

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

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Владислав КАРНАУШЕНКО

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

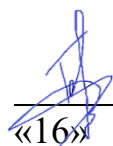
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Світлотехніка та дизайн світлового середовища

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СДС

Віталій ГЕРАСИМЕНКО



«16» червня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Карнаушенко Владислав Андрійович

1 Тема роботи: Система автоматичного керування освітленням громадських будівель.

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:
16.06.2026 р.

3 Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Матеріали переддипломної практики. Загальні принципи побудови систем керування.

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

4.1 Аналітична частина (огляд, аналіз, оцінка) Аналіз систем керування природним освітленням. Огляд стратегій автоматичного керування. Оцінка протоколів керування освітленням.

4.2 Світлотехнічна частина (вибір параметрів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення) Архітектура автоматизованої системи керування. Розробка структурної схеми, алгоритму автоматизованої системи громадської будівлі.

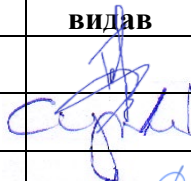
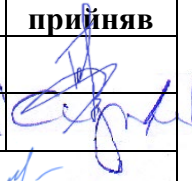
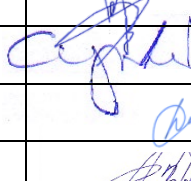
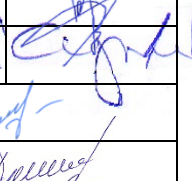
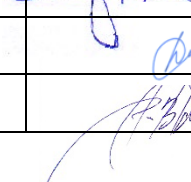
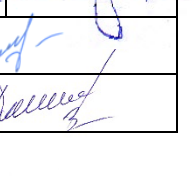
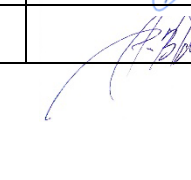
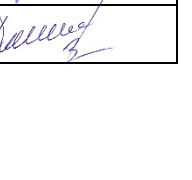
4.3 Електротехнічна частина (напрями удосконалення, результати проведеної роботи) Розрахунок параметрів енергоефективності та моделювання системи.

4.4 Охорона праці.

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

Постановка завдання. Мета, предмет, основні положення бакалаврської кваліфікаційної роботи. Аналіз систем керування природним освітленням. Архітектура автоматизованої системи керування. Структурна схема та алгоритм. Схемотехнічні рішення. Результати 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 – 16.06.26	
6	Підготовка доповіді та презентації	15.06.26 – 16.06.26	

Здобувач  Владислав КАРНАУШЕНКО

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи  Віталій ГЕРАСИМЕНКО

АНОТАЦІЯ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглядається розробка автоматизованої системи керування освітленням для громадських і комерційних будівель (класу BMS) на основі мікроконтролерної архітектури та сучасної цифрової сенсорної бази.

У першій частині роботи проведено аналіз існуючих підходів до побудови енергоефективних систем автоматизації будівель, приділено увагу обґрунтуванню вибору обчислювальної платформи та компонентної бази для апаратної реалізації комплексу.

У другій частині роботи розроблено структурну схему та комплекс алгоритмів автоматизованої системи. Створено два диференційовані алгоритми керування: адаптивний (компенсація денного світла за допомогою ШІМ-димірування) та дискретний (жорстка таймерна логіка для технічних зон).

У третій частині роботи розглянуто архітектуру автоматизованої системи, виконано розрахунок параметрів енергоефективності та моделювання системи.

У розділі «Охорона праці» виконано комплексний аудит потенційних виробничих небезпек та запропоновано систему нормативних умов праці для працівників у приміщенні науково-дослідної лабораторії.

Основними результатами роботи є розробка енергоефективної автоматизованої системи керування освітленням, яка рекомендована до практичного впровадження для суттєвого зниження енергетичних витрат на об'єктах інфраструктури.

Ключові слова (5-6 слів): автоматизована система, енергоефективність, мікроконтролер, освітлення, BMS, алгоритм.

Загальний обсяг бакалаврської кваліфікаційної роботи становить: сторінок – 81; формул – 12; рисунків – 33; таблиць – 1; літературних джерел – 33; слайдів – 10.

ЗМІСТ

ВСТУП_____	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА _____	9
1.1 Загальні принципи побудови систем керування _____	9
1.2 Архітектура та топологія мереж _____	15
1.2.1 Типи систем керування природним освітленням _____	20
1.3 Стратегії автоматичного керування _____	25
1.3.1 Ключові аспекти щодо проєктування систем керування ____	32
1.4 Протоколи керування освітленням _____	35
2 СВІТЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА _____	43
2.1 Обґрунтування вибору апаратної бази для системи автоматизації освітлення _____	43
2.2 Архітектура автоматизованої системи керування _____	45
2.2.1 Підсистема детектування присутності та освітленості ____	49
2.2.2 Аналізатор природного світла та комутаційне обладнання .	51
2.3 Розробка структурної схеми автоматизованої системи громадської будівлі _____	53
2.4 Розробка алгоритмічного забезпечення системи керування ____	58
2.5 Схемотехнічні рішення та логіка вимірювань _____	63
3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА _____	65
3.1 Розрахунок параметрів енергоефективності та моделювання системи _____	65
4 ОХОРОНА ПРАЦІ _____	69
4.1 Забезпечення охорони праці _____	69
4.2 Характеристика об'єкта проєктування та аудит умов праці ____	69
4.3 Ідентифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів	71
4.4 Комплекс організаційно-технічних заходів із забезпечення безпеки _____	72
4.5 Пожежна безпека _____	74
4.6 Висновки до розділу _____	75

ВИСНОВКИ _____	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ _____	78

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової економіки та інфраструктури нерозривно пов'язаний із процесами оптимізації енергоспоживання. На тлі вичерпання традиційних джерел генерації та глобальних кліматичних змін, підвищення енергоефективності інженерних мереж трансформувалося з економічної опції у життєво необхідну стратегію. У загальній структурі споживання електроенергії сучасними містами частка громадських та комерційних будівель є домінуючою, причому до 30–40 % цих витрат генерують саме системи штучного освітлення.

Для України питання інтелектуального енергозбереження набуло безпрецедентної актуальності в умовах критичних викликів для національної енергетичної безпеки та необхідності масштабного відновлення інфраструктури. Традиційні (ручні або напівавтоматичні) системи керування освітленням у громадських просторах є морально застарілими, оскільки їхня ефективність нівелюється людським фактором, що призводить до колосальних перевитрат ресурсу в неробочий час або в умовах достатньої природної інсоляції.

Водночас євроінтеграційний вектор України вимагає жорсткої імплементації директив ЄС щодо енергоефективності будівель (EPBD), які стандартизують впровадження систем класу BMS (Building Management System). Стрімкий розвиток концепції «Інтернету речей» (IoT), доступність високоточних цифрових сенсорів та мікропроцесорних платформ створюють унікальні передумови для розробки недорогих, але високоефективних апаратно-програмних рішень.

Впровадження диференційованих алгоритмів керування (адаптивної компенсації денного світла для відкритих офісів та дискретної логіки для технічних приміщень) здатне вирішити комплексне завдання:

- радикальне зниження операційних витрат (OPEX) на електроенергію (потенціал ресурсозбереження сягає 30–50 %);

- суттєве скорочення викидів парникових газів шляхом зниження пікових навантажень на енергосистему;
- автоматична підтримка нормованого світлового комфорту, що прямо корелює зі зниженням зорової втоми та підвищенням продуктивності персоналу (концепція Human Centric Lighting).

Таким чином, розробка та дослідження автоматизованої системи керування освітленням, адаптованої до специфіки громадських просторів, є надзвичайно актуальним науково-прикладним завданням, що має високу практичну цінність.

Мета бакалаврської кваліфікаційної роботи полягає у розробці та дослідженні автоматизованої системи керування освітленням для громадських і комерційних будівель, яка забезпечує максимізацію енергозбереження та підтримку нормативного візуального комфорту шляхом впровадження адаптивних та дискретних алгоритмів на базі мікроконтролерної архітектури.

Об'єкт дослідження: процес керування енергетичними потоками в системах штучного освітлення громадських будівель.

Предмет дослідження: методи, алгоритмічні моделі та апаратно-програмні засоби автоматизації систем освітлення для підвищення їхньої енергоефективності.

Задачі бакалаврської кваліфікаційної роботи:

1. Провести аналіз існуючих концепцій побудови систем класу BMS.
2. Розробити структурну схему та комплекс алгоритмів керування.
3. Здійснити апаратно-програмну реалізацію обчислювального ядра системи на базі мікроконтролера архітектури AVR.
4. Розробити комплекс організаційно-технічних заходів з охорони праці, що враховує ергономічні, пожежні та електротехнічні ризики.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні принципи побудови систем керування

Система керування – це сукупність механічних або електронних компонентів, які у своїй сукупності регулюють стан і поведінку інших пристроїв або систем для досягнення бажаного результату. Її базовий принцип роботи полягає у формуванні вихідного сигналу на основі вхідних даних та логіки їх перетворення. Залежно від рівня втручання людини, системи керування поділяються на ручні та автоматичні.

У контексті штучного освітлення, система керування являє собою комплекс обладнання, що дозволяє контролювати параметри роботи освітлювальної установки [1]. Це включає активацію (увімкнення), деактивацію (вимкнення), а також адаптацію поточного стану освітлення, зокрема:

- регулювання інтенсивності світлового потоку (димірування);
- зміну кольору випромінювання;
- керування корельованою колірною температурою (ККТ) для створення біодинамічного освітлення (Human-Centric Lighting).

Аналогічний підхід застосовується і до керування сонцезахисними системами (природним освітленням). У цьому випадку вихідними пристроями виступають електродвигуни, які піднімають або опускають ролети, або ж встановлюють їх у заздалегідь визначене положення. Електроприводи також можуть керувати ламелями жалюзі, регулюючи кут їх нахилу для блокування прямого потрапляння сонячних променів. Використання світловідбиваючих ламелей дозволяє ефективно контролювати та перерозподіляти природне світло в глибину приміщення за заданою схемою.

Функціональна структура будь-якої системи керування ґрунтується на трьох основних ланках [2] (рис. 1.1).

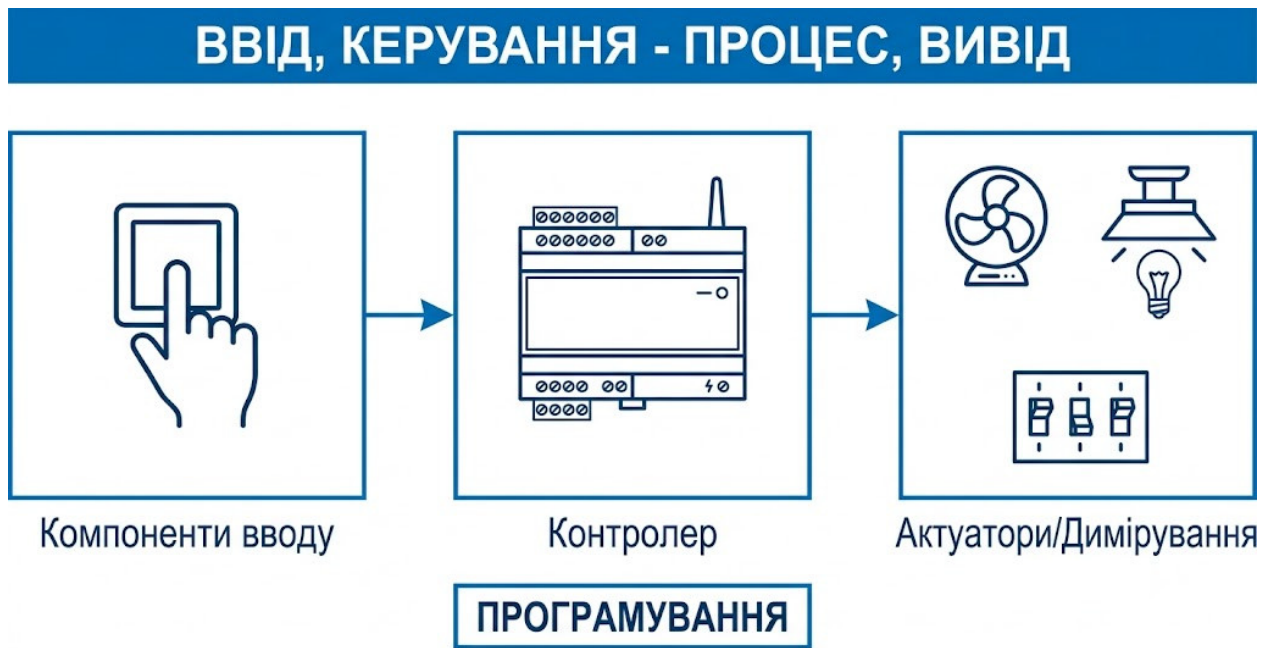


Рисунок 1.1 – Базова архітектура системи керування: компоненти вводу , процес керування та компоненти виводу

В автоматичних системах керування освітленням один або декілька сенсорів здійснюють безперервне зчитування параметрів середовища (наприклад, виявлення присутності/руху, вимірювання рівня природної освітленості тощо). Зібрані фізичні величини перетворюються на електричний або цифровий сигнал, який передається до контролера. Сенсори часто є найбільш «видимим» і функціонально визначальним компонентом автоматичних систем. У повністю ручних системах керування сенсори відсутні, а генерація вхідного сигналу здійснюється безпосередньо користувачем через механічні вимикачі, панелі керування або мобільні додатки [3].

Отримавши вхідний сигнал, контролер аналізує його з урахуванням заданих параметрів, таймерів або алгоритмів (на сучасному етапі – з можливим залученням елементів штучного інтелекту). Після обробки контролер генерує «сценарій дії» та надсилає відповідну команду керування до виконавчого механізму.

На фінальному етапі актуатор (виконавчий механізм) отримує команду від контролера і виконує фізичну дію.

Для систем штучного освітлення такою дією є димірування, увімкнення або вимкнення джерела світла. Найбільш розповсюдженими актуаторами тут є електронні пускорегулювальні апарати (ЕПРА) або сучасні LED-драйвери.

Для систем сонцезахисту актуатором є двигун, який переміщує механізм у задане положення.

Як у ручних, так і в автоматичних системах, ці три основні компоненти можуть бути реалізовані як окремі пристрої, розподілені у просторі, так і об'єднані в єдиний моноблок (наприклад, мультисенсор із вбудованим реле).

Для забезпечення коректної взаємодії всі компоненти повинні мати здатність обмінюватися інформацією. Комунікація між елементами системи може бути реалізована за допомогою аналогових (наприклад, 1-10V, релейне керування) або сучасних цифрових протоколів (DALI, KNX, DMX512 тощо), що відкриває можливості для інтеграції освітлення в глобальні системи управління будівлею (BMS) та середовище Інтернету речей (IoT) [4].

У теорії автоматичного керування виділяють два основні класи систем: розімкнені та замкнені (рис. 1.2). Принципова різниця між ними полягає у наявності або відсутності зворотного зв'язку [3].

У розімкненій системі керування вихідний сигнал, згенерований системою, не впливає на подальші вимірювання, що виконуються компонентами вводу (сенсорами), а також на дії, визначені контролером. Оскільки у процесі керування не використовується зворотний зв'язок від самої системи, такий контур керування є розімкненим.

Натомість замкнена система керування враховує поточний вихідний сигнал і коригує його для досягнення бажаного стану. Система використовує результати своєї роботи на наступному етапі керування. Завдяки використанню зворотного зв'язку процес керування утворює замкнений контур. Це дозволяє результатам роботи системи поступово наближатися до заданого (бажаного) значення через багатоетапний ітераційний процес.

Типовим прикладом реалізації обох принципів у сфері освітлення є системи компенсації денного світла (daylight harvesting), які автоматично

регулюють рівень штучного освітлення залежно від обсягу природної інсоляції [5].

Системи, що використовують сенсори для вимірювання виключно природного освітлення (розміщені зовні будівлі або спрямовані безпосередньо у вікно), належать до розімкнених.

Системи, сенсори яких розташовані таким чином, що вимірюють сумарний рівень як природного, так і штучного освітлення на робочій поверхні, є замкненими.



Рисунок 1.2 – Використання сенсорів у системах керування освітленням: зчитування зовнішніх параметрів освітленості (розімкнений контур) або внутрішніх параметрів (замкнений контур)

Принцип замкнутого контуру спрямований на підтримання постійного, нормованого рівня освітленості на робочій площині. Це означає, що світловий потік, відбитий від поверхні назад до сенсора на стелі, також має залишатися незмінним.

У замкнених системах електричного освітлення світильники часто оснащуються власними інтегрованими сенсорами (рис. 1.4). Зазвичай це сенсор освітленості, спрямований донизу (з чутливістю, обмеженою певним тілесним кутом). Це дозволяє автоматично підвищувати або знижувати рівень штучного освітлення для збереження заданої освітленості робочої зони під час зміни рівня природного світла. Такий датчик часто працює в комбінації з

сенсором присутності, що дозволяє активувати штучне світло лише за необхідності та з мінімально потрібною потужністю.

У деяких конфігураціях сенсор (рис. 1.3) може бути винесеним (встановлюватися на стелі окремо від корпусу світильника).



Рисунок 1.3 – Приклад сенсора, що використовується в замкненій системі (датчик розміщено на стелі окремо від світильника)



Рисунок 1.4 – Локалізована замкнена система зі стельовим сенсором

Специфіка проектування та розміщення сенсорів у замкнених системах є наступною:

- можливе створення топології, де один сенсор є спільним для цілої групи (зони) світильників;
- пряме світло від світильників, що потрапляє безпосередньо на сенсор денного світла, викликає хибні спрацювання системи. Для мінімізації цього явища сенсори повинні бути розташовані таким чином, щоб унеможливити потрапляння на них прямого світлового потоку від джерел штучного світла;
- для світильників відбитого (непрямого) світла існують альтернативні варіанти розміщення: якщо світильник розташований паралельно вікну, сенсор можна розмістити на його нижній частині, спрямувавши до вікна;
- розміщення сенсора між світильниками в одному ряду допомагає уникнути зворотного засвічення у випадку використання вбудованих світильників із широким розсіювачем.

У розімкненому підході сенсор вимірює виключно природне світло та передає інформацію до контролера, який на основі закладеного алгоритму приймає рішення щодо регулювання освітлення.

Найчастіше для цього використовується зовнішній сенсор денного світла (встановлений на фасаді або даху). У такому положенні він ізольований від впливу внутрішніх штучних джерел світла і забезпечує абсолютно незалежні показники інсоляції.

Сенсор також може розташовуватися всередині приміщення, будучи спрямованим безпосередньо на вікно. У такому випадку його калібрують таким чином, щоб зчитувати величину, яка корелює з корисним світлом на робочій поверхні або прогнозує ризик виникнення сліпучої дії (дискомфортного блиску) для користувачів.

Якщо сенсор встановлений зовні, алгоритм контролера та процес пусконаладження мають обов'язково враховувати коефіцієнт світлопропускання віконних конструкцій та стан систем сонцезахисту (жалюзі, ролет).

В обох випадках (як для замкнених, так і для розімкнених систем) критично важливою умовою ефективної роботи та досягнення розрахункових показників енергоефективності є точне та професійне пусконаладження системи безпосередньо на об'єкті [6-7].

1.2 Архітектура та топологія мереж

Для забезпечення комунікації між компонентами освітлювальної мережі можуть використовуватися різні топології (як дротові, так і бездротові).

Топологія описує фізичні або логічні взаємозв'язки компонентів у мережі. Вибір конфігурації безпосередньо впливає на ключові характеристики системи: надійність і стійкість мережі до збоїв, час поширення сигналу, максимальну кількість підключених пристроїв, а також на загальну відстань, яку може охоплювати мережа. Основні види мережевих топологій (послідовна, шина, зірка, кільце та сітка), згідно зі стандартом ANSI/IES TM-23-17, наведені на рис. 1.5.

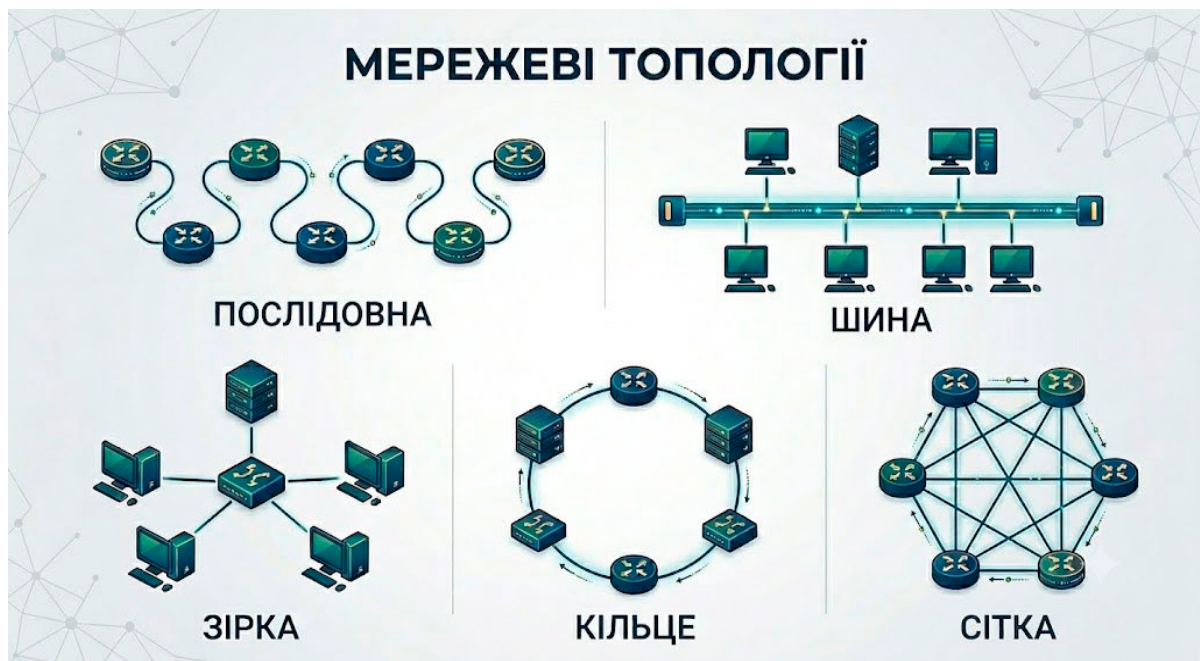


Рисунок 1.5 – Основні мережеві топології, що застосовуються в системах керування

Сучасні бездротові системи керування освітленням (наприклад, на базі стандартів Bluetooth, ZigBee та Thread) все частіше використовують топологію сітки (mesh). У таких мережах усі вузли можуть з'єднуватися один з одним за допомогою множинних переходів [2, 80]. Передача даних у mesh-мережах може здійснюватися двома основними методами:

1. Лавинна маршрутизація: кожен вузол у зоні дії отримує повідомлення, а вузли, що виконують роль ретрансляторів, передають його далі всім іншим доступним пристроям. Цей підхід є базовим для стандарту Bluetooth Mesh.

2. Маршрутизація: мережа забезпечує безперервне з'єднання та здатна автоматично переконфігурувати маршрути в обхід заблокованих або пошкоджених ділянок. Сигнал «перестрибує» від вузла до вузла, доки не досягне пункту призначення.

Важливою технічною перевагою комірчастих мереж є їхня здатність до самовідновлення: мережа продовжує функціонувати навіть при виході з ладу окремого вузла або погіршенні якості локального з'єднання. Це робить mesh-мережі високонадійними, оскільки між джерелом і приймачем сигналу завжди існує більше одного фізичного або логічного шляху.

Незважаючи на те, що радіус дії між окремими вузлами у стандартах Bluetooth і ZigBee зазвичай є обмеженим (10–20 м), загальне покриття мережі може в рази перевищувати цю відстань завдяки регенерації сигналу на кожному активному вузлі. Проте цей процес має технічні обмеження: зі збільшенням кількості вузлів на шляху від джерела до приймача зростає затримка часу, що може призвести до надто повільної реакції системи освітлення на команди користувача або датчиків.

Система управління будівлею (Building Management System – BMS), також відома як система автоматизації будівлі (BAS), є комп'ютеризованою інфраструктурою, що встановлюється для централізованого контролю та моніторингу інженерного й електричного обладнання (рис. 1.6). Вона охоплює

системи вентиляції, освітлення, електропостачання, пожежної безпеки та охорони [9-11].

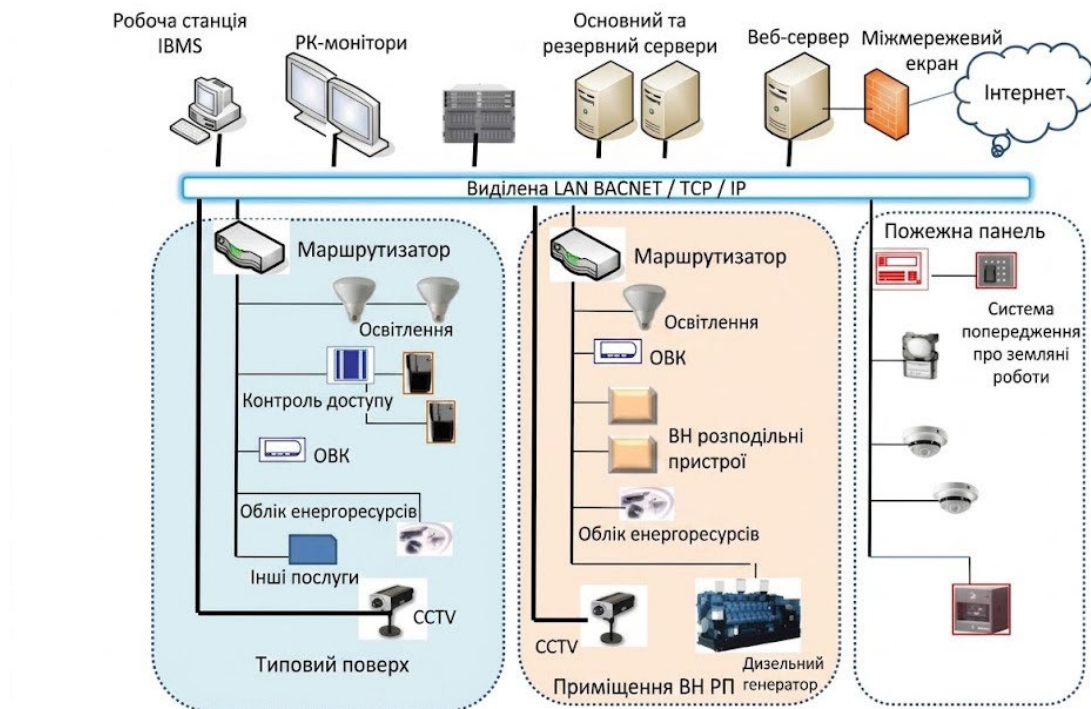


Рисунок 1.6 – Архітектура інтегрованої системи управління будівлею

BMS складається з апаратного та програмного забезпечення. Програмна частина зазвичай має ієрархічну структуру і може використовувати пропрієтарні протоколи (наприклад, C-Bus, Profibus). Сучасні виробники також активно впроваджують у BMS інтернет-протоколи та відкриті стандарти. У галузі автоматизації громадських будівель використовується низка комунікаційних протоколів та шин даних, зокрема:

- KNX (стандарт для автоматизації комерційних будівель);
- EtherCAT;
- LON;
- BACnet та Modbus;
- CASAMBI (на базі протоколу Low Power Bluetooth);
- VLAN, DeviceNet, XML, SOAP тощо.

Керування освітленням може розглядатися як інтегрована підсистема (функціональний модуль) у межах глобальної BMS. У такій архітектурі

сенсори освітленості та присутності надсилають дані до центрального процесора BMS, де програмне забезпечення формує відповідні керуючі сигнали на основі загальної логіки роботи будівлі. Після цього драйвери в освітлювальних приладах змінюють споживану потужність (димірують або перемикають стан) відповідно до отриманих команд. Інтеграція освітлення в BMS має свої техніко-економічні особливості. Серед переваг – це висока економічна доцільність, якщо в будівлі вже передбачено встановлення базової системи BMS для інших інженерних мереж. Серед недоліків – процес пусконаладження та подальше технічне обслуговування такої комплексної системи вимагають залучення вузькоспеціалізованих та сертифікованих інженерів-операторів.

Існує низка підходів до побудови архітектури систем автоматизації, які можуть будуватися як на локальному, так і на централізованому принципах керування. Вибір конкретного рішення залежить від масштабу об'єкта, вимог до надійності та необхідності інтеграції з іншими інженерними мережами.

У децентралізованих системах зв'язок між пристроями (наприклад, світильниками) та сенсорами здійснюється напряму, без використання центрального контролера або комп'ютерного блоку керування. Основна перевага такого підходу – незалежність. Тут кожна локальна зона може функціонувати автономно від решти будівлі. Це актуально як для систем штучного освітлення, так і для систем керування денним світлом.

Наприклад, системи сонцезахисту можуть оснащуватися двигунами з вбудованими мікроконтролерами, що здатні безпосередньо обробляти інформацію від датчиків освітленості або метеостанцій.

Основні характеристики децентралізованих систем (зокрема, на базі бездротових технологій, таких як EnOcean) наступні:

- для кожного виконавчого компонента (світильника, мотора жалюзі) потрібен окремий актуатор (реле або димер);
- актуатори встановлюються безпосередньо між джерелом живлення та керованим пристроєм;

- бездротові вимикачі та сенсори індивідуально «прив'язуються» з відповідними актуаторами;
- децентралізоване керування є ідеальним рішенням для невеликих об'єктів або під час реконструкції існуючих приміщень, оскільки мінімізує потребу у прокладанні нових кабельних трас (рис. 1.7).

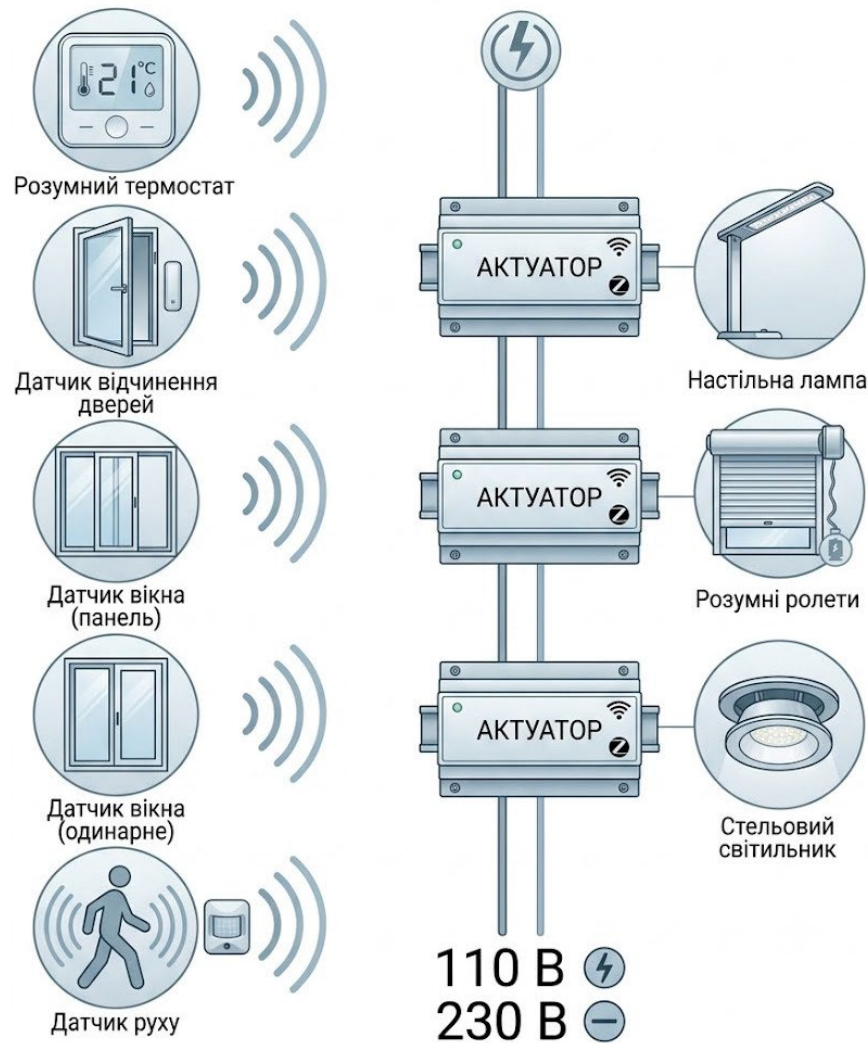


Рисунок 1.7 – Децентралізована система управління розумного будинку

Централізована архітектура передбачає наявність одного головного блоку керування (контролера), який встановлюється для всієї будівлі, окремого поверху або великої функціональної зони.

Система може функціонувати як автономно, так і бути повноцінно інтегрованою в загальну систему управління будівлею (BMS).

Всі сигнали від сенсорів та вимикачів надходять до центрального контролера, який їх обробляє та надсилає команди відповідним актуаторам (рис. 1.8). Цей підхід спрощує глобальний моніторинг, диспетчеризацію та збір статистики енергоспоживання.



Рисунок 1.8 – Централізована система управління розумного будинку

1.2.1 Типи систем керування природним освітленням

Ефективне автоматичне керування освітленням у громадських будівлях неможливе без контролю природної інсоляції. Згідно з номенклатурою американської організації AERC (Attachment Energy Rating Council), виділяють такі основні типи сонцезахисних пристроїв (рис. 1.9):

- горизонтальні жалюзі;
- рулонні штори / ролети;
- захисні ролети / рольставні;

- штори-плісе;
- стільникові штори.



Рисунок 1.9 – Основні типи затінення вікон

Європейська організація із сонцезахисту (ES-SO) [12] пропонує детальнішу класифікацію, поділяючи пристрої за місцем їх встановлення та здатністю до трансформації на чотири групи:

1. Динамічні зовнішні: жалюзі, захисні та рулонні ролети.
2. Статичні зовнішні: структурні архітектурні елементи (наприклад, ламелі, козирки, статичні мембрани).
3. Динамічні міжскляні: жалюзі та стільникові штори, вбудовані всередину склопакета.
4. Динамічні внутрішні: жалюзі, штори-плісе, стільникові та рулонні штори.

За результатами європейського дослідницького проекту KEEP COOL та на основі даних ES-SO [12], різні типи сонцезахисних пристроїв мають різну ефективність при виконанні конкретних задач. Оцінка їхніх функціональних характеристик наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Функціональні характеристики систем затінення

Критерій оцінки	Зовнішні динамічні (жалюзі, ролети)	Статичні зовнішні	Міжскляні системи	Внутрішні динамічні (штори, жалюзі)
Перерозподіл та спрямування денного світла углиб приміщення	++	-	+	від - до +
Змінність рівня проникнення денного світла	++	--	++	++
Контроль надходжень сонячного тепла	++	+	+	від - до --
Варіативність <i>g-фактору</i> (коефіцієнта сонячного пропускання)	++	--	++	++
Захист від сліпучої дії	++	о	++	++
Забезпечення приватності	++	о	++	++
Збереження візуального зв'язку із зовнішнім середовищем	++	++	++	від + до --
Підвищення теплоізоляції будівлі	від + до ++	--	о	+
Стійкість до вітрових навантажень	від + до ++	++	н/з	н/з

Оцінювання: «++» – дуже добре; «+» – добре; «о» – нейтрально; «-» – швидше погано; «--» – погано; «н/з» – не застосовується

Аналіз даних табл. 1.1 показує, що зовнішні динамічні системи (особливо керовані жалюзі) є найбільш універсальним та енергоефективним рішенням. Вони не лише запобігають перегріву приміщень, відбиваючи сонячну енергію до її потрапляння на склопакет, але й здатні динамічно перерозподіляти природне світло (функція daylight redirection), що дозволяє

глибше освітлювати приміщення та значно знижувати витрати на штучне освітлення.

Частка моторизованих пристроїв керування природним освітленням (сонцезахисних систем) неухильно зростає. Зокрема, сучасні зовнішні системи здебільшого від початку оснащуються електроприводами та є готовими до інтеграції в екосистему інтелектуальної будівлі. Водночас у житловому секторі автоматизація досі впроваджується рідко, і керування зводиться до ручного втручання користувача. Це створює високий ризик перегріву приміщень, особливо у літній період, коли користувачі не можуть або забувають вчасно опустити ролети. З огляду на це, нові європейські будівельні стандарти (зокрема, ініційовані в Австрії та імplementовані в нормативи ЄС щодо енергоефективності будівель) пропонують нормативно враховувати потенціал енергозбереження, який забезпечується саме автоматизованим керуванням сонцезахистом.

Найбільш елементарною стратегією є керування за таймером, коли сонцезахисні пристрої змінюють положення у чітко визначений час або залежно від астрономічного положення сонця (наприклад, відкриття на світанку та закриття через дві години після заходу сонця). Ця функція часто комбінується з пороговими значеннями освітленості: якщо зовнішня освітленість падає нижче 20 лк, система ідентифікує настання темної пори доби та автоматично закриває жалюзі для збереження тепла і приватності.

У громадських та комерційних будівлях базове керування зазвичай ґрунтується на моніторингу глобальної горизонтальної або вертикальної сонячної радіації. Ці дані вимірюються метеостанціями на даху будівлі та математично перераховуються для кожної орієнтації фасаду. При досягненні певного порогу інсоляції пристрої переходять у заздалегідь запрограмоване положення [6].

Для горизонтальних жалюзі керування включає не лише рівень їх опускання, але й регулювання кута нахилу ламелей (0° відповідає

горизонтальному положенню, 90° – повністю закритому). Замість повного закриття жалюзі часто застосовується стратегія підтримання кута відсікання.

Кут відсікання – це мінімальний кут нахилу ламелей, який повністю блокує пряме проникнення сонячних променів і перекриває пряму видимість сонця з будь-якої ймовірної позиції очей людини в приміщенні (рис. 1.10). Ця стратегія, що також має назву «відстеження сонця», дозволяє максимізувати проникнення розсіяного денного світла, одночасно суттєво знижуючи теплові надходження. Для інших типів пристроїв (наприклад, рулонних штор) єдиною доступною командою є зміна позиції по висоті (найчастіше – повне опускання).

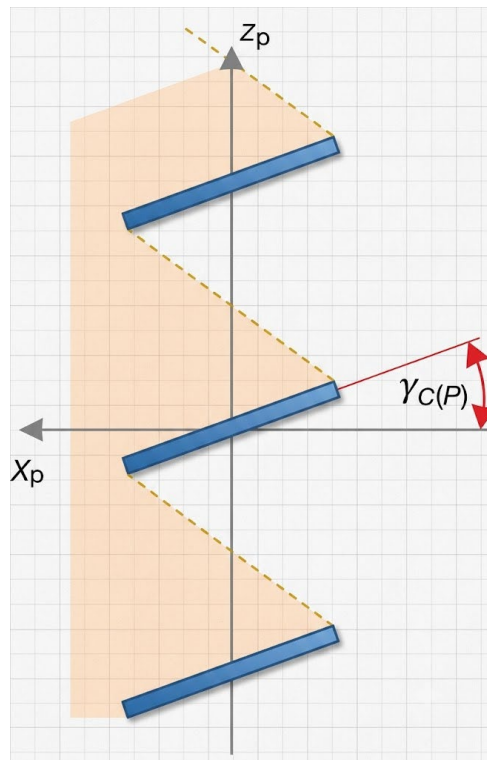


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення кута відсікання
прямого сонячного випромінювання

Альтернативним підходом є «відстеження тіні», яке зберігає візуальний контакт користувачів із зовнішнім середовищем. Стратегія полягає в обмеженні глибини проникнення прямих сонячних променів. Наприклад, алгоритм може дозволяти інсоляцію лише на глибину 50 см від підвіконня або

на ділянках підлоги, де висока яскравість і теплові надходження не викликатимуть дискомфортного блиску чи перегріву робочої зони.

Важливою архітектурною особливістю будь-якої системи керування є те, що всі користувацькі та кліматичні алгоритми автоматично скасовуються захисними апаратними функціями:

1. **Вітровий захист:** при фіксації анемометром швидкості вітру, що перевищує допустимий поріг, усі зовнішні пристрої негайно переходять у безпечне (повністю підняте) положення.

2. **Захист від обмерзання:** при поєднанні атмосферних опадів і низьких температур система блокує будь-який рух механізмів для запобігання пошкодженню електроприводів через налипання снігу або льоду.

Більшість згаданих вище стратегій працюють ізольовано і не враховують комплексний вплив сонцезахисних пристроїв на загальний енергобаланс будівлі. У класичних алгоритмах відсутній прямий зв'язок між витратами енергії на штучне освітлення (чи HVAC-системи) та обсягом сонячної енергії, що надходить ззовні. Оптичні характеристики матеріалів сонцезахисту (коефіцієнт пропускання, фактор відкритості) рідко інтегруються в керуючу логіку «з коробки». Датчики лише постачають сирі дані, тому для забезпечення максимальної енергоефективності виникає критична потреба у складному програмному пусконаладженні та інтеграції в єдину BMS-систему будівлі [9-11].

1.3 Стратегії автоматичного керування

З моменту винаходу ламп розжарювання у XIX столітті постійно тривав пошук рішень для збільшення світлового потоку при одночасному зниженні енергоспоживання. Протягом останніх 40 років фокус світлотехнічної галузі змістився на підвищення світлової віддачі джерел світла та вдосконалення оптики світильників. Це призвело до радикального зниження питомої потужності освітлювальних установок (наразі цей показник становить 4–8 Вт/м² для більшості громадських приміщень). Завдяки світловій віддачі, що

перевищує 150–200 лм/Вт, світлодіоди (LED) стали безальтернативно найефективнішим джерелом світла, а масовий перехід на цю технологію отримав назву «ледифікація» [13] (рис. 1.11).

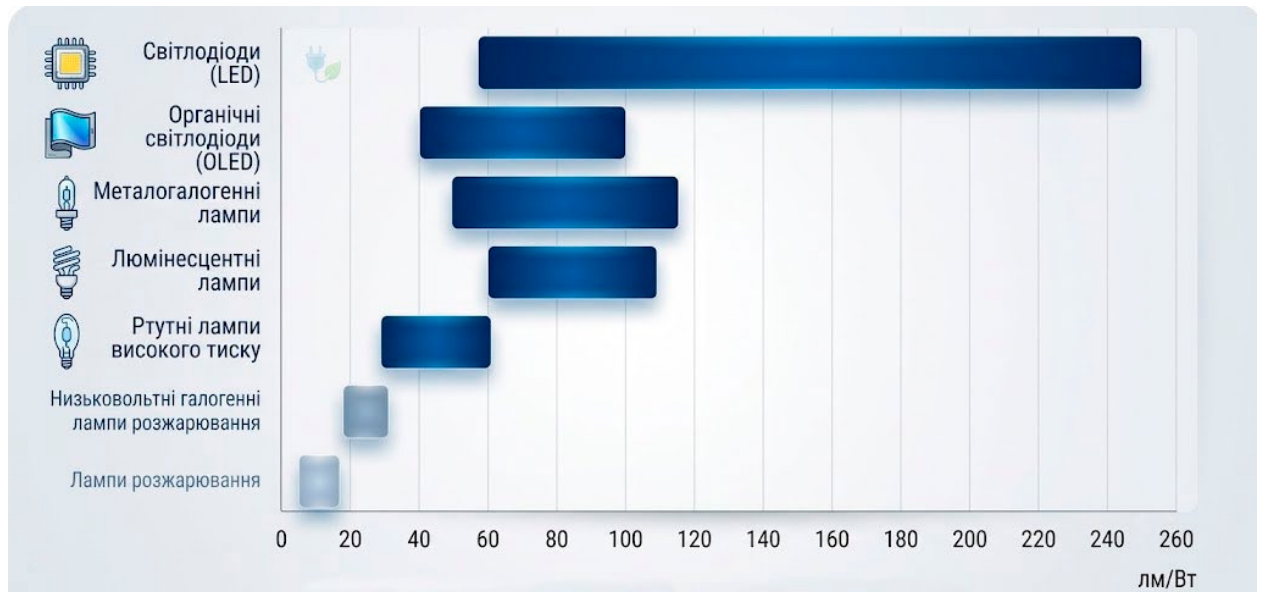


Рисунок 1.11 – Світлова віддача різних типів джерел світла

Поєднання високої енергоефективності, якості світла та експлуатаційної гнучкості призвело до того, що світлодіоди домінують у сучасних проєктах освітлення громадських та комерційних будівель. Важливою технічною перевагою напівпровідникових джерел є легкість їхнього електронного керування. Це стало потужним драйвером для загальної цифровізації освітлення та впровадження інтелектуальних систем IoT-керування, що ґрунтуються на розширеному функціоналі датчиків та мережевій взаємодії.

Головною метою сучасних систем керування є не лише максимальне зниження енергоспоживання, але й здатність гнучко адаптувати освітлювальне середовище до фізіологічних та психологічних потреб користувачів. Візуальний комфорт та безпека завжди повинні залишатися ключовим пріоритетом під час проєктування.

Такий підхід будується на економічній доцільності. Дослідження доводять, що початкові капітальні витрати на будівництво (включно з інфраструктурою освітлення) та витрати на експлуатацію/обслуговування становлять менше 10 % від сукупної вартості володіння будівлею протягом її

життєвого циклу. Основна частка витрат пов'язана з фондом оплати праці персоналу. Відповідно, створення комфортного та здорового освітлювального середовища, орієнтованого на біологічні потреби людини (Human-Centric Lighting), здатне суттєво знизити економічні втрати від лікарняних і водночас підвищити продуктивність праці [14] (рис. 1.12).

Ця парадигма вимагає застосування нових моделей оцінки ефективності, де витрати на освітлення розглядаються як інвестиція в підвищення функціональної та ринкової вартості робочих просторів.

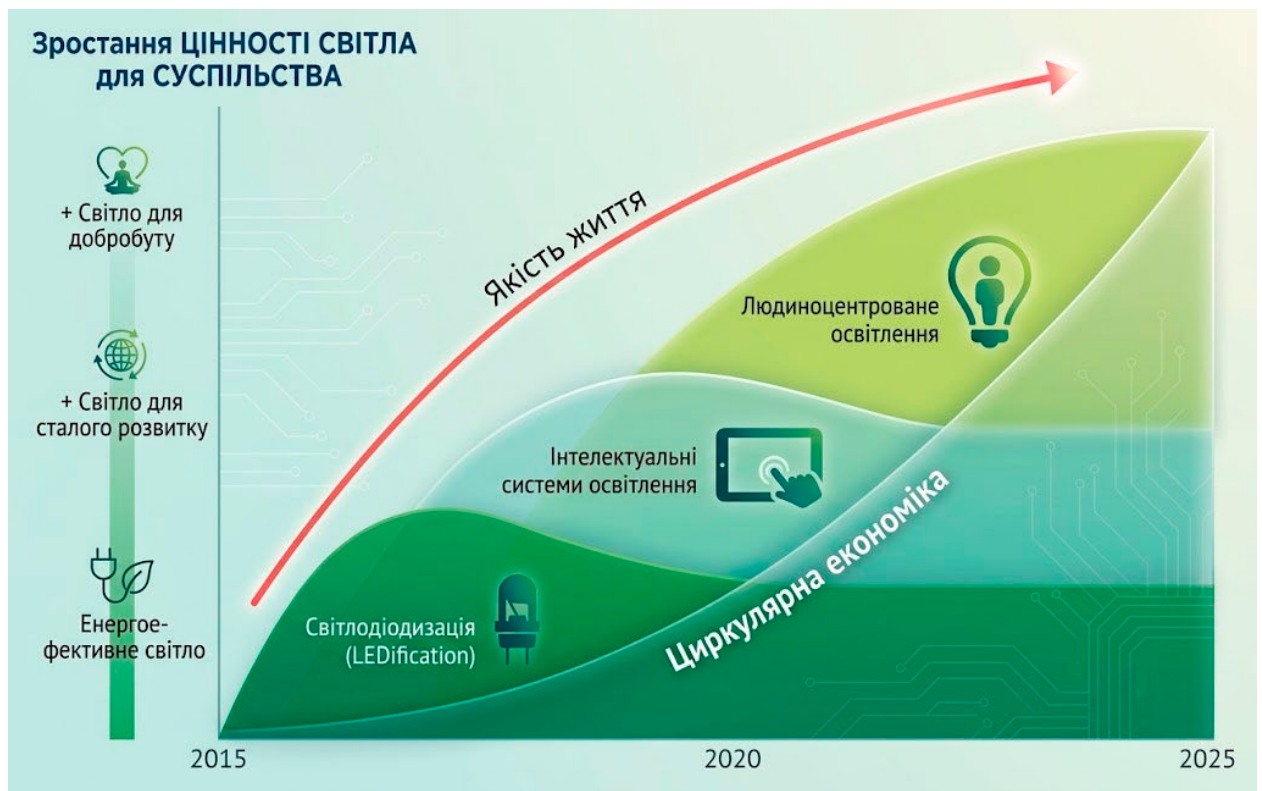


Рисунок 1.12 – Еволюція пріоритетів світлотехнічної галузі: перехід від базового енергозбереження до створення доданої цінності для здоров'я та продуктивності

При розробці стратегій керування освітленням критично важливо враховувати кілька фундаментальних факторів, що безпосередньо впливають на реальне, а не розрахункове енергоспоживання:

1. **Концепція Trias Energetica** – це класична триступенева стратегія сталого проєктування, адаптована для систем освітлення:

- зниження базової потреби в енергії та максимальне залучення природного денного світла до освітлення простору;
- використання найефективніших технологій та безумовне застосування сучасних LED-рішень, що здатні генерувати якісне світло з мінімальними витратами енергії;
- інтелектуальне керування та використання систем автоматизації для жорсткого обмеження часу роботи штучного освітлення (датчики присутності) та його активної потужності (компенсація денного світла через димірування).

2. **Ефект відскоку** – оскільки сучасні світлодіодні системи є надзвичайно ефективними, користувачі підсвідомо припиняють економити (наприклад, ігнорують необхідність вимикати світло, вважаючи його експлуатацію «безкоштовною»). Така зміна поведінкових патернів призводить до того, що реальна енергоекономія від переходу на LED виявляється нижчою за теоретично можливу. Це робить наявність автоматичного керування обов'язковою умовою для нівелювання людського фактору.

3. **Відносні та абсолютні показники економії** – при оцінці доцільності впровадження системи керування необхідно аналізувати не лише відсотки відносної економії, але й абсолютні фізичні та фінансові показники (кВт·год, грн). Наприклад, у приміщенні з дуже високим рівнем природного освітлення ($\text{КПО} > 5 \%$) система компенсації денного світла може демонструвати економію у понад 50 %. Проте, через високу інсоляцію, загальний час використання штучного освітлення може складати менше 500 годин на рік. У такому разі абсолютна економія в кіловат-годинах буде незначною і навряд чи окупить капітальні витрати на складні датчики та програмування.

4. **Пусконаладження та калібрування** – досвід експлуатації показує, що ігнорування етапу професійного налаштування є головною причиною некоректної роботи систем керування. Неправильно відкалібровані сенсори створюють візуальний дискомфорт, що часто змушує персонал або

інженерів служби експлуатації примусово відключати автоматику (саботувати систему), зводячи нанівець усі закладені рішення з енергоефективності.

Наведений аналіз доводить, що під час вибору архітектури керування необхідно комплексно враховувати не лише апаратні можливості обладнання, але й архітектурний контекст об'єкта, графіки його використання та суворі вимоги щодо забезпечення візуального комфорту.

Досвід експлуатації громадських будівель свідчить, що користувачі часто є непередбачуваними у своїй взаємодії з освітлювальними установками. Людям зазвичай важко спрогнозувати наслідки своїх дій: наприклад, при наявності денного світла складно оцінити, як виглядатиме простір, якщо частину світильників вимкнути або задимірувати. Крім того, у нежитлових (комерційних, освітніх) приміщеннях неможливо очікувати, що користувачі будуть постійно та свідомо регулювати параметри освітлення. Найчастіше їхня поведінка є пасивною.

Саме тому автоматичні системи керування є безальтернативним інструментом для досягнення цілей енергозбереження при збереженні візуального комфорту [9-11]. Розглянемо детальний аналіз основних стратегій автоматичного керування:

1. Керування за часовим графіком.

Головна мета цієї стратегії – економія енергії шляхом обмеження часу роботи освітлення лише тими періодами, коли у приміщенні очікується присутність людей або освітлення вимагається з міркувань безпеки чи комерції (наприклад, вітрини).

Варіант 1: керування за абсолютним часом.

- принцип дії: зміна стану освітлення (увімкнення/вимкнення, димірування) здійснюється за запрограмованим розкладом на основі вбудованого годинника реального часу;
- сфера застосування: найбільш ефективно в будівлях з чітко прогнозованим графіком роботи (навчальні заклади, музеї, торговельні центри);

- особливості експлуатації: рекомендується використовувати цей алгоритм переважно для примусового автоматичного вимкнення. Увімкнення краще залишати ручним, щоб уникнути ситуацій, коли світло вмикається за графіком у порожньому приміщенні. Для запобігання небезпечних ситуацій (раптове настання темряви) вимкнення має відбуватися поетапно (групами) або супроводжуватися попереднім плавним диміруванням. Система обов'язково повинна мати функцію ручного перехоплення керування.

Варіант 2: Керування за відносним часом (затримка дії).

- принцип дії: стан освітлення змінюється через визначений проміжок часу після певної події. Класичний приклад – сходовий релейний вимикач, який автоматично вимикає світло через кілька хвилин після ручного увімкнення;

- сфера застосування: транзитні зони короткочасного перебування (коридори, сходи, холи).

Варіант 3: Часове керування колірною температурою.

- принцип дії: динамічна зміна колірної температури за розкладом;
- сфера застосування: архітектурне підсвічування або реалізація концепції біодинамічного освітлення (Human-Centric Lighting) для підтримки циркадних ритмів, що є актуальним для медичних закладів, офісів та шкіл.

2. Виявлення присутності та відсутності.

Мета стратегії – синхронізація роботи освітлювальної установки з фактичною наявністю людей у приміщенні (з використанням інфрачервоних або ультразвукових сенсорів).

Варіант 1: Виявлення присутності.

- принцип дії: світло вмикається автоматично щойно датчик фіксує рух. Якщо протягом заданого часу затримки рух не фіксується, світло димірується та/або вимикається;

- сфера застосування: приміщення, де люди перебувають нерегулярно або недовго, і де ручне вмикання є незручним (санітарні вузли, технічні приміщення, коридори).

Варіант 2: Виявлення відсутності.

- принцип дії: увімкнення світла здійснюється виключно вручну (кнопковим вимикачем). Автоматика відповідає лише за підтримання світла під час присутності та його автоматичне вимкнення після того, як приміщення спорожніє;

- сфера застосування: офіси, навчальні аудиторії;
- аналітичний висновок: з точки зору енергоефективності стратегія «виявлення відсутності» є значно вигіднішою. Вона виключає марне вмикання штучного світла, якщо користувач зайшов до приміщення вдень (за достатньої кількості природного світла), але датчик «присутності» все одно активував би установку.

3. Системи керування на основі денного світла.

Алгоритм дозволяє знижувати рівень або повністю вимикати штучне освітлення залежно від обсягу природної інсоляції, підтримуючи нормований рівень освітленості на робочій поверхні. Ці системи поділяються на системи з розімкненим та замкненим контуром.

- експлуатаційні особливості: димірування є значно пріоритетнішим порівняно з простим релейним перемиканням. Димірування не створює візуального дискомфорту (різких перепадів яскравості) для користувачів та забезпечує глибшу і більш пропорційну економію електроенергії. Реальна ефективність цих систем прямо залежить від якості пусконаладжувальних робіт, які мають бути не разовою опцією, а ітеративним процесом підлаштування.

4. Підтримання постійного світлового потоку (Constant Light Output – CLO).

При проектуванні освітлювальних установок завжди закладається коефіцієнт запасу, що компенсує майбутню природну деградацію світлодіодів та забруднення оптичної системи. Як наслідок, нова установка споживає і видає більше світла, ніж нормативно необхідно. Стратегія CLO передбачає штучне заниження (димірування) потужності світильників на початку їх

експлуатації та поступове (протягом років) підвищення робочого струму для підтримки суворо постійного рівня освітленості.

- реалізація через драйвер: сучасні LED-драйвери програмуються на заводі з урахуванням кривої деградації конкретних світлодіодів. Цей метод дозволяє отримати значну економію електроенергії в перші роки роботи об'єкта;
- реалізація через датчики: ґрунтується на використанні локальних сенсорів замкненого контуру, які безперервно зчитують реальний рівень світла і коригують потужність.

5. Керування навантаженням.

- принцип дії: динамічне зниження споживаної потужності (шляхом димірування) за зовнішнім сигналом від енергомережі або системи BMS;
- сфера застосування: використовується для зрізання піків енергоспоживання у періоди найвищих тарифів на електроенергію або при дефіциті потужності в мережі;
- особливості: зниження рівня освітлення має відбуватися плавно і стосуватися лише загального фонових освітлення, не впливаючи на локальне робоче освітлення, щоб не викликати обурення чи дискомфорту в користувачів.

1.3.1 Ключові аспекти щодо проектування систем керування

Для досягнення оптимального балансу між візуальним комфортом, якістю освітлення та енергоефективністю у громадських будівлях доцільно спиратися на актуальні міжнародні стандарти. Фундаментальним документом у цій сфері є технічний звіт Міжнародної комісії з освітлення (CIE) – CIE 222:2017 «Decision Scheme for Lighting Controls in Non-Residential Buildings» [15]. Цей стандарт містить алгоритми вибору найбільш релевантної стратегії керування, орієнтованої на специфічні вимоги користувачів до продуктивності та персонального контролю.

Як показує інженерна практика, не існує єдиної універсальної системи, здатної вирішити всі задачі на об'єкті. Найвищої ефективності досягають комплексні рішення, що поєднують кілька стратегій (наприклад, виявлення присутності та компенсацію денного світла). Сучасна апаратна база дозволяє інтегрувати різні сенсори в єдиному корпусі, що значно спрощує монтаж та налаштування (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Приклади мультисенсорів, що поєднують функції виявлення присутності та компенсації денного світла в одному пристрої

Під час проєктування та впровадження систем керування необхідно враховувати низку базових принципів, якими часто нехтують на етапі реалізації:

1. Система штучного освітлення не є ізольованим елементом. Вона функціонує у тісній взаємодії з природним освітленням (через віконні отвори) та сонцезахисними пристроями. Проєкт має спочатку максимізувати надходження денного світла, потім використати високоефективні LED-технології, і лише на фінальному етапі застосувати алгоритми автоматизації для оптимізації часу роботи та активної потужності світильників.

2. Логічний поділ освітлювальної установки на окремі керовані зони (групи світильників) гарантує використання електроенергії виключно в тих локаціях, де це фактично необхідно в даний момент.

3. Коректний фізичний монтаж (маршрутизація кабелів, позиціонування датчиків) є лише базою. Вкрай важливим є програмне

калібрування системи для узгодження теоретичних розрахунків із реальними умовами об'єкта. В ідеалі, пусконаладження є не разовою процедурою, а циклічним процесом моніторингу та переналаштування під час експлуатації.

4. Хоча автоматизація є основою енергозбереження, надання користувачам можливості локального ручного керування (через настінні панелі або інтерфейси) психологічно підвищує їхній рівень задоволеності середовищем та загальну продуктивність.

5. Користувачі повинні розуміти логіку роботи автоматики. Якщо персонал не знає принципів роботи сенсорів, це неминуче призводить до конфліктів та спроб самостійного «втручання» в роботу системи (наприклад, заклеювання або фізичного блокування датчиків), що повністю нівелює енергоефективність проєкту.

Ефективність систем компенсації денного світла критично залежить від правильного просторового розташування датчиків освітленості. Головною вимогою є те, що датчик має реєструвати відбите від робочих поверхонь світло, але при цьому не повинен піддаватися впливу прямих сонячних променів. Пряма інсоляція лінзи сенсора викликає ефект «засліплення», що призводить до хибних обчислень контролера та помилкового вимкнення освітлення.

Згідно з галузевими рекомендаціями щодо пусконаладжувальних робіт (зокрема, інструкціями виробників рівня Lutron [16]), існують наступні емпіричні правила позиціонування:

- стельові сенсори денного світла слід розміщувати на відстані, що дорівнює від однієї до двох ефективних висот вікна. Ефективна висота розраховується від підвіконня (або рівня 1 метр від підлоги, якщо вікно панорамне) до верхнього укосу віконного отвору;
- для уникнення конфліктів між користувачами з різними вподобаннями, в кожному індивідуальному офісі чи аудиторії має встановлюватися щонайменше один автономний сенсор;

- у приміщеннях великої площі сенсори повинні розміщуватися з кроком не більше ніж 9 метрів один від одного вздовж лінії вікон, що дозволяє коректно відстежувати градієнт спадання природної освітленості в глибину приміщення.

1.4 Протоколи керування освітленням

Поряд із традиційними комплексними системами автоматизації будівель (BMS), такими як KNX або BACnet, з початку 2000-х років на ринку з'явилися нові спеціалізовані підходи до керування освітленням. Глобально комунікаційні системи можна поділити на дві основні категорії [3]:

1. **Бездротові системи:** живлення світильників підводиться стаціонарним кабелем, а керуючі команди передаються та приймаються радіоканалом (наприклад, через Bluetooth, ZigBee або Wi-Fi).
2. **Дротові системи:** передача керуючого сигналу (а в деяких випадках і живлення) здійснюється через фізичні провідники від центрального контролера до виконавчих пристроїв.

Можливість плавного регулювання світлового потоку (димірування) стала першим кроком до створення концепції «розумного будинку», оскільки це дозволяє економити електроенергію та створювати більш комфортне візуальне середовище. Аналогове димірування охоплює системи, які не перетворюють керуючий сигнал у цифровий код, а безпосередньо змінюють фізичні параметри мережі.

Розглянемо різні методи керування освітленням:

1. **Фазове димірування.** Цей метод здійснюється шляхом зміни (відсікання) частини синусоїди напруги живлення. Для його реалізації не потрібне прокладання додаткових кабелів керування – димер встановлюється послідовно в розрив мережевого проводу. Залежно від того, яка частина хвилі відсікається, розрізняють два типи димірування (рис. 1.14):

- димірування по передньому фронту зазвичай використовує симістори (TRIAC). Історично цей метод застосовувався для ламп розжарювання та галогенних ламп;
- димірування по задньому фронту забезпечує відсікання на низхідній ділянці хвилі (з кінця до початку). Цей метод генерує менше електромагнітних завад і є більш сумісним із сучасними світлодіодними (LED) драйверами, які представляють собою ємнісне навантаження.

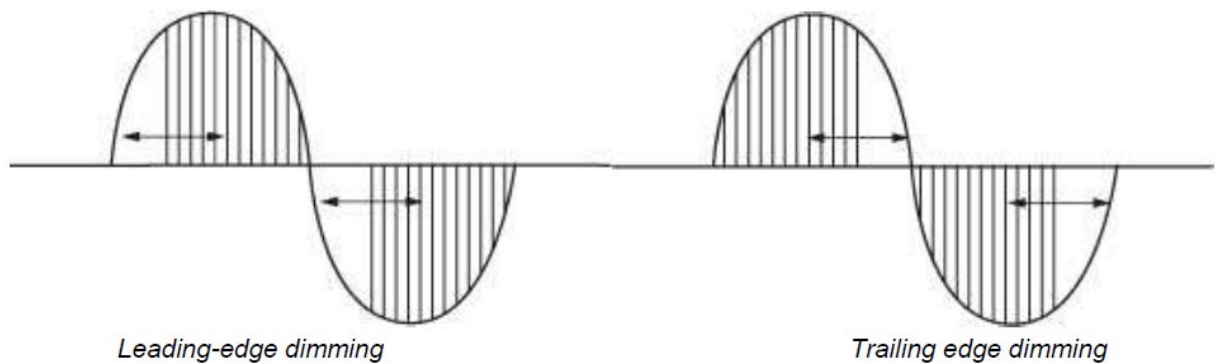


Рисунок 1.14 – Графіки напруги при фазовому диміруванні по передньому та задньому фронтах синусоїди

2. Протокол 1-10V є класичним галузевим стандартом, що дозволяє регулювати світловий потік джерела світла від 1...10 % до 100 %. На відміну від фазового димірування, цей метод вимагає прокладання додаткової слабкострумової двопровідної лінії керування, якою передається аналоговий сигнал від контролера до обладнання. Під час монтажу критично важливо дотримуватися полярності («+» та «-») цих проводів.

Параметри протоколу жорстко регламентуються міжнародним стандартом IEC 60929. Нормативна крива димірування відображає практично лінійну залежність між напругою в лінії керування та вихідним світловим потоком у діапазоні від 3 В до 10 В (рис. 1.15). Оскільки людське око сприймає зміну яскравості нелінійно, для створення комфортного візуального ефекту часто застосовують контролери з логарифмічними потенціометрами.

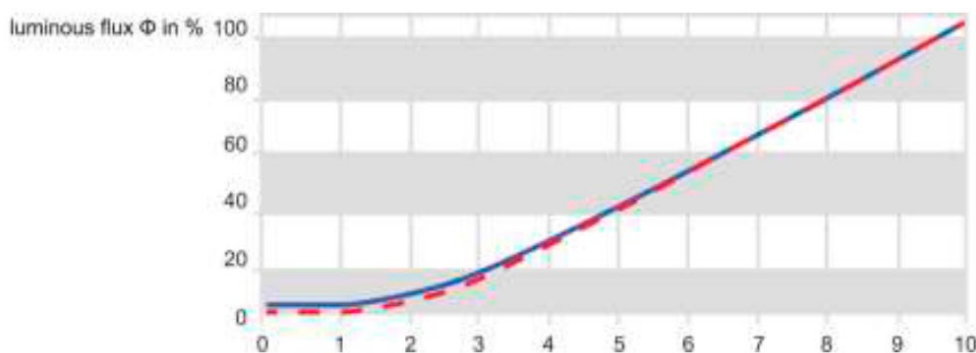


Рисунок 1.15 – Нормативна крива регулювання світлового потоку згідно зі стандартом ІЕС 60929

Технічні обмеження протоколу 1-10V:

- інформація передається виключно в одному напрямку – від контролера до світильника. Драйвер не генерує зворотного зв'язку (наприклад, даних про несправність лампи або фактичне енергоспоживання);
- логічні групи світильників формуються виключно фізичним шляхом (через паралельне з'єднання їхніх керуючих контактів кабелем), що унеможливорює гнучке програмне переналаштування зон у майбутньому;
- максимальна дистанція керування обмежується падінням напруги в кабелі, що залежить від перерізу провідника та загальної кількості підключених до лінії драйверів.

3. Керування кнопкою (Touch Control) – це проста та економічно вигідна система аналогового димірування, яка дозволяє виконувати базові функції керування без використання спеціалізованих зовнішніх контролерів. Як керуючий сигнал тут використовується безпосередньо мережева напруга, яка подається на відповідну клему драйвера через стандартний настінний кнопковий вимикач зворотного типу (без фіксації положення). Відсутність додаткових блоків живлення для інтерфейсу керування значно здешевлює систему.

Алгоритм роботи є наступним:

- коротке натискання («клік»): система вмикає або вимикає освітлення (перемикання стану);

- тривале утримання кнопки: відбувається плавне збільшення (або зменшення) світлового потоку. При кожному наступному тривалому утриманні напрямок димірування змінюється на протилежний (почергово між мінімальним та максимальним рівнями).

Аналогові системи керування (зокрема 1-10V та фазове димірування) заклали фундамент для автоматизації освітлення. Проте їхні обмеження щодо масштабованості, відсутність зворотного зв'язку та необхідність складного кабельного групування зумовили перехід індустрії до повністю цифрових протоколів.

Цифрове керування охоплює всі системи, де керуючий сигнал перетворюється на цифровий код. Це забезпечує високу точність, стійкість до завад та можливість двонаправленого обміну інформацією між пристроями.

4. Цифровий інтерфейс DALI (Digital Addressable Lighting Interface) – це цифровий адресований інтерфейс керування освітленням. Він є відкритим міжнародним стандартом, що регламентується нормою IEC 62386. Цей стандарт гарантує повну сумісність та взаємозамінність обладнання від різних виробників. Мережа DALI використовує двонаправлену архітектуру (master-slave). Інформація надходить від контролера (який виступає як master) до виконавчих пристроїв – ЕПРА або LED-драйверів (які працюють як slaves). Підлеглі пристрої виконують отримані команди або надсилають у відповідь інформацію про свій стан (наприклад, рівень потужності або повідомлення про вихід лампи з ладу).

Цифрові сигнали передаються по двопровідній шині керування. Більшість сучасних DALI-драйверів проєктуються незалежними від полярності, що значно спрощує електромонтажні роботи (рис. 1.16).

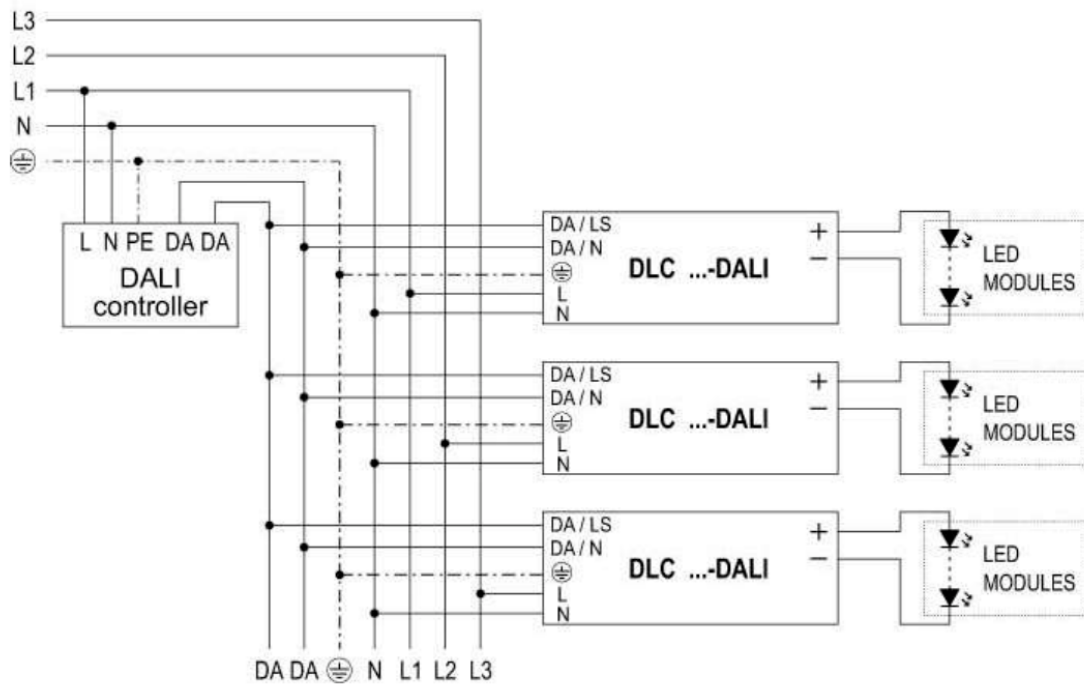


Рисунок 1.16 – Схема підключення цифрової системи DALI

Ключовою перевагою DALI над аналоговими системами є відсутність необхідності створювати групи світильників шляхом окремого кабельного розведення. Усі пристрої підключаються паралельно до однієї шини (допускається будь-яка топологія: лінія, зірка, дерево, головне – уникати топології замкненого кільця). Крім того, для увімкнення/вимкнення живлення не потрібні зовнішні механічні реле чи контактори, оскільки драйвери вмикаються внутрішніми цифровими командами. На відміну від протоколу DMX, шина DALI не потребує встановлення термінаторів (узгоджувальних резисторів) на кінцях лінії.

Максимальне падіння напруги вздовж лінії керування не повинно перевищувати 2 В при максимальному струмі шини 250 мА. За умови використання кабелю з перерізом 1,5 мм², максимальна довжина лінії DALI не може перевищувати 300 метрів.

Після фізичного монтажу система конфігурується програмно. Інтерфейс дозволяє призначити до 64 індивідуальних адрес у межах однієї лінії. Ці пристрої можна об'єднати у 16 незалежних груп та запрограмувати до 16 різних світлових сцен. Керування також може здійснюватися

широкомовною командою, що діє на всі пристрої одночасно. Будь-які зміни в конфігурації груп здійснюються програмно без втручання в електропроводку.

Протокол DALI використовує логарифмічну криву димірування, яка адаптована до фізіологічної чутливості людського ока. Нормативний діапазон регулювання становить від 0,1 % до 100 %, при цьому фактичний мінімум визначається апаратними можливостями конкретного LED-драйвера.

5. Протокол автоматизації KNX є еволюційним розвитком європейської інсталяційної шини (EIB) і виступає глобальним стандартом для комплексного управління будівлями (BMS). Хоча для вузькоспеціалізованих задач освітлення часто використовують шлюзи KNX-DALI, відкритість стандарту KNX призвела до появи LED-драйверів з прямою підтримкою шини KNX, що дозволяє уникнути встановлення додаткових шлюзів та зменшити розмаїття програмного забезпечення. У базовому варіанті для зв'язку між сенсорами та актуаторами прокладається додатковий екранований кабель керування з напругою 29 В постійного струму (DC). Також існують радіочастотні (RF) та IP-рішення.

6. Протокол DMX512 (Digital Multiplex) – це стандарт цифрових комунікаційних мереж, який історично розроблявся для керування сценічним та театральним освітленням. Сьогодні він широко застосовується в архітектурному медіа-освітленні та динамічному підсвічуванні фасадів. Протокол використовує диференціальну передачу сигналів (стандарт EIA-485) із пакетною комунікацією і є строго однонаправленим (без зворотного зв'язку). DMX512 дозволяє надсилати 512 каналів керування по одній лінії, що ідеально підходить для швидкої зміни кольорів (RGB/RGBW систем). Однак через відсутність автоматичної перевірки помилок він чутливий до електромагнітних завад і вимагає обов'язкового встановлення термінаторів на кінцях ліній для запобігання відбиттю сигналу.

7. Передача даних лініями живлення (Ready2mains / Powerline) – технологія передачі цифрового сигналу безпосередньо по силових кабелях мережі 230 В є зручним рішенням при модернізації об'єктів. Спеціальний

1 – мережевий комутатор; 2 сервер; 3 – бездротова точка доступу; 4 – з'єднувальні клеми; 5 – корпус блоку живлення; 6 – керуюча шина; 7 – клемні колодки контролера; 8 – датчик; 9 – бездротовий сигнал; 10 – лінія керування світильниками

Крім того, перехід на 48 В уніфікує архітектуру будівлі, дозволяючи напряму (без зайвих циклів інвертування струму) інтегрувати в систему освітлення сонячні панелі та акумуляторні накопичувачі енергії.

Аналіз теоретичних засад та існуючої апаратної бази показав, що сучасна система автоматичного керування освітленням громадської будівлі є складною багаторівневою інженерною структурою. Для забезпечення максимальної енергоефективності без втрат візуального комфорту система має будуватися на базі відкритих цифрових протоколів (таких як DALI), інтегруватися у загальну систему BMS будівлі та обов'язково враховувати синергетичну взаємодію з системами контролю природного освітлення. Запропоновані аналітичні висновки стануть технічним підґрунтям для розробки практичної частини кваліфікаційної роботи.

2 СВІТЛОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування вибору апаратної бази для системи автоматизації освітлення

У сучасній світлотехніці одним із головних векторів розвитку є створення інтелектуальних систем освітлення, що забезпечують максимальну енергоефективність при суворому дотриманні норм візуального комфорту. Згідно з вимогами державних будівельних норм (ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [17]) та європейського стандарту EN 12464-1 (Освітлення робочих місць) [18], освітлювальні установки повинні бути не лише економічними, але й адаптивними. Ефективність таких рішень критично залежить від обраної апаратної архітектури: мікроконтролерів для обробки логіки та масиву сенсорів для моніторингу простору.

Дослідження ринку засобів промислової автоматизації показує, що традиційним стандартом є програмовані логічні контролери (ПЛК). Проте для автоматизації освітлення в громадських будівлях середнього масштабу або впровадження IoT-рішень використання ПЛК часто є економічно недоцільним через високу вартість обладнання, закритість екосистем та складність інтеграції адаптивних алгоритмів керування.

З огляду на це, для реалізації практичної частини бакалаврської кваліфікаційної роботи було обрано модульну концепцію побудови пристрою. Структурна схема розроблюваної системи керування освітленням складається з таких функціональних блоків:

- керуюче ядро: мікроконтролер для обробки алгоритмів;
- сенсорна підсистема: датчики присутності та вимірювачі рівня природної освітленості (реалізація функції daylight harvesting);
- виконавчий модуль: комутаційні апарати (реле) для керування драйверами світильників;
- освітлювальна установка: безпосередньо джерела світла (сучасні LED-панелі або лампи).

Як базову обчислювальну платформу для прототипування обрано екосистему Arduino [19]. Такий підхід дозволяє оптимізувати капітальні витрати на розробку та забезпечує високу гнучкість при інтеграції системи в існуючі інженерні мережі будівель (включно зі старим житловим фондом) без потреби в масштабній реконструкції силової проводки.

Головним обчислювальним модулем системи визначено плату Arduino Uno (рис. 2.1).

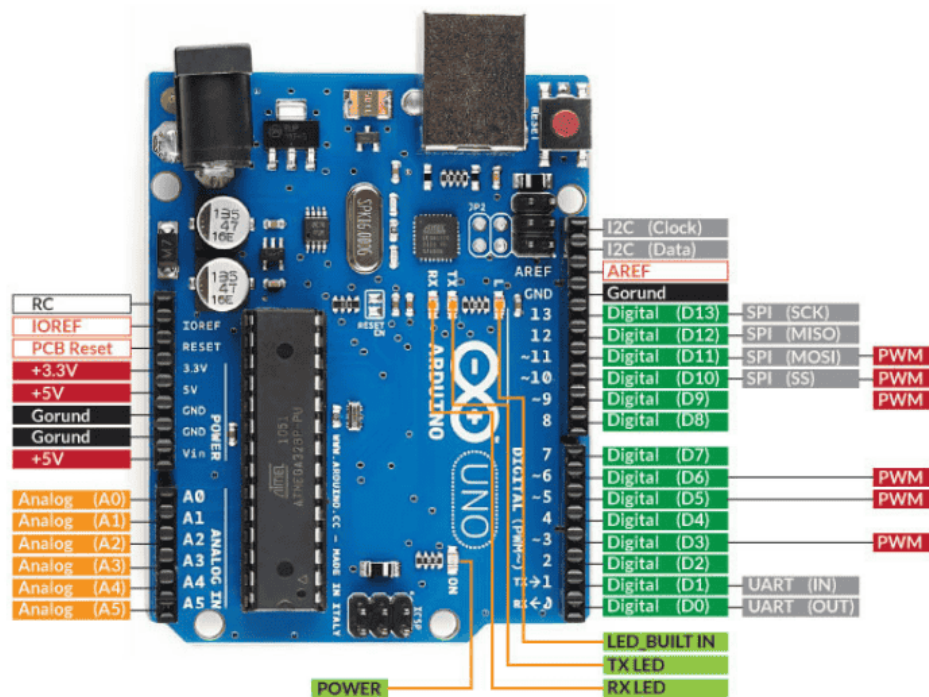


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд та інтерфейси налагоджувальної плати Arduino Uno

Вибір саме цієї платформи аргументується оптимальним балансом між обчислювальною потужністю, ціною та наявністю величезної бібліотеки сумісних електронних компонентів. Апаратним «серцем» плати є 8-бітний мікроконтролер сімейства AVR – ATmega328P.

Ключові технічні параметри Arduino Uno у контексті керування освітленням:

1. Плата має 14 цифрових виводів, 6 з яких апаратно підтримують широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ/PWM). Це критично важлива характеристика для світлотехнічних задач, оскільки ШІМ дозволяє реалізувати плавне димірування світлодіодних джерел світла. Також передбачено 6 аналогових входів (АЦП) для точного зчитування показань аналогових датчиків освітленості.

2. Тактова частота 16 МГц є цілком достатньою для опитування масиву сенсорів у реальному часі та виконання керуючих алгоритмів без помітних для ока людини затримок.

3. Апаратна підтримка інтерфейсів I2C, SPI та UART дозволяє в майбутньому масштабувати систему, підключаючи цифрові мультисенсори, дисплеї або модулі бездротового зв'язку (Wi-Fi/Bluetooth) для інтеграції в систему «Розумний будинок» (BMS).

4. Наявність вбудованих лінійних стабілізаторів на 5 В та 3,3 В дозволяє жити більшості сенсорів безпосередньо від плати мікроконтролера.

Програмування пристрою здійснюється у фірмовому кросплатформеному середовищі Arduino IDE [20], яке розповсюджується на умовах відкритого вихідного коду (Open Source). Мова програмування ґрунтується на синтаксисі C/C++ із використанням фреймворку Wiring. Наявність готових високорівневих бібліотек для обробки сигналів із сенсорів значно скорочує час розробки, дозволяючи інженеру-світлотехніку зосередитися безпосередньо на логіці енергоощадних алгоритмів.

2.2 Архітектура автоматизованої системи керування

У процесі проектування було здійснено критичний аналіз існуючих підходів до побудови систем автоматизації будівель (класу BMS та «smart home»), висвітлених у сучасних працях вітчизняних і закордонних дослідників. На основі систематизації отриманих даних для практичної реалізації розробляється чотирирівнева ієрархічна архітектура (рис. 2.2). Ця

топология забезпечує оптимальний баланс між швидкістю обробки телеметричних даних, надійністю апаратної частини та гнучкістю алгоритмів керування.

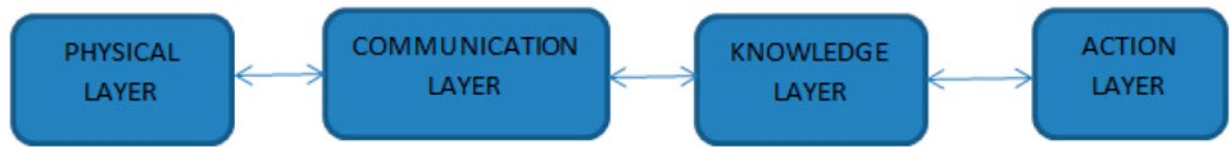


Рисунок 2.2 – Архітектура автоматизованої системи керування)

Функціонування запропонованої архітектурної моделі будується на безперервному потоці даних, який проходить крізь наступні інформаційні рівні:

1. **Рівень сприйняття (Physical Layer):** фундаментальний рівень, на якому польова сенсорна мережа генерує первинні дані. Датчики здійснюють безперервне вимірювання фізичних величин (освітленості, присутності, електричних параметрів) із заданою частотою дискретизації.
2. **Комунікаційний рівень (Communication Layer):** аналогові та цифрові сигнали від сенсорних вузлів передаються дротовими каналами зв'язку до центрального контролера. Цей рівень забезпечує маршрутизацію, завадостійкість та цілісність передачі телеметрії.
3. **Рівень обробки даних та рішень (Knowledge Layer):** обчислювальне ядро системи. Програмний апарат здійснює фільтрацію вхідних сигналів, перетворюючи їх у машинозрозумілі часові ряди подій. На цьому етапі застосовуються розроблені алгоритми керування, що дозволяє системі динамічно реагувати на поточний стан об'єкта та оптимізувати енергоспоживання.
4. **Рівень виконання (Action Layer):** на основі команд, згенерованих обчислювальним ядром, формуються керуючі впливи. Сигнали надходять до виконавчих механізмів (драйверів освітлення, силових реле), здійснюючи фізичну зміну стану інженерних мереж.

Практична реалізація запропонованої концептуальної моделі (рис. 2.3) виконана на базі апаратної платформи Arduino Uno [19].

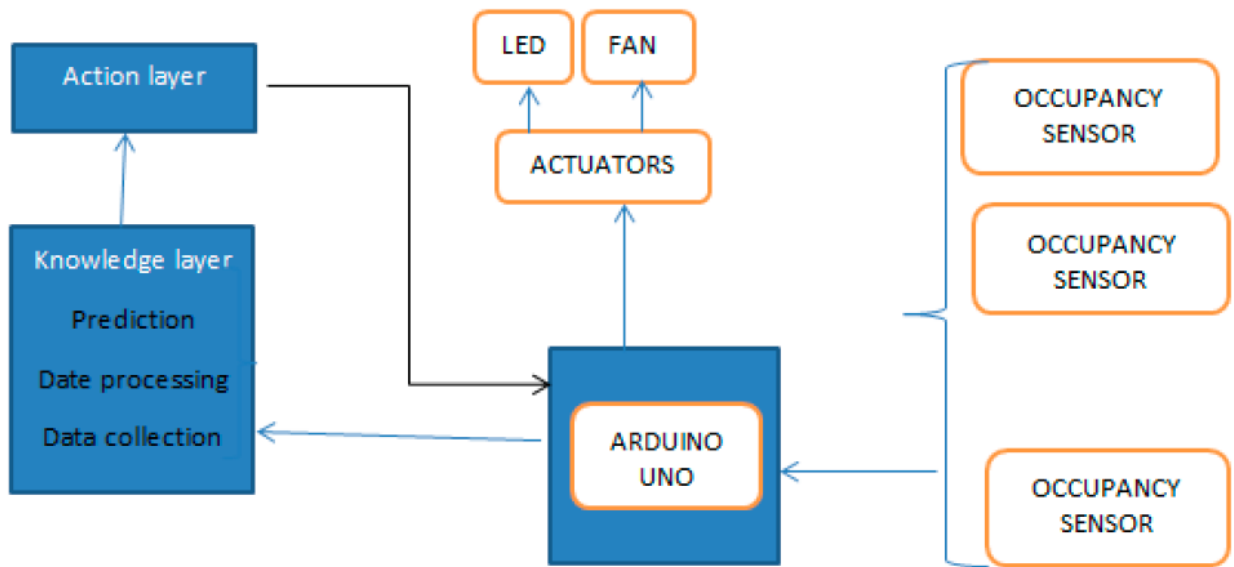


Рисунок 2.3 – Практична реалізація запропонованої моделі автоматизованої системи

Узагальнену структурну схему, що відображає інформаційну та електричну взаємодію ключових вузлів системи, наведено на рис. 2.4.

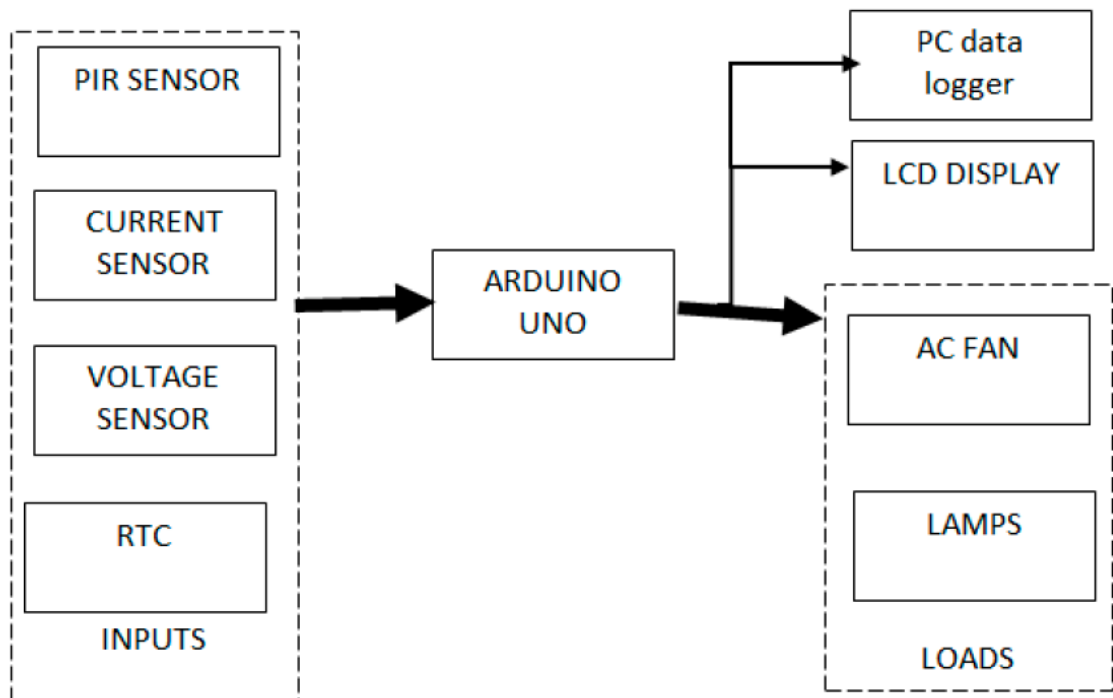


Рисунок 2.4 – Структурна схема взаємодії ключових вузлів автоматизованої системи

Апаратна архітектура комплексу побудована за модульним принципом і диференціюється на три основні функціональні блоки:

1. Підсистема збору даних (сенсорна мережа)

- детектори присутності (PIR-сенсори): використовують піроелектричний елемент для реєстрації інфрачервоного (теплого) випромінювання користувачів, забезпечуючи дискретний логічний сигнал про наявність людей у зоні моніторингу;
- сенсор освітленості BH1750: високоточний цифровий люксометр із широким динамічним діапазоном. Дозволяє прецизійно вимірювати рівень інсоляції як при слабкому штучному, так і при інтенсивному природному світлі, що є критично важливим для адаптивних алгоритмів димірування;
- вузол моніторингу енергоспоживання:
 - датчик струму (ACS712): функціонує на базі ефекту Холла, забезпечуючи гальванічно розв'язане вимірювання змінного струму навантаження;
 - датчик напруги: реалізований через схему з понижувальним трансформатором (220/12 В), випрямлячем та резистивним дільником напруги, що гарантує безпечне масштабування амплітуди мережевої напруги для АЦП контролера.
- модуль реального часу (RTC): забезпечує апаратну синхронізацію подій та автономну підтримку розкладів незалежно від перебоїв у живленні мікроконтролера.

2. Обчислювальне ядро

Центральним процесором виступає мікроконтролер на базі чипа ATmega328P. До його апаратно-програмних завдань входить: циклічне опитування польових датчиків, цифрова обробка сигналів (DSP), реалізація логіки автоматичного керування та підтримання інтерфейсу обміну даними (UART) з верхнім рівнем диспетчеризації.

3. Підсистема індикації та виконавчих пристроїв

- людино-машинний інтерфейс (HMI): символний рідкокристалічний дисплей (LCD), що у реальному часі візуалізує системні параметри (факти реєстрації руху, діючі значення напруги та струму, поточний режим роботи);
- силовий комутаційний блок: набір електромеханічних реле для безпосереднього керування тестовими навантаженнями (моделями систем освітлення та вентиляції);
- система реєстрації та логування (Datalogger): канал передачі телеметрії на персональний комп'ютер, де спеціалізоване програмне забезпечення формує бази даних (Excel-формат) із прив'язкою до часових міток для подальшого аналізу ефективності алгоритмів.

2.2.1 Підсистема детектування присутності та освітленості

Головним інструментом для виключення «марного» використання електроенергії (ефекту забутого світла) є датчики виявлення присутності. У сучасних системах автоматизації найширшого поширення набули пасивні інфрачервоні детектори (PIR – Passive Infrared sensor) [21]. Їхній принцип роботи полягає у фіксації динамічної зміни інфрачервоного (теплого) фону в контрольованій зоні.

У розробленій системі застосовано PIR-модуль HC-SR501 (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Конструкція інфрачервоного датчика руху

Датчик будується на піроелектричному кристалі, що реагує на інфрачервоне випромінювання тіла людини. Для розширення кута огляду та фокусування теплових променів на чутливому елементі застосовується сегментована лінза Френеля. Електронна обв'язка модуля фільтрує статичний тепловий фон (наприклад, від радіаторів опалення) і реагує лише на переміщення об'єктів з температурою, що відрізняється від температури навколишнього середовища.

Специфікації модуля HC-SR501 [21]:

- енергоспоживання у режимі очікування: менше 60 мкА;
- ефективна дистанція детектування: налаштовується потенціометром від 3 до 7 метрів;
- просторовий кут огляду: від 110° до 140°;
- апаратна затримка вимкнення: регулюється від 5 до 300 секунд.

Для задач освітлення критично важливим є правильне налаштування режиму роботи тригера (за допомогою апаратного джампера на платі). Оптимальним є Режим Н – режим із перезапуском. У цьому стані кожний новий рух у приміщенні обнуляє внутрішній таймер датчика, гарантуючи, що освітлення не вимкнеться, поки людина знаходиться в зоні видимості.

У рамках дослідження також розглядалися мікрохвильові (радарні) датчики, які працюють на основі ефекту Доплера [21], та акустичні (ультразвукові) сенсори [21]. Мікрохвильові сенсори здатні фіксувати навіть мікрорухи (дихання людини під час роботи за комп'ютером) і можуть встановлюватися приховано (за підвісною стелею або в корпусі світильника). Проте через їхню високу вартість, підвищене енергоспоживання та схильність до хибних спрацювань через тонкі стіни, базовим варіантом обрано надійний та бюджетний PIR-сенсор.

2.2.2 Аналізатор природного світла та комутаційне обладнання

Для реалізації концепції компенсації денного світла (вимкнення або зниження потужності світильників при достатній кількості природного світла з вікон) систему оснащено цифровим датчиком освітленості (люксметром) BH1750 [21] (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Модуль цифрового датчика освітленості BH1750

Цифровий датчик освітленості GY-302 на чіпі BH1750 призначений для вимірювання фонового освітлення. Має високу чутливість та поширений послідовний інтерфейс I2C. Спектр чутливості збігається із кривою чутливості людського ока.

Для фізичного керування лініями живлення 230 В (драйверами світильників) за допомогою низьковольтної логіки Arduino застосовано модуль електромеханічного реле. Головна функція реле у цій архітектурі – забезпечення надійної гальванічної розв'язки. Воно повністю ізолює низьковольтний мікроконтролер від високовольтної мережі змінного струму, захищаючи чутливу електроніку від пускових струмів, які є характерними для блоків живлення світлодіодних світильників. Для більш складних систем димірування на 230 В у перспективі можливе використання твердотільних реле (SSR) спільно з алгоритмами фазового керування.

Логіка роботи системи ґрунтується на централізованому обробітці даних. Контролер Arduino безперервно зчитує стани сенсорів і використовує адаптивний алгоритм для ухвалення рішень.

Подача живлення на освітлювальну установку відбувається виключно при збігу двох умов (логічне «І»):

1. У контрольованій зоні зафіксовано присутність (сигнал від PIR-сенсора = 1).
2. Загальний рівень природної освітленості опустився нижче нормативного порогу (сигнал від фоторезистора свідчить про недостатність світла).

На рис. 2.7 показано модель системи керування освітленням у середовищі онлайн-симуляції [22].

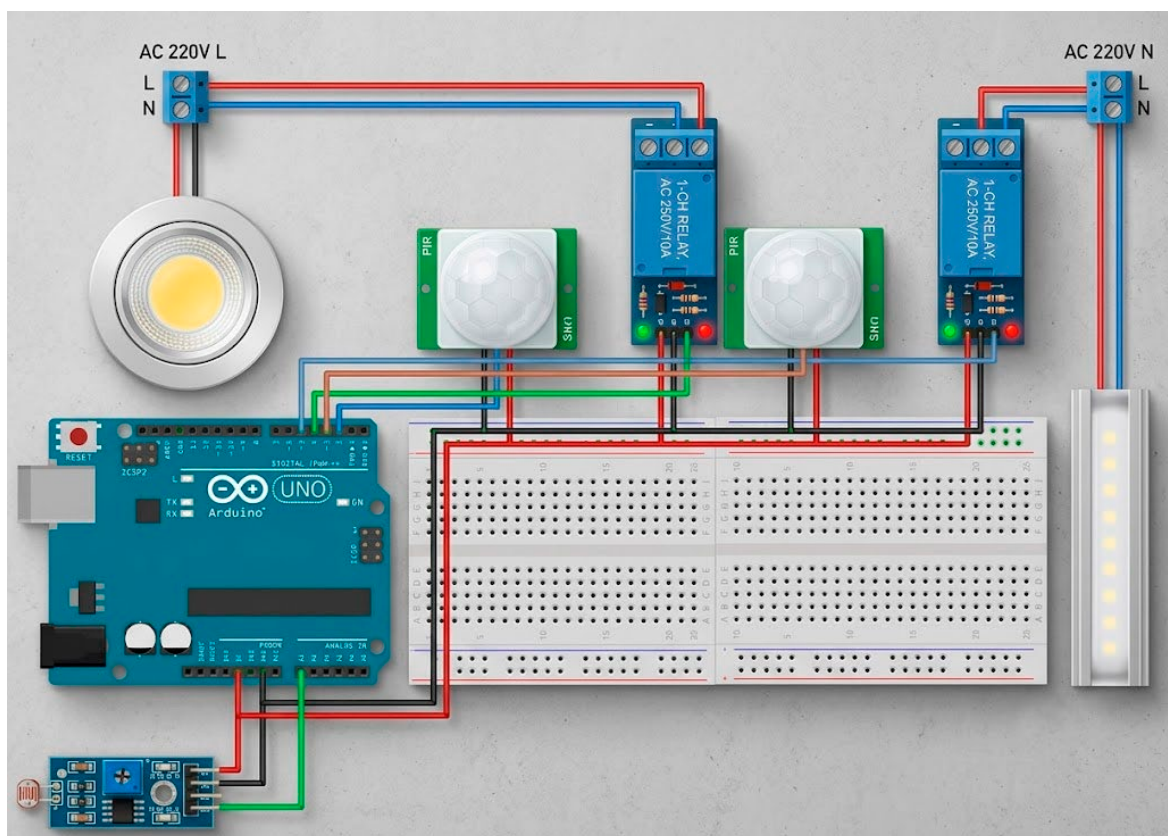


Рисунок 2.7 – Модель системи керування освітленням у середовищі онлайн-симуляції

Віртуальне тестування дозволяє безпечно перевірити алгоритми комутації навантаження, налаштувати затримки таймерів для запобігання

«блiманню» свiтла та пiдтвердити працездатнiсть концепцiї. Дана система характеризується високою модульнiстю та легко пiддається масштабуванню. Запропонована архiтектура повнiстю вiдповiдає сучасним вимогам енергозбереження та створює надiйний фундамент для подальшої розбудови багатокомпонентних iнтелектуальних iнженерних мереж громадських будiвель.

2.3 Розробка структурної схеми автоматизованої системи громадської будівлі

Спираючись на результати аналітичного дослідження, проведеного у першому розділі, було розроблено концептуальну та схемотехнічну модель енергоощадної системи автоматизації. З огляду на специфіку цільового об'єкта (громадська будівля), архітектура комплексу орієнтована на інтеграцію в глобальну систему управління будівлею (BMS).

Головне функціональне призначення розробленої системи полягає в безперервному моніторингу присутності користувачів та параметрів інсоляції з подальшим адаптивним керуванням підсистемами штучного освітлення та мікроклімату (HVAC). Ключова мета проєкту – досягнення максимального рівня енергоефективності згідно з класом автоматизації «А» за європейським стандартом EN 15232 [23], що передбачає мінімізацію марних витрат електроенергії без зниження рівня візуального та теплового комфорту для персоналу чи відвідувачів.

Узагальнену структурну схему автоматизованого комплексу наведено на рис. 2.8. Архітектура побудована за ієрархічним принципом: локальні контролери окремих приміщень об'єднуються в єдину інформаційну магістраль. Обмін даними між вузлами реалізовано на базі протоколів сімейства Ethernet (TCP/IP), а функції верхнього рівня керування виконує сервер диспетчеризації, який координує взаємодію всіх підсистем, збирає телеметрію та формує аналітичні звіти щодо енергоспоживання.

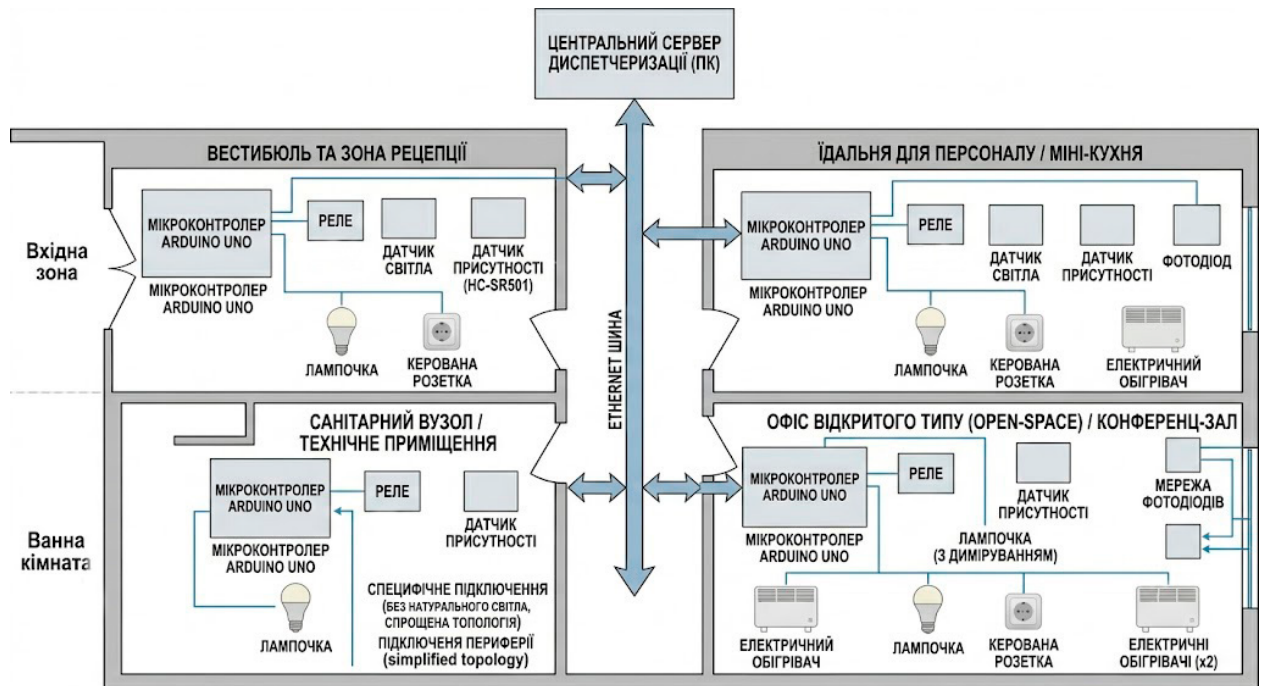


Рисунок 2.8 – Узагальнена структурна схема автоматизованої системи керування громадською будівлею

Для детального розуміння алгоритмів функціонування комплексу доцільно проаналізувати його схемотехнічну реалізацію на рівні типових функціональних зон громадської будівлі.

Схемотехнічне рішення для робочих зон із тривалим перебуванням людей (офіси типу «open-space», конференц-зали, лекційні аудиторії) представлено на рис. 2.9. Це багатокомпонентний апаратний вузол, спроектований для забезпечення найвищого рівня ергономіки.

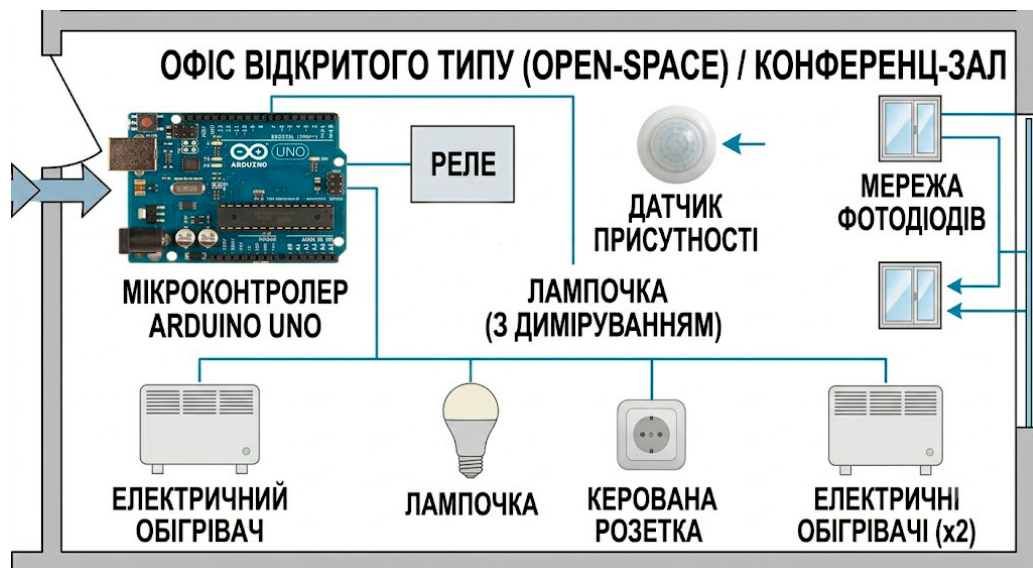


Рисунок 2.9 – Схематехнічне рішення підсистеми керування для офісів відкритого типу

Топологія сенсорної мережі передбачає встановлення високочутливих датчиків присутності над робочими місцями та в зонах транзиту. Відмінністю застосованих алгоритмів є фокус саме на детектуванні присутності (а не просто великих рухів). Чутливість ІЧ-сенсорів налаштована таким чином, щоб фіксувати мікрорухи (наприклад, роботу за клавіатурою комп'ютера), що повністю виключає ризик помилкового вимкнення освітлення під час малорухливої офісної роботи або проведення нарад.

Для максимізації енергозбереження реалізовано технологію адаптивного використання природного світла (Daylight Harvesting). Мережа фотосенсорів, розташованих уздовж фасадного скління, здійснює постійний моніторинг інсоляції. Аналізуючи ці дані, контролер генерує ШІМ-сигнал або команди по шині DALI для локальних драйверів світильників, плавно диміруючи їхню потужність у світлу пору доби.

Силова частина підсистеми також охоплює керування кліматичними приладами та керованими розетковими групами. Контролер через силові реле може знеструмлювати периферійне офісне обладнання в неробочий час, нівелюючи так зване «фантомне» споживання електроенергії (струми очікування).

Структура системи керування для кухонних зон та приміщень відпочинку персоналу (рис. 2.10) будується на уніфікованих алгоритмах, але має специфіку щодо комутації навантажень.

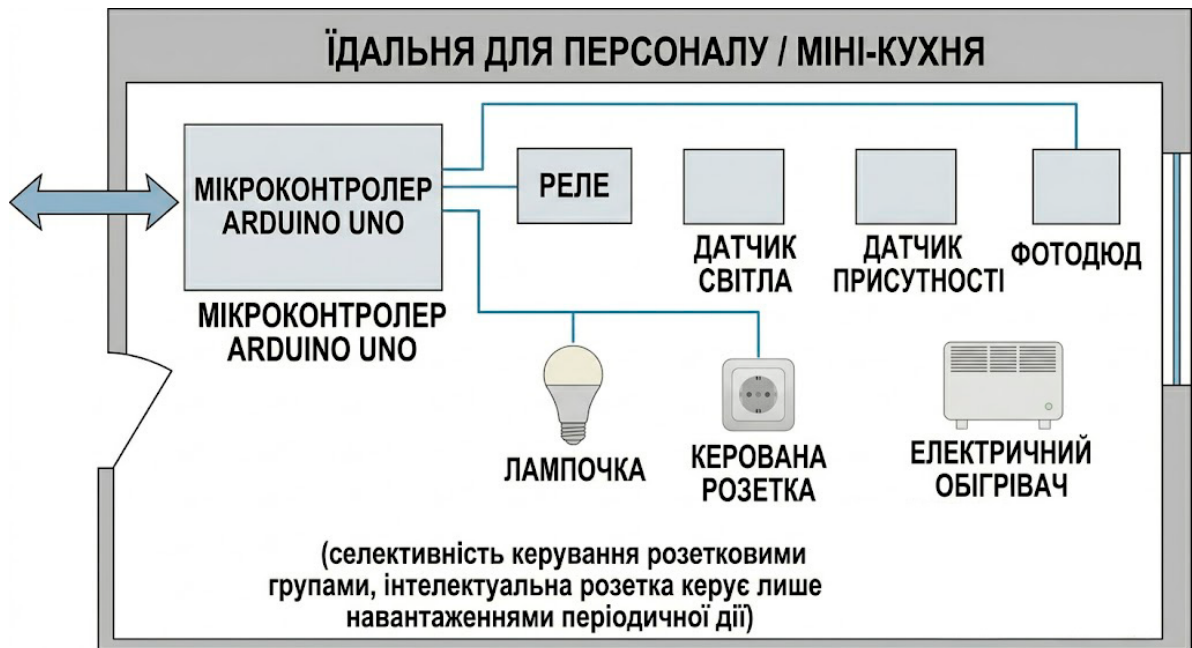


Рисунок 2.10 – Схематехнічне рішення для зон відпочинку та їдалень

Сигналом для пробудження системи з режиму енергозбереження є спрацювання датчика присутності у вхідній групі. Це ініціює включення фонового освітлення (з урахуванням компенсації денного світла через фотодіоди) та переведення системи вентиляції в активний режим для забезпечення нормативного повітрообміну.

Критичною вимогою до схематехніки таких зон є селективність електроживлення. Мікроконтролер керує лише тими лініями, до яких підключено обладнання періодичної дії (кавомашини, мікрохвильові печі, телевізори). Натомість холодильне обладнання та системи пожежної безпеки підключаються до захищених, безперебійних (UPS) ліній, які виключені з контуру автоматичного відключення, що гарантує технологічну та санітарну безпеку об'єкта.

Підсистема керування для санітарних кімнат, архівів або серверних (рис. 2.11) має значно спрощену топологію. Це пояснюється специфікою таких

приміщень: як правило, вони розташовані в ядрі будівлі і не мають вікон (абсолютна відсутність природного освітлення).

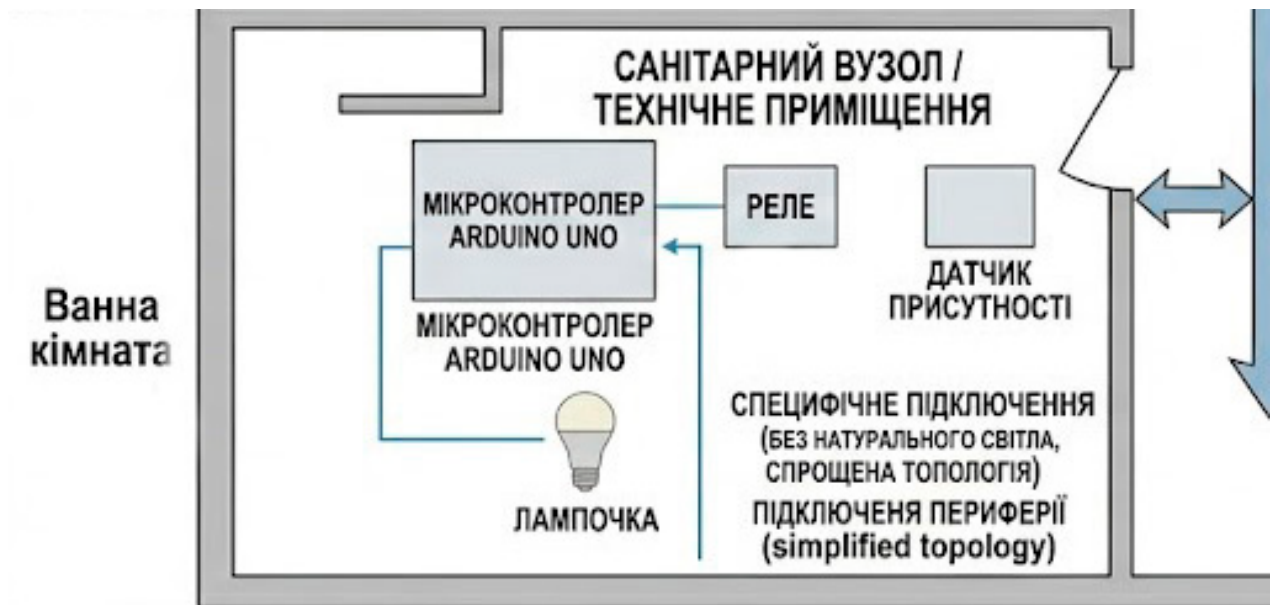


Рисунок 2.11 – Схематехнічне рішення для санітарних вузлів та технічних приміщень

Через відсутність потреби у фотосенсорах, логіка керування цілком ґрунтується на показаннях датчиків присутності. Активація сенсора миттєво вмикає штучне освітлення на 100 % потужності та запускає витяжні вентилятори. Після того, як користувач залишає приміщення, освітлення вимикається із запрограмованою затримкою (для запобігання зносу реле при частому комутуванні), а вентиляційна установка продовжує працювати ще певний час (вибіг вентилятора) для нормалізації якості повітря. Локальні настінні панелі (перемикачі) залишено для можливості ручного примусового втручання технічним персоналом під час прибирання або обслуговування.

Вестибюлі, транзитні коридори та зони реєстрації є «обличчям» громадської будівлі і характеризуються високим рівнем трафіку. Схематехнічне рішення для цієї зони (рис. 2.12) орієнтоване на безпеку та представницькі функції.

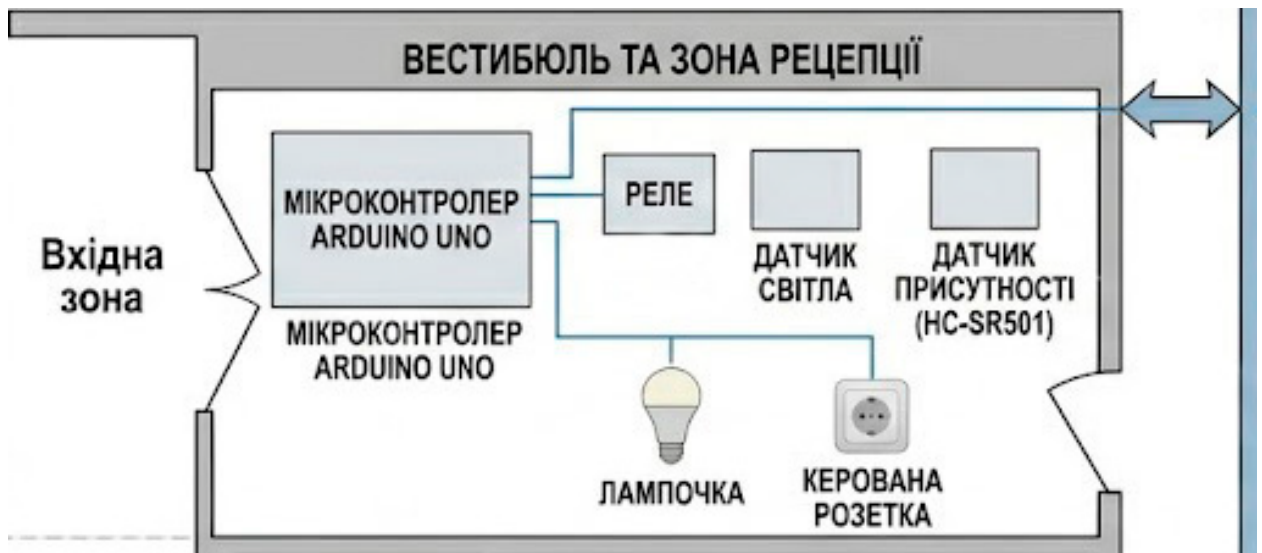


Рисунок 2.12 – Схематехнічне рішення для входних груп та транзитних коридорів

Базовий алгоритм для транзитних зон полягає у використанні «чергового» режиму. У неробочий час або за відсутності руху освітлення не вимикається повністю, а димірується до рівня 10-20 % від номінальної потужності, забезпечуючи нормативні вимоги безпеки (евакуаційне підсвічування). Щойно датчик фіксує переміщення людини, яскравість плавно (протягом 1-2 секунд) збільшується до 100 % у напрямку її руху.

Двосторонній обмін даними між периферійним контролером вестибюлю та центральним BMS-сервером дозволяє охоронним структурам дистанційно моніторити активність у будівлі в неробочий час. Крім того, така мережева архітектура забезпечує можливість централізованого оновлення прошивок (OTA) мікроконтролерів, що дозволяє легко додавати нові алгоритми та розширювати функціонал будівлі в майбутньому.

2.4 Розробка алгоритмічного забезпечення системи керування

Оптимальне управління енергетичними потоками є фундаментальною задачею при проєктуванні сучасних автоматизованих систем (BMS) громадських будівель. У цьому підрозділі обґрунтовано вибір алгоритмічних моделей, які гарантують гнучку реакцію освітлювальної установки на

динамічні зміни зовнішнього середовища (насамперед рівня природної інсоляції) та змінний трафік користувачів.

Базовим елементом ефективності комплексу є програмна логіка мікроконтролера, що в режимі реального часу аналізує масив телеметричних даних від сенсорної інфраструктури – детекторів присутності та датчиків освітленості. Спираючись на ці ввідні параметри, контролер генерує відповідні керуючі впливи на виконавчі механізми: релейну комутацію силових ліній або плавне регулювання потужності світлодіодних драйверів.

Імплементація запропонованих програмних алгоритмів має на меті досягнення чотирьох стратегічних показників:

1. **Максимізація енергоефективності:** радикальне зниження витрат електроенергії за рахунок повного виключення її марнотратного споживання в порожніх приміщеннях.
2. **Експлуатаційна надійність:** забезпечення стабільного та безперебійного функціонування апаратної бази, запобігання надмірному зносу комутаційного обладнання.
3. **Оптимізація операційних витрат:** суттєве зменшення фінансових витрат на оплату електроенергії та технічне обслуговування будівлі.
4. **Забезпечення візуального комфорту:** автоматична підтримка нормованих показників освітленості робочих поверхонь для створення ергономічного середовища для персоналу та відвідувачів.

Практична реалізація таких алгоритмів дозволяє знайти ідеальний баланс між жорсткою економією енергоресурсів та збереженням високих стандартів комфорту, що є визначальним критерієм якості сучасної інженерної інфраструктури.

Зважаючи на архітектурно-планувальну специфіку громадських будівель, які включають як зони з великою площею фасадного скління (відкриті офіси, конференц-зали, вестибюлі), так і «сліпі» зони без доступу природного світла (санітарні вузли, технічні приміщення, сервери), було

застосовано диференційований підхід до автоматизації. Залежно від топології приміщення система використовує один із двох алгоритмів: адаптивний або дискретний.

Адаптивний алгоритм (для зон із природним освітленням):

Для робочих просторів, оснащених віконними отворами, застосовується адаптивна логіка керування (блок-схема наведена на рис. 2.13). Фундаментом цього алгоритму є технологія компенсації денного світла (Daylight Harvesting).

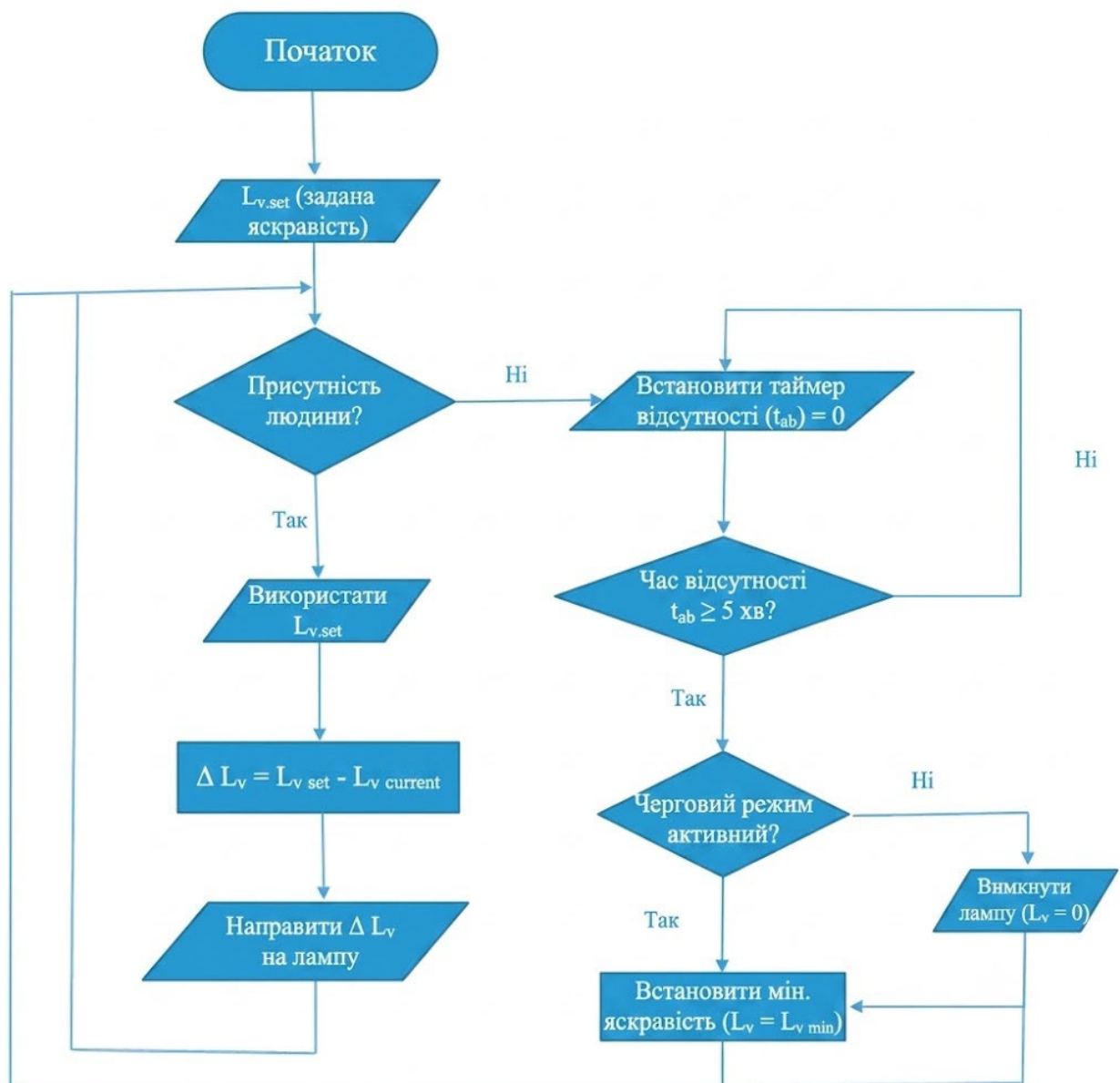


Рисунок 2.13 – Блок-схема адаптивного алгоритму роботи системи освітлення

Логіка роботи ініціюється виключно за умови спрацювання датчика присутності. Отримавши сигнал про фізичну активність у контрольованій зоні, мікроконтролер звертається до фотосенсорів для оцінки поточного рівня природної інсоляції. Шляхом математичного порівняння фактичної освітленості із закладеним нормативним значенням обчислюється дефіцит світла, який необхідно компенсувати.

Виконавче регулювання інтенсивності штучного освітлення відбувається плавно за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ / PWM). Цей метод дозволяє безперервно підлаштовувати яскравість світильників у повному динамічному діапазоні залежно від погодних умов за вікном. Для запобігання дискомфорту «блимванню» світла (наприклад, у разі короткочасної нерухомості персоналу за комп'ютерами) в алгоритм інтегровано програмний таймер гістерезису. Лише якщо рух повністю відсутній протягом контрольного інтервалу (стандартно – 5 хвилин), система плавно зменшує яскравість до нуля і переходить у режим очікування.

Дискретний алгоритм (для технічних та санітарних зон):

У приміщеннях, позбавлених природного світла, використання фотодіодів та систем плавного димірування є технічно надлишковим та економічно недоцільним. Для таких локацій розроблено спрощений алгоритм дискретного керування (рис. 2.14).

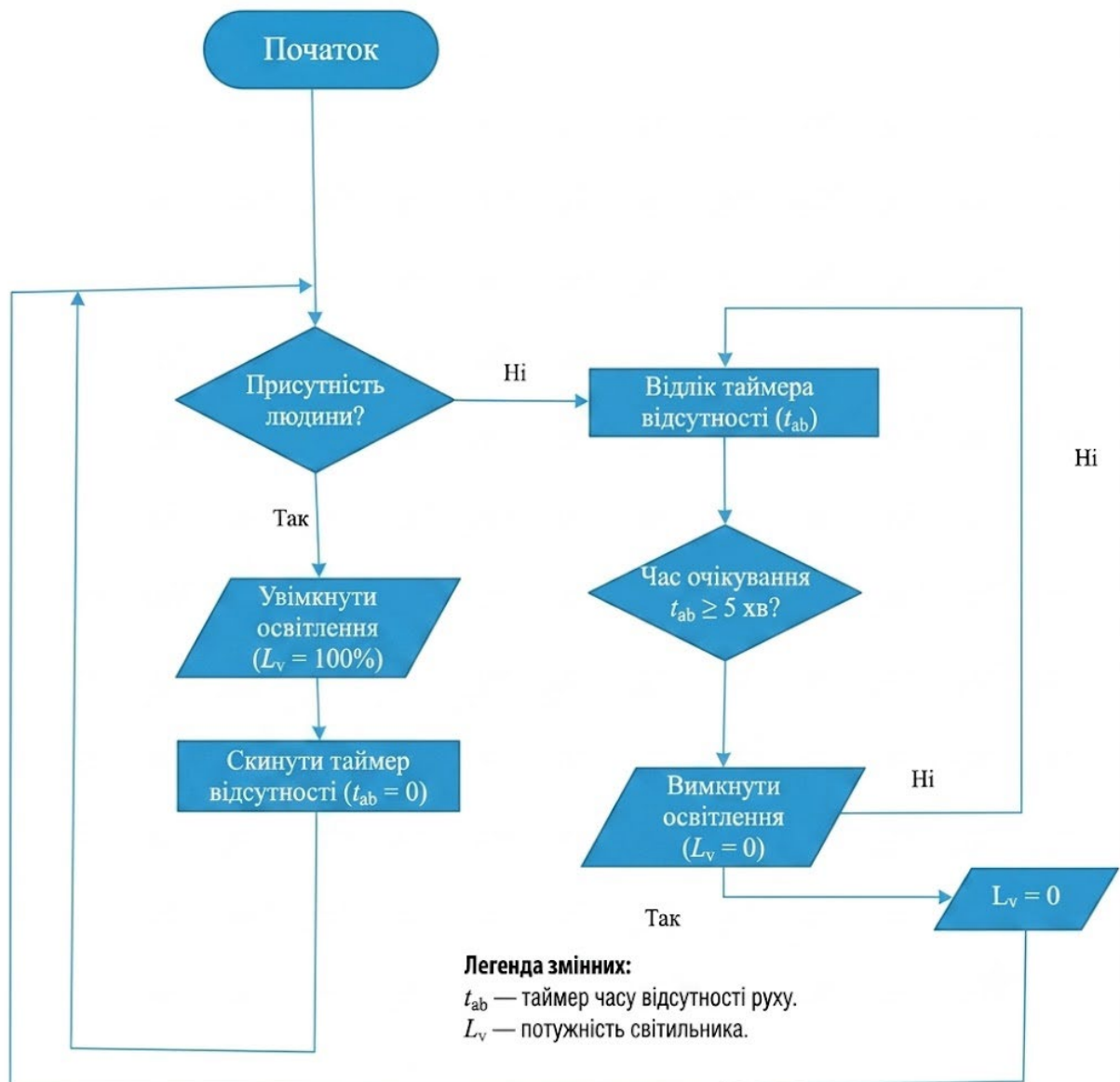


Рисунок 2.14 – Блок-схема спрощеного (дискретного) алгоритму роботи системи освітлення

Архітектура цього алгоритму будується на строгій бінарній логіці:

1. **Активация:** при надходженні сигналу високого рівня (логічної одиниці) від PIR-сенсора мікроконтролер миттєво замикає силове реле, активуючи джерела світла на 100 % їхньої номінальної потужності.
2. **Утримання стану:** живлення на світильники подається безперервно протягом усього часу, поки датчик фіксує будь-яку динаміку в приміщенні.

Фізична логіка взаємодії будується на безперервному циклі опитування. Робота з PIR-сенсором здійснюється через цифрові порти GPIO. При фіксації теплового переміщення формується сигнал високого рівня ($U = 5 \text{ В}$). У стані спокою на лінії утримується логічний нуль ($U = 0 \text{ В}$). Поява логічної одиниці запускає алгоритм активації відповідного релейного каналу через оптопару (для забезпечення гальванічної ізоляції керуючого кола від силового).

Підсистема енергомоніторингу працює за двома аналоговими каналами:

1. Струмовий канал: аналоговий вихід датчика ACS712 підключений до порту *A0*.

2. Канал напруги: вимірювальний сигнал після резистивного дільника ($R_1 = 18 \text{ кОм}$, $R_2 = 4,7 \text{ кОм}$) надходить на порт *A1*. Для апаратного захисту АЦП мікроконтролера від імпульсних перенапруг паралельно вимірювальному входу встановлено стабілітрон із напругою стабілізації $5,1 \text{ В}$.

Мікроконтролер оцифровує отримані сигнали та за допомогою закладених калібрувальних коефіцієнтів обчислює середньоквадратичні (діючі) значення струму (I_{RMS}) та напруги (U_{RMS}), на базі яких розраховується поточна споживана активна потужність.

Для практичної верифікації розробленого апаратно-програмного комплексу було зібрано фізичну модель (макет), що масштабує архітектуру будівлі до трьох незалежних функціональних зон.

Процедура збору емпіричних даних охоплювала реєстрацію векторів телеметрії: енергетичних параметрів (струм, напруга, потужність) та бінарних статусів присутності. Передача масиву даних реалізована за топологією «Мікроконтролер – ПК» через інтерфейс USB-UART. Частота дискретизації вимірювань (період опитування та запису в таблицю) була встановлена на рівні $1/15 \text{ Гц}$ (один лог-запис кожні 15 секунд), що є оптимальним для аналізу повільноплинних процесів у системах освітлення та мікроклімату.

3 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок параметрів енергоефективності та моделювання системи

Проектування та впровадження автоматизованої системи керування (BMS) громадською будівлею вимагає попереднього математичного моделювання. Це необхідно для об'єктивної оцінки потенціалу енергозбереження, а також для прецизійного налаштування граничних параметрів спрацювання апаратно-сенсорної інфраструктури. У цьому підрозділі наведено аналітичну методику розрахунку енергетичної ефективності та математичний апарат калібрування вимірювальних каналів.

Фундаментальним критерієм якості функціонування підсистеми освітлення є стабільне забезпечення нормованого рівня освітленості робочих поверхонь відповідно до вимог діючих стандартів ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [17] та європейської директиви EN 12464-1 [18].

Базовий рівень освітленості визначається як відношення світлового потоку до площі освітлюваної поверхні:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (3.1)$$

Для коректної реалізації алгоритму компенсації денного світла (Daylight Harvesting), який був описаний у попередніх розділах, мікроконтролер повинен в режимі реального часу підтримувати сумарну освітленість (E_{Σ}) на рівні, що не опускається нижче нормативного показника ($E_{\text{норм}}$):

$$E_{\Sigma} = E_{\text{пр}} + E_{\text{шт}} \geq E_{\text{норм}}, \quad (3.2)$$

де $E_{\text{пр}}$ – складова природної інсоляції (вимірюється цифровим фотосенсором системи);

$E_{\text{шт}}$ – складова штучного освітлення (динамічно регулюється мікроконтролером).

Економічна доцільність впровадження автоматизованого комплексу оцінюється шляхом порівняльного аналізу споживання електроенергії

традиційною системою з ручним керуванням ($W_{\text{трад}}$) та запропонованою автоматизованою системою ($W_{\text{авт}}$) за фіксований розрахунковий період T (наприклад, календарний рік).

Сумарне споживання електроенергії об'єктом без засобів автоматизації розраховується за формулою:

$$W_{\text{трад}} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot t_i), \quad (3.3)$$

де P_i – номінальна активна потужність i -го джерела світла (кВт);
 t_i – час роботи джерела світла (год), який за традиційної схеми має високу частку нецільового використання через суб'єктивний людський фактор.

Прогнозоване споживання енергії автоматизованою системою формується з урахуванням коефіцієнта фактичного використання робочого часу (k_i) та коефіцієнта адаптивного димірування (k_{dim}), а також враховує власне споживання апаратної бази:

$$W_{\text{авт}} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot t_{\text{act}} \cdot k_{\text{dim}}) + P_{\text{сп}} \cdot T, \quad (3.4)$$

де t_{act} – час фактичної присутності користувачів у зоні моніторингу (детектується PIR-сенсорами);

k_{dim} – середній інтегральний коефіцієнт потужності при ШІМ-диміруванні (знаходиться в межах від 0 до 1), величина якого обернено пропорційна рівню природного освітлення;

$P_{\text{сп}}$ – власна споживана потужність елементів BMS у режимі очікування (standby), включаючи мікроконтролер, сенсори та джерела живлення;

T – загальний фонд календарного часу роботи системи.

Абсолютна величина зекономленої електроенергії (ΔW) визначається різницею цих показників:

$$\Delta W = W_{\text{трад}} - W_{\text{авт}}. \quad (3.5)$$

Відповідно, відносна енергетична ефективність комплексу (η) у відсотковому вираженні становить:

$$\eta = \frac{W_{\text{трад}} - W_{\text{авт}}}{W_{\text{трад}}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

Згідно з галузевими дослідженнями [24-25], імплементація лише дискретних датчиків присутності дозволяє скоротити параметр t_{act} на 20–40 %, тоді як впровадження алгоритмів адаптивного димірування k_{dim} здатне забезпечити додаткову економію до 30 % у світлий час доби.

Для плавного регулювання яскравості світлодіодних драйверів система використовує метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ / PWM). Середня потужність ($P_{\text{сеп}}$), що інтегрується на навантаженні, є прямо лінійною функцією від коефіцієнта заповнення імпульсу D :

$$P_{\text{сеп}} = D \cdot P_i. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт заповнення D (Duty Cycle) обчислюється як відношення тривалості активного імпульсу (t_{on}) до загального періоду слідування (T_{period}):

$$D = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} = \frac{t_{\text{on}}}{T_{\text{period}}}. \quad (3.8)$$

У мікроконтролері ATmega328P апаратна генерація ШІМ реалізується через 8-бітні регістри таймерів, що забезпечує 256 рівнів квантування (від 0 до 255). Еквівалентна вихідна напруга, що подається на драйвер світильника, описується виразом:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{source}} \cdot \frac{V_{\text{alPWM}}}{255}, \quad (3.9)$$

де V_{source} – напруга живлення керуючого кола;

V_{alPWM} – поточне значення у регістрі мікроконтролера.

Для інтеграції аналогових вимірювальних каналів (зокрема датчиків струму, напруги або резервних фоторезисторів типу LDR) мікроконтролер використовує вбудований 10-бітний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), що формує цифровий код ADC_{val} у діапазоні від 0 до 1023.

Базовий розрахунок падіння напруги на виході аналогового датчика (V_{sensor}) здійснюється за формулою:

$$V_{sensor} = V_{rcf} \cdot \frac{ADC_{val}}{1024}, \quad (3.10)$$

де V_{rcf} – опорна напруга АЦП (стандартно 5 В).

Варто відзначити складність використання класичних аналогових фоторезисторів (на базі сульфїду кадмію) для систем адаптивного димірування. У схемі резистивного дільника опір фоторезистора (R_{ph}) обчислюється як:

$$R_{ph} = R_{fixed} \cdot \left(\frac{V_{in}}{V_{sensor}} - 1 \right). \quad (3.11)$$

Однак, залежність опору такого напівпровідника від фактичної освітленості (E) є суворо нелінійною і описується степеневою функцією:

$$R_{ph} = A \cdot E^{-\gamma}, \quad (3.12)$$

де A та γ – константи конкретного фоторезистора.

Саме ця складна математична нелінійність, що вимагає громіздкої програмної апроксимації (лінеаризації) в коді мікроконтролера, обґрунтовує зроблений у розділі вибір на користь цифрових I2C-сенсорів (BH1750), які виконують ці розрахунки на апаратному рівні і видають готове значення безпосередньо в люксах.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Забезпечення охорони праці

Питання охорони праці [26] є фундаментальним складником життєвого циклу будь-якого інноваційного проекту. При розробці високотехнологічних комплексів, таких як автоматизовані системи керування освітленням (BMS), забезпечення належного рівня безпеки персоналу набуває критичної ваги. Ефективність праці інженера-проектувальника прямо пропорційна якості створеного виробничого середовища, яке має задовольняти фізіологічні, ергономічні та психологічні потреби працівника.

Комплексний підхід до організації робочого місця розробника апаратно-програмних комплексів вимагає прискіпливого аналізу специфіки трудового процесу. У цьому контексті ключовими векторами досліджень є:

- оптимізація ергономічних показників робочої зони;
- стабілізація та підтримка нормативних параметрів мікроклімату;
- абсолютне гарантування електробезпеки під час макетування та пусконаладження електронних вузлів;
- формування сприятливого світлового середовища, що мінімізує зорову втому.

Стратегія з охорони праці ґрунтується на превентивній оцінці впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів (ШНВФ) на організм людини. Головною метою цього підрозділу є розробка дієвих організаційно-технічних заходів та локальних інструкцій, специфічних для умов створення електронних систем керування. Імплементация цих заходів покликана мінімізувати професійні ризики, купірувати виробничу втому та максимізувати загальну продуктивність інженерної діяльності.

4.2 Характеристика об'єкта проектування та аудит умов праці

Базовим об'єктом для аналізу та впровадження заходів з охорони праці

визначено приміщення науково-дослідної лабораторії, де здійснювались ключові етапи проєктування системи автоматизації. Просторова та технічна організація робочих місць на цій локації суворо регламентується Вимогами до безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями, затвердженими Наказом Мінсоцполітики України № 207 від 14.02.2018 [27].

Вибір саме цієї ділянки зумовлений концентрацією специфічних факторів професійного ризику, притаманних інженерно-проєктній галузі: висока інтенсивність когнітивних процесів, необхідність тривалої концентрації при роботі з персональним комп'ютером, надмірне напруження зорового аналізатора та перманентний контакт з електротехнічним обладнанням під час тестування прототипів.

Відповідно до положень Наказу № 207 [27], архітектура робочого місця має забезпечувати працівнику свободу зміни робочої пози. Аналіз фактичних габаритів лабораторії підтверджує дотримання санітарно-ергономічних норм, визначених ДБН В.2.2-28:2010 [28] (питома площа не менше 6 м² на одне робоче місце та об'єм не менше 20 м³), що формує базис для безпечної праці.

Життєвий цикл розробки автоматизованої системи є симбіозом складної інтелектуальної діяльності та тонкої ручної праці. Виробничий функціонал інженера диференціюється на такі ключові етапи:

1. **Інженерно-математичне моделювання:** створення CAD-моделей, розрахунок світлотехнічних та електротехнічних параметрів, підбір електронної компонентної бази (ЕКБ).

2. **Апаратно-програмна імплементація:** написання та відлагодження коду для мікроконтролера ATmega328P, фізичний монтаж макетних плат, пайка та інтеграція сенсорних модулів.

3. **Експериментальна аналітика:** збір та статистична обробка масивів даних телеметрії, валідація енергоефективності.

Згідно з Державними санітарними нормами, діяльність інженера-розробника за ступенем важкості класифікується як категорія Ia (легка фізична

праця, енерговитрати до 120 ккал/год), оскільки виконується переважно в сидячому положенні та не вимагає систематичного фізичного напруження. Однак за показниками напруженості праця належить до високо напруженої через:

- екстремальне нервово-емоційне навантаження, пов'язане з високою відповідальністю за стабільність програмно-апаратних рішень;
- критичне напруження зорового аналізатора (розряд зорової роботи III–IV), зумовлене тривалим моніторингом екранних пристроїв та маніпуляціями з дрібними SMD-компонентами.

4.3 Ідентифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Мікросередовище проєктної лабораторії генерує спектр чинників, що потенційно впливають на гомеостаз працівника. Згідно з Державними санітарними нормами та правилами «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» (Наказ МОЗ № 248 [29]), на робочому місці ідентифіковано такі групи факторів:

1. Фактори фізичної природи:

- **параметри мікроклімату:** щільне розташування обчислювальної техніки та вимірювальних приладів генерує значне конвективне тепловиділення. Порушення нормативних показників температури, відносної вологості або швидкості руху повітря (регламентованих ДСН 3.3.6.042-99) призводить до дисбалансу терморегуляції організму та різкого падіння працездатності;
- **неіонізуючі електромагнітні випромінювання (ЕМВ):** потужними генераторами ЕМВ виступають системні блоки, монітори, лабораторні джерела живлення, а також модулі бездротової передачі даних, які є невід'ємною частиною розробки «розумного будинку»;
- **параметри світлового середовища:** дефіцит освітленості на

робочій поверхні столу, пряме та відбите засліплення (відблиски на матрицях моніторів) або високий коефіцієнт пульсації газорозрядних/світлодіодних ламп провокують стрімкий розвиток астенопії (зорової втоми);

- **ризик електротравматизму:** оскільки створення прототипів передбачає роботу з лабораторними блоками живлення, паяльними станціями та релейними модулями, що комутують напругу 220 В, існує перманентна загроза ураження струмом внаслідок пробою ізоляції або дефекту контуру захисного заземлення.

2. Психофізіологічні фактори (фактори трудового процесу):

- **сенсорне перевантаження:** процес програмування та налагодження схем вимагає фіксації зору на об'єктах розміром 0,3–0,5 мм (код, виводи мікросхем). Тривала акомодация на фіксованій відстані виснажує циліарний м'яз ока;

- **гіподинамія та статичні навантаження:** робота розробника характеризується жорстко фіксованою робочою позою. Дефіцит рухової активності провокує дегенеративні зміни у шийно-грудному відділі хребта, венозний стаз у нижніх кінцівках та розвиток карпального тунельного синдрому (від роботи з мишею та клавіатурою);

- **когнітивне виснаження:** необхідність одночасної обробки великих масивів інформації, генерація евристичних алгоритмічних рішень та хронічний дефіцит часу генерують стійкий стресовий фон.

4.4 Комплекс організаційно-технічних заходів із забезпечення безпеки

Фундаментом нівелювання негативного впливу ШНВФ є науково обґрунтована ергономічна організація автоматизованого робочого місця (АРМ) згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 9241-5:2004 [30]:

1. Ергономіка простору:

- дисплейний модуль має бути орієнтований у просторі так, щоб лінія погляду була перпендикулярна центру екрана (допускається відхилення

$\pm 5^\circ$), а оптимальна відстань до очей становила 500–700 мм. Верхня кромка монітора повинна знаходитися на рівні очей або нижче (рис. 4.1);

- робоче крісло має забезпечувати підтримку поперекового лордозу, бути підйомно-поворотним із регульованою висотою сидіння та кутом нахилу спинки, гарантуючи фізіологічно правильний кут у колінних суглобах ($90^\circ \dots 120^\circ$).

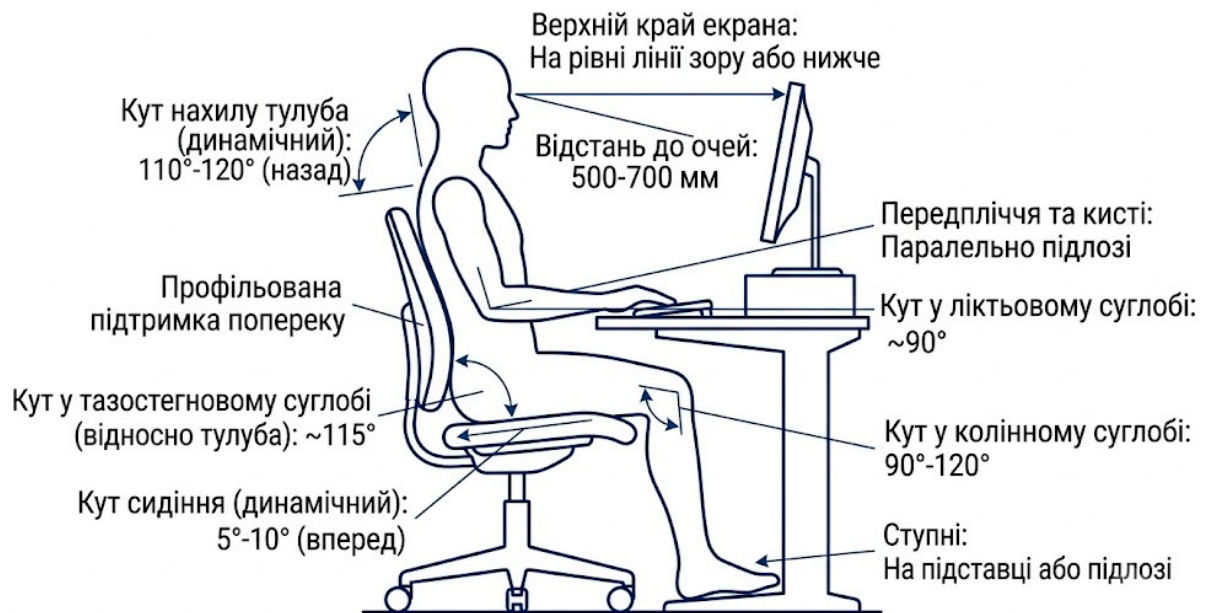


Рисунок 4.1 – Антропометричні параметри динамічної ергономічної пози

2. Оптимізація освітлення:

- для нейтралізації відблисків та тінеутворення застосовується система комбінованого освітлення. Локальні світильники мають встановлюватися зліва від оператора, оснащуватися непрозорими рефлекторами для унеможливлення прямого засліплення;

- робочі поверхні повинні мати матове антиблікове покриття з коефіцієнтом відбиття 0,4–0,6.

3. Регламентація праці та психофізіологічне розвантаження:

- тайм-менеджмент здоров'я: впровадження мікропауз (10–15 хвилин) кожні 2 години безперервної роботи за монітором. Ці перерви призначені для виконання комплексів виробничої гімнастики, спрямованих на релаксацію м'язів шийно-комірцевої зони та кистей рук;

- офтальмологічна гігієна: застосування техніки візуального розвантаження («правило 20-20-20» – фокусування на об'єктах вдалині) та обов'язковий щорічний скринінг у лікаря-офтальмолога.

4. Забезпечення електробезпеки:

- усі металеві корпуси обладнання та лабораторні стенди підлягають обов'язковому приєднанню до контуру захисного заземлення (опір розтіканню струму – не більше 4 Ом для мереж до 1000 В);

- лінії живлення лабораторних розеток повинні оснащуватися пристроями захисного відключення (ПЗВ) зі струмом уставки не більше 30 мА та автоматичними вимикачами з відповідною ампер-секундною характеристикою;

- працівники лабораторії зобов'язані пройти інструктаж та атестацію для присвоєння кваліфікаційної групи І з електробезпеки.

4.5 Пожежна безпека

Проектна лабораторія, що характеризується високою щільністю електронно-обчислювальної техніки та електромонтажним обладнанням, належить до приміщень підвищеної пожежної небезпеки. Реалізація превентивної протипожежної стратегії здійснюється відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014 [31]).

Домінуючими тригерами пожеж у таких приміщеннях є струми короткого замикання, теплове перевантаження мереж та іскріння в перехідних контактах. Стратегія мінімізації пожежних ризиків ґрунтується на таких принципах:

1. **Профілактика електромереж:** систематичний аудит стану ізоляції силових ліній, вимірювання перехідних опорів та тепловізійний контроль контактних з'єднань у розподільчих щитах.

2. **Апаратний захист:** обов'язкове використання джерел

безперебійного живлення (ДБЖ/UPS) та реле напруги для локалізації аварійних перенапруг.

3. **Пожежна гігієна:** жорсткий контроль за накопиченням пилу на платах приладів та у вентиляційних каналах (пил є каталізатором термічного пробою), а також абсолютна заборона на використання відкритого вогню чи зберігання легкозаймистих рідин (ЛЗР) у робочій зоні.

Логістика приміщення має гарантувати безперешкодну евакуацію. Габарити проходів розраховуються відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» [32]. Маршрути виходу позначаються фотолюмінесцентними знаками.

Лабораторія обладнується адресними димовими пожежними сповіщувачами раннього виявлення.

Для ліквідації локальних осередків загоряння (особливо електроустановок під напругою до 1000 В) застосовуються виключно вуглекислотні вогнегасники (типу ВВК), оскільки вуглекислота, на відміну від порошку, не спричиняє корозії та хімічної деградації вцілілих електронних компонентів.

Окремим стратегічним напрямком є інформаційна безпека в умовах надзвичайних ситуацій (НС): впровадження жорстких протоколів автоматичного резервного копіювання (backup) програмного коду мікроконтролерів та інженерних баз даних на географічно розподілені «хмарні» сервери, що гарантує збереження інтелектуального капіталу навіть за умови повного знищення апаратної бази об'єкта.

4.6 Висновки до розділу

У межах розділу «Охорона праці» бакалаврської кваліфікаційної роботи здійснено вичерпний аудит стану охорони праці на робочому місці інженера-розробника систем автоматизації будівель:

1. Систематизовано номенклатуру виробничих небезпек та доведено превалювання психофізіологічних факторів (гіпернапруження зору, статична

гіподинамія) та ризиків електротравматизму.

2. Сформовано науково обґрунтований комплекс ергономічних та організаційних рішень щодо конфігурації автоматизованого робочого місця і регламентації режимів праці.

3. Розроблено багаторівневу модель протипожежного та електротехнічного захисту, адаптовану під специфіку експлуатації мікропроцесорної техніки.

Впровадження запропонованої концепції гарантує дотримання законодавчих норм України у сфері охорони праці, мінімізує виробничий травматизм та створює оптимальне середовище для високопродуктивної інженерної діяльності.

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення енергоефективності інженерних мереж громадських та комерційних будівель шляхом розробки автоматизованої системи керування освітленням (класу BMS). На основі проведених досліджень отримано наступні результати:

1. Проведено критичний аналіз існуючих методів керування штучним освітленням. Встановлено, що класичні релейні системи з ручним керуванням генерують значні перевитрати електроенергії через вплив людського фактору. Обґрунтовано безальтернативність переходу до інтелектуальних систем на базі мікроконтролерів та енергоефективних джерел світла.

2. Запропоновано ієрархічну чотирирівневу архітектуру автоматизованої системи. Такий модульний підхід забезпечує високу надійність апаратної частини, швидкість обробки телеметрії та гнучкість масштабування системи під будь-яку площу об'єкта.

3. Створено програмну логіку контролера, що реалізує два спеціалізовані режими залежно від топології приміщень: адаптивний алгоритм для відкритих офісів та зон із природною інсоляцією та дискретний алгоритм: для технічних і санітарних вузлів без вікон.

4. Створено діючий прототип системи на базі мікроконтролера архітектури AVR. Опрацьовано вектори подальшої модернізації.

5. Здійснено комплексний аудит небезпечних та шкідливих виробничих факторів при проектуванні мікропроцесорних систем.

Розроблений апаратно-програмний комплекс є технічно доцільним та безпечним рішенням. Успішна верифікація алгоритмів дозволяє рекомендувати цю систему для масового впровадження у проєктах реконструкції та будівництва муніципальних, освітніх і комерційних об'єктів інфраструктури України як дієвий інструмент енергетичної незалежності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wilson, C. Benefits and risks of smart home technologies / C. Wilson, T. Hargreaves, R. Hauxwell-Baldwin // *Energy Policy*. – 2017.–Vol.103. – pp. 72-83.
2. 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.
3. К. І. Іоффе, О. Л. Черкашина. Конспект лекцій з дисципліни «Системи керування світлотехнічними пристроями». Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2018. 56 с.
4. Al-Ali, A. R. A smart home energy management system using IoT and big data analytics approach / A. R. Al-Ali, I. A. Zualkernan, M. Rashid, R. Gupta, M. Alikarar // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. – 2017. – Vol. 63, Issue 4. – pp. 426-434.
5. Neelam Verma, Anjali Jain. "Optimized Automatic Lighting Control in a Hotel Building for Energy Efficiency", International Conference on Power Energy, 2018. 170 p.
6. Hajjaj, M., Miki, M., & Shimohara, K. "The Effect of Using the Intelligent Lighting System to Deduct the Power Consumption at the Office", IEEE 7th Conference on Systems, Process and Control (ICSPC), 2019. 66 p.
7. 1st Source Lighting. The Basics of Lighting Control Systems: An Introduction and Guide. URL: <https://1stsourcelighting.com/the-basics-of-lighting-control-systems/> (date of access: 30.05.2026).
8. Lighting Controls Academy. URL: <https://lightingcontrolsacademy.org/> (date of access: 01.06.2026).
9. Akbulut, L.; Taşdelen, K.; Atılğan, A.; Malinowski, M.; Coşgun, A.; Şenol, R.; Akbulut, A.; Petryk, A. A Systematic Review of Building Energy Management Systems (BEMSs): Sensors, IoT, and AI Integration. *Energies* **2025**, *18*, 6522. <https://doi.org/10.3390/en18246522>

10. Moreno, M.V.; Úbeda, B.; Skarmeta, A.F.; Zamora, M.A. How can We Tackle Energy Efficiency in IoT Based Smart Buildings? *Sensors* 2014, 14, 9582-9614. <https://doi.org/10.3390/s140609582>
11. Serrano, W. Smart or Intelligent Assets or Infrastructure: Technology with a Purpose. *Buildings* 2023, 13, 131. <https://doi.org/10.3390/buildings13010131>
12. Welcome to the world of solar shading. ESSO. URL: <https://es-so.com/> (date of access: 02.06.2026).
13. Фізика і техніка світлодіодів: навч. посібник / Л. А. Назаренко, А. І. Колесник ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 255 с.
14. Human Centric Lighting with tunableWhite. URL: <https://www.zumtobel.com/au-en/tunablewhite-hcl.html> (date of access: 05.06.2026).
15. CIE 222:2017 «Decision Scheme for Lighting Controls in Non-Residential Buildings». URL: <https://cie.co.at/publications/decision-scheme-lighting-controls-non-residential-buildings> (date of access: 05.06.2026).
16. Lutron. Intelligent light. Automated Shades. Powerful Controls. URL: <https://www.lutron.com/us/en> (date of access: 05.06.2026).
17. 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 (дата звернення: 06.06.2026).
18. ДСТУ EN 12464-1:2016 Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця (EN 12464-1:2011, IDT). Будстандарт. Сервіс документів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71838 (дата звернення: 06.06.2026).
19. Arduino. Arduino UNO Q: From blink to think. URL: <https://www.arduino.cc/> (date of access: 07.06.2026).
20. Arduino IDE. URL: <https://www.arduino.cc/en/software/> (date of access: 07.06.2026).

21. Космодром. URL: <https://www.kosmodrom.ua/> (дата звернення: 07.06.2026).
22. WOKWI. World's most advanced ESP32 simulator. URL: <https://wokwi.com/> (date of access: 08.06.2026).
23. ДСТУ EN 15232-1:2017 Енергоефективність будівель. Частина 1. Вплив функцій автоматизації, контролювання та управління будівлею. Модулі M10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 (EN 15232-1:2017, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99024 (дата звернення: 09.06.2026).
24. Williams A., Atkinson B., Garbesi K., Page E., Rubinstein F. Lighting controls in commercial buildings. Leukos. 2012. Vol. 8, No. 3. P. 161–180.
25. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed. San Diego: Springer, 2016. 758 p.
26. Закон України «Про охорону праці». Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 10.06.2026).
27. Наказ Міністерства соціальної політики України № 207 від 14.02.2018 «Про затвердження Вимог до безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями». Рада. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18#Text> (дата звернення: 10.06.2026).
28. ДБН В.2.2-28:2010 Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. Будстандарт. Сервіс документів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=27263 (дата звернення: 10.06.2026).
29. 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: 11.06.2026).

30. ДСТУ ISO 9241-5:2004 Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Вимоги до компонування робочого місця та до робочої пози (ISO 9241-5:1998, IDT). Будстандарт. Сервіс документів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53291 (дата звернення: 11.06.2026).
31. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні : затв. наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15> (дата звернення: 12.06.2026).
32. 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 (дата звернення: 12.06.2026).
33. 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.