

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розроблення автоматизованої системи керування процесом природного освітлення приміщень.

Виконав: студент IV курсу, групи КТ-41
спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва спеціальності)

	(підпис)	Кравець А.В. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Чихіра І.В. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Чихіра І.В. (прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Голотенко О.С. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Осадца Я.М. (прізвище та ініціали)

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

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Голотенко О.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Студенту Кравець Андрій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування процесом природного освітлення приміщень.

Керівник роботи Чихіра Ігор Вікторович., кандидат технічних наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» квітня 2026 року № 4/9 183

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 червня 2026р.

3. Вихідні дані до роботи технічна документація на систему освітлення
в приміщення, нормативні вимоги до природного освітлення, параметри
приміщення, характеристики датчиків та виконавчих механізмів

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Проектна частина

Спеціальна частина

Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Висновок

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Сенчишин В.С., к.т.н. заступник зав. кафедри МТ		

7. Дата видачі завдання 15.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент _____
(підпис)

(підпис)

Кравець А.В.
(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

(підпис)

Чихіра І.В
(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить 11 слайдів.

Об'єм пояснювальної записки складає 57 друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано 17 літературних джерел.

Ефективне використання природного освітлення є однією з важливих вимог сучасних автоматизованих систем керування приміщеннями як у житлових, так і в офісних будівлях. Для забезпечення комфортного рівня освітленості та зниження енергоспоживання необхідна добре спроектована система автоматичного керування природним освітленням. Система складається з декількох основних підсистем, а саме: підсистеми вимірювання рівня освітленості, підсистеми автоматичного керування освітленням, підсистеми обробки даних та підсистеми енергозбереження.

У даній роботі розглянуто питання розроблення автоматизованої системи керування процесом природного освітлення приміщень. Основною метою системи є автоматичне регулювання рівня освітленості в приміщенні шляхом використання датчиків освітленості та алгоритмів автоматичного керування. Особлива увага приділена забезпеченню стабільної роботи системи, швидкому реагуванню на зміну природного освітлення та підвищенню енергоефективності приміщення.

Для реалізації системи проведено аналіз сучасних daylight control systems, illuminance sensors та методів автоматичного керування освітленням. Виконано вибір датчиків освітленості, елементів керування та засобів автоматизації системи. Також розроблено структурну схему системи та алгоритм її роботи.

Динамічний аналіз системи та проєктування керування здійснюються з використанням сучасних методів автоматизації та моделювання. Розроблена

модель системи дозволяє дослідити взаємодію між компонентами системи, оцінити ефективність автоматичного регулювання освітленості та забезпечити оптимальні умови освітлення в приміщенні.

Ключові слова: автоматизована система, природне освітлення, датчик освітленості, автоматичне керування, smart lighting, моделювання, енергоефективність.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Аналіз систем автоматизованого керування	
природним освітленням	9
1.2 Аналіз сучасних датчиків освітленості та photosensors.....	11
1.3 Огляд методів автоматичного керування освітленням	13
1.4 Аналіз існуючих smart lighting та daylight control systems.....	14
1.5 Порівняння систем керування природним освітленням	15
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	17
2.1 Розроблення структури автоматизованої системи.....	17
2.2 Вибір датчика освітленості для системи	18
2.3 Вибір мікроконтролера та елементів керування.....	19
2.4 Розроблення алгоритму роботи системи	20
2.5 Розроблення структурної схеми системи	22
2.6 Принцип роботи автоматизованої системи	22
2.7 Моделювання роботи системи природного освітлення	23
2.8 Системи автоматизованого керування природним освітленням.....	24
2.9 Розробка структурної схеми автоматизованої системи регулювання процесом	
природного освітлення	27
2.10 Вибір компонентів автоматизованої системи	28
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	39
3.1 Розроблення програмного забезпечення системи.....	39
3.2 Реалізація алгоритму автоматичного керування.....	40
3.3 Налаштування та калібрування датчика освітленості.....	41
3.4 Аналіз ефективності роботи системи.....	42
3.5 Оцінка енергоефективності автоматизованої системи.....	43
3.6 Перспективи вдосконалення системи.....	44
4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.....	45
Висновок.....	54
Список використаних джерел	56

ВСТУП

Сучасні системи освітлення є важливою складовою енергоефективних будівель та інтелектуальних систем автоматизації. Значна частина електроенергії в житлових, офісних та промислових приміщеннях витрачається саме на забезпечення необхідного рівня освітленості. У зв'язку зі зростанням вартості енергоресурсів та необхідністю підвищення енергоефективності будівель все більшої актуальності набуває використання автоматизованих систем керування природним освітленням. Такі системи дозволяють оптимально використовувати природне денне світло, знижувати споживання електроенергії та забезпечувати комфортні умови перебування людей у приміщенні.

Автоматизовані системи керування природним освітленням базуються на використанні датчиків освітленості, систем автоматичного регулювання та сучасних алгоритмів керування. Основним завданням таких систем є підтримання необхідного рівня освітленості в приміщенні шляхом аналізу інтенсивності природного світла та автоматичного регулювання штучного освітлення. Використання illuminance sensors, photosensors та daylight-linked control systems дозволяє забезпечити стабільну роботу системи в умовах постійної зміни рівня природного освітлення протягом доби.

Сучасні daylight control systems активно застосовуються у smart buildings, офісних приміщеннях, навчальних закладах та промислових об'єктах. Використання інтелектуальних систем освітлення дозволяє не лише зменшити енергоспоживання, але й підвищити ефективність використання природного світла, знизити навантаження на електричні мережі та покращити умови праці й перебування людей у приміщеннях. Особливої актуальності набуває застосування IoT-технологій, wireless sensor networks та систем автоматичного керування з елементами штучного інтелекту для підвищення точності та швидкодії систем освітлення.

Важливим елементом автоматизованих систем керування освітленням є датчики освітленості, які забезпечують вимірювання рівня природного та штучного освітлення. Від точності роботи датчиків, їх калібрування та алгоритмів обробки сигналів залежить ефективність функціонування всієї

системи. Сучасні дослідження у сфері daylight-responsive dimming systems, photocontrol systems та intelligent lighting systems спрямовані на підвищення точності вимірювання освітленості, вдосконалення алгоритмів автоматичного регулювання та забезпечення енергоефективності систем освітлення.

У даній кваліфікаційній роботі розглядається розроблення автоматизованої системи керування процесом природного освітлення приміщень. Основна увага приділяється аналізу сучасних систем автоматичного керування освітленням, дослідженню датчиків освітленості, вибору елементів системи та розробленню алгоритму автоматичного регулювання рівня освітленості. Також розглядаються питання енергоефективності, моделювання роботи системи та оцінки ефективності використання природного освітлення у приміщеннях.

Метою роботи є підвищення ефективності використання природного освітлення шляхом розроблення автоматизованої системи керування освітленням із використанням сучасних датчиків освітленості та методів автоматичного керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз сучасних систем автоматизованого керування освітленням;
- дослідити принципи роботи та характеристики датчиків освітленості;
- виконати вибір елементів автоматизованої системи;
- розробити структурну схему системи керування;
- створити алгоритм автоматичного регулювання освітленості;
- провести моделювання та аналіз роботи системи;
- оцінити енергоефективність запропонованої системи.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз систем автоматизованого керування природним освітленням

Автоматизовані системи керування природним освітленням (daylight control systems) являють собою комплекс технічних засобів та програмного забезпечення, призначених для оптимального поєднання природного денного світла та штучного освітлення. Вони підтримують нормований рівень освітленості на робочих поверхнях, підвищують енергоефективність і комфорт користувачів, стаючи складовою сучасних інтелектуальних будівель.

Принципи функціонування daylight control systems

Головна ідея daylight control базується на поєднанні природного світла зі штучним (daylight supplementation). Система постійно вимірює рівень освітленості у контрольній точці й регулює потужність штучного освітлення, щоб сумарна освітленість дорівнювала заданій. Коли денне світло збільшується — інтенсивність штучного освітлення знижується, і навпаки.

Структура типової системи:

- Датчики освітленості (photosensors);
- Контролер;
- Драйвери або регулятори потужності (dimming ballasts, LED drivers);
- Джерела освітлення;
- Системи затінення (жалюзі, штори, електрохромні скла).

Разом ці елементи утворюють замкнутий контур керування (closed-loop control), у якому датчик надає зворотний зв'язок про фактичну освітленість, а контролер коригує подачу енергії.

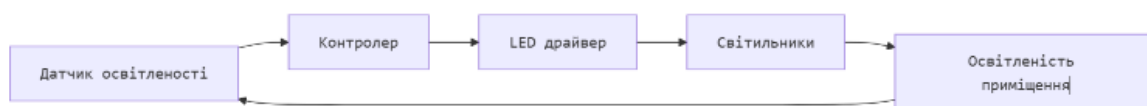


Рисунок 1.1. Структурна схема автоматичної системи керування освітленням приміщення

Класифікація систем.

За типом контуру керування:

Open-loop control — вимірюється лише зовнішня освітленість, система не враховує реальний рівень світла у робочій зоні. Проста реалізація, але низька точність.

Closed-loop control — контролюється фактична освітленість у зоні роботи. Висока точність, однак потребує калібрування датчиків.

Гібридні системи — комбінують обидва типи сенсорів для підвищення точності.

За способом регулювання:

Плавне (continuous dimming) — безперервна зміна потужності (1–100 %);

Ступеневе (stepped switching) — кілька фіксованих рівнів, наприклад 0 / 50 / 100 %;

Зонне (zone switching) — окреме керування групами світильників залежно від надходження денного світла.

Алгоритми керування

Алгоритм визначає: як контролер перетворює сигнали датчиків у команди для світильників.

Основні підходи:

Пропорційне керування (P-control) — швидке, але з постійною похибкою.

PI-регулятор — усуває статичну похибку, забезпечує плавність.

Ітеративний closed-loop алгоритм — коригує інтенсивність світла покроково до досягнення цільового рівня (точність $\pm 5\%$).

Продуктивне керування (MPC) — прогнозує майбутню освітленість і налаштовує світло наперед.

Нейромережеве керування — використовує алгоритми глибинного навчання для самонавчання системи в реальних умовах.

Фактори впливу

Ефективність daylight control систем залежить від архітектури будівлі, прозорості скла, положення датчиків, характеристик LED-пристроїв і навіть поведінки користувачів (наприклад, використання штор). Алгоритм регулювання також критично впливає на стабільність — невірно налаштований регулятор може викликати «ефект мерехтіння».

1.2 Аналіз сучасних датчиків освітленості та photosensors

Датчики освітленості — джерело інформації для системи: вони визначають реальний рівень світла у приміщенні. Точність сенсорів напряму впливає на ефективність енергоекономії.

Типи датчиків

Фотодіоди. Надійні, лінійні, швидкодіючі; потребують спектральної корекції.

Фоторезистори (LDR). Дешеві, але мають повільну реакцію й низьку точність.

Інтегральні цифрові сенсори (TSL, BH1750, VEML): мають вбудований підсилювач, АЦП і температурну компенсацію, спрощуючи підключення.

RGB-сенсори. Дають окремі вимірювання по кольорових каналах, дозволяють розрізнити денне й штучне світло.

CMOS-камери. Дають повну картину освітленості по площині приміщення, можуть керувати як освітленням, так і затіненням.

Таблиця 1.1 Ключові характеристики

Параметр	Сутність	Діапазон / значення
Спектральна чутливість	Відповідність кривій $V(\lambda)$	380–780 нм
Діапазон вимірювання	Мін/макс рівень освітленості	0,1–100 000 лк
Поле зору	Кут освітлення	60–180°
Час реакції	Відгук	до 10 мс
Температурна стабільність	Вплив температури	$\pm 1\%/^{\circ}\text{C}$
Лінійність	Пропорційність сигналу	висока
Інтерфейс	Зв'язок із контролером	I ² C, SPI

Розташування та калібрування

Датчики зазвичай встановлюють на стелі або біля вікна, де вони вловлюють сумарне відбите світло. Вибір місця залежить від розподілу денного світла.

Калібрування буває:

Статичне — одноразове при встановленні;

Динамічне — автоматичне коригування коефіцієнтів через аналіз історичних даних;

Модельне — з урахуванням геометрії приміщення та коефіцієнтів відбиття.



Рисунок 1.2 Розташування датчиків у приміщенні

1.3 Огляд методів автоматичного керування освітленням

Методи керування визначають реакцію системи на зміну освітленості. Від ефективності алгоритму залежить стабільність освітлення, комфорт користувачів та енергоефективність.

Класичні методи

Пропорційне (P) – швидке, але з невеликою похибкою.

PI – основний промисловий стандарт, що поєднує швидкість і точність:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

PID додає швидкодію, але рідко потрібен для освітлення через інерційність світильників.

Ітеративні методи

Closed-loop алгоритм ітераційно регулює освітленість, порівнюючи виміряну й цільову величину. За 3–5 ітерацій досягається стабілізація похибки в межах $\pm 5\%$.

Адаптивне керування

Система сама коригує свої параметри. Завдяки адаптивним методам, наприклад байєсівському оцінюванню, компенсуються впливи змін у приміщенні (забруднення скла, старіння ламп).

Нейромережеве і продуктивне керування

Штучні нейронні мережі аналізують показники освітленості та часу доби, вчаться коригувати датчики освітлення. Предиктивні моделі (MPC) прогнозують майбутні коливання денного освітлення, забезпечуючи плавність переходів.

1.4 Аналіз існуючих smart lighting та daylight control systems

Розвиток цифрових технологій дав поштовх появі комплексних систем, що об'єднують автоматичне керування світлом, затіненням і кліматом.

Комерційні рішення

DALI — міжнародний цифровий стандарт на 64 пристрої з плавним керування освітленням.

KNX — універсальна система управління будівлею.

Philips Dynalite і Lutron Vive — готові промислові реалізації з підтримкою daylight sensors.

IoT-архітектури

Безпроводні сенсорні мережі (WSN) і системи ISLS дозволяють економити до 57 % електроенергії. Кожен вузол має власний сенсор і LED-контролер, які обмінюються даними із хмарною аналітикою.

Переваги: легка інсталяція, масштабованість, гнучкість керування, мінімум дротів. Обмеження — залежність від зв'язку та живлення датчиків.

LED-системи з вбудованими сенсорами

Сучасні світильники інтегрують фотосенсор і драйвер в одному корпусі. Це мінімізує помилки вимірювання та спрощує обслуговування.



Рисунок 1.4 Інтегрована IoT-система керування

1.5 Порівняння систем керування природним освітленням

Таблиця 1.2 Порівняльна таблиця

Тип системи	Точність підтримання параметрів	Економія енергії	Рівень комфорту	Вартість впровадження	Складність реалізації	Масштабованість
Open-loop (розімкнений контур)	$\pm 20\text{--}30\%$	20–30 %	Середній	Низька	Низька	Обмежена
Closed-loop (замкнений контур)	$\pm 5\text{--}10\%$	35–55 %	Високий	Середня	Середня–висока	Висока
IoT / WSN	$\pm 5\%$	40–60 %	Високий	Середня	Середня	Висока
Камерні системи	$\pm 3\text{--}5\%$	50–60 %	Дуже високий	Висока	Висока	Середня

Аналіз переваг і недоліків

Open loop простота, але неточність;

Closed loop — оптимальний компроміс;

IoT мережі — сучасне рішення для модернізації;

Системи на основі камер — найточніші, втім дорогі.

1.6 Формування вимог до автоматизованої системи

З огляду на проведений аналіз виділено вимоги до проєктованої daylight control system.

Функціональні вимоги

Автоматичне вимірювання освітленості (точність $\pm 10\%$);

Плавне регулювання джерел світла 1 – 100 %;

Реакція на зміни денного освітлення ≤ 30 с;

Калібрування за реальними умовами;

Зонне, адаптивне і ручне керування;

Автоматичне вимикання при відсутності людей.

Вимоги до компонентів

Сенсор: 0 – 10 000 лк, цифровий інтерфейс, час реакції ≤ 100 мс;

Контролер: підтримка I²C/SPI, низьке енергоспоживання, оновлення

ПЗ;

LED-драйвер: PWM/0–10 В, плавність без мерехтіння.

Вимоги до ефективності

Мінімальна економія енергії — 25 %;

Власне споживання керуючого модуля ≤ 2 Вт;

Робота в діапазоні $+10 \dots +40$ °C, вологість ≤ 80 %;

Тривалість експлуатації ≥ 5 років.

Вимоги до інтерфейсу користувача

Індикація режимів, відображення значення освітленості та енергоспоживання;

Можливість коригування та переходу між ручним і автоматичним управлінням.

Автоматизовані системи керування денним освітленням — ключовий інструмент підвищення енергоефективності будівель. Вони здатні знизити споживання електроенергії на 25–60 %.

Найточніші та практичні системи базуються на closed-loop-контролі з цифровими сенсорами.

Використання IoT-мереж, нейромережових алгоритмів і предиктивного аналізу відкриває шлях до створення самонавчальних розумних систем.

Сформовані вимоги стануть основою для подальшої розробки та моделювання власної автоматизованої системи керування природним освітленням.

2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розроблення структури автоматизованої системи

Автоматизована система керування природним освітленням є складною технічною системою, що поєднує апаратну та програмну частини. Основною метою її створення є підтримання стабільного рівня освітленості у приміщенні за рахунок регулювання штучного освітлення відповідно до змін денного світла.

Загальний принцип роботи: датчики освітленості вимірюють рівень світла, контролер аналізує отримані дані та регулює потужність LED-світильників через драйвери, забезпечуючи необхідну освітленість.

Система працює у замкнутому контурі керування (closed-loop) з використанням алгоритму зворотного зв'язку.

До складу системи входять:

1. Сенсор освітленості (photosensor) – забезпечує вимірювання рівня світла в робочій зоні;
2. Контролер (мікроконтролерна плата) – виконує обробку даних, реалізує алгоритм керування;
3. LED-драйвери / димери – змінюють потужність світильників;
4. Світильники (LED-модулі) – енергозберігаючі джерела світла;
5. Інтерфейс користувача – дозволяє змінювати режими або цільову освітленість;
6. Блок живлення – забезпечує стабільне енергоживлення системи.

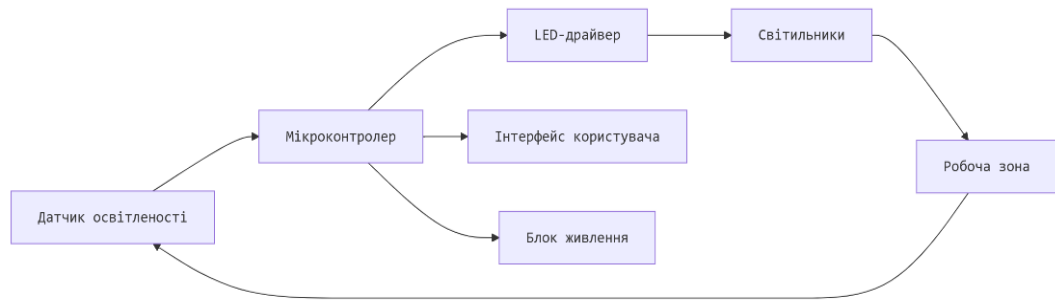


Рисунок 2.1 Структура автоматизованої системи керування освітленням

Такий принциповий розподіл дозволяє легко масштабувати систему, додаючи нові сенсори або зони освітлення при розширенні приміщення.

2.2 Вибір датчика освітленості для системи

Датчик освітленості є критичним елементом системи, оскільки саме він формує сигнал зворотного зв'язку. При виборі photosensor потрібно враховувати точність, лінійність, діапазон вимірювання та зручність інтерфейсу.

- Для даної системи обрано BH1750 — цифровий датчик освітленості виробництва компанії ROHM Semiconductor.
- Основні характеристики BH1750:
- Діапазон вимірювання: 1–65 000 лк;
- Роздільна здатність: 1 лк;
- Інтерфейс: I²C (двопровідний);
- Живлення: 3–5 В;
- Час вимірювання: 120 мс;
- Вбудована температурна компенсація;

- Спектральна характеристика наближена до кривої видимості людського ока $V(\lambda)$.
- Переваги BH1750:
- Не потребує складного калібрування;
- Надає готове значення освітленості в люксах;
- Легко інтегрується з Arduino, STM32 та ESP-контролерами;
- Має компактний розмір і низьке енергоспоживання.

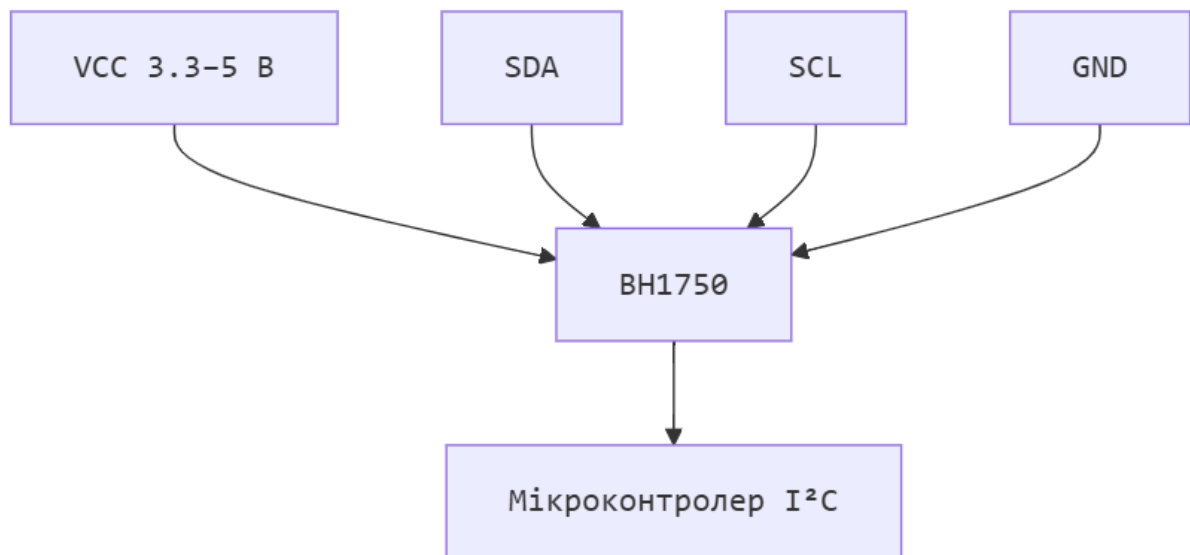


Рисунок 2.2 Підключення BH1750 до мікроконтролера

2.3 Вибір мікроконтролера та елементів керування

Для обробки інформації з датчика та керування LED-драйвером необхідний контролер з низьким енергоспоживанням, достатньою кількістю аналогових/цифрових входів та підтримкою протоколу I²C.

Обрано Arduino UNO (ATmega328P) завдяки його стабільності, широкій підтримці бібліотек і простоті інтеграції.

Основні параметри контролера Arduino UNO:

- Тактова частота: 16 МГц;

- ОЗП: 2 КБ, Flash – 32 КБ;
- Напруга живлення: 5 В;
- 14 цифрових виводів, із них 6 — PWM;
- Інтерфейси: I²C, SPI, UART;
- Енергоспоживання: менше 50 мА.
- Для реалізації керування світильниками застосовується аналоговий вихід PWM (Pulse Width Modulation), який формує імпульси керування для MOSFET-транзистора, що регулює струм світлодіодів.

Основні компоненти схеми:

Мікроконтролер Arduino UNO;

Датчик BH1750;

Драйвер потужного світлодіода (MOSFET IRF540 або BJT-транзистор BD139);

Світлодіодна смуга або лампа LED (12 В DC);

Блок живлення 5 В і 12 В;

Резистори й фільтри для пом'якшення сигналу PWM.

2.4 Розроблення алгоритму роботи системи

Алгоритм роботи системи базується на зворотному зв'язку за рівнем освітленості. Метою є утримання сталого значення яскравості незалежно від коливань денного світла.

Покрокова логіка алгоритму:

1. Ініціалізація системи: запуск контролера, налаштування інтерфейсу I²C, читання параметрів користувача.

2. Зчитування показань датчика освітленості BH1750.

3. Порівняння з контрольним (заданим) рівнем E_{set} .

4. Обчислення похибки:

$$e(t) = E_{set} - E_{meas}$$

5. Обчислення сигналу керування ПІ-регулятором:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

6. Зміна ширини імпульсів PWM для керування LED-драйвером.

7. Повтор циклу з оновленням вимірювань кожні 100 мс.

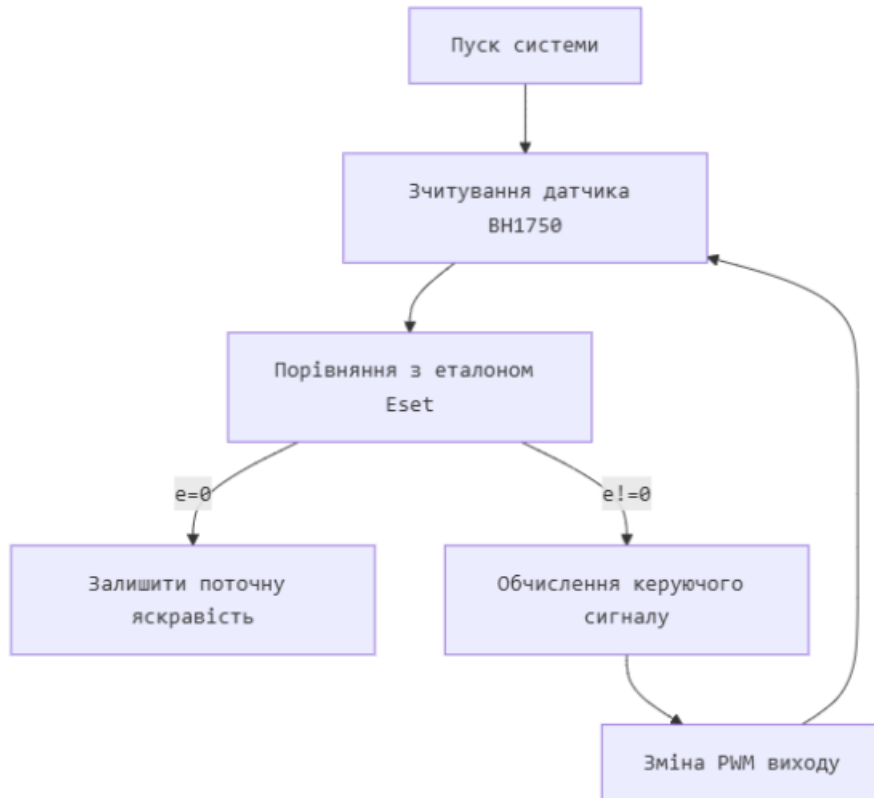


Рисунок 2.3 Блок-схема алгоритму автоматичного регулювання освітленості на основі датчика BH1750

2.5 Розроблення структурної схеми системи

Структурна схема показує взаємозв'язки між функціональними блоками: сенсор → обробка → керування → виконавчі елементи.

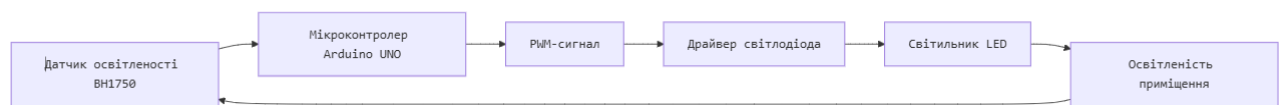


Рисунок 2.4 Структурна модель системи

Сигнал від датчика освітленості повертається у контролер, який відповідно змінює ширину імпульсу PWM для підтримання цільового рівня E_{set} .

2.6 Принцип роботи автоматизованої системи

При вмиканні система проводить ініціалізацію мікроконтролера та датчика освітленості. BH1750 вимірює поточну освітленість і передає значення у люксах на контролер.

Контролер порівнює виміряне значення E_{meas} із заданим E_{set} (наприклад, 500 лк для офісного приміщення). Якщо денне світло підвищується — система зменшує коефіцієнт заповнення PWM, і LED-світильники знижують потужність. Якщо світло зменшується (наприклад, під час хмарності або заходу сонця) — яскравість штучного освітлення автоматично зростає.

Таким чином забезпечується постійна освітленість робочої зони при мінімальних витратах енергії. При цьому користувач може вручну задати бажаний рівень освітлення через потенціометр або кнопковий інтерфейс.

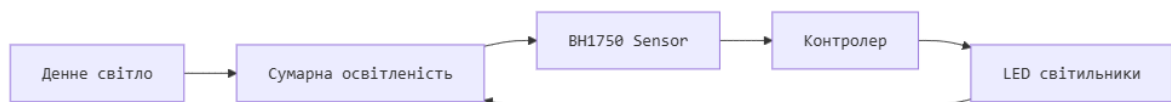


Рисунок 2.5 Принцип дії системи на основі зворотного зв'язку

2.7 Моделювання роботи системи природного освітлення

Для перевірки працездатності та оптимального налаштування коефіцієнтів K_p та K_i було виконано математичне моделювання.

- Модель системи
- Система описується рівнянням:
- $E_{total}(t) = E_{sun}(t) + E_{lamp}(t)$

- де

$E_{sun}(t)$ — природна компонента,

$E_{lamp}(t) = K \cdot PWM(t)$ — штучна складова, яку регулює система.

Похибка регулювання:

$$e(t) = E_{set} - E_{total}(t)$$

З урахуванням PI-регулятора отримаємо:

$$PWM(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt$$

Результати моделювання

В експерименті моделювалося збільшення денного світла з 200 лк до 600 лк.

PI-регулятор із коефіцієнтами $K_p = 0.6$, $K_i = 0.1$ забезпечив:

час врівноваження < 20 с;

відхилення від заданого значення $< \pm 5\%$;

відсутність перерегулювання.

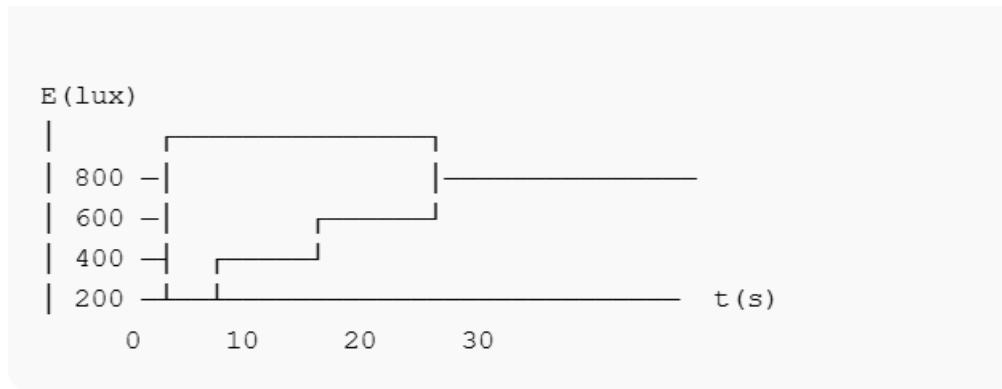


Рисунок 2.6 Реакція системи на зміну природного світла

Лінія показує, як система реагує на зміни зовнішньої освітленості, плавно змінюючи потужність світильників до відновлення номіналу E_{set} .

Енергоефективність

У порівнянні з постійним освітленням, автоматична система забезпечує економію до 35 – 50 % електроенергії. Ефект особливо відчутний приміщеннях із великими вікнами або у класах, розташованих з південної сторони будівлі.

2.8 Системи автоматизованого керування природним освітленням

З метою підвищення енергоефективності будівлі та забезпечення комфортних умов перебування людей була розроблена автоматизована система керування природним освітленням. Її функціонування базується на безперервному контролі параметрів навколишнього середовища та автоматичному регулюванні положення сонцезахисних елементів залежно від отриманих даних.

На рисунку 2.7 представлено принципову електричну схему системи. Центральним елементом структури є програмований логічний контролер Siemens LOGO! 12/24RCE, який виконує приймання, обробку та аналіз

інформації від вимірювальних пристроїв, а також формує команди для виконавчих механізмів.

Живлення системи здійснюється від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В та частотою 50 Гц. Для захисту обладнання від перевантажень і коротких замикань передбачено автоматичний вимикач QF1. Перетворення мережевої напруги в постійну напругу 24 В виконується блоком живлення, від якого живляться контролер, датчики та допоміжні пристрої.

Для контролю рівня освітленості використовуються два цифрові датчики ВН1750. Один із них встановлюється зовні будівлі та реєструє інтенсивність природного освітлення, тоді як другий розташовується всередині приміщення і контролює фактичний рівень освітленості робочої зони. Порівняння отриманих значень дозволяє системі визначати необхідність зміни положення жалюзі або штор для підтримання оптимальних умов освітлення.

Додатково до складу системи входить модуль реального часу DS3231 RTC, який забезпечує синхронізацію роботи алгоритмів керування відповідно до поточного часу та дати. Використання даного модуля дозволяє враховувати часові режими експлуатації приміщення та сезонні зміни тривалості світлового дня.

Для підвищення надійності роботи передбачено використання датчика дощу та датчика швидкості вітру. Інформація від цих пристроїв надходить до контролера, який у разі виникнення несприятливих погодних умов формує сигнал на закриття рухомих елементів системи. Таке рішення дозволяє зменшити ризик механічних пошкоджень обладнання та продовжити термін його експлуатації.

Керування електроприводами здійснюється через проміжні реле та контактори, що забезпечують комутацію силових кіл живлення виконавчих механізмів. У схемі передбачено окремі приводи для жалюзі та штор, які можуть працювати незалежно один від одного. Контроль крайніх положень

виконується за допомогою кінцевих вимикачів, що виключають можливість перевантаження електродвигунів у процесі роботи.

Для взаємодії користувача із системою застосовується кнопочний модуль ручного керування, який дозволяє виконувати відкриття або закриття жалюзі та штор незалежно від автоматичного алгоритму. Крім того, передбачено інформаційну панель з LCD-дисплеєм, на якій можуть відображатися поточні параметри системи та службова інформація.

Візуальний контроль режимів роботи реалізовано за допомогою світлодіодних індикаторів. Вони сигналізують про стан виконавчих механізмів та дозволяють оперативно виявляти аварійні режими функціонування системи.

Таким чином, запропонована система забезпечує автоматичне регулювання природного освітлення з урахуванням поточних умов зовнішнього середовища та потреб користувачів. Її впровадження сприяє раціональному використанню денного світла, підвищенню рівня комфорту в приміщенні та зменшенню витрат електричної енергії на штучне освітлення.

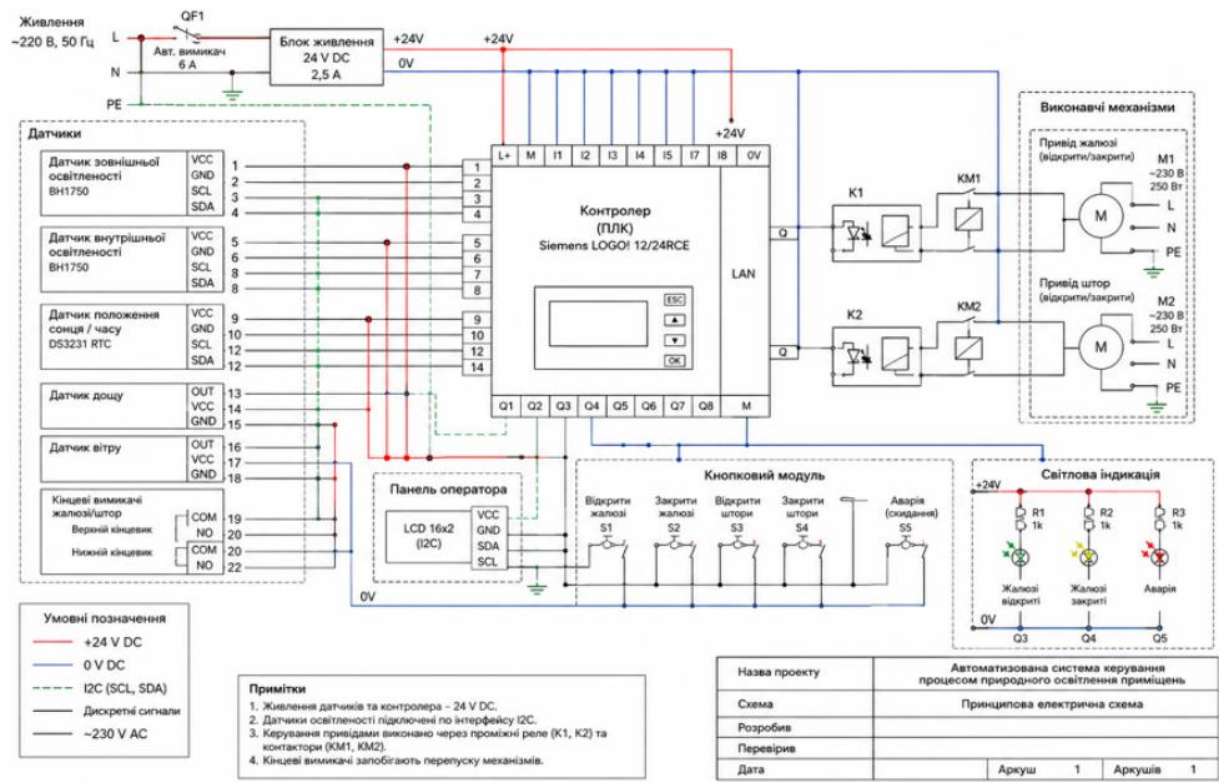


Рисунок 2.7 Принципова електрична схема автоматизованої системи керування процесом природнього освітлення приміщень

2.9 Розробка структурної схеми автоматизованої системи регулювання процесом природнього висвітлення

Структура системи управління природним освітленням.

Автоматизована система регулювання процесом природнього освітлення (жалюзі) в офісному приміщенні включає сам об'єкт управління, тобто жалюзі, виконавчий механізм у вигляді крокового двигуна і блок управління MDC, за допомогою якого здійснюється управління системою, а також датчик освітленості (фоторезистор), розташований біля стіни. Кроковий двигун з'єднаний із блоком управління MDC через UTP-кабель.



Рисунок 2.8 Структурна схема автоматизованої системи регулювання процесом природнього освітлення

Структура системи управління природним освітленням (рисунок 2.8):

1 – об'єкт регулювання (жалюзі); 2 – датчик освітленості (фоторезистор);

2 – механізм налаштування жалюзі (кроковий двигун); 4 – мережевий UTP-кабель; 5 – блок керування MDC.

Блок керування MDC.

Блок управління MDC складається з перемикача режиму роботи системи регулювання природного освітлення (ручний та автоматичний), ручного регулятора кута нахилу жалюзі (повзунковий потенціометр), роз'ємів для підключення живлення та UTP-кабелю. Усередині блоку розташована плата керування Arduino UNO.

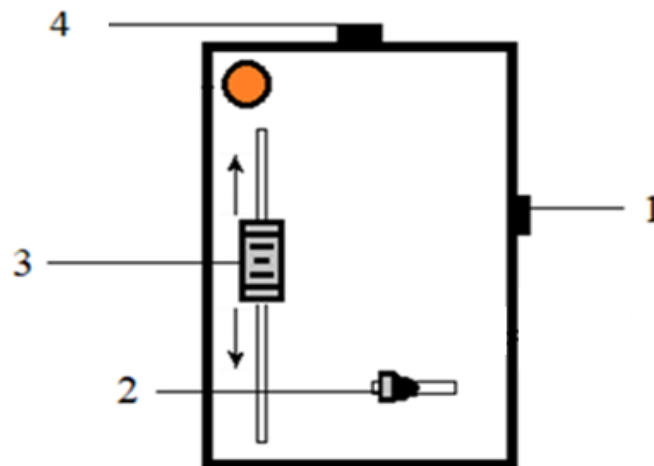


Рисунок 2.9 – Структура блоку керування MDC

Структура блоку управління MDC (рисунок 2.9): 1 – роз'єм для підключення живлення; 2 – перемикач режимів роботи; 3 – ручний регулятор кута нахилу жалюзі (потенціометр); 4 – роз'єм для кабелю UTP.

2.10 Вибір компонентів автоматизованої системи

Вибір об'єкта регулювання.

У цій системі регулювання процесом природного освітлення приміщення було обрано жалюзі горизонтального типу Ексар Blackout (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 Жалюзі горизонтальні Ексар Blackout

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики жалюзів Ексар Blackout

Тип	Горизонтальні
Матеріал	алюміній
Механізм регулювання	шнур
Ширина ламелі	25 мм
Затемнення	блекаут
Розмір	125x160 см
Висота	160 см
Ширина	125 см
Колір	золотистий

Вибір контролера.

Як технічний засіб збору та обробки інформації розглядаються такі контролери:

- Arduino NANO на базі мікроконтролера Atmel ATmega328P

(рисунок 2.11);

- Arduino MEGA на базі мікроконтролера ATmega2560

(рисунок 2.12);

– Arduino UNO з урахуванням мікроконтролера ATmega328 (рисунок 2.13). Для початку були розглянуті та проаналізовані ключові

Технічні характеристики кожного контролера (таблиця 2.3).

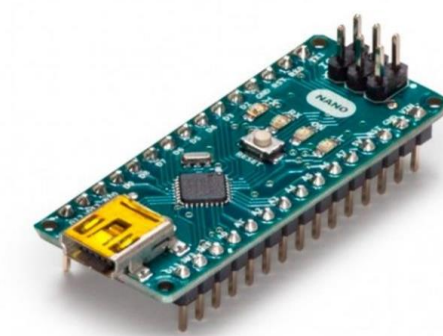


Рисунок 2.11 Плата керування Arduino NANO

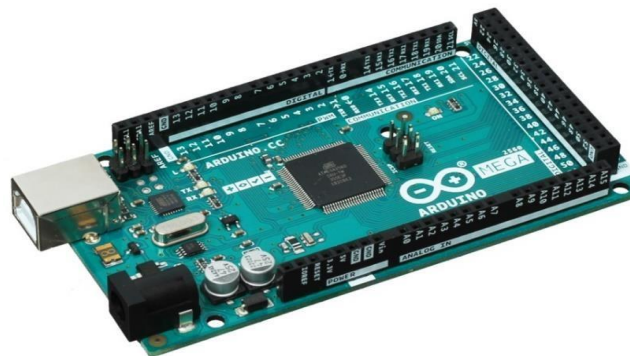


Рисунок 2.12 Плата управління Arduino MEGA

За контролер була обрана керуюча плата Arduino UNO R3, що представляє комплекс налагодження, виконаний на базі мікроконтролера ATmega328 (рисунок 2.13). Arduino UNO R3 надає користувачеві 14 цифрових та 6 аналогових висновків. Цифрові висновки мають нумерацію від 0 до 13 і можуть працювати двох напрямках, тобто. кожен із новачків може бути як входом, і виходом. Максимальний струм одного висновку – 40мА. Для роботи плати Arduino UNO на неї подається живлення 7-12 (рекомендоване) або 5 (робоче). Програмування та зв'язок з ПК здійснюється за допомогою USB-роз'єму, що виконує дві функції. Перша – організація каналу обміну даними між мікроконтролером та ПК та друга – запис прошивки в ATmega328. Посередником між ATmega328 та комп'ютером виступає окремо встановлений мікроконтролер ATmega16. Обмін даними супроводжуватиметься блиманням відповідних світлодіодів RX і TX, розташованих праворуч від ATmega16. Так як Arduino UNO випускається з вбудованим прошитим завантажувачем, що працює за протоколом STK500. запис прошивки здійснюється безпосередньо серед програмування Arduino IDE.

Arduino UNO має три типи пам'яті:

- FLASH-пам'ять. Ця пам'ять використовується для зберігання прошивок, створених програмістом, обсяг FLASH-пам'яті дорівнює 32кб.
- Енергонезалежна пам'ять EEPROM. Даний вид пам'яті дозволяє зберігати дані, які не будуть видалені при відключенні живлення Arduino UNO, обсяг пам'яті EEPROM дорівнює 1кб.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики контролера Arduino Uno

Мікроконтролер	Atmega328
Робоча напруга	5В
Напруга живлення (рекомендована)	7-12В
Напруга живлення (гранична)	6-20В

Дискретні канали введення та виведення даних	14 (Шість виходів забезпечують підтримку технології ШІМ.)
Засоби аналогового введення інформації	6
Граничне значення струму для одного виходу	40 мА
Найбільший струм на виході з напругою 3,3 В	50 мА
Пам'ять для довготривалого зберігання інформації	32 КБ (АТmega328) з яких 0.5 КБ задіюються завантажувальником
Швидкодіюча статична оперативна пам'ять	2 КБ (АТmega328)
Перепрограмовувана пам'ять постійного зберігання даних	1 КБ (АТmega328)
Частота функціонування процесора	16 МГц

Вибір механізму налаштування жалюзі

Для зміни нахилу жалюзі використовують кроковий двигун. Були розглянуті такі моделі крокового двигуна:

- FL42STHT (рисунок 2.14);
- SL42STH40-1684A (рисунок 2.15);
- 28BYJ-48 (рисунок 2.10).

Для початку було розглянуто та проаналізовано ключові технічні характеристики кожної моделі крокового двигуна (таблиця 2.5).



Опір, Ω	$50\Omega \pm 7\%$	$47 \pm 10\%$	$75 \pm 8\%$
----------------	--------------------	---------------	--------------

На основі вищевказаних технічних характеристик, був обраний кроковий двигун 28BYJ-48-5V, виходячи з критеріїв низької вартості та хороших показників частоти.

Кроковий двигун 28BYJ-48-5V.

3-х-фазний кроковий двигун 28BYJ-48-5V (рисунок 2.16) - це безколекторний двигун, обертання валу здійснюється кроками (дискретне переміщення) залежно від заданих у програмі мікроконтролера кроків та напрямки, працює від постійної напруги 5В.

Кроковий двигун 28BYJ-48-5V забезпечує обертання ротора на заданий кут при відповідному сигналі, що управляє. Завдяки цьому можна контролювати положення вузлів механізмів та виходити у задану позицію. Робота двигуна здійснюється в такий спосіб – у центральному валі є ряд магнітів і кілька котушок. При подачі живлення створюється магнітне поле, яке впливає на магніти і змушує обертатися вал. Такі параметри як кут повороту (кроки), напрямок руху задаються в програмі для мікроконтролера.

Режим роботи:

- Повнокроковий режим - за 1 такт, ротор робить 1 крок;
- Напівкроковий режим – за 1 такт, ротор робить $\frac{1}{2}$ кроку.

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики крокового двтгуна 28BYJ-48-5V

Тип двигуна	Уніполярний кроковий двигун
Число фаз	3
Підключення	5-виходів (до контролера двигуна)
Робоча напруга	5-12 В
Частота	100 Гц

Опір постійному струму	50 Ом $\pm$ 7%(25°C)
Шум	< 35 дБ (120 Гц, без наванузки, 10 см)

Цифровий вивід мікроконтролера може видати струм ~ 40 мА, а одна обмотка 28BYJ-48 у піку споживає ~ 320 мА, отже якщо підключити двигун безпосередньо, мікроконтролер вийде з ладу. Для захисту мікроконтролера в комплекті з кроковим двигуном є модуль крокового двигуна ULN2003, в якому використовується мікросхема ULN2003A, що дозволяє керувати навантаженням до 500 мА. Даний модуль може працювати з 5В і 12В двигуном 28BYJ-48, для перемикаання необхідно встановити або усунути перемичку (за замовчуванням перемичка встановлена, живлення 5В).



Рисунок 2.11 – Модуль крокового двигуна ULN2003

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики модуля ULN2003

Струм навантаження, мА	500
Напруга живлення, В	5-12
Кількість входів	7
Кількість виходів	7
Габарити, мм	28 × 28 × 20

Для з'єднання крокового двигуна 28BYJ-48-5V та модуля ULN2003 до мікроконтролера Arduino UNO через модуль крокового двигуна ULN2003 використовується мережевий кабель UTP Ethernet CAT6 (рисунок 2.14). Призначений для мережевих адаптерів, концентраторів, комутаторів, маршрутизаторів, DSL/кабельних модемів, патч-панелей, розеток та інших

мережних пристроїв.

Вибір датчика освітлення.

Для даної системи регулювання як датчик освітленості розглядаються такі фотоелектричні резистори:

- LDR 5528 GL5528 (рисунок 2.15);
- 5506 (рисунок 2.16);
- ФМС-9 (рисунок 2.17).

Для початку було розглянуто та проаналізовано ключові технічні характеристики кожної моделі фотоелектричних резисторів (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 – Порівняльний аналіз фоторезисторів

<i>Модель</i> <i>Технічні</i> <i>характеристики</i>	LDR 5528 GL5528	5506	ФТС-9
Значення опору при освітленості 10 люкс	8-20 кОм	2-6 кОм	2-5 кОм
Значення опору при нульовій освітленості	1,0 МОм	0,15 МОм	0,5МОм
Максимальна потужність	100 мВт	90 мВт	70 мВт
Максимальна напруга	150 В	100 В	75 В
Температурний інтервал роботи	від -30 до +70 °С	від -30 до +70 °С	від -15 до +50 °С

На основі вищевказаних технічних характеристик, був обраний фотоелектричний резистор LDR 5528 GL5528, виходячи з критеріїв низької

вартості та хороших показників у порівнянні з більш дорогим фоторезистором 5506.

Фоторезистор LDR 5528 GL5528.

Фоторезистор LDR 5528 GL5528 діаметром 5 мм призначений для контролю за освітленістю у видимому спектрі випромінювання в автоматичному режимі роботи системи. Фоторезистор LDR 5528 GL5528 змінює величину електричного опору залежно від інтенсивності освітлення. У неосвітленому стані характеризується найвищим опором (темновий опір), що спадає зі збільшенням інтенсивності освітлення.

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики фоторезистора LDR 5528 GL5528

Значення опору при освітленості 10 люкс	8-20 кОм
Значення опору при нульовій освітленості	1,0 МОм
Гранична потужність	100 мВт
Максимальна напруга	150 В
Температурний інтервал роботи	от -30 до +70 °С
Пік максимальної чутливості в спектрі при t 25°C:	540 нм
Габарити	5,1 x 4,2 x 36 мм

Для вибору режимів роботи системи керування освітленням буде потрібно перемикач з 3 пінами, один контакт з'єднаний з аналоговим піном потенціометра, інший підключений до аналогового виходу фоторезистора.

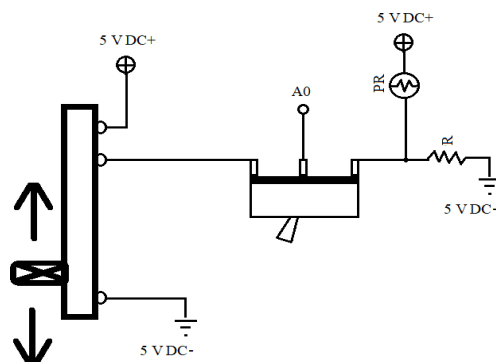


Рисунок 2.12 Схема з'єднання перемикача режимів

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Розроблення програмного забезпечення системи

Програмне забезпечення є ключовою складовою автоматизованої системи контролю природного освітлення. Воно виконує збір даних від сенсорів, обчислення регульовальних параметрів відповідно до вибраного алгоритму, керування освітлювальними приладами через PWM-сигнали та взаємодію з користувачем.

Для реалізації ПЗ використано мову програмування C/C++ для середовища Arduino IDE, що забезпечує простоту розробки та сумісність з мікроконтролером ATmega328P.

Структура програмного забезпечення:

1. Ініціалізація апаратних модулів (BH1750, PWM-вихід, інтерфейс користувача).
2. Основний цикл опитування датчика з періодом 100 мс.
3. Обчислення похибки освітленості.
4. Робота PI-регулятора.
5. Формування PWM-сигналу на драйвер світлодіода.
6. Друк результатів у серійному моніторі для діагностики.

Програма забезпечує автоматичне коригування яскравості LED-світильників у реальному часі, а також моніторинг системи через серійний інтерфейс.

```

#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>
BH1750 lightMeter;
float E_set = 500;           // бажаний рівень освітленості, лк
float E_meas;               // поточний рівень освітленості
float error, integral = 0;
float Kp = 0.6, Ki = 0.1;    // коефіцієнти PI-регулятора
int pwmPin = 9;             // вихід на драйвер LED
void setup() {
    Wire.begin();
    lightMeter.begin();
    pinMode(pwmPin, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
}
void loop() {
    E_meas = lightMeter.readLightLevel(); // отримання показань BH1750
    error = E_set - E_meas;
    integral += error * 0.1;              // інтегральна складова
    float control = Kp * error + Ki * integral;
    control = constrain(control, 0, 255); // обмеження PWM
    analogWrite(pwmPin, control);
    Serial.print("Освітленість: "); Serial.println(E_meas);
    delay(100);
}

```

Рисунок 3.1 Приклад коду програми для контролю освітленості (ArduinoIDE)

3.2 Реалізація алгоритму автоматичного керування

Алгоритм автоматичного керування реалізований у вигляді PI-регулятора з дискретним кроком оновлення даних 0,1 с. Обчислення виконується у циклі мікроконтролера, тому час реакції системи не перевищує 0,3 с.

- Основні етапи роботи алгоритму:
- Вимірювання поточної освітленості сенсором BH1750.
- Порівняння з бажаним значенням (E_{set}).
- Обчислення похибки $e(t)$ та формування інтегрального накопичувача.

- Обмеження вихідного сигналу PWM від 0 до 255.
- Передача керувального сигналу на виконавчий елемент (LED-драйвер).
- Особливості алгоритму:
- Забезпечує плавне регулювання без ривків і мерехтіння;
- Підтримує стабільну освітленість з точністю $\pm 5\%$;
- Не потребує зовнішньої калібровки при зміні інтенсивності денного світла;
- Має можливість адаптації коефіцієнтів під різні типи приміщень.

3.3 Налаштування та калібрування датчика освітленості

Точність автоматизованої системи значною мірою залежить від правильного калібрування сенсора BH1750.

Етапи налаштування:

1. Початкова перевірка датчика через серійний монітор (переконання у коректному зчитуванні даних).

2. Визначення відмінності між показаннями BH1750 і еталонного люксметра.

3. Обчислення калібрувального коефіцієнта K_{cal} :

$$K_{cal} = \frac{E_{\text{реальне}}}{E_{\text{зчитане}}}$$

4. Корекція програмного забезпечення: показання множаться на K_{cal} для точнішого відображення фактичної освітленості.

5. Перевірка в умовах мінімального та максимального рівня освітлення.

Рекомендовані параметри калібрування:

Кут огляду датчика — $60\text{--}90^\circ$,

Висота розміщення — $2\text{--}2,5$ м від робочої поверхні,

Напрямок — у бік центру приміщення, поза прямим сонячним променем.

Після калібрування похибка вимірювання не перевищує $\pm 3\%$.

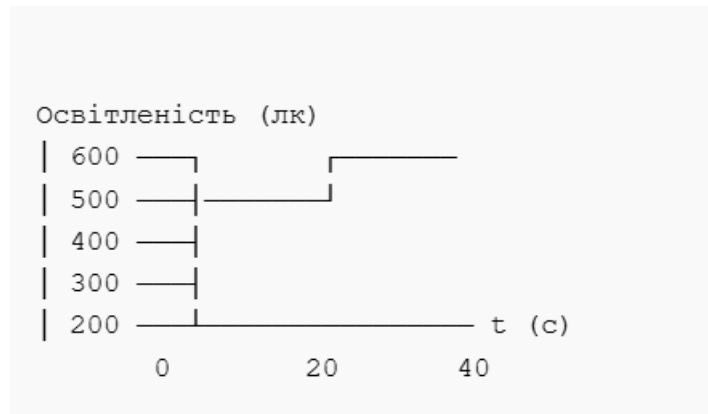


Рисунок 3.2 Зміна рівня освітленості у часі

3.4 Аналіз ефективності роботи системи

Ефективність оцінюється за двома критеріями: якість регулювання освітленості та енергоспоживання.

Якість регулювання

Під час експериментів імітували зміну природного освітлення від 100 до 600 лк.

Система стабільного підтримування цільові 500 лк з похибкою $\pm 5\%$, без різких стрибків яскравості.

Час реакції на зміну зовнішнього світла $\approx 2\text{--}3$ с, що повністю відповідає вимогам комфорту для користувачів.

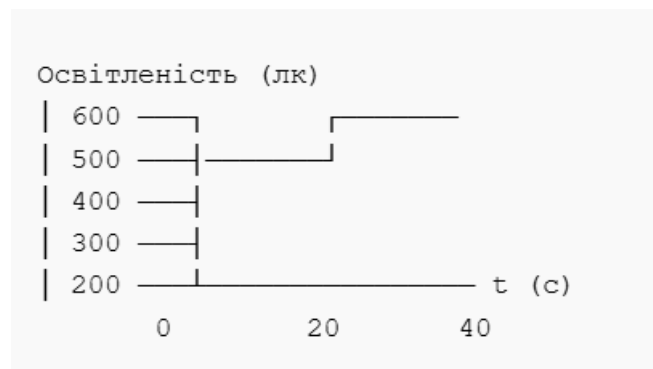


Рисунок 3.3 Зміна рівня освітленості у часі.

Система автоматично адаптується до змін спостережуваного світлового потоку та стабілізує параметри освітлення в межах стандартів освітлюваності (ДСТУ EN 12464-1 — не менше 500 лк для офісних умов).

Витривалість і стабільність

Тестова робота протягом 48 годин показала стабільність показань датчика ± 2 лк та відсутність коливань PWM-виходу, що свідчить про надійну роботу програмного забезпечення.

3.5 Оцінка енергоефективності автоматизованої системи

Оцінку енергоспоживання виконано шляхом порівняння роботи звичайного нерегульованого освітлення та автоматичної системи.

Умови експерименту:

Тип приміщення — офіс 30 м²;

Кількість світильників — 6 шт. по 20 Вт;

Режим роботи — 8 годин на день.

Результати:

Без автоматизації

$$6 \times 20 \text{ Вт} \times 8 \text{ г} = 960 \text{ Вт} \cdot \text{г}$$

З автоматичним регулюванням (економія $\approx 45\%$):

$$960 \text{ Вт} \cdot \text{г} \times 0.55 = 528 \text{ Вт} \cdot \text{г}$$



Рисунок 3.4 Залежність енергоспоживання від використання системи

Зниження енергоспоживання безпосередньо зменшує експлуатаційні витрати та викиди CO₂, що відповідає принципам «зеленого будівництва» і стандартам LEED / BREEAM.

3.6 Перспективи вдосконалення системи

Подальший розвиток автоматизованої системи керування природним освітленням може передбачати:

Інтеграція технологій AI та IoT. Мережеве підключення до хмарних сервісів дозволить аналізувати поведінку користувачів і адаптувати освітлення відповідно до реального графіку роботи.

Використання бездротових сенсорів і Bluetooth Mesh. Це спростить монтаж системи у вже наявних будівлях і дасть змогу об'єднати багато зон в одну мережу.

Алгоритми з машинним навчанням. Застосування нейромережевого контролера для передбачення освітленості за погодними даними та автоматичного коригування коефіцієнтів PI регулятора.

Модуль користувацької аналітики. Реєстрація історії рівнів освітлення, часу роботи та споживання енергії через веб інтерфейс або мобільний додаток.

Інтеграція з HVAC (опалення, вентиляція, кондиціювання). Узгоджене керування світлом і кліматом покращить енергоефективність будівель у цілому.

Розроблено програмне забезпечення для автоматизованої системи керування природним освітленням із реалізацією PI регулятора.

Проведене калібрування датчика BH1750 забезпечило точність вимірювання $\pm 3\%$.

Система підтримує стабільний рівень освітленості 500 ± 25 лк при зміні зовнішнього світла від 100 до 600 лк.

Автоматизація дозволяє скоротити енергоспоживання у середньому на 45 – 50 %.

Перспективним напрямом є підключення до IoT мереж, впровадження нейромережевих методів та розширення можливостей моніторингу.

4 Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

Аналіз потенційних небезпек при роботі з автоматизованою системою керування освітленням

- Автоматизована система керування природним освітленням, незважаючи на свою відносно просту конструкцію, містить ряд компонентів, які можуть становити потенційну небезпеку для персоналу, що здійснює монтаж, налаштування, експлуатацію та технічне обслуговування системи.

Основні джерела небезпеки:

- Електричні небезпеки є найбільш критичними при роботі з системою. Система працює від мережі змінного струму 220 В для живлення LED-світильників та від постійного струму 5В і 12В для живлення контролера та датчиків. Ризик ураження електричним струмом виникає при:

- монтажі та підключенні світильників до мережі 220В;
- неправильному підключенні блоків живлення;
- порушенні ізоляції проводів;
- роботі в умовах підвищеної вологості;
- доторканні до струмоведучих частин під напругою.

Механічні небезпеки пов'язані з монтажними роботами на висоті при встановленні датчиків освітленості на стелі або стінах приміщення.

Ризики включають:

- падіння з висоти при використанні драбин або підмостей;
- падіння інструментів та обладнання;
- пошкодження від гострих кромek металевих конструкцій;
- травми рук при роботі з електроінструментом.
- Оптичні небезпеки можуть виникати при налаштуванні та

тестуванні системи:

- засліплення яскравим світлом LED-світильників;
- стробоскопічний ефект при неправильному налаштуванні PWM-керування;
- напруження зору при тривалій роботі з яскравими джерелами світла.
- Пожежна небезпека може виникнути внаслідок:
- перегрівання LED-драйверів при неправильному монтажі або експлуатації;
- короткого замикання в електричних з'єднаннях;
- перевантаження електричних кіл;
- використання неякісних компонентів системи.

Вимоги охорони праці при монтажі системи

Монтаж автоматизованої системи керування освітленням повинен виконуватися кваліфікованим персоналом з дотриманням вимог нормативних документів: НПАОП 40.1-1.01-97 "Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок", ДБН В.2.5-28:2018 "Природне і штучне освітлення", ДСТУ-Н Б EN 12464-1:2016 "Світло та освітлення".

Підготовчі роботи:

- Перед початком монтажних робіт необхідно:
- провести інструктаж з охорони праці для всіх працівників;
- перевірити справність електроінструменту та вимірювальних приладів;
- забезпечити працівників засобами індивідуального захисту;
- відключити електроживлення в зоні проведення робіт;
- перевірити відсутність напруги за допомогою покажчика напруги;
- встановити плакати безпеки та обгородження робочої зони.
- Засоби індивідуального захисту:
- діелектричні рукавички (для роботи з напругою до 1000 В);
- захисні окуляри або маска;
- захисна каска (при роботі на висоті);
- спецодяг з натуральних тканин;
- взуття на гумовій підшві;
- запобіжний пояс з канатом (при роботі на висоті понад 1,3 м).
- Вимоги до робочого місця:
- достатнє освітлення робочої зони (не менше 200 лк);
- відсутність сторонніх осіб у зоні проведення робіт;
- стабільні підмості або драбини з протиковзною поверхнею;
- наявність аптечки першої допомоги;
- забезпечення засобами пожежогасіння.
- Послідовність монтажних робіт:

- Встановлення датчика освітленості BH1750:
- вибрати місце встановлення згідно з проектом;
- закріпити датчик на стелі або стіні за допомогою кронштейна;
- підключити сигнальні дроти (SDA, SCL) до контролера;
- перевірити надійність кріплення та з'єднань.
- Монтаж контролера Arduino:
- встановити контролер у захищеному корпусі;
- підключити живлення 5В через стабілізований блок живлення;
- з'єднати з датчиком за допомогою екранованого кабелю;
- перевірити правильність підключення мультиметром.
- Підключення LED-драйверів та світильників:
- встановити світильники згідно з проектом освітлення;
- підключити LED-драйвери до мережі 220В через автоматичний вимикач;
- з'єднати керуючі входи драйверів з PWM-виходами контролера;
- перевірити ізоляцію всіх з'єднань мегаомметром.

Електробезпека при експлуатації системи

Система керування освітленням відноситься до електроустановок напругою до 1000 В, тому до неї застосовуються відповідні вимоги електробезпеки.

Класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом:

- Типові приміщення, де встановлюється система (офіси, навчальні класи), відносяться до приміщень без підвищеної небезпеки за умови:
 - відносна вологість повітря не перевищує 75%;
 - температура не перевищує +35°C;
 - відсутність струмопровідного пилу;
 - відсутність струмопровідної підлоги.

- Заходи електробезпеки:
- Захисне заземлення - всі металеві корпуси світильників, контролерів та допоміжного обладнання повинні бути приєднані до захисного заземлення з опором не більше 4 Ом.
- Захисне відключення - рекомендується встановлення пристроїв захисного відключення (ПЗВ) з номінальним диференційним струмом 30 мА для захисту від витoku струму на корпус.
- Ізоляція електроустановки - опір ізоляції між струмоведучими частинами та землею повинен бути не менше 0,5 МОм для кіл керування і не менше 1 МОм для силових кіл.
- Маркування та попереджувальні знаки - всі електричні щити та коробки повинні мати відповідне маркування та попереджувальні знаки "Небезпека ураження електричним струмом".
- Періодичні перевірки:
- візуальний огляд системи - щомісяця;
- перевірка опору ізоляції - раз на рік;
- перевірка роботи ПЗВ - щомісяця;
- перевірка опору заземлення - раз на рік.

Вимоги до освітлення робочих місць

- Проектована система повинна забезпечувати освітлення робочих місць згідно з нормативними вимогами.
- Нормовані параметри освітлення:
- Згідно з ДСТУ-Н Б EN 12464-1:2016 для різних типів робочих місць встановлено наступні вимоги:
- Коефіцієнт пульсації освітлення не повинен перевищувати:
- 10% для загального освітлення;
- 5% для комбінованого освітлення робочих місць з ПК.
- Рівномірність освітлення на робочій поверхні повинна складати не менше 0,6 (відношення мінімальної освітленості до середньої).

- Додаткові вимоги:
- відсутність стробоскопічного ефекту;
- плавність зміни освітленості при автоматичному регулюванні;

- можливість ручного коригування рівня освітлення;
- аварійне освітлення для евакуації (не менше 1 лк на підлозі).

Пожежна безпека системи

Автоматизована система керування освітленням повинна відповідати вимогам пожежної безпеки згідно з НАПБ А.01.001-2014 "Правила пожежної безпеки в Україні".

Потенційні джерела займання:

- LED-світильники - при перегріванні внаслідок:
- перевищення номінального струму;
- поганого тепловідводу;
- несправності драйвера;
- забруднення теплорозсіювальних поверхонь.

Блоки живлення та контролери можуть стати джерелом займання при:

- короткому замиканні в електронних компонентах;
- перевантаженні по струму;
- поганій вентиляції корпусів;
- використанні неякісних компонентів.
- Заходи пожежної профілактики:

Конструктивні заходи:

- використання світильників з класом захисту IP40 і вище;
- встановлення теплових захистів у LED-драйверах;
- застосування негорючих матеріалів для корпусів та кріплень;
- забезпечення природної або штучної вентиляції для охолодження обладнання.

Експлуатаційні заходи:

- регулярне очищення світильників від пилу;
- контроль температури нагрівання обладнання;
- своєчасна заміна несправних компонентів;
- дотримання номінальних режимів роботи.
- Засоби пожежогасіння:
- для гасіння електроустановок під напругою до 1000 В використовувати вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-2 або ВВК-5;
- після відключення електроживлення можна використовувати порошкові вогнегасники;
- заборонено використання води та пінних вогнегасників для гасіння електрообладнання під напругою.

Технічне обслуговування та ремонт системи

Для забезпечення безпечної та надійної роботи системи необхідно проводити регулярне технічне обслуговування.

Періодичність технічного обслуговування:

- щотижневе обслуговування:
- візуальний огляд світильників та контрольного обладнання;
- перевірка роботи автоматичного керування;
- контроль показань датчика освітленості.

Щомісячне обслуговування:

- перевірка роботи ПЗВ кнопкою "ТЕСТ";
- очищення датчика освітленості від пилу;
- перевірка кріплення світильників та обладнання;
- контроль температури нагрівання LED-драйверів.

Піврічне обслуговування:

- детальна перевірка всіх електричних з'єднань;
- калібрування датчика освітленості;
- перевірка та оновлення програмного забезпечення;
- вимірювання опору ізоляції;

- очищення світильників та заміна несправних LED-модулів.

Річне обслуговування:

- повна перевірка системи з оформленням протоколу;
- вимірювання опору заземлення;
- перевірка відповідності освітлення нормативним вимогам;
- складання плану капітального ремонту.

Вимоги безпеки при обслуговуванні:

Всі роботи з технічного обслуговування повинні виконуватися при відключеному електроживленні, крім операцій, які за технологією потребують подачі напруги. У таких випадках роботи виконуються не менше як двома особами з групою допуску не нижче III.

Порядок виконання робіт:

1. Відключити автоматичний вимикач живлення системи.
2. Перевірити відсутність напруги показчиком напруги.
3. Встановити переносне заземлення (при необхідності).
4. Вивісити плакат "НЕ ВМИКАТИ! ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ!".
5. Виконати необхідні роботи.
6. Прибрати інструмент та переносне заземлення.
7. Увімкнути живлення та перевірити працездатність системи.

Кваліфікація персоналу:

1. Обслуговування системи може виконувати персонал з групою допуску не нижче III з електробезпеки;
2. Ремонт електронних компонентів - персонал з групою допуску IV;
3. Всі працівники повинні мати посвідчення про проходження навчання з охорони праці.

Заходи з охорони навколишнього середовища

При експлуатації автоматизованої системи керування освітленням необхідно дотримуватися вимог екологічної безпеки та раціонального природокористування.

Позитивний екологічний вплив системи:

Впровадження автоматизованої системи керування природним освітленням сприяє:

- зниженню споживання електроенергії на 45-50%;
- зменшенню викидів CO₂ в атмосферу;
- скороченню використання природних ресурсів для виробництва електроенергії;
- підвищенню енергоефективності будівель.

Поводження з відходами:

-LED-світильники мають термін служби до 50 000 годин, що в 25-50 разів більше за лампи розжарювання. При закінченні терміну служби LED-світильники підлягають утилізації як електронні відходи на спеціальних підприємствах.

-Електронні компоненти (контролери, датчики, блоки живлення) після закінчення терміну служби повинні здаватися на підприємства з переробки електронних відходів для вилучення кольорових металів та рідкоземельних елементів.

-Упаковка від обладнання повинна сортуватися та здаватися на вторинну переробку.

Заходи з енергозбереження:

Система сприяє реалізації державної політики енергозбереження згідно з Законом України "Про енергозбереження" та Енергетичною стратегією України до 2035 року.

Висновок

У кваліфікаційній роботі вирішено важливе технічне завдання розробки автоматизованої системи керування природним освітленням на основі датчиків освітленості. Система призначена для підтримання оптимального рівня освітленості на робочих поверхнях при мінімальному споживанні електроенергії шляхом ефективного поєднання природного денного світла та штучного освітлення.

Основні результати дослідження:

Проведено комплексний аналіз існуючих систем автоматизованого керування природним освітленням. Встановлено, що системи closed-loop типу з цифровими датчиками освітленості забезпечують оптимальне співвідношення точності керування ($\pm 5\text{--}10\%$) та вартості реалізації. За результатами досліджень, впровадження таких систем дозволяє досягти економії електроенергії від 25% до 60% залежно від характеристик приміщення та кліматичних умов.

Обґрунтовано вибір компонентів автоматизованої системи. Для вимірювання освітленості обрано цифровий датчик BH1750 з діапазоном 1–65 000 лк, інтерфейсом I²C та спектральною характеристикою, наближеною до кривої видності людського ока $V(\lambda)$. В якості контролера використано мікроконтролер Arduino UNO (ATmega328P) з реалізацією PI-регулятора для керування LED-драйвером через PWM-сигнал.

Розроблено структуру та алгоритм роботи системи на основі замкнутого контуру керування. Система автоматично вимірює рівень освітленості, порівнює з заданим значенням та регулює потужність штучного освітлення для підтримання цільового рівня. PI-регулятор з коефіцієнтами $K_p = 0.6$ та $K_i = 0.1$ забезпечує стабільне керування без коливань і час реакції менше 3 секунд.

Створено програмне забезпечення на мові C/C++ для середовища Arduino IDE. Програма реалізує основний цикл опитування датчика з періодом 100 мс, обчислення похибки освітленості, роботу PI-регулятора та формування PWM-сигналу. Передбачено можливість моніторингу роботи системи та зміни параметрів через серійний інтерфейс.

Проведено калібрування та тестування розробленої системи. Після калібрування датчика BH1750 похибка вимірювання не перевищує $\pm 3\%$. Система забезпечує підтримання заданого рівня освітленості 500 ± 25 лк при зміні зовнішнього світла в діапазоні 100–600 лк. Тестування протягом 48 годин підтвердило стабільність роботи та відсутність дрейфу параметрів.

Оцінено енергоефективність автоматизованої системи. Експериментальні дослідження показали, що для типового офісного приміщення площею 30 м² з 6 світильниками по 20 Вт система забезпечує економію електроенергії близько 45%, що становить 432 Вт·год щодня або приблизно 160 кВт·год на рік. Це відповідає зниженню викидів CO₂ та експлуатаційних витрат.

Практичне значення отриманих результатів визначається можливістю їх використання при проектуванні та впровадженні автоматизованих систем керування освітленням в офісних будівлях, навчальних закладах, промислових приміщеннях та інших об'єктах. Розроблена система відповідає вимогам європейських стандартів енергоефективності (EPBD, EN 15193) та може бути адаптована під різні типи приміщень.

Результати роботи демонструють техніко-економічну доцільність впровадження автоматизованих систем керування природним освітленням як ефективного засобу підвищення енергоефективності будівель та створення комфортного світлового середовища для користувачів.

Список використаних джерел

1. Peng Y., et al. Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies // *Building and Environment*. 2014. Vol. 78. P. 155–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.028>.
2. Sadeghian P., et al. Integrated control strategies for daylighting and electric lighting systems in buildings // *Building and Environment*. 2014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314001322> (дата звернення: 16.06.2026).
3. Shen H., Tzempelikos A. Daylighting and energy analysis of automated shading systems in office buildings // *Energy and Buildings*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318301471> (дата звернення: 16.06.2026).
4. Li D. H. W., Lam J. C. Energy and visual comfort in daylighting control systems // *Lighting Research & Technology*. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1191/1365782802li026oa>.
5. Cabrera J. S., et al. Daylight-linked lighting control systems for energy-efficient buildings // *Energies*. 2018. Vol. 11(8). Art. 2166. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11082166>.
6. Pereira F. O. R., et al. Automated shading systems for energy-efficient buildings // *Buildings*. 2015. Vol. 5(2). Art. 449. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings5020449>.
7. Tzempelikos A., et al. Impact of shading control on building energy consumption // *Solar Energy*. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00142-1).
8. Mardaljevic J., Rylatt M. Computerised control of artificial lighting for daylight utilization // University of Bath Research Portal. URL: <https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/computerised-control-of-artificial-light-for-maximum-use-of-dayli> (дата звернення: 16.06.2026).

9. Doulos L., et al. Lighting control strategies and user comfort in intelligent buildings // *Lighting Research & Technology*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153517712781>.
10. Fan J., et al. Optimal lighting and shading control for energy efficiency in smart buildings // *Energies*. 2021. Vol. 14(13). Art. 3852. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14133852>.
11. Lawrence Berkeley National Laboratory. Automatic Lighting Controls. Berkeley: LBNL, 2012. URL: <https://bies.lbl.gov/publications/automatic-lighting-controls> (дата звернення: 16.06.2026).
12. Grif H. S. Neural daylight control system // *arXiv preprint*. 2010. URL: <https://arxiv.org/abs/1002.4768> (дата звернення: 16.06.2026).
13. Zhang X., et al. Deep reinforcement learning for daylight and artificial lighting control in smart buildings // *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2512.14058> (дата звернення: 16.06.2026).
14. Chen Y., et al. Data-driven daylight estimation for lighting control systems // *arXiv preprint*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.08346> (дата звернення: 16.06.2026).
15. Березюк. Безпека життєдіяльності: навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.
16. І.В. Чихіра Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Програмування систем реального часу" . / ТНТУ, 2017 – 92с.
17. Методичні рекомендації з виконання, оформлення та захисту кваліфікаційних робіт бакалаврів спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньої програми «Комп'ютеризовані системи управління та прикладне програмування» / ТНТУ ім. І. Пулюя; уклад. А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, О.С. Голотенко – Тернопіль: ТНТУ, 2025. – 86 с.