратних ресурсів. Безпосередньо після подачі напруги живлення або генерації імпульсу скидання (*Reset*) обчислювальне ядро переходить до виконання підпрограми початкового конфігурування. Цей процес передбачає переведення внутрішніх системних регістрів, областей оперативної пам'яті (RAM) та периферійних контролерів у фіксований початковий стан. У рамках розробленої архітектури ініціалізаційний цикл охоплює:

- конфігурування внутрішніх регістрів спеціальних функцій мікроконтролера;
- тестування готовності та перевірку статусів периферійних інтерфейсних мікросхем;
- програмне налаштування внутрішніх параметрів OPT3002 по шині I<sup>2</sup>C;
- синхронізацію та запуск часового генератора (якщо архітектура доповнена таймером реального часу RTC).

Процедура скидання архітектури MCS-51 супроводжується жорстко регламентованим перерозподілом даних у внутрішніх областях пам'яті:

- лічильник команд (PC) обнуляється і вказує на вектор початкової адреси програмної пам'яті (*0000H*);
- регістр слова стану програми (PSW) повністю очищується, скидаючи всі прапорці умов;
- здійснюється вибір нульового банку робочих регістрів загального призначення;
- користувацький прапорець загального призначення F0 скидається в логічний «0»;
- вказівник стека (SP) ініціалізується константним значенням *07H*;
- інші системні регістри, включаючи акумулятор (ACC), регістр дозволу переривань (IE), базова периферія та таймери, примусово переводяться у стан *00H*.

Під час інтеграції пасивного інфрачервоного датчика руху (PIR) було враховано його ключові експлуатаційні переваги – мінімальне енергоспоживання, низька ринкова вартість компонентної бази та повна відсутність емісії шкідливого для людини електромагнітного або іонізуючого випромінювання. Проте головним недоліком напівпровідникових піроелементів є схильність до хибних спрацювань через раптові теплові чи світлові флуктуації в навколишньому просторі.

Окрім того, якщо користувач перебуває в зоні моніторингу в статичному стані, диференціальний сигнал датчика падає до нуля, що класифікується системою як відсутність людей. Для усунення цього явища в мікрокод було впроваджено програмний фільтр-таймер (алгоритм утримання сигналу). Після фіксації первинної активності ядро переходить у режим циклічного підтвердження статусу із часовим вікном утримання  $T_{sustain} \geq 60$  секунд. Це повністю нівелює ефект раптового вимкнення освітлення при тривалій статичній праці людини в приміщенні та запобігає апаратній деградації виконавчих реле.



Логіка роботи системи підпорядкована жорсткому оптимізаційному правилу. За умови високого рівня природної інсоляції (коли зареєстрована датчиком OPT3002 освітленість перевищує або дорівнює граничному інваріанту у 750 лк), штучне освітлення залишається примусово вимкненим, незалежно від наявності чи руху людей у просторі. Якщо ж рівень природного світла падає нижче порогового значення, активація силових світлодіодних ліній відбувається виключно при підтвердженні фактора присутності.

Математичний опис та комбінаторні стани керуючої логіки деталізовано за допомогою таблиці істинності (табл. 3.1), де стан «0» для освітленості означає її дефіцит ( $< 750$  лк), а стан «1» – достатній рівень ( $\geq 750$  лк); для присутності «1» відображає наявність людини, а для світильників «1» відповідає увімкненому стану навантаження.

Таблиця 3.1 – Матриця логічних станів і умов комутації виконавчих пристроїв

| Природна освітленість<br>(Порог 750 лк) | Фактор присутності<br>(PIR-детектор) | Робочий стан<br>виконавчих<br>світильників |
|-----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|
| 0                                       | 0                                    | 0                                          |
| 1                                       | 0                                    | 0                                          |
| 0                                       | 1                                    | 1                                          |
| 1                                       | 1                                    | 0                                          |

Для написання, відлагодження та оптимізації мікрокоду центрального процесора було застосовано спеціалізоване інтегроване середовище розробки (IDE) Keil C51. Цей програмний комплекс є галузевим стандартом для проєктування вбудованих систем на базі мікроконтролерів сімейства 8051. Keil C51 функціонує в середовищі ОС Windows і містить повний стек інструментарію – високотехнологічний редактор коду, менеджер макропроєктів, лінкер, апаратний симулятор та інтерактивний програмний відлагоджувач. Середовище підтримує крос-компіляцію як низькорівневого асемблерного коду, так і високорівневих мов PL/M та C, що істотно знижує часові витрати на розробку та тестування алгоритмів.

Компілятор Keil C51 відрізняється високою ефективністю генерації об'єктного коду, трансформуючи високорівневі інструкції в оптимізований, компактний машинний код із мінімальним використанням обмеженого простору Flash-пам'яті (ROM) чипа. Застосування мови C замість класичного Асемблера в рамках даного проєкту забезпечує очевидні інженерні переваги – строгу структурованість коду, високу читабельність, простоту модернізації та масштабованість алгоритмів (наприклад, при майбутньому розширенні системи функціями диміруванні по шині DALI чи KNX).

Графічну інтерпретацію послідовності виконання операцій, розгалужень та циклів програмного забезпечення представлено на блок-схемі алгоритму (рис. 3.1).

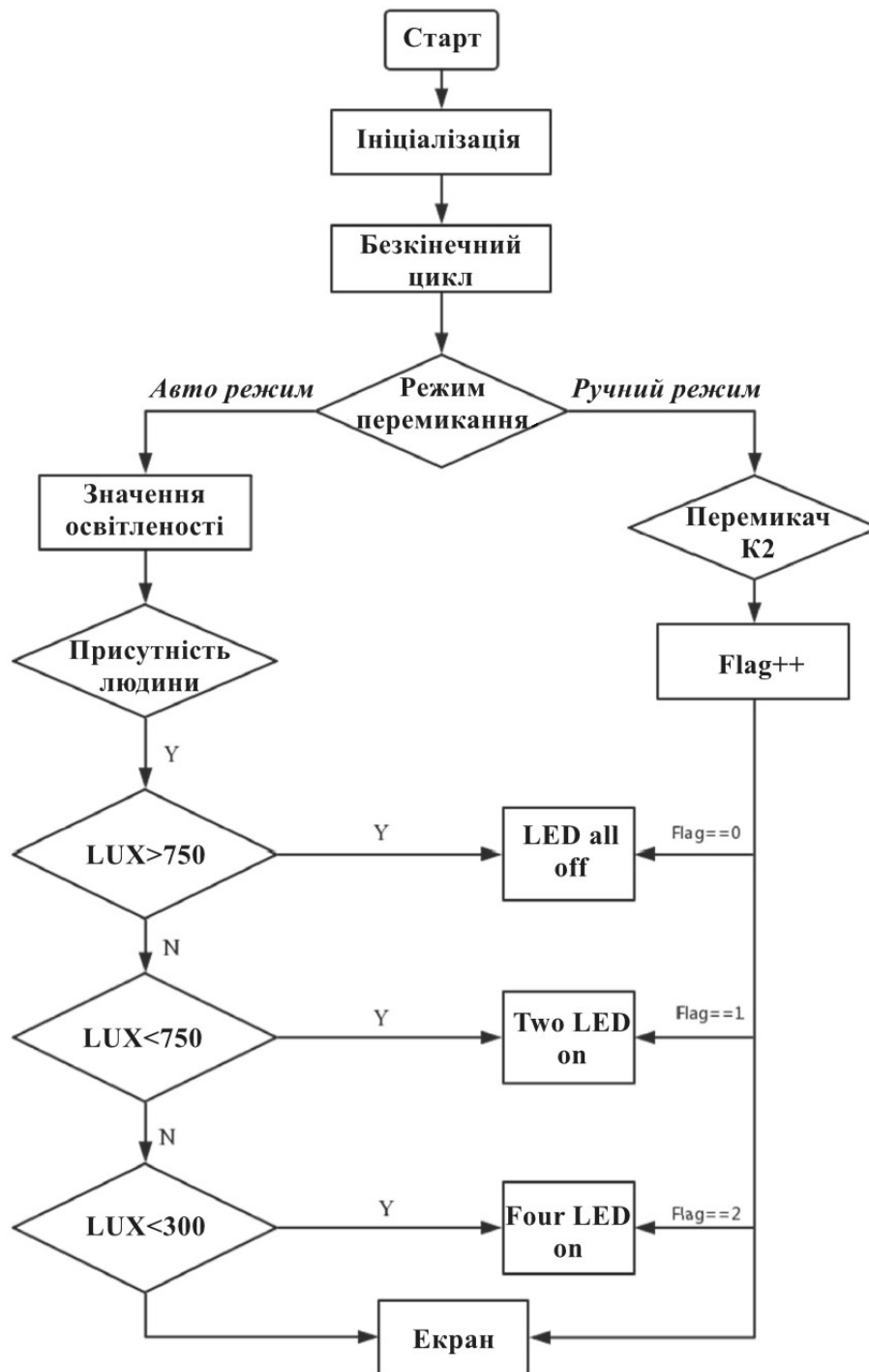


Рисунок 3.1 – Графічна схема алгоритму виконання головного програмного циклу системи автоматики

### 3.2 Віртуальне прототипування та програмно-апаратне моделювання системи керування

Для підтвердження працездатності розроблених алгоритмів у межах даної бакалаврської кваліфікаційної роботи застосовано метод комп'ютерної

симуляції. Як базове середовище обрано передовий програмний комплекс електронного проєктування (EDA) – Proteus Design Suite (зокрема його підсистему Proteus VSM) [17]. Цей інструментарій вигідно відрізняється від класичних SPICE-симуляторів тим, що поєднує глибоке математичне моделювання аналогово-цифрових кіл із можливістю повноцінної симуляції мікропроцесорних ядер на рівні виконання машинного коду. Proteus охоплює повний цикл проєктування: від створення принципових електричних схем (модуль Schematic Capture) і змішаного SPICE-моделювання до трасування друкованих плат з автоматичним розведенням провідників.

Ключовою перевагою архітектури Proteus VSM є інтерактивна коесимуляція. Це означає, що розробник має змогу в реальному часі взаємодіяти з віртуальними периферійними пристроями – натискати клавіші, змінювати стан датчиків, спостерігати за реакцією рідкокристалічних дисплеїв (LCD), обертанням крокових двигунів чи роботою інтерфейсів I<sup>2</sup>C/SPI. Система підтримує точну емуляцію популярних мікроконтролерних архітектур, таких як 8051 (MCS-51), AVR, PIC та ARM. Для компіляції прошивки середовище безшовно інтегрується з професійними компіляторами, зокрема IAR, MPLAB та Keil C51. Завдяки цьому Proteus став галузевим стандартом як для промислових розробників вбудованих систем, так і для науково-освітнього середовища.

Проте процес симуляції має певні фізичні обмеження. Зокрема, поведінку інфрачервоного теплового випромінювання та просторову активність об'єктів для датчика PIR (модель RE200B) неможливо змодельовати безпосередньо. У таких випадках застосовується загальноприйнята інженерна абстракція – вихідний сигнал складного сенсора замінюється генератором цифрових імпульсів або інтерактивним логічним перемикачем (кнопкою). Узагальнену схемотехнічну модель розробленого інтелектуального світлотехнічного пристрою представлено на рис. 3.2.

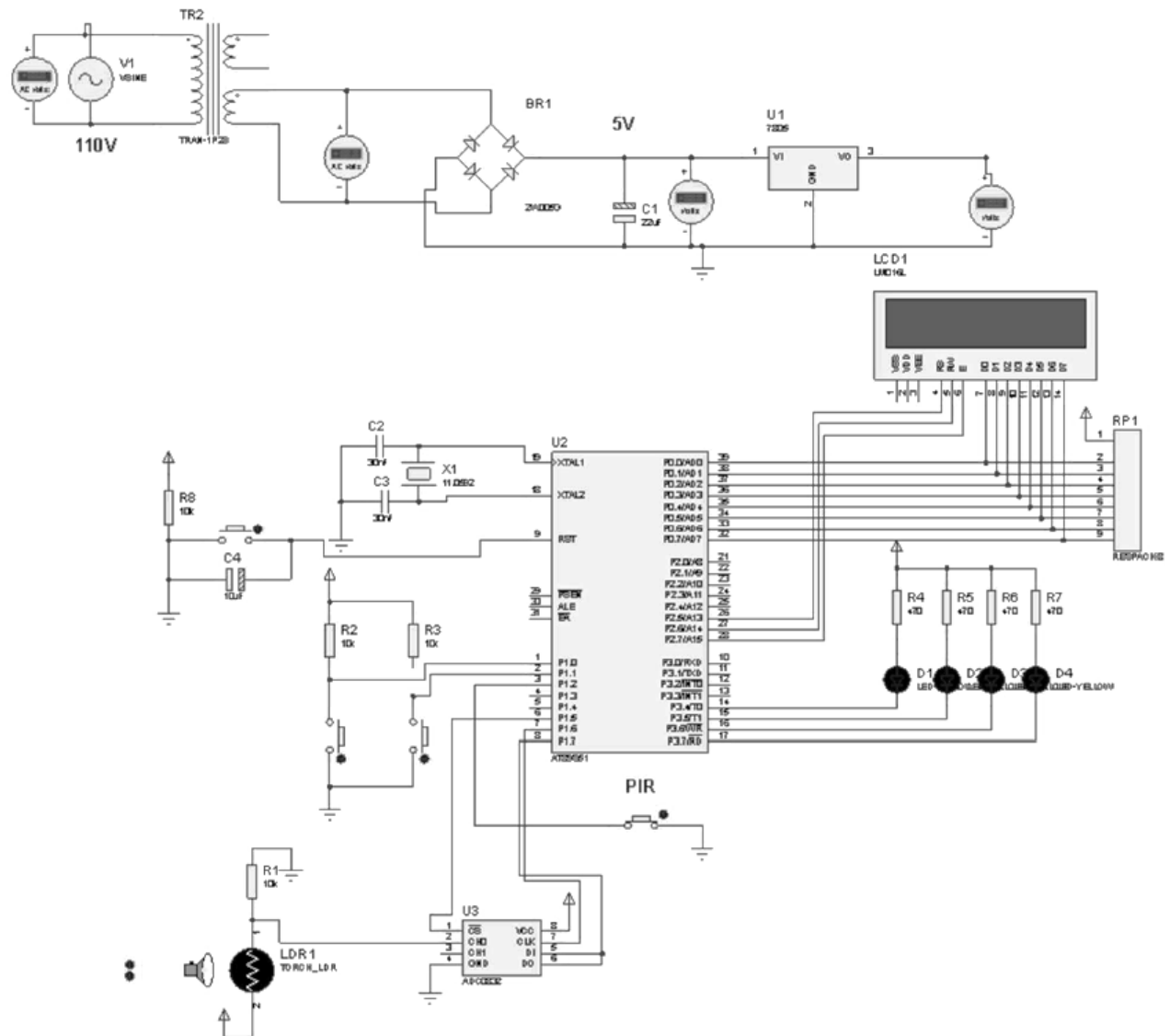


Рисунок 3.2 – Схемотехнічна модель інтелектуальної системи освітлення у середовищі віртуального прототипування Proteus

Розроблена мікропрограма забезпечує сувору логіку енергозбереження – силове комутування навантаження можливе виключно за умови одночасного настання двох подій – дефіциту природної освітленості (сигнал від LDR) та підтвердженого фактора присутності (сигнал від PIR). Така стратегія радикально мінімізує енерговитрати, роблячи платформу економічно доцільною для розгортання в автономних мережах (наприклад, із живленням від сонячних панелей). Для наочної візуалізації роботи алгоритму в моделі застосовано чотири світлодіоди (LED1–LED4). При цьому враховано особливості підключення портів мікроконтролерів сімейства 8051

(конфігурація зі втікаючим струмом), де активним логічним станом для увімкнення світлодіода є логічний нуль («0»).

Нижче наведено оптимізований вихідний код керуючої програми, написаний мовою C для середовища Keil C51:

```
#include <REGX51.H>
/* Призначення портів мікроконтролера */
#define PIR  P1_2 // Вхід датчика руху (1 – рух виявлено)
#define LDR  P1_5 // Вхід датчика освітленості (0 – ніч/темно, 1 – день/світло)
#define RELAY P1_1 // Вихід керування силовим реле
/* Світлодіодна індикація (активний рівень – низький, 0 = Увімкнено) */
#define LED1  P3_4 // Індикатор темної пори доби
#define LED2  P3_5 // Основний світильник 1
#define LED3  P3_6 // Основний світильник 2
#define LED4  P3_7 // Основний світильник 3
/* Функція програмної затримки */
void delay_ms(unsigned int ms) {
    unsigned int i, j;
    for(i = 0; i < ms; i++)
        for(j = 0; j < 123; j++); // Емпірична апроксимація 1 мс для частоти 11.0592 МГц
}
void main() {
    /* Ініціалізація портів вводу/виводу */
    P1 = 0xFF; // Налаштування порту P1 на вхід (підтяжка для PIR та LDR)
    P3 |= 0xF0; // Вимкнення всіх LED (встановлення логічної '1' на P3.4 - P3.7)
    RELAY = 0; // Початкове знеструмлення силового реле
    /* Головний нескінченний цикл диспетчеризації */
    while(1) {
        if(LDR == 0) { // Умова: недостатнє природне освітлення (Ніч)
            LED1 = 0; // Увімкнути інформаційний індикатор "Ніч"
            if(PIR == 1) { // Умова: сенсор зафіксував просторову активність
                RELAY = 1; // Активація силового реле (замикання ланцюга)
                LED2 = 0; // Увімкнення основних світильників
                LED3 = 0;
                LED4 = 0;
                while(PIR == 1); // Блокуючий цикл: очікуємо повного припинення руху
                delay_ms(5000); // Програмний таймер утримання (5 секунд)
                RELAY = 0; // Вимкнення силового реле після затримки
                LED2 = 1; // Вимкнення основних світильників
                LED3 = 1;
                LED4 = 1;
            }
        }
        else { // Умова: достатнє природне освітлення (День)
            RELAY = 0; // Примусове знеструмлення реле
            LED1 = 1; // Примусове вимкнення всіх індикаторів
            LED2 = 1;
            LED3 = 1;
            LED4 = 1;
        }
    }
}
```

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Організаційно-правове забезпечення охорони праці

Створення безпечних умов життєдіяльності є фундаментальною вимогою та невід'ємною складовою успішного функціонування будь-якого сучасного підприємства. Особливої актуальності це питання набуває під час виконання складних проєктно-конструкторських завдань у високотехнологічних галузях, зокрема у компаніях, що спеціалізуються на розробці та імплементації інтелектуальних архітектур енергоефективного керування освітленням. Забезпечення високого рівня ергономіки та безпеки для фахівців, що проєктують апаратно-програмні комплекси, є базовою передумовою для підтримання їхнього оптимального фізіологічного та психоемоційного стану. Належні умови праці мають пряму кореляцію із загальною інженерною продуктивністю, здатністю до концентрації та превенцією професійних захворювань.

Організація автоматизованого робочого місця інженера-проєктанта вимагає комплексного, науково обґрунтованого підходу, що враховує специфіку тривалої роботи з комп'ютерними системами моделювання та вплив супутніх фізичних факторів виробничого середовища. Серед ключових параметрів, що підлягають суворому нормативному контролю, першочергово виділяють: просторову ергономіку робочої зони, параметри виробничого мікроклімату, беззаперечне дотримання норм електробезпеки (особливо під час тестування та відлагодження апаратних прототипів із мережевим живленням), а також забезпечення якісного, позбавленого дискомфорту засвітки та пульсацій, освітлення робочої поверхні.

Зважаючи на постійну зорову та нервово-емоційну напругу, яка супроводжує процес написання мікрокоду та трасування плат, необхідно провести ретельний аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів та впровадити комплексну систему захисних заходів. Крім того, для гарантування безпеки персоналу передбачається розробка локальних

інструкцій з охорони праці. Ці інструкції повинні суворо ґрунтуватися на чинній нормативно-правовій базі України, зокрема відповідати регламентам безпечної взаємодії з екранними пристроями, мінімізуючи ризики розвитку астенопії (зорової втоми) та розладів опорно-рухового апарату, пов'язаних із тривалою статичною позою [18].

## **4.2 Розробка заходів з охорони праці**

Об'єктом дослідження та проєктування виступає спеціалізоване інженерно-лабораторне приміщення, призначене для розробки, програмного забезпечення та апаратного тестування адаптивних систем освітлення. Забезпечення еталонної якості виробничого середовища у такому просторі має критичне значення як для підтримки фізіологічного здоров'я персоналу, так і для гарантування високої продуктивності праці інженерів. Вибір цього об'єкта як еталона для впровадження заходів з охорони праці обґрунтовано специфічними факторами ризику:

1. Екстремальне зорове навантаження – робота інженера-проєктанта пов'язана з безперервним аналізом дрібних деталей (трасування багатошарових друкованих плат, написання мікрокоду), що вимагає найвищого рівня освітленості робочої зони та повної відсутності стробоскопічного ефекту.

2. Ергономічні ризики – тривала статична поза за мультимоніторними станціями (робота в CAD-системах та середовищах програмування) провокує захворювання опорно-рухового апарату та вимагає впровадження сучасних гнучких рішень, таких як кронштейни для моніторів та адаптивні робочі поверхні.

3. Гібридна виробнича небезпека – суміщення роботи за персональним комп'ютером із процесом налагодження апаратних макетів під напругою (відлагодження плат з мікроконтролерами, тестування силових LED-драйверів) створює підвищений ризик ураження електричним струмом.



4. Концентрація та когнітивна втома – наявність інтенсивного розумового навантаження вимагає жорсткого дотримання параметрів мікроклімату та акустичного комфорту, оскільки будь-які відхилення призводять до різкого зниження продуктивності.

Специфіка життєвого циклу розробки адаптивних світлотехнічних архітектур охоплює комплекс високоінтелектуальних операцій, які здійснюються з використанням потужних обчислювальних станцій та вимірювальних приладів. Основні вектори інженерної роботи включають:

- побудову точних 3D-моделей просторів для виконання світлотехнічних розрахунків (розподіл світлового потоку, розрахунок відбиття);
- оптимізацію спектральних характеристик та колірної температури світлодіодних матриць з урахуванням кривих чутливості людського ока та циркадних ритмів;
- розробку топологій друкованих плат, схемотехнічне моделювання та віртуальне прототипування електронних вузлів;
- написання, крос-компіляцію та програмне відлагодження керуючого мікрокоду;
- імплементацію сенсорних мереж та протоколів зв'язку для предиктивного автоматичного регулювання;
- натурне випробування мікропроцесорних модулів, зняття осцилограм, аналіз енергоспоживання та збір статистичних даних.

Для нівелювання шкідливого впливу зазначених факторів розробляється комплексний план заходів з охорони праці. Відповідно до державних будівельних норм (ДБН В.2.5-28:2018 [19-20]), рівень загального освітлення в зоні тривалої роботи з комп'ютерною технікою повинен становити не менше 500 лк (а для високоточних складальних робіт з електронними прототипами застосовується комбіноване освітлення до 750 лк). Обмеження дискомфортної засвітки моніторів досягається жорстким нормуванням узагальненого показника дискомфорту ( $UGR < 19$ ) та правильним просторовим

орієнтуванням робочих поверхонь відносно джерел природного світла. Для запобігання розвитку астенії розробляється суворий регламент чергування праці та відпочинку.

#### **4.3 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів**

У сучасному інженерно-технічному середовищі інтенсифікація використання персональних комп'ютерів та засобів автоматизації є базовою умовою для досягнення високої швидкості обробки даних та ефективності проєктування. Проте превалювання екранних пристроїв та цифрових систем моделювання у повсякденній діяльності науково-дослідних лабораторій створює комплексний негативний вплив на фізіологічний, соматичний та психоемоційний стан працюючих.

Екстремально тривала робота за монітором комп'ютерної станції без впровадження превентивних захисних заходів призводить до розвитку ряду професійно зумовлених патологій – хронічних алгій у лямбальній та цервікальній ділянках хребта, прогресуючого зниження гостроти зору (комп'ютерного зорового синдрому), стійкого цефалгічного синдрому та інших деструктивних симптомів. Вимушена гіподинамія та тривале перебування у фіксованій сидячій позі знижують загальний тонус мускулатури, уповільнюють гемодинаміку та виступають потужним тригером для розвитку захворювань серцево-судинної системи.

Окрім суто фізичного впливу, висока щільність інформаційного потоку, необхідність прецизійного написання мікрокоду та оперативного вирішення багатовекторних інженерних задач генерують значне когнітивне навантаження. Постійний психологічний тиск та дефіцит часу викликають синдром хронічної втоми, розлади сну та, як наслідок, стрімке зниження загальної продуктивності та надійності роботи персоналу.

З огляду на це, першочерговим інженерним завданням є організація раціонального і безпечного використання комп'ютерних технологій. Це передбачає обов'язкове впровадження регламентованих перерв для виконання

комплексів виробничої гімнастики, а також підтримання сприятливого психологічного клімату в колективі шляхом оптимізації архітектури робочого простору. Тільки системний облік цих факторів дозволяє досягти стабільного балансу між високою технологічністю виробничих процесів та збереженням здоров'я і працездатності інженерно-технічного персоналу.

Відповідно до класифікації небезпечних і шкідливих виробничих факторів (згідно з [21]), у приміщенні, де здійснюється проектування та апаратне тестування адаптивних систем керування освітленням, виділяють такі ключові ризики:

1. Несприятливі параметри світлового середовища (зорове навантаження) – некоректне просторове орієнтування моніторів, незадовільні рівні штучної освітленості робочих поверхонь, а також наявність прямої та відбитої блискіткості (дзеркальних відблисків на екранах) викликають перенапруження акомодційного апарату ока, стрімку зорову втому (астенопію) та деградацію зорових функцій.

2. Психофізіологічні та ергономічні фактори – невідповідність параметрів меблів антропометричним характеристикам людини примушує до тривалого утримання статично напруженої неправильної пози. Це викликає дегенеративні зміни в опорно-руховому апараті (остеохондроз, міофасціальний больовий синдром). Водночас монотонні високочастотні рухи кисті під час роботи з клавіатурою та маніпулятором «миша» призводять до розвитку хронічних компресійно-ішемічних невропатій.

3. Підвищений рівень електромагнітного випромінювання – тривала дія низькочастотних та радіочастотних електромагнітних полів, що генеруються імпульсними блоками живлення обчислювальної техніки, силовими трансформаторами та бездротовими інтерфейсними модулями (Wi-Fi, ZigBee), створює сумулятивний негативний вплив на функціонування нервової та ендокринної систем організму.

4. Нервово-емоційне та ментальне перенапруження – висока концентрація уваги під час відлагодження алгоритмів у реальному часі та

великі обсяги аналітичної роботи зумовлюють високе психологічне виснаження, що є фактором ризику розвитку професійного вигорання.

5. Пожежна небезпека – наявність значної кількості одночасно функціонуючого електрообладнання, висока щільність прокладання силових та сигнальних кабельних трас у разі порушення правил монтажу чи виникнення аварійних режимів роботи (коротких замикань, перевантажень) створюють високу загрозу виникнення пожежі.

6. Небезпека ураження електричним струмом – проведення натурних випробувань, підключення макетів, дебаг світлодіодних драйверів та взаємодія з нестабільними силовими мережами підвищують ризик випадкового доторкання до струмоведучих частин, що знаходяться під небезпечною напругою. Пошкодження ізоляції або неефективне керування кабельною інфраструктурою створюють передумови для виникнення струмів витоку та електротравматизму.

Для радикальної мінімізації та усунення зазначених інфраструктурних загроз впроваджується комплекс технічних та організаційних заходів. На технічному рівні обов'язковим є застосування трипровідних мереж живлення із контуром захисного заземлення (система TN-S або TN-C-S), встановлення стандартизованої арматури та розеточних груп.

Важливим кроком є інтеграція в силові щити лабораторії пристроїв диференційного захисту – вимикачів диференційного струму (ПЗВ) зі струмом спрацьовування не більше 30 мА (а для розеток, що живлять експериментальні стенди – 10 мА). Для захисту чутливого мікропроцесорного обладнання від комутаційних перенапруг та з метою підвищення електробезпеки доцільно використовувати автоматичні вимикачі з електронними розчеплювачами та модулі захисного відключення з уповільненим або інтелектуальним моніторингом параметрів мережі, що запобігає аварійним ситуаціям при пускових струмах.

Організаційний блок заходів передбачає ергономічне планування простору, використання ортопедичних крісел із регулюванням висоти та кута

нахилу спинки, забезпечення нормованих коефіцієнтів пульсації світла, регулярне проведення планово-попереджувальних ремонтів (ППР) електромереж, а також систематичний інструктаж персоналу щодо правил безпечної експлуатації цифрової та силової електроніки.

#### 4.4 Розрахунок параметрів захисного заземлювального пристрою

Згідно з вимогами чинних Норм та Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [22], для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу в електроустановках напругою до 1000 В (зокрема в мережах з ізольованою або глухозаземленою нейтраллю) максимально допустимий опір контуру захисного заземлення не повинен перевищувати нормоване значення  $R_z \leq 4 \text{ Ом}$ .

Для проєктування контуру обрано вертикальні штучні заземлювачі – сталевий куточок із шириною полиці  $b = 40 \text{ мм}$  (0,04 м) та довжиною  $l = 2,5 \text{ м}$ . Об'єднання вертикальних електродів у єдиний контур здійснюється за допомогою горизонтальної сполучної смуги – сталевого шинопроводу перерізом  $40 \times 4 \text{ мм}$ . Глибина закладення верхнього краю стрижнів від поверхні землі становить  $H_0 = 1 \text{ м}$ .

Визначимо розрахунковий питомий опір ґрунту з урахуванням кліматичного зонального коефіцієнта:

$$\rho_{\text{розр}} = K_z \cdot \rho; \quad (4.1)$$

$$\rho_{\text{розр}} = 1,08 \cdot 100 = 108 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

де  $K_z = 1,08$  – кліматичний коефіцієнт, що враховує сезонні коливання вологості;

$\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – базовий питомий опір ґрунту.

Еквівалентний діаметр вертикального стрижня для кутової сталі розраховується за емпіричним співвідношенням:

$$d_{\text{екв}} = 0,95 \cdot b = 0,95 \cdot 0,04 = 0,038 \text{ м}. \quad (4.2)$$

Глибина закладення середини вертикального заземлювача:

$$H = H_0 + 0,5 \cdot l = 1 + 0,5 \cdot 2,5 = 2,25 \text{ м.} \quad (4.3)$$

Розрахунок опору розтіканню струму для одного вертикального заземлювача виконується за класичною формулою Оллендорфа-Лорана:

$$R_{cm.од.} = \frac{\rho_{розр}}{2\pi l} \cdot \ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+1}{4H-1}, \quad (4.4)$$

$$R_{cm.од.} = \frac{108}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \cdot \ln \frac{5}{0,038} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,25 + 2,5}{4 \cdot 2,25 - 2,5} = 6,87 \cdot \ln(131,5) + 0,5 \cdot \ln(1,77) = 33,8 \text{ Ом.}$$

Периметр ділянки, яка підлягає захисту (лабораторія), становить  $24 \times 7$  м. Відповідно, загальна довжина горизонтальної сполучної смуги дорівнює:

$$L = 2 \cdot (24 + 7) = 62 \text{ м.}$$

При встановленні вертикальних стрижнів із кроком  $a = 2$  м їхня орієнтовна базова кількість становить  $62 / 2 = 31$  шт. Опір розтіканню горизонтальної сполучної смуги  $R_{cm}$  за попередніми розрахунками становить 2,06 Ом.

Необхідний еквівалентний опір усіх вертикальних заземлювачів, щоб у сумі зі смугою забезпечити нормативні 4 Ом, дорівнює:

$$R_{cm} = 1,76 \text{ Ом.}$$

З урахуванням ефекту взаємного екранування стрижнів (коефіцієнт використання  $\eta_{cm} = 0,42$ ) необхідна кількість вертикальних заземлювачів розраховується як:

$$n = \frac{R_{ст.од.}}{\eta_{ст} \cdot R_{ст}}, \quad (4.5)$$

$$n = \frac{33,8}{0,42 \cdot 1,76} = 45,7 \approx 46 \text{ шт.}$$

Фактичний сумарний опір запропонованого багатоелектродного

заземлювального пристрою (з паралельним з'єднанням 46 стрижнів та контурної смуги) дорівнює:

$$R_{\Sigma} \approx 0,95 \text{ Ом.}$$

Спроектована система заземлення, що складається з 46 вертикальних електродів та замкнутого контуру, має розрахунковий опір 0,95 Ом. Цей показник повністю відповідає вимогам ПУЕ [22], гарантуючи надійний захист персоналу від ураження електричним струмом у разі пробоя ізоляції на корпус обладнання.

#### **4.5 Забезпечення пожежної безпеки об'єкта**

Організація пожежної безпеки в інженерних лабораторіях, що спеціалізуються на проектуванні та тестуванні електронних систем освітлення, є критично важливою складовою загальної системи охорони праці. Наявність великої кількості обчислювальної техніки, стендів для мікроконтролерів та силових драйверів, що працюють під напругою, формує специфічне пожежне навантаження, яке вимагає впровадження високотехнологічних заходів превенції та ліквідації загорянь [23].

На етапі просторового планування лабораторії ключовим завданням є забезпечення безперешкодного доступу до евакуаційних виходів. Архітектура розміщення комп'ютерних станцій та вимірювального обладнання повинна гарантувати нормативну ширину проходів (не менше 1,0–1,2 м) для оперативної евакуації персоналу у разі виникнення нештатних ситуацій, що регламентується відповідними Державними будівельними нормами (ДБН В.1.1-7:2016). [24]

Особлива увага приділяється електротехнічній інфраструктурі. Для запобігання тепловому пробоям ізоляції та виникненню коротких замикань необхідно використовувати автоматичні вимикачі із селективним захистом, а також джерела безперебійного живлення (ДБЖ) з функцією подвійного

перетворення. Це дозволяє не лише стабілізувати напругу, а й уникнути іскріння під час раптових перепадів у мережі.

Зважаючи на високу інтелектуальну вартість розробок (вихідні коди алгоритмів, топології друкованих плат), класичні методи збереження даних є неефективними. Втрата даних під час пожежі запобігається не програмними антивірусами, а шляхом апаратного дублювання – автоматичної реплікації масивів даних на віддалені хмарні сервери (Backup) та використання вогнестійких мережесховищ (NAS).

Принциповим є вибір первинних та автоматичних засобів пожежогасіння. Використання традиційних водяних (спринклерних) або порошкових систем у комп'ютерних лабораторіях є абсолютно неприпустимим, оскільки ці вогнегасні речовини безповоротно знищують прецизійну електроніку та призводять до колосальних збитків. Відповідно до європейських норм (наприклад, NFPA 75 / CFPA-E), приміщення з високоцінним діагностичним та комп'ютерним обладнанням обладнуються системами автоматичного газового пожежогасіння, які миттєво локалізують полум'я на молекулярному рівні, не пошкоджуючи плати та оптичні сенсори. Для ручного гасіння локальних осередків (наприклад, загоряння макета на столі) робочі місця комплектуються виключно вуглекислотними (ВВК) вогнегасниками.

Інтеграція системи пожежної сигналізації з розробленою адаптивною системою освітлення відкриває додаткові можливості для збереження життів: у разі спрацювання датчиків диму центральний контролер може автоматично перевести всі світильники у режим максимальної яскравості (100 %) та активувати аварійне освітлення шляхів евакуації, ігноруючи дані датчиків освітленості та присутності.

Комплексний підхід до пожежної безпеки також вимагає безперервного навчання персоналу: проведення регулярних протипожежних інструктажів, практичних тренувань з евакуації та планових аудитів стану інженерних



мереж. Такий динамічний ризик-менеджмент гарантує стійкість об'єкта до аварій і максимальний рівень безпеки для інженерів.

#### **4.6 Висновки до розділу**

У четвертому розділі бакалаврської кваліфікаційної роботи обґрунтовано комплекс технічних та організаційних заходів з охорони праці, виробничої санітарії та пожежної безпеки в інженерній лабораторії:

1. Ідентифіковано шкідливі виробничі фактори – підвищене зорове та нервово-емоційне навантаження при роботі з ПЕОМ, ергономічні ризики, вплив електромагнітних полів, а також небезпеку ураження струмом під час натурних випробувань прототипів.

2. Розраховано захисне заземлення – для захисту персоналу спроектовано заземлювальний пристрій системи TN-S.

3. Забезпечено пожежну безпеку: відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 обґрунтовано впровадження системи автоматичного газового пожежогасіння, оскільки водяне чи порошкове гасіння є неприпустимим для мікропроцесорної техніки.

4. Реалізовано інтеграцію систем – розроблено алгоритм взаємодії, за якого при спрацюванні пожежної сигналізації адаптивна система освітлення автоматично блокує покази датчиків і переводить усі світлодіодні канали в режим 100 % яскравості для забезпечення безпечної евакуації.

Запропоновані рішення повністю відповідають чинним нормативним актам (НПАОП, ДБН, ПУЕ), мінімізують виробничі ризики та створюють безпечне й ергономічне середовище для інженерної діяльності.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальне інженерне завдання – розроблено та досліджено апаратно-програмний комплекс інтелектуальної системи адаптивного керування освітленням. За результатами проведеної роботи та проєктування можна зробити такі основні висновки:

1. На основі аналізу сучасних промислових стандартів доведено перспективність створення локальних мікроконтролерних рішень. Сформовано математичні моделі ймовірності присутності та оцінки візуального комфорту.

2. Обґрунтовано вибір сучасної елементної бази та розроблено принципову електричну схему на основі мікроконтролера AT89S51. Використання прецизійного цифрового оптичного сенсора OPT3002 та інфрачервоного детектора RE200B забезпечило високу точність моніторингу навколишнього середовища.

3. Працездатність розроблених апаратних рішень та керуючих алгоритмів успішно підтверджено шляхом комп'ютерного моделювання у програмному комплексі Proteus.

4. Розроблено комплексний план заходів для забезпечення безпечних умов праці інженерів-проектантів. Виконано практичний розрахунок заземлювального пристрою та обґрунтовано необхідність використання систем пожежогасіння для захисту мікропроцесорної техніки.

Впровадження запропонованого пристрою дозволяє суттєво оптимізувати витрати електроенергії, збільшити експлуатаційний ресурс LED-світильників та створити максимально комфортне, адаптивне й ергономічне середовище для роботи і відпочинку.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Human-Centric Lighting Design: Considering Health and Wellbeing. URL: <https://www.kaarwan.com/blog/architecture/human-centric-lighting-design-considering-health-and-wellbeing?id=942> (date of access: 10.05.2026).
2. Mohamed, A.F.; Ali, A.A.; Benmouna, A.; Ramadan, H.S.; Omran, N.F. IoT-Enabled Smart Street Lighting: A Bibliometric-Driven Review of Energy-Efficient Architectures and Environmental Integration. *Information* **2026**, *17*, 596. <https://doi.org/10.3390/info17060596>
3. Pandharipande A, Caicedo D, Wang X. Sensor-Driven Wireless Lighting Control: System Solutions and Services for Intelligent Buildings [J]. *Sensors Journal*, IEEE, 2014, 14(12):4207-4215.
4. Tran D, Tan Y K. Sensorless Illumination Control of a Networked LED-Lighting System Using Feedforward Neural Network [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(4):2113-2121.
5. Energy-Efficient IoT-Enabled Smart Street Lighting System with Master-Slave Node Architecture / P. Kumar et al. *E3S Web of Conferences*. 2026. Vol. 10. Article 05002. URL: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2026/10/e3sconf\\_ispes2026\\_05002.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2026/10/e3sconf_ispes2026_05002.pdf) (date of access: 15.05.2026).
6. Pasolini, G.; Toppan, P.; Toppan, A.; Bandiera, R.; Mirabella, M.; Zabini, F.; Bonata, D.; Andrisano, O. Comprehensive Assessment of Context-Adaptive Street Lighting: Technical Aspects, Economic Insights, and Measurements from Large-Scale, Long-Term Implementations. *Sensors* **2024**, *24*, 5942. <https://doi.org/10.3390/s24185942>
7. Zigbee 101: посібник для початківців. URL: <https://dou.ua/forums/topic/38080/> (дата звернення: 17.05.2026).
8. A comprehensive survey on the security of low power wide area networks for the Internet of Things / Giovanni Stanco et al. *ICT Express*. 2024. Vol. 10. P. 519–552. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2024.03.003>

9. Direct Illuminance-Contribution-Based Lighting Control for IoT-Based Lighting Systems in Smart Buildings / S. Kim et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, iss. 12. Article 5054. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/12/5054>
10. Tech Lumen. Lighting Controls & Smart Systems. URL: <https://www.techlumen.gr/en/guide/lighting-controls-smart-systems-guide/> (date of access: 17.05.2026).
11. DMX Guide. sACN: The Complete Streaming ACN Guide. URL: <https://dmx-guide.com/sacn-streaming-acn-guide.html> (date of access: 17.05.2026).
12. Wu, X.; Qin, P. Adaptive Lighting and Thermal Comfort Control Strategies in Digital Twin Classroom via Deep Reinforcement Learning. *Electronics* 2026, 15, 873. <https://doi.org/10.3390/electronics15040873>
13. Microchip. Atmel Products. URL: <https://www.microchip.com/en-us/about/corporate-overview/acquisitions/atmel> (date of access: 22.05.2026).
14. Chong, P.L.; Ismail, D.; Ng, P.K.; Kong, F.Y.; Basir Khan, M.R.; Thirugnanam, S. A TRIZ Approach for Designing a Smart Lighting and Control System for Classrooms Based on Counter Application with Dual PIR Sensors. *Sensors* 2024, 24, 1177. <https://doi.org/10.3390/s24041177>
15. Low-Noise Long-Range PIR Sensor Conditioner Circuit Design / Texas Instruments. Application Report SLAA916B. 2024. 12 p. URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/slaa916> (date of access: 22.05.2026).
16. OPT3002 Light-to-Digital Sensor with Wide Spectral Bandwidth: Datasheet (Rev. A) / Texas Instruments. Dallas, TX, USA, 2024. 35 p. URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/OPT3002> (date of access: 24.05.2026).
17. Virtual System Modelling Software – VSM MCU Simulation. URL: <https://www.labcenter.com/whyvsm/> (date of access: 30.05.2026).
18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями: Затв. Наказом Мінсоцполітики України від 14.02.2018 № 207 / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18> (дата звернення: 05.06.2026).

19. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. Будстандарт. Сервіс документів. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885) (дата звернення: 08.06.2026).
20. Modern Ergonomic Office Trends: Designing Workspaces for Productivity and Well-being in 2026 / Corporate Workspace Insights. CC Office Design. 2026. URL: <https://ccofficefurniture.com/modern-ergonomic-office-trends-2026-productivity-design/> (date of access: 08.06.2026).
21. Наказ МОЗ України № 248 від 08.04.2014 «Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища». Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text> (дата звернення: 09.06.2026).
22. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Розділ 1.7. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом: Затв. Наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. Київ, 2017. URL: <https://pozhezhni-systemy.org.ua/pue-pravyla-ulashtuvannya-elektroustanovok/> (дата звернення: 12.06.2026).
23. Правила пожежної безпеки в Україні: Затверджено Наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30.12.2014 № 1417. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 05.03.2015 за № 252/26697. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15> (дата звернення: 14.06.2026).
24. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. Будстандарт. Сервіс документів. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=68456](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68456) (дата звернення: 14.06.2026).
25. Закон України «Про охорону праці». Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 15.06.2026).

26. Кодекс цивільного захисту України. Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 16.06.2026).
27. Я. О. Серіков, І. В. Білецький, Д. М. Калюжний «Охорона праці в галузі електроенергетики» (специфічні питання охорони праці в електроенергетичних установках). – Харків, ХНУРЕ, 2021. 247 с.
28. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник / О. О. Шавьолкін; Харків, над. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
29. Назаренко Л. А. Штучне зовнішнє освітлення: навч. посібник / Л. А. Назаренко, К. І. Іоффе; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 88 с.
30. К. І. Іоффе, О. Л. Черкашина. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування світлотехнічними пристроями». Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2018. 56 с.