

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

ГЮІК. ХХХХХХ.016 ПЗ  
(позначення документа)

Комп'ютерна система управління для забезпечення  
рівня освітлення на базі мікроконтролера

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, групи СКСм-21-1  
спеціальності (напряму підготовки) \_\_\_\_\_

123 – Комп'ютерна інженерія  
(код і повна назва спеціальності)

освітньо-наукова програма Спеціалізовані  
комп'ютерні системи  
(повна назва освітньої програми)

Ворона Д.В  
(прізвище, ініціали)

Керівник проф. Кривуля Г.Ф.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри



(підпис)

Чумаченко С.В.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Ворони Дмитра Вячеславовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи

Комп'ютерна система управління для забезпечення рівня освітлення на базі мікроконтролера

затверджена наказом по університету від "14" листопада 2022 р № 1478 ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15.12.2022

3. Вихідні дані до роботи

Мікроконтролер STM32

Датчик освітлення

Світлодіод

Норми рівня освітлення

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Поняття інтернет речей

Система освітлення в розумному будинку

Міжнародні стандарти рівня освітлення робочого місця

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Отримання завдання</i>	<i>04.11.2022 – 05.11.2022</i>	
2	<i>Аналіз літератури</i>	<i>12.11.2022 – 16.11.2022</i>	
3	<i>Розробка моделі</i>	<i>17.11.2022 – 26.11.2022</i>	
4	<i>Реалізація моделі</i>	<i>29.11.2022 – 05.12.2022</i>	
5	<i>Тестування отриманих даних</i>	<i>06.12.2022 – 10.12.2022</i>	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>13.12.2022 – 17.12.2022</i>	

Дата видачі завдання 03 09 2022 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис) (посада, прізвище, ініціал)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 53 сторінки, 22 рисунка, 6 таблиць.

ВБУДОВАНІ СИСТЕМИ, СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ, КОНТРОЛЛЕР, СВІТЛОДІОДНЕ ОСВІТЛЕННЯ, ФОТОТРАНЗИСТОР, ФОТОМЕТРИЧНИЙ ДАТЧИК.

Метою дослідницької роботи є запропонувати вбудовану систему керування освітленням робочого місця. Представлена конструкція розглянутої системи освітлення з потужним світлодіодом (Light Emitting Diode) та ідея керування нею. Наведено та обговорено деякі результати досліджень побудованої системи освітлення, зокрема вимірювання її оптичних та електричних параметрів. Наведені результати показують, що за допомогою даної системи можна отримати високе значення рівномірності освітлення робочого місця при різних значеннях основного освітлення в приміщенні.

Управління швидке, і жоден час реакції, досягнутий під час випробувань, не перевищував навіть 1 с, забезпечуючи плавну зміну. Хоча макет і алгоритми, що використовуються, прості, це можна вважати перевагою, оскільки вони не створюють зайвої складності, але відповідають усім вимогам стандартів. Наведено обговорення отриманих результатів, зокрема в області енергозбереження.

## ABSTRACT

The explanatory note contains: 53 pages, 22 figures, 6 tables.

EMBEDDED SYSTEM, LIGHTNING SYSTEM, CONTROLLING, LED LIGHTING, PHOTOTRANSISTOR, PHOTOMETRIC SENSOR.

The aim of the research work is to propose an integrated workplace lighting control system. The design of the considered lighting system with a powerful LED (Light Emitting Diode) and the idea of its control are presented. Some research results of the constructed lighting system, including the measurement of its optical and electrical parameters, are presented and discussed. The given results show that with the help of this system, it is possible to obtain a high level of uniformity of illumination of the workplace at different values of the main lighting in the room.

Controls are fast, and no response time achieved in testing even exceeded 1s, ensuring a smooth transition. Although the layout and algorithms used are simple, this can be considered an advantage because they do not create unnecessary complexity, but meet all the requirements of the standards. The results obtained are discussed, in particular in the field of energy saving.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ПРАВОВИХ НОРМ ОСВІТЛЕННЯ РОБОЧОГО МІСЦЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ	11
1.1 Поняття інтернет речей	11
1.1.1 Система освітлення в розумному будинку	12
1.2 Норми рівня освітлення.	13
1.3 Освітлення робочого місця.	15
2 ЕТАПИ РОЗРОБКИ	20
2.1 Вибір комплектуючих	20
2.2.1 Мікроконтролер STM32F407VG Discovery	20
2.2.2 Датчик освітленості ТЕМТ6000	23
2.2.3 Оптрон CNY17-4	24
2.2.4 Світлодіод живлення XML2	25
2.2.5 Модуль LED Ring XRE	27
2.3 Опис роботи системи	27
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ	37
3.1 Дослідження системи з розімкненим контуром зворотного зв'язку	37
3.2 Дослідження системи із замкнутим контуром зворотного зв'язку	40
ВИСНОВКИ	48
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	49
ДОДАТОК А	52
Графічний матеріал атестаційної роботи	52

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- IoT – Інтернет речей (англ. Internet of Things)
- Wi-Fi – Стандарт бездротового зв'язку 802.11 (англ. Wireless Fidelity)
- GSM – Глобальний стандарт цифрового мобільного сотового зв'язку (англ. Global System for Mobile Communications)
- DVR – Цифровий відеореєстратор (англ. Digital Video Recorder)
- VCR – Аналоговий відеореєстратор (англ. Video Cassette Recording)
- NVR – Мережевий відеореєстратор (англ. Network Video Recorder)
- CCTV – Система телебачення замкнутого контуру (англ. Closed Circuit Television)
- SMS – Технологія прийому та передачі коротких текстових повідомлень за допомогою сотового телефону (англ. Short Message)
- IP – Міжмережевий протокол (англ. Internet Protocol)
- VoIP – Телефонний зв'язок по протоколу IP (англ. Voice over Internet Protocol)
- Pin – Контакт в електроніці для з'єднання двох елементів схеми
- SIM – Модуль ідентифікації абоненту (англ. Subscriber identification module)
- AT – Початок виклику строк команд модема (англ. Attention – «увага»)
- DIY – Зроби сам (англ. Do It Yourself)
- RX – Канал отримання даних (англ. Receive)
- TX – Канал відправлення даних (англ. Transceive)
- DC – Постійний струм (англ. Direct current)
- GND – Вузол в електроніці, потенціал якого умовно приймається за нуль (англ. Ground)
- PIR sensor – Інфрачервоний датчик (англ. Passive Infrared sensor)
- MW sensor – Мікрохвильовий датчик (англ. Microwave sensor)
- LAN – Локальна сеть (англ. Local Area Network)
- Ultrasonic sensor – Ультразвуковий датчик
- SoC – Система на кристалі (англ. System-on-a-Chip)
- RAM – Оперативна пам'ять (англ. Random Access Memory)

## ВСТУП

Правильне освітлення робочого місця важливо для комфорту та ефективності роботи. Тому відповідні вимоги до освітленості такого стенду сформульовані в нормативно-правових актах і стандартах. Однак у наведених документах відсутні деталі технічних рішень, що забезпечують отримання бажаних значень або параметрів, що характеризують освітленість робочого місця. Вже кілька років в освітленні все частіше використовуються світлодіодні джерела світла. Вони характеризуються високою ефективністю перетворення електричної енергії в світло, і в той же час дуже легким регулюванням випромінюваного світлового потоку шляхом регулювання прямого струму на світлодіод.

При освітленні робочого місця велике значення має величина освітленості, що надходить від зовнішніх джерел, наприклад, основного освітлення приміщення або сонячного світла. У такій ситуації можна забезпечити бажане значення освітленості робочої поверхні меншим значенням освітленості від локального джерела освітлення. Обмеження значення цього параметра дозволяє знизити показник струму на світлодіод та заощадити електроенергію. Ця система дозволяє вивчати розподіл інтенсивності освітлення, але не дозволяє повністю контролювати середнє поточне значення використовуваних точкових джерел світла. На першому етапі розробки система не дозволяє спілкуватися з ПК (персональним комп'ютером).

Існують також доступні технології, які дозволяють плавно контролювати освітлення, наприклад система, описана в цій кваліфікаційній роботі. Однак освітлювальні прилади, адаптовані під зовнішнє освітлення, наразі найчастіше доступні лише в професійних, дорогих рішеннях, підготовлених під потреби клієнта. Ми також можемо зустріти пристрої на основі машинного навчання та штучного інтелекту. Алгоритми використовуються в таких пристроях, щоб обчислити значення, яке було

налаштоване належним чином, або навіть для вивчення звичок людини на основі зразків із ручних налаштувань. На жаль, такі технології дорогі.

У статтях представлені класичні системи освітлення, що використовують твердотілі джерела світла, які не використовують сигнали зворотного зв'язку, отримані за допомогою датчиків освітленості, виготовлених за аналоговою або цифровою технологією, для регулювання випромінюваного світлового потоку. Також можуть бути використані статичні методи керування у вигляді схем, побудованих з використанням тиристорів або МОП-транзисторів (металооксидних напівпровідникових польових транзисторів).

У роботах наведено результати вимірювань статичних і динамічних параметрів вибраних датчиків освітленості з урахуванням ширини спектру вимірюваного випромінювання. З іншого боку, в роботах детально описуються випробувальні стенди для регулювання освітленості з використанням датчиків освітленості, виготовлених за аналоговою або цифровою технологією.

У роботах представлені випробувальні стенди, які використовують сигнали зворотного зв'язку для регулювання випромінюваного світлового потоку. Для цього використовуються не тільки датчики освітленості, але також датчики температури і датчики для вимірювання спектру випромінювання.

На жаль, така велика кількість сигналів зворотного зв'язку призводить до великої складності випробувальних стендів, що часто подовжує час контролю випромінюваного світлового потоку навіть до кількох десятків секунд. Слід також пам'ятати, що запропонована система іноді використовує дуже складні адаптивні алгоритми для управління випромінюваним світловим потоком. Це подовжує час реакції систем, розроблених таким чином. Застосування адаптивних алгоритмів і алгоритмів штучного інтелекту, окрім збільшення часу реакції системи на зміну інтенсивності

зовнішнього освітлення, також вимагає використання DSP (Digital Signal Processor), що значно здорожує весь пристрій.

Важливою проблемою, представленою в роботі, є вплив факторів вибору на величину освітленості, випромінюваної твердотільними джерелами світла. Широко описаний у літературі також вплив температури навколишнього середовища та самонагрівання на теплові та оптичні параметри твердотільних джерел світла. Слід пам'ятати, що занадто велике значення прямого струму при освітленні робочих місць одним потужним світлодіодом може спричинити підвищення його внутрішньої температури та значне погіршення оптичних параметрів. Рішенням цієї проблеми є використання спеціальних пасивних або активних систем охолодження, описаних у документах.

У даній роботі представлена вбудована система, яка дозволяє автоматично регулювати освітленість офісного робочого місця, обладнаного світлодіодним джерелом світла. Для спрощення топології пристрою та отримання швидких налаштувань використовуваної системи керування в цій системі реалізовано ітераційний алгоритм.

# 1 АНАЛІЗ ПРАВОВИХ НОРМ ОСВІТЛЕННЯ РОБОЧОГО МІСЦЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

## 1.1 Поняття інтернет речей

Інтернет речей (IoT) відноситься до еволюційного етапу Інтернету, який створює глобальну комунікаційну інфраструктуру між людьми та машинами. IoT буде глобальну інфраструктуру, яка змінить фундаментальні аспекти нашого життя, від послуг охорони здоров'я до виробництва, від сільського господарства до видобутку корисних копалин. IoT запропонує необхідні засоби для останньої розробки штучного інтелекту (AI). У цьому розділі розглядаються огляд, характеристики, переваги, недоліки, загальне використання, безпека, довіра, конфіденційність і функціональний вигляд IoT. Крім того, у цьому розділі детально пропонуються сфери застосування IoT.

IoT став маркетинговою тенденцією та загальною новиною. Крім перебільшення, IoT з'явився як потужна техніка з пристроями в багатьох сферах. IoT бере свій початок у багатьох попередніх методах: сенсорних мережах, вбудованих системах і всепроникній інформації. Багато пристроїв IoT пов'язані між собою для розробки схем конкретного призначення; у глобальній мережі вони рідко використовуються як пристрої загального доступу. Вузол Інтернету речей – це апаратне забезпечення, що містить сенсор, який передає чуттєву інформацію користувачам або іншим пристроям через Інтернет. Вузли IoT вбудовуються в промислове обладнання, мобільні та медичні інструменти, бездротові датчики тощо. Найпопулярнішими прикладами IoT є підключене розумне місто, розумна промисловість, розумний транспорт, розумні будівлі, розумна енергетика, розумне виробництво, розумний моніторинг середовища, розумне життя, розумне здоров'я, розумний моніторинг їжі та води.

Ця архітектура має багато датчиків IoT для таких цілей, як температура, вологість, тиск тощо. Після вимірювання ці дані передаються на хмарний сервер через шлюз IoT. Крім того, користувачі можуть отримати доступ до цих даних через мобільні програми тощо. Завдяки доступності недорогих і розумних пристроїв мережа IoT відноситься до розумних систем. Пристрої IoT працюють незалежно за допомогою своїх можливостей слуху та передачі. Крім того, розповсюдження IoT дає багато переваг, але також створює потенційні загрози. Фактором, який поки що не враховується, є зростання витрат енергії.

### 1.1.1 Система освітлення в розумному будинку

Освітлення описує використання природного та штучного світла для загального освітлення приміщень, для виконання конкретних завдань або для акцентного освітлення. Традиційні системи освітлення часто складаються з одного або кількох вимикачів і освітлювальних приладів. SLS використовує додаткові компоненти, такі як датчики руху чи присутності або датчики денного світла, щоб регулювати інтенсивність світла відповідно до навколишнього середовища та/або потреб користувача. У всіх сферах застосування, де потрібне світло, SLS надає, можливо, корисні рішення. Типовими випадками використання є внутрішнє освітлення, наприклад, в офісах і житлових будинках, і зовнішнє освітлення, наприклад, на громадських вулицях.

Основною характеристикою SLS є покращена якість світла та енергоефективність. Завдяки застосуванню ефективних технологій, таких як світлодіоди, споживання енергії освітленням може бути значно зменшено з додатковими перевагами покращеної якості світла. Гнучке керування освітленням може забезпечити світло залежно від вимог користувача шляхом регулювання кольору та інтенсивності світла. Інтегровані датчики забезпечують автоматичне керування освітленням із можливістю зворотного

зв'язку із замкнутим циклом, що забезпечує покращені послуги на додаток до зменшення споживання енергії. Завдяки останнім розробкам в освітлювальних технологіях і джерелах світла, таких як світлодіоди та цифрове керування світлом, SLS також є частиною концепції Інтернету речей (IoT) з позитивним впливом з точки зору технологій, економіки, інформації та кінцевих користувачів. Загалом, SLS надають функціональні можливості, які виходять за межі освітлення, і, отже, вони впливають на продуктивність складу не тільки на енергоефективність. Застосовуваний у промисловому середовищі SLS забезпечує зв'язок між освітлювальними пристроями з перевагами, наприклад, в управлінні якістю, сприяючи більш передбачуваним, більш безпечним і ефективним робочим процесам, що призводить до зниження витрат. SLS є екологічно чистими завдяки довговічності компонентів, а гнучке керування освітленням допомагає зменшити світлове забруднення. Світлове забруднення є причиною марної витрати енергії через надмірне або нав'язливе штучне світло, викликане поганим дизайном освітлення, що, наприклад, негативно впливає на дику природу чи здоров'я. Відмовостійкі системи та системи автоматичного введення в експлуатацію дозволяють скоротити технічне обслуговування та знизити відповідні витрати, одночасно покращуючи функціональну безпеку. Комфортне використання, простота використання та індивідуальна адаптація, а також можливість інтеграції в існуючі системи важливі для високого визнання користувача. Функціональні можливості освітлення, як-от зв'язок у видимому світлі (VLC), увімкнений за допомогою модуляції світла, забезпечують доступ до мережі та зв'язують середовище шляхом інтеграції в нові платформи SLS.

## 1.2 Норми рівня освітлення.

Правильно сформована система освітлення дає безліч переваг для роботи у виробничому середовищі. Воно сприяє підвищенню ефективності

праці працівників підприємств, мінімізує їх зорове стомлення і в цілому забезпечує сприятливу обстановку. Для виконання цих умов фахівцями був розроблений перелік норм і правил, які дозволяють розумно організувати джерела світла. Це норми освітленості робочих місць і виробничих приміщень, які зачіпають питання технічного забезпечення приладами, санітарні нюанси, а також враховують вимоги екологічної безпеки.

У сучасних проектах освітлення все частіше використовуються принципи моделюючого світла. Він дозволяє забезпечувати об'ємне сприйняття об'єктів, що дуже важливо для працівників підприємств з конвеєрними лініями. Також цей спосіб організації світла дозволяє точніше розраховувати обсяги розсіювання і яскравості подачі випромінювання. В нормативах за розрахункову одиницю беруться люкс (lx). Одна одиниця lx відповідає одному люмену на квадратний метр. Так, загальні вимоги до освітленості робочого місця вказують, що в приміщеннях з постійним перебуванням людей середнє значення освітлення повинно відповідати 200 lx. Повинні дотримуватися і вимоги до рівномірності освітлення. Відоме правило, що світ повинен охоплювати всю цільову площу, в даному випадку не діє. Робочий простір розділяється на дві зони – периферію і безпосереднє оточення. У випадку з периферійною зоною коефіцієнт рівномірності відповідає 0,10, а безпосереднє оточення охоплюється з величиною 0,40. Тут розрізняються і вимоги до яскравості. Периферійна зона повинна бути освітлена з розрахунком 30 lx для стелі і 50 lx – для стін.

В організації освітлення робочих місць, які повинні мати широку оглядовість навколишнього простору, застосовується так звана концепція нормування циліндричної освітленості. Також використовуються прийоми зниження або повного виключення ступеня відображеної блекоти. Для регулювання цього параметра використовуються різні конфігурації взаємного розташування світильників. Це дозволяє варіювати показники яскравості, коефіцієнти відбиття облицювальних матеріалів і т. д. Важливий і інше питання – які вимоги пред'являються до освітленості робочих місць в

умовах інтенсивного зорового напруги? У цьому випадку, крім дотримання показників яскравості світла, відповідальна особа повинна спочатку правильно підійти і до вибору світильників. Бажано з точки зору щадного впливу світла на очі інтегрувати лампи розжарювання, але в силу економічних і експлуатаційних факторів це не завжди можливо. Тому застосовуються спеціальні моделі люмінесцентних та світлодіодних приладів м'якого освітлення.

### 1.3 Освітлення робочого місця.

Забезпечення належних умов праці є необхідним не тільки з правової точки зору, але й з точки підвищення ефективності роботи працівників і стан їх здоров'я. Автоматичне керування використовується, щоб переконатися, що освітлення адаптується до умов навколишнього середовища, і щоб уникнути необхідності вручну регулювати його. Така процедура не тільки враховує рівень комфорту співробітника, але й забезпечує екологічні переваги, які зараз мають велике значення. Система забезпечує належне освітлення, що запобігає надмірному освітленню.

У розглянутій системі освітлення використовуємо світлодіодне джерело. Таке джерело характеризується високою ефективністю перетворення електроенергії в світло. Це також додає цінності дизайну, дозволяючи контролювати світловий потік шляхом легкого регулювання середнього показника струму на світлодіод. Це забезпечує високу точність і легкість керування сигналом ШІМ (широко-імпульсна модуляція), який генерується мікроконтролером. Під час аналізу були враховані документи, що визначають параметри та критерії належного рівня освітлення робочого місця.

Виходячи зі стандартів, визначено робочу зону формату А3 (297 × 420 мм). Стандарти визначають цю область — поле завдання як простір, у якому виконується візуальне завдання. Оточення цього простору називають полем

найближчого оточення. Тобто простір у полі зору у формі поясу навколо прилеглого до нього поля завдання шириною не менше 0,5 м. А потім фон — область у полі зору, розташована поряд із навколишнім полем. Фон не повинен містити жодного поля завдання або будь-якого поля в безпосередній близькості, а його ширина визначається щонайменше 3 м. На рисунку 1 показані розміри робочої зони та розташування.

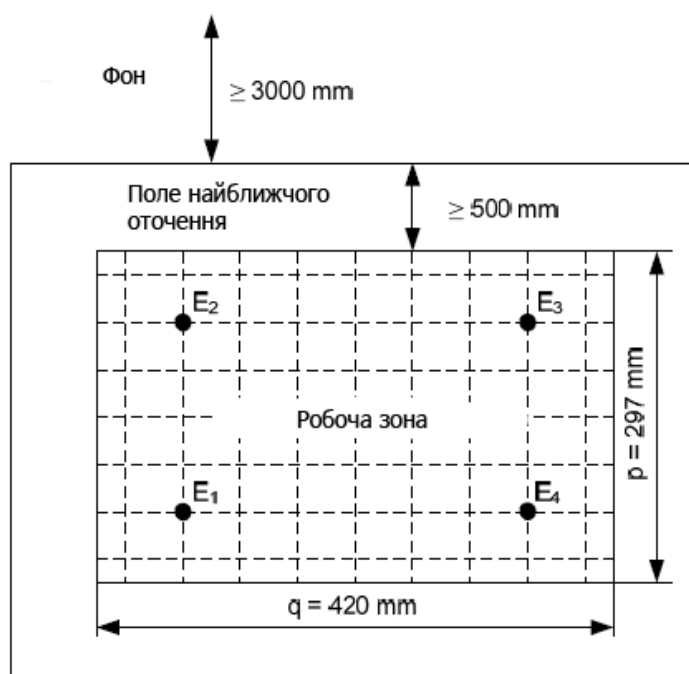


Рисунок 1.1 – Розміри робочої зони

Контрольованим параметром, що характеризує якість освітлення робочого місця, є освітленість. Припускаючи, що джерело світла є точковим, можна використовувати спрощену формулу для освітленості в точці Р площини, що розглядається, де  $I$  — сила світла в напрямку Р,  $r$  — відстань від джерела світла до точки Р,  $\alpha$  — кут падіння світла,  $h$  — відстань джерела світла від площини, що розглядається.

$$E_p = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \alpha = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \alpha$$

Щоб виміряти значення освітленості поверхні, слід визначити середню освітленість  $E$ . На практиці він використовується для розрахунку середнього

значення освітленості із середньої освітленості для репрезентативної кількості точок вимірювання  $n$  у даній місцевості.

Проаналізовані норми вказують лише на граничні значення, які не можна перевищувати. тому у своїй роботі ми використовуємо не тільки середні значення, але й екстремальні значення, наприклад, мінімальна освітленість, яка є найменшим значенням освітленості в одній із обраних точок робочої зони.

Стандарт вимагає підтримувати мінімальні значення середньої освітленості в залежності від виду виконуваної зорової роботи та типу приміщення.

Нормативні мінімально допустимі середні значення освітленості коливаються від 10 lx для загального орієнтування в освітленому приміщенні до 1 klx при тривалій і напруженій зоровій роботі.

Стандарт визначає також робочу освітленість  $E_m$ , від якої значення середньої освітленості  $E$  в робочій зоні не може бути нижчим. Допустима величина робочої освітленості залежить від виконуваної діяльності. Наприклад, для діяльності, пов'язаної з точним складанням вимірювальних приладів, значення робочої освітленості становить 1 klx, тоді як для написання мобільних пристроїв це значення становить лише 750 lx.

Для міркування, наведених у цій роботі, також використовувалося значення рівномірності освітлення  $E_m$ , яке визначається відношенням мінімальної освітленості  $E_{min}$  до середньої освітленості на поверхні  $E$ . Стандарти визначають найменше допустиме значення  $\sigma$  на даній поверхні, відповідно до типу виконуваної діяльності та для найближчого оточення, що містить робочу зону. Для робочої зони, в якій виконується безперервна цехова робота, значення мінімально допустимого значення  $\sigma$  становить 0,65, а для епізодичних робіт це значення становить лише 0,4. Допустиме значення  $\sigma$  для робочої зони не може бути нижче 0,7, а значення цього параметра для зони найближчого оточення не може бути нижче 0,5.

Вимірювання освітленості слід проводити на прямокутній робочій площі розмірами, рівними  $p$  і  $q$ . При інтерпретації результатів вимірювань загальної освітленості слід враховувати рекомендацію, що в місці постійного проживання робоча освітленість не повинна бути нижче 200 lx. Важливим параметром, що характеризує освітленість досліджуваної території, є найменша допустима кількість точок вимірювання на рівномірно освітленій робочій площі. Це залежить від параметра  $w$ , заданого формулою:

$$w = \frac{p \cdot q}{h \cdot (p + q)}$$

Якщо значення параметра  $w < 1$ , то необхідно вимірювати освітленість у 4 точках, при  $1 < w < 2$  — у 9 точках, при  $2 < w < 3$  — у 16 точках, при  $w > 3$  — у 25 точках.

Для визначення рівномірності розподілу освітленості  $\sigma$  для робочої зони, необхідно визначити відношення мінімальної освітленості  $E_{\min}$  до середньої освітленості  $E_{av}$  у вибраній робочій зоні. Найменше значення не може бути нижче 0,65 для робочої зони, в якій виконується безперервна робота, або 0,4 для робочої зони, в якій виконується випадкова робота.

Окрім кількості точок вимірювання, також визначаються відстані між цими точками. Вимоги відрізняються залежно від того, чи проводиться вимірювання для робочої зони, поля безпосереднього оточення чи фону. Стандарт рекомендує використовувати вимірювальну сітку з вічками у формі прямокутників, бажано квадратів. Відношення довжини до ширини такого прямокутника має бути в межах від 0,5 до 2. Максимальна відстань між точками вимірювання  $x$  визначається за формулою:

$$x = 0.2 \cdot 5^{\log(q/p)}$$

Відповідно до стандарту значення  $x$  не повинно перевищувати 10 м для зовнішнього застосування. Знаючи максимальну відстань між точками вимірювання  $x$  і довжину більшої сторони  $q$ , можна визначити мінімальну кількість точок вимірювання  $N$  на цій стороні. Це ціле число, яке найближче

до результату ділення довжини довшої сторони  $q$  на відстань між точками вимірювання  $x$ .

На підставі залежності еталон показує залежність між величиною рівномірності освітленості робочої зони, максимальною відстанню між точками вимірювання  $x$  і мінімальною кількістю цих точок  $N$ , які представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.1 Необхідна рівномірність у зоні безпосереднього оточення на основі значення в робочій зоні.

$\delta$	$x$ (m)	$N$
0.4	0.15	3
0.6	0.2	3
1	0.2	5
2	0.3	6
5	0.6	8
10	1	10
25	2	12
50	3	17
100	5	20

Дотримуючись вищезазначених принципів, була обрана робоча зона як площа розміром А3 (297 x 420 мм), тому достатньою кількістю вимірювальних точок було 4 точки. Однак під час дослідження для побудови розподілу інтенсивності освітлення використовували 63 регулярно розташовані вимірювальні точки. Розташування датчиків освітленості показано на рис.1.1.

## 2 ЕТАПИ РОЗРОБКИ

### 2.1 Вибір комплектуючих

#### 2.2.1 Мікроконтролер STM32F407VG Discovery

Плата розробника STM32F4 DISCOVERY STM32F407VG побудована на базі контролера STM32F407VGT6 з ядром Cortex-M4F, яке можна розігнати до 168 МГц. Об'єм оперативної пам'яті складає 192 кб яку можна збільшити, допаяв зовнішню мікросхему пам'яті. Флеш пам'ять програм 1 мб. Є підтримка USB, причому контролер може бути як пристроєм так і хостом. Є апаратний генератор випадкових чисел. Крім звичних інтерфейсів DAC, ADC, SPI, I2C, PWM, RTC у чіпа є ще DCMІ для підключення камери і SDIO для підключення SD карт. Є підтримка Ethernet.

На борту розміщений вбудований цифровий мікрофон MP45DT02, стереофонічний 24х бітний ЦАП CS43L22 і вбудованим підсилювачем класу D з регулюванням гучності, тембру і т. і. Це дає можливість розробнику побудувати на даній платі непогану звукову карту.

Також на платі встановлений трохосевої цифровий акселерометр LIS302DL. Крім стандартних функцій, акселерометр додатково має можливість перемикає діапазони вимірювання прискорення, апаратно обробляти кліки і подвійні кліки, наприклад постукування і генерувати переривання. Є два інтерфейси: SPI або I2C і виходи для переривань. Для управління і контролю на платі розміщені чотири різних світлодіода, розташованих навколо акселерометра, і дві кнопки, одна призначена для користувача, а друга апаратний сброс контролера.

Система живлення реалізована через стабілізатор напруги LD3985M33R. Для початку роботи цілком достатньо 150мА, однак для складних пристроїв з великою кількістю периферії потрібно більш потужний зовнішній стабілізатор 3.3В.

Налагодження проводиться через програматор-відладчик ST-Link, встановлений на платі. На відміну від програматорів інших плат DISCOVERY, світлодіод даної плати - двоколірний, що дозволяє розрізняти режими роботи налагодження та програмування.



Рисунок 2.1 – Мікроконтролер STM32F407VG Discovery

Таблиця 2.1 – Характеристика плати STM32F407VG Discovery

Параметр	Значення
Процесор	STM32L475VGT6
Робоча напруга	5 В
Стабілізатор напруги	3-5 В
Цифрові Входи / Виходи	51 (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ виходів)

Аналогові входи	40 mA
Постійний струм через вхід / вихід	50 mA
Флеш-пам'ять	1 МБ з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем
ОЗУ	192 kB
Незалежна пам'ять	256 kB
Тактова частота	5 KHz

Цей мікроконтролер адаптован для роботи з IoT (Інтернет речей) через модуль Wi-Fi. Ця система використовує аналого-цифровий перетворювач для запису напруги, що генерується аналоговими датчиками освітленості ТЕМТ6000. Для формування ШІМ-сигналу з частотою, що дорівнює 5 кГц, використовується таймер, реалізований в процесорі. Використання такої частоти ШІМ-сигналу дозволяє усунути явище мерехтіння світлодіода, яке може спостерігатися при низьких значеннях частоти (нижче 100 Гц) цього сигналу.

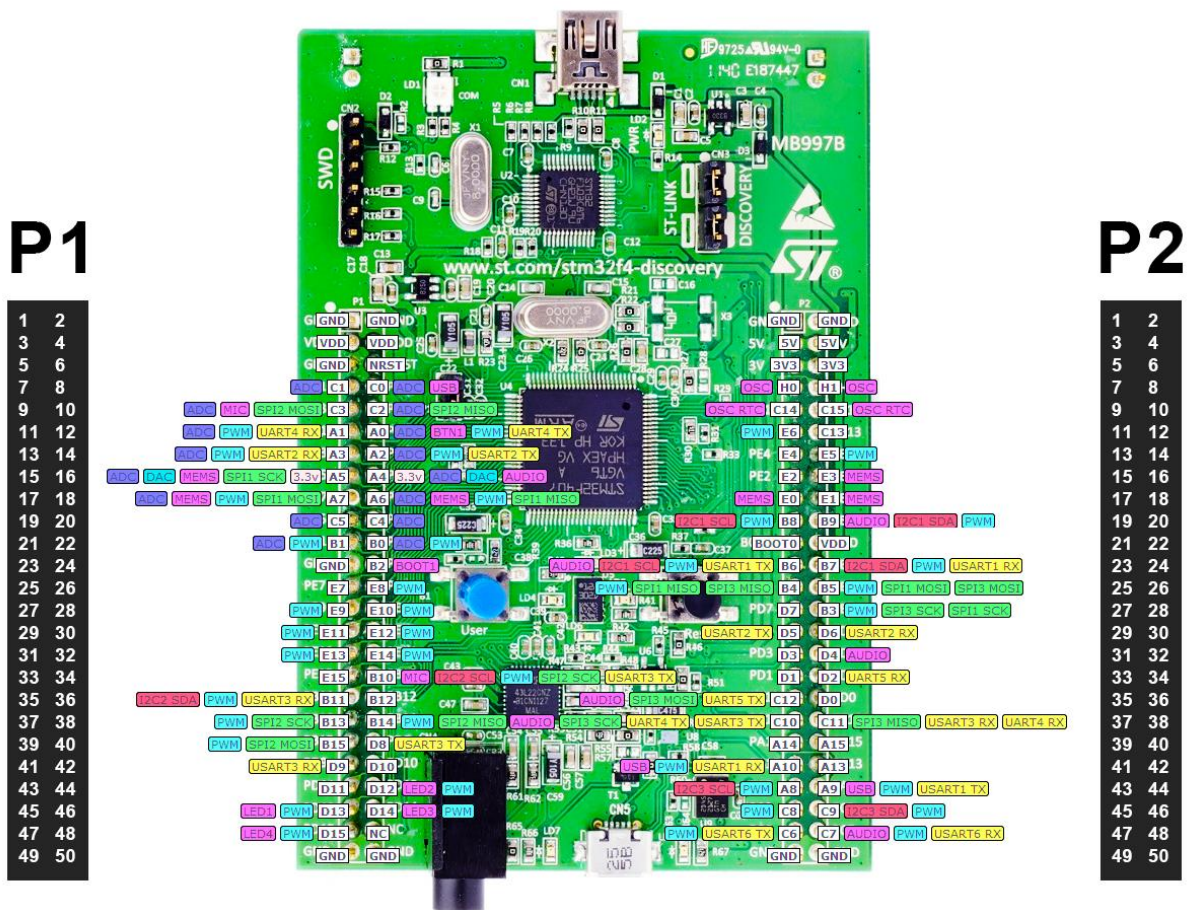


Рисунок 2.2 – Цифрові входи/виходи STM32 Discovery

2.2.2 Датчик освітленості ТЕМТ6000

Датчик освітленості ТЕМТ6000 - це модуль, який містить датчик вимірювання навколишнього освітлення. Пристрій може застосовуватися для створення роботизованих пристроїв, приладів розумного будинку і охоронних систем. Наприклад, такий датчик буде просто незамінний у відеокамерах спостереження, у вуличних світильниках на сонячних батареях, датчиках освітленості, нічниках та інших пристроях контролю освітлення.

Перевагою модуля КУ-018 можна відзначити те, що він вимірює освітлення з чутливістю наближеної до характеристик людського ока. У приладі є вбудований потенціометр для налаштування порогового значення модуля. Ця модель може використовуватися для створення проєктів на основі Ардуїно, а також спільно з іншими мікроконтролерами.

Принцип роботи пристрою простий: за відсутності світла опір фоторезистора великий і доходить до 1 МОм, а при його освітленні падає до декількох Ом, вимірює прилад вимірювання значення опору і на основі цього видає вимірювальні значення.

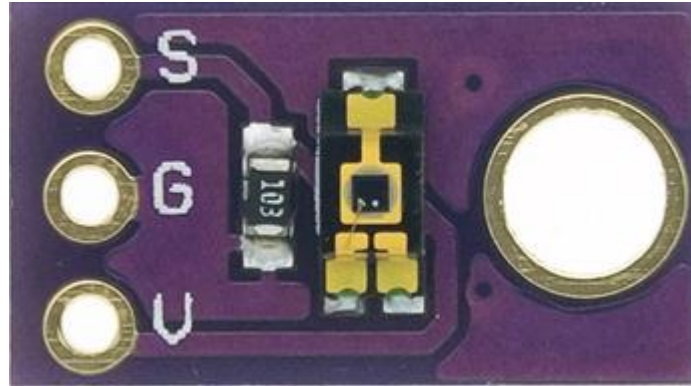


Рисунок 2.3 – Датчик освітленості TEMT6000

Таблиця 2.2 – Характеристика датчик освітленості TEMT6000

Параметр	Значення
Напруга живлення	5 В
Діапазон Робочої частоти	10 - 100 МГц
Робоча температура	Від -40°C до +85°C
Максимальний струм	20 А
Кут чутливості	60°

### 2.2.3 Оптрон CNY17-4

CNY17 — це оптично з'єднана пара, що складається з а інфрачервоний діод з арсеніду галію, оптично з'єднаний із кремнієвим фототранзитором NPN.

Інформація про сигнал, включаючи рівень постійного струму, може передаватися пристроєм, зберігаючи високий ступінь електричної ізоляції між входом і виходом.

CNY17 можна використовувати для заміни реле та трансформаторів у багатьох додатках цифрового інтерфейсу, а також аналогових додатків, таких як модуляція CRT.



Рисунок 2.4 – Оптрон CNY17-4

Таблиця 2.3 – Характеристика оптрона CNY17-4

Параметр	Значення
Напруга живлення	6 В
Струм на виході	<50 $\mu$ А
Час включення	6 мкс
Час вимкнення	25 мкс
Напруга колектор-емітер	70В
Робоча температура	від -55 до +110°C

#### 2.2.4 Світлодіод живлення XML2

Світлодіод XM-L2 являє собою унікальне винахід науки, що дозволяє отримати потік світла електричного струму. Його конструкція включає такі обов'язкові елементи: оптична система, напівпровідниковий кристал на підкладці і корпус з передбаченими контактними виводами. Виробничий відбір новітнього світлодіода компанії Cree проводиться при температурному показнику переходу кристалу в 85°C, що значно спрощує оцінку всіх параметрів у режимі роботи. Максимально допустимий робочий струм XM-

L2 складає 3 А, з ним потік світла може досягати 985 лм при світловіддачі 100 лм/Вт. На номінальному показнику напруги електричного струму в 700 мА віддача світла 150 лм/Вт. Розмір корпусу світлодіода 5x5 мм Посадочний майданчик – стандартна, повністю ідентична попередньої версії і дорівнює 25 мм?. Випускаються CreeXM-L2 в нейтральному і холодному білому кольорі діапазоном від 2700 К до 8300 К. Основною сферою застосування є архітектурне, промислове та вуличне освітлення.

Під час випробувань точковим джерелом світла слугував світлодіод типу XMLBWT 00-0000-000LT40E4, який входить до складу системи під час калібрування датчиків та вимірювання його статичності. і динамічні параметри. Застосовуваний світлодіод може працювати при максимальному прямому струмі  $I_{Fmax} = 3$  А, сумарній потужності  $P_{tot}$  до 10 Вт, випромінюваному світловому потоці досягає 341 lx при прямому струмі  $I_F = 0,35$  А, при куті випромінювання  $125^\circ$ .

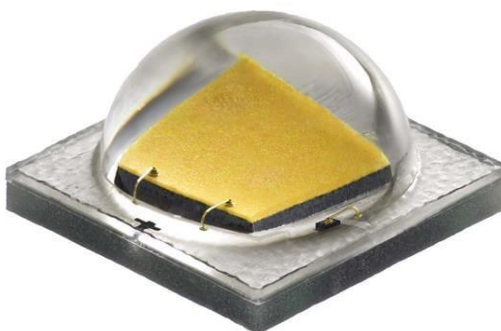


Рисунок 2.6 – Світлодіод живлення XML2

Таблиця 2.4 – Характеристика датчика широкого спектра газів MQ-2

Параметр	Значення
Напруга живлення	До 10В
Світловий потік	До 1000 lx
Робоча температура	Від -25 до +85°C
Термін роботи	40000 годин

### 2.2.5 Модуль LED Ring XRE

Модуль Ring XRE також тестується як точкове джерело світла, що містить шість діодів типу XRE-L1 0000-006F8 (Cree LED, Durham, NC, USA), з'єднаних послідовно з максимальним прямим струмом  $I_{Fmax} = 0,7$  А, який використовується для досліджень динаміки системи.

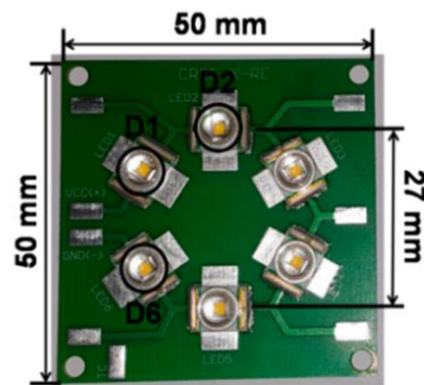


Рисунок 2.7 – Модуль LED Ring XRE

Таблиця 2.5 – Характеристика датчика протікання води FC-37

Параметр	Значення
Напруга живлення	3,3 – 3,7 В
Кут освітлення	90°
Світловий потік	107-235 lx
Розміри модуля	50 x 50 мм

### 2.3 Опис роботи системи

На рис. 2.8 наведено структурну схему вбудованої системи керування освітленням офісної станції, основним компонентом якої є система керування, побудована на процесорі STM32L475VGT6. Цей процесор є компонентом оціночної плати Discovery B-L475E-IOT01A2, адаптованої для роботи з IoT (Інтернет речей) через модуль Wi-Fi. Ця система використовує аналого-цифровий перетворювач для запису напруги, що генерується

аналоговими датчиками освітленості TEMT6000. Для формування ШІМ-сигналу з частотою, що дорівнює 5 кГц, використовується таймер, реалізований в процесорі. Використання такої частоти ШІМ-сигналу дозволяє усунути явище мерехтіння світлодіода, яке може спостерігатися при низьких значеннях частоти (нижче 100 Гц) цього сигналу.

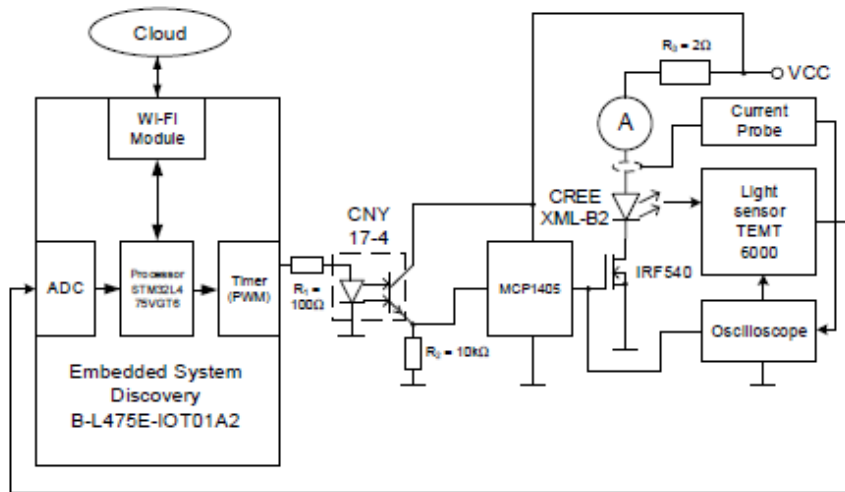


Рисунок 2.8 – Структурна схема вбудованої системи керування освітленням офісної станції.

Для гальванічного відокремлення ланцюга заземлення плати та джерела живлення світлодіодів використовується оптрон CNY17-4. Якщо оптоізолятор не використовується, спостерігаються дуже високі середньоквадратичні значення шуму на виході датчика освітленості TEMT6000, що перевищує 50 мВ, що унеможливує роботу алгоритму керування. Для збільшення струмової ефективності виходу сигналу ШІМ використовується контролер MCP1405. Як пристрій комутації струму світлодіода використовується MOSFET типу IRF540.

Іншим важливим завданням є забезпечення належних умов вимірювання. Щоб досягти цього, готується тестова установка для забезпечення стабільних умов зовнішнього освітлення, що дозволить проводити випробування системи керування. Однією з таких умов є забезпечення можливості зміни інтенсивності зовнішнього освітлення, що

дозволило б перевірити реакцію системи керування. Додатковою перевагою тестової установки є легка і точна зміна положення датчиків інтенсивності світла для дослідження розподілу освітленості, створеної використаними точковими джерелами світла.

Прототип тестової установки, представлений на рис. 3, відповідав усім встановленим цілям. Розміщення установки в темній кімнаті допомогло створити стабільне середовище, яке дозволило проводити точні вимірювання системи керування.



Рисунок 2.9 – Вигляд тестової установки із зовнішнім освітленням.

У нижній частині тестової установки розміщено пластину з 63 рівномірно розподіленими точками для розміщення датчиків, що дозволяє легко змінювати положення датчиків. Положення датчиків можна було змінювати в межах прийнятої робочої зони розмірами 297 x 420 мм, в 7 рядках і 9 стовпцях. Підготовлена таким чином вимірювальна поверхня забезпечує кожен раз точне позиціонування датчиків, що дозволяє отримувати надійні результати та вимірювати розподіл інтенсивності освітлення. Як згадувалося раніше, вибрано 4 позиції, в яких розміщуються

датчики E1, E2, E3 і E4, як показано на малюнку 1. Під час досліджень висота, на якій фіксується точкове джерело світла, кероване системою, становить 50 см.

У представленій установці аналоговий датчик використовується для вимірювання інтенсивності світла, який чутливий до видимого світла, з половинним кутом чутливості  $\phi = \pm 60^\circ$ . Світлочутливим елементом оптичного датчика є фототранзистор.

Даний датчик монтується на PCB (Printed Circuit Board) розміром 11 x 11 мм за технологією SMD (Surface Mounted Devices). В результаті його контакти припаяні до контактних площадок, що дозволяє підключатися до макетної плати або основного модуля у вигляді плати розробки STM32Disco, яка використовується в представленій системі, або комплекту розробки Arduino. Система оптичного датчика TEMT6000 має три контакти GND — заземлення системи, VCC — напруга живлення 5 В і VOUT — аналоговий вихід.

Датчик TEMT6000 характеризується вузьким діапазоном вимірюваних значень освітленості, які зазвичай не перевищують кількох клx. Це викликано властивостями фототранзистора, який діє як світлочутливий елемент. Такі датчики характеризуються швидким насиченням вихідної характеристики фототранзистора. Датчик TEMT6000 містить, крім фототранзистора, резистор потужністю 10 кВт, що обмежує струм колектора. Падіння напруги на цьому резисторі надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача вимірювальної системи.

Застосовані датчики освітленості E1–E4 типу TEMT 6000 є основними компонентами контуру зворотного зв'язку системи керування для регулювання освітленості точкового джерела світла. Ці датчики також реагують на зміну інтенсивності зовнішнього освітлення. Застосування даного типу датчиків зумовлювалося низькими значеннями вимірюваної освітленості, які в розглянутій системі не перевищували 1 клx.

Під час випробувань точковим джерелом світла слугував світлодіод

типу XMLBWT 00-0000-000LT40E4, який входить до складу системи під час калібрування датчиків та вимірювання його статичності. і динамічні параметри. Застосовуваний світлодіод може працювати при максимальному прямому струмі  $I_{Fmax} = 3 \text{ A}$ , сумарній потужності  $P_{tot}$  до 10 Вт, випромінюваному світловому потоці досягає 341 lx при прямому струмі  $I_F = 0,35 \text{ A}$ , при куті випромінювання  $125^\circ$ . Під час роботи системи освітлення світлодіод встановлений на радіаторі RAD-A5723/100. Модуль Ring XRE також тестується як точкове джерело світла, що містить шість діодів типу XRE-L1 0000-006F8 (Cree LED, Durham, NC, USA), з'єднаних послідовно з максимальним прямим струмом  $I_{Fmax} = 0,7 \text{ A}$ , який використовується для досліджень динаміки системи.

Для керування освітленням офісної станції підготовлено алгоритм, реалізований у мікроконтролері STM32L4. Аналого-цифровий перетворювач АЦП отримує дані від чотирьох аналогових датчиків освітленості. Наступним кроком є усереднення результатів вимірювань цих датчиків. Передавач бере 2000 проб від кожного оптичного датчика та усереднює результати вимірювань. Операція усереднення для чотирьох датчиків займає не більше 5 с. Наступним кроком є порівняння виміряного значення освітленості зі значенням, прийнятим як еталонне значення. Якщо ці значення рівні, зчитуються наступні 2000 зразків, при цьому показання завищені або знижені по відношенню до прийнятого стандарту, середнє значення струму світлодіода регулюється за допомогою шпаруватості сигналу, що керує затвором MOSFET.

На рисунку 2.10 показаний алгоритм роботи основної частини прошивки. Він не містить роботи системи DMA (Direct Memory Access), яка без використання часу процесора постійно копіює показання з аналогових датчиків і поміщає їх у буфер. З нього вони беруться кожні 1 мс і усереднюються, щоб позбутися шуму, пов'язаного з якістю датчиків. Наведений нижче алгоритм не включає зв'язок із програмою для ПК. Користувач у будь-який час після підключення комп'ютера з комплектом

оцінки STM32Disco через порт USB (Universal Serial Bus) може завантажити поточні дані із системи та надіслати нові задані значення. Це не зупиняє програму; нові дані оновлюються, і під час наступного запуску циклу.

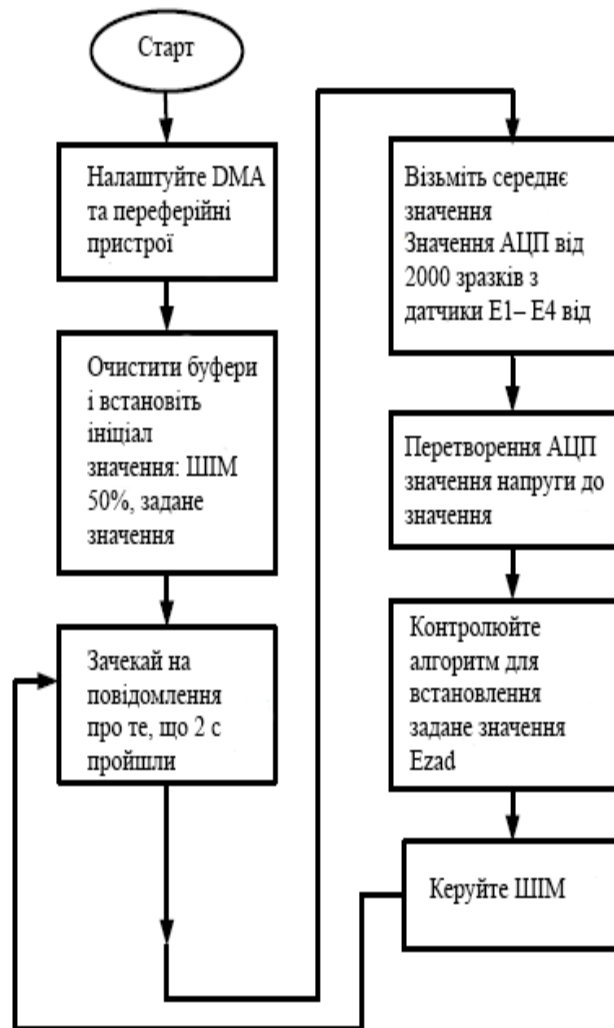


Рисунок 2.10 - Алгоритм цільового циклу.

Алгоритм керування відіграє ключову роль у роботі системи, тому його вибір не був однозначним. Нарешті, вибрано дуже простий ітераційний алгоритм, представлений на рисунку 2.11.

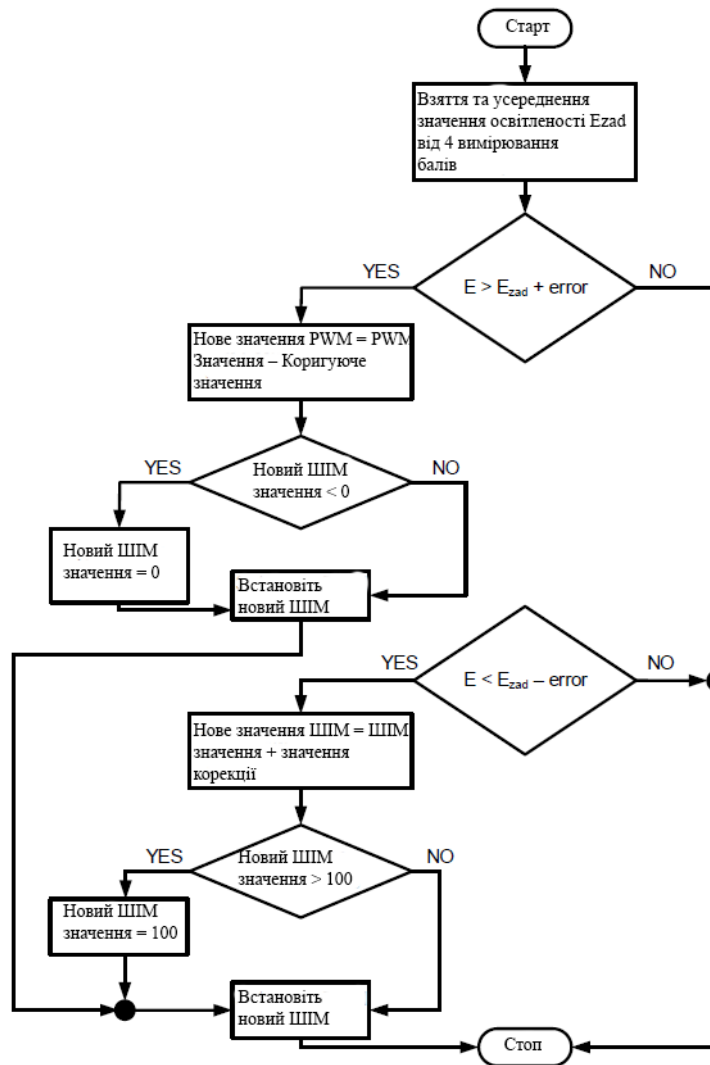


Рисунок 2.11 - Алгоритм роботи системи керування.

Алгоритм також використовує розраховане значення освітленості в робочій зоні і порівнює його із заданим значенням. Він враховує можливу похибку в 20 lx. Якщо розраховане значення з урахуванням значення похибки відрізняється від заданого значення освітленості, то для зміни значення освітленості проводиться корекція, тобто зміна значення наповнення сигналу ШІМ. У випадку, коли розраховане значення є нижчим за встановлене значення, алгоритм збільшує шпаруватість сигналу ШІМ на значення корекції, а у випадку, коли розраховане значення вище встановленого значення, корекція полягає у зменшенні шпаруватість сигналу ШІМ за значенням корекції. Під час випробувань значення поправки було

встановлено на рівні 2%, що є достатнім для того, щоб систему керування можна було вважати точною, і водночас керування можна вважати достатньо швидким.

Незважаючи на те, що характеристики використовуваного алгоритму не забезпечують постійний час відгуку системи, він зростає зі збільшенням різниці між значенням, отриманим від датчиків, і заданим значенням, алгоритм можна вважати достатнім, що доведено представленими тестами пізніше в роботі. Значення, згадане раніше як значення помилки, вводиться в алгоритм для забезпечення стабільності схеми. Небажано, щоб освітленість постійно змінювалася в гонитві за досконалістю. Датчики недостатньо точні, щоб забезпечити постійне зчитування значень, і умови навколишнього освітлення можуть дещо змінюватися. Якщо системі не вдається підтримувати ідеальні налаштування в цій ситуації, це може спричинити мерехтіння світла, що призводить до втоми очей користувача, який перебуває в таких умовах. Ця величина вносить допустиму похибку, яка не виправляється, але забезпечує стійкість системи керування і водночас забезпечує її достатню якість.

Для забезпечення вищої точності та більш стабільного часу відповіді системи можна було використати алгоритм вищої складності, який не просто порівнював би фактичне значення із заданим значенням на більшій/меншій основі. Алгоритм міг обчислити різницю між цими значеннями і, залежно від її величини, змінити шпаруватість ШІМ-сигналу на більшу або меншу величину.

Перевагою цього рішення буде збільшення швидкості реакції системи та більш стабільна робота системи. Система мала б розрахувати, на яке значення наповнення вона має змінити налаштування, щоб отримати задану точку. Для цього можна було використовувати алгоритми штучного інтелекту, що означало б слідувати тенденціям технологічної індустрії. Таке рішення було б швидшим, але перевага використаного рішення полягала в тому, що зміна налаштувань була дуже плавною, що позитивно впливало на

зір користувача. Крім того, під час випробувань ітераційний алгоритм, наведений вище, виявився достатнім і відповідає всім вимогам. Запровадження більш складного алгоритму може означати більшу складність програми, що може зробити її більш ненадійною, а також, якщо проект буде перенесено на пристрій, який буде продаватися на ринку, це може унеможливити оптимізацію обладнання. Для більш складних алгоритмів потрібні процесори з більшою обчислювальною потужністю та пам'яттю. Використаний алгоритм дає можливість оптимізувати витрати та зменшити споживання електроенергії.

Використання штучного інтелекту або алгоритмів машинного навчання також збільшило б необхідну кеш-пам'ять мікроконтролера, що призвело б до більшої складності системи керування, необхідності використання більш складної архітектури мікроконтролера та спростувало б припущення, тим самим збільшуючи вартість системи. Таке рішення також призведе до споживання більшої кількості електроенергії, що спростує припущення про економію енергії, споживаної запропонованою системою керування освітленням на робочому місці.

У статтях пропонуються системи, що використовують штучний інтелект і алгоритми машинного навчання. Однак автори цих систем відзначають значні обчислювальні зусилля, необхідні для стабільного керування твердотільним джерелом світла, і складність систем безперервного вимірювання освітленості. Це призводить до потреби в мікроконтролерних системах, які додатково вимагають цифрових алгоритмів обробки сигналів. Ці системи також демонструють тривалий час роботи, що перевищує навіть кілька секунд. У обговорюваних статтях також представлені рішення, які використовують програмовані схеми, що дозволяють реалізувати систему керування, додаткові обсяги кеш-пам'яті, і схеми цифрової обробки сигналів в одній інтегральній схемі, що суттєво обмежує рентабельність такого проекту.

Перевага системи керування, запропонованої в цій роботі, полягає в

оптимізації понесених витрат, оскільки система керування використовує дуже популярний і дешевий мікроконтролер сімейства STM32L4, що забезпечує низьке енергоспоживання, що призводить до економії споживання електроенергії. Ця система, порівняно з літературними системами, також характеризується простотою алгоритму керування, оскільки вона використовує лише один контур зворотного зв'язку для чотирьох датчиків вимірювання, тоді як літературні системи використовують окремі контури зворотного зв'язку для кожного використаного датчика освітленості.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Щоб перевірити правильність роботи представленої системи, було проведено багато статичних і динамічних випробувань на раніше представленій тестовій установці. Визначено розподіл освітленості для джерел світла у вигляді одного світлодіода живлення XML2 та модуля LED Ring XRE при різних освітленнях. Значення освітленості були попередньо визначені шляхом вимірювань за допомогою люкметра L200 виробництва компанії Sonoran, який використовувався як еталонний прилад. Фактичні значення освітленості в точках E1–E4 вимірювали за допомогою датчиків TEMT6000. Детальна схема розташування цих датчиків наведена на рисунку 3.1. Аналізуючи дані датчиків TEMT6000, вдалося визначити значення середньої освітленості  $E_{av}$  і мінімальне значення освітленості  $E_{min}$  для робочої зони.

У розділі 3.1 представлені результати вимірювань, отримані з розімкнутим контуром зворотного зв'язку, а в розділі 3.2 із замкнутим контуром зворотного зв'язку.

#### 3.1 Дослідження системи з розімкненим контуром зворотного зв'язку

На рисунку 3.1 показано вимірний розподіл освітленості для двох різних значень прямого струму світлодіода 0,804 А (малюнок 7а) і 1,875 А (малюнок 7б), відповідно. Як видно, більш високе значення рівномірності розподілу освітленості  $\delta$ , рівне 0,673, отримано для прямого струму світлодіода, що дорівнює 0,804 А. При прямому струмі, що дорівнює 1,875 А, рівномірність  $\delta$  дорівнює 0,642.

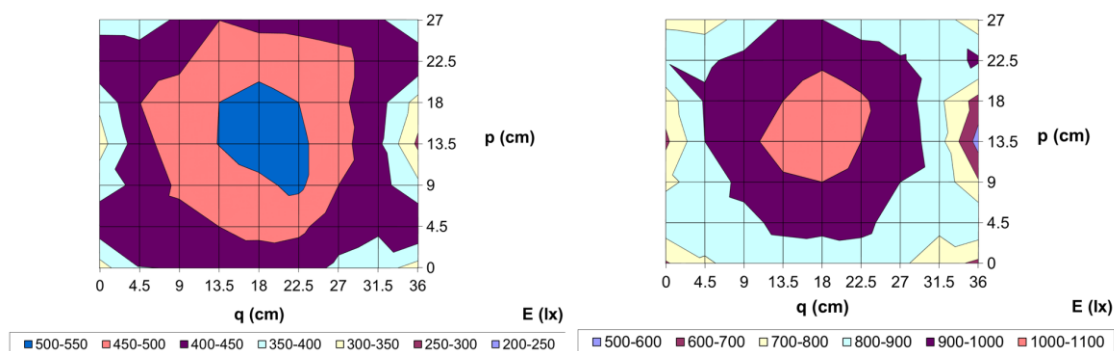


Рисунок 3.1 – Розподіл освітленості в робочій зоні для потужного світлодіода XML2 і номінального значення Ezad 500 lx і 1 klx.

Як видно, на переважній більшості освітленої площі відмінності між вимірними значеннями освітленості не перевищують 20%. Лише на краях досліджуваної ділянки спостерігаються менші значення вимірюваної величини. На підставі представлених результатів вимірювань визначено значення параметрів, що характеризують освітленість розглянутої робочої зони. Для розподілу, показаного на малюнку 7б, значення параметра  $E_{av} = 869,7$  lx,  $E_{min} = 558$  lx і  $\delta = 0,642$ . У свою чергу, для розподілу з рисунка 7а значення цих параметрів становлять 429,2 lx, 289 lx і 0,673 відповідно. Як видно, вищу однорідність було отримано для прямого струму світлодіода 0,804 А.

На рисунку 3.2 показано вимірні розподіли освітленості модуля LED Ring XRE зі значенням прямого струму, що змінюється від 0,25 А до 0,66 А. Порівнюючи рівномірність освітленості для обох точкових джерел світла, можна зробити висновок, що модуль XRE досягає кращої рівномірності освітленості, яка при прямому струмі 0,25 А склала  $\delta = 0,752$ .

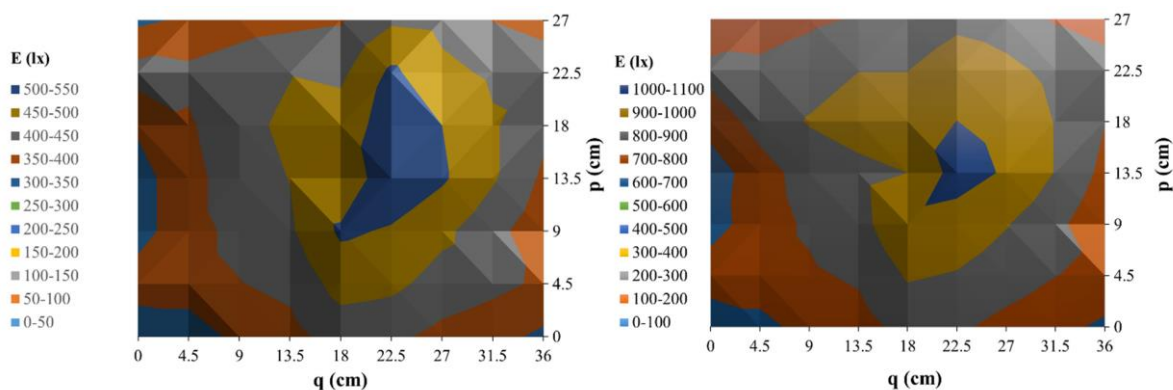


Рисунок 3.2 – Розподіл освітленості модуля Ring XRE для значення  $E_{zad}$ , що дорівнює 500 lx і 1 klx.

Можна побачити, що вимірний розподіл освітленості є більш рівномірним, отже, цей модуль освітлює робочу зону більш рівномірно, ніж світлодіод живлення XML2. Отримані значення  $\delta$  перевищували 0,7 визначені стандартом. Найбільш рівномірна освітленість ( $\delta = 0,778$ ) була отримана для  $E_{zad}$ , рівного 750 lx, виміряного люксометром Sonoran L-200, і прямого струму, що дорівнював 0,42 А. Модуль Ring XRE був найменш рівномірним ( $\delta = 0,752$ ), що освітлює робочу зону при прямому струмі модуля, що дорівнює 0,66 А, а екстремальними значеннями в цьому випадку були  $E_{max} = 1040$  lx і  $E_{min} = 633$  lx. Однак у випадку розподілу для значення  $E_{zad}$ , що дорівнює 500 lx, екстремальні значення освітленості були  $E_{max} = 536$  lx,  $E = 314$  lx. Кожне значення однорідності, отриманого за допомогою модуля Ring XRE, відповідає стандарту, оскільки перевищує 0,7.

У роботі були проведені експериментальні дослідження вимірювань характеристик світлорозподілу кількома довільно вибраними твердотільними джерелами світла. Сильний вплив прямого струму можна помітити в характеристиках розподілу точкових джерел світла, таких як потужні світлодіоди. На форму цих характеристик також впливає оптична вісь, на якій були виміряні просторові діаграми випромінювання.

У роботі використовуються два різних типи світлодіодів XML2 і XRE. Слід зазначити, що ці світлодіоди мають різні розміри, а також вони мають різні розміри лінз Ламберта.

У роботі згадується, що недоліки, що виникають в оптичних системах твердотільних джерел світла, які також впливають на нерівномірний розподіл інтенсивності випромінюваного світла, мають великий вплив на отриманий світловий потік. Ці недоліки проявляються забрудненням оптичних систем і мікротріщинами, які не видно, але мають великий вплив на отримане фотометричне тверде тіло.

### 3.2 Дослідження системи із замкнутим контуром зворотного зв'язку

У таблиці 3.1 наведені виміряні та розрахункові значення електричних і оптичних параметрів для обох точкових джерел світла при визначенні розподілів інтенсивності освітлення, графіки яких наведені на рисунках 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 - Робочі параметри точкових джерел світла.

LED	XML-B2		Ring XRE Module		
$E_{zad}$ (lx)	500	1000	500	750	1000
$I$ (A)	0.804	1.875	0.25	0.42	0.66
$E_{gr}$ (lx)	429.2	869.7	417.7	670.1	829.1
$E_{min}$ (lx)	289	558	314	521	633
$\delta$	0.673	0.642	0.763	0.778	0.752

На рисунку 3.3 показаний вид вимірювальної установки. Його компонентами є осцилограф GW INSTRON типу GDS2104A (GW INSTRON, Новий Тайбей, Тайвань), який використовувався для реєстрації сигналів напруги та струму за допомогою пробників напруги та пробник струму ТСПА300 Tektronix.



Рисунок 3.3 – Вигляд вимірювальної установки.

Виконані тести динамічних параметрів стосувалися осцилографа напруги VGS між затвором і витоком транзистора IRF540, струму стоку ID цього транзистора і напруги VOUT на виході датчика TEMT6000. Випробування проводилися для обох розглянутих точкових джерел світла. Регулювалися значення зовнішньої освітленості Ezew і заданої точки освітленості Ezad джерела світла. Модуль зовнішнього освітлення прототипу стенду був побудований з використанням чотирьох паралельно з'єднаних світлодіодних модулів типу XRGBWT-N1-ССКР-АFHE5KE40. Кожен із цих світлодіодних модулів містить 16 послідовно підключених світлодіодів і встановлений на загальній підкладці МСРСВ (друкована плата з металевим сердечником) розміром 22,2 x 5 см. Ці модулі були побудовані компанією Fideltronik Poland, і надалі їх називатимуть модулями АГН. Використовуючи два резистори номіналами R4 = 10 Вт і R5 = 20 Вт відповідно, можна було ступінчасто регулювати значення інтенсивності зовнішнього освітлення Ezew зі значеннями 200 lx і 100 lx відповідно. Вимкнувши джерело живлення, також можна отримати значення зовнішнього освітлення Ezew рівне 0.

На рисунку 3.4 показана схема і розміри зовнішнього джерела освітлення.

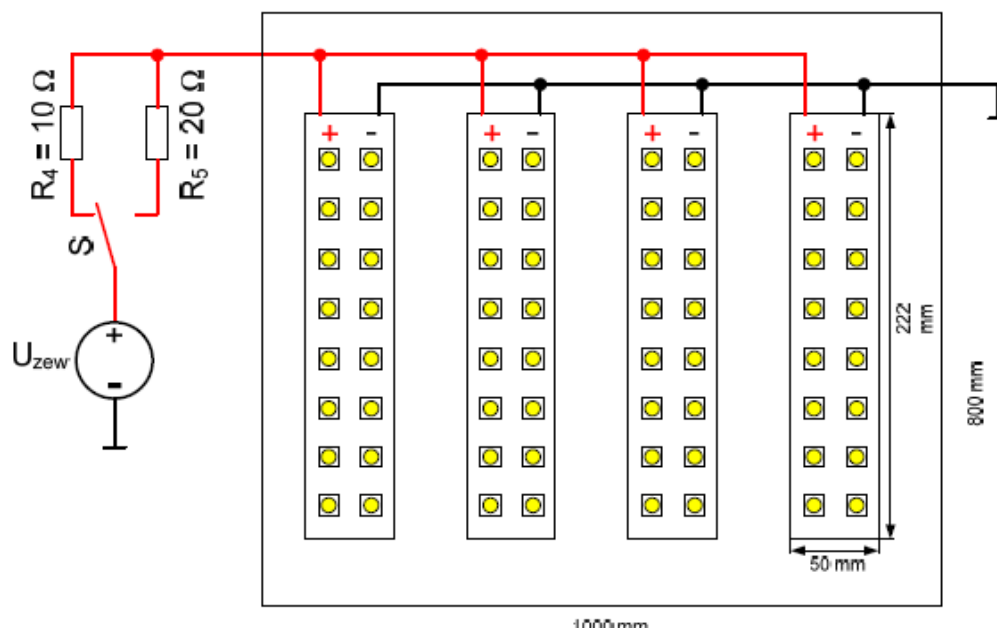


Рисунок 3.4 - Схема і розміри стельового модульного джерела освітлення

На малюнку 3.5 показані вимірні форми напруги VGS транзистора (жовтий), напруги VOUT на виході датчика TEMT6000 (рожевий) і ID струму стоку транзистора (синій) для прикладеного джерела прожектора — діодів XML-B2. , відповідно, для значення зовнішньої освітленості Ezew, що дорівнює 200 lx (рис. 11а), 100 lx (рис. 11б) і 0 (рис. 11в) відповідно. Форма хвилі струму стоку близька до прямокутної форми із шпаруватістю d, яка залежить від рівня керування затвором транзистора, що використовується в схемі прототипу. Аналізуючи наступні осцилограми та значення, зібрані в таблиці 4, можна побачити, що зі збільшенням інтенсивності зовнішнього освітлення робочий цикл d зменшується, а середньоквадратичне значення струму на точковому джерелі світла зменшується. З іншого боку,

середньоквадратичне значення напруги на фотодетекторі змінюється дуже мало.

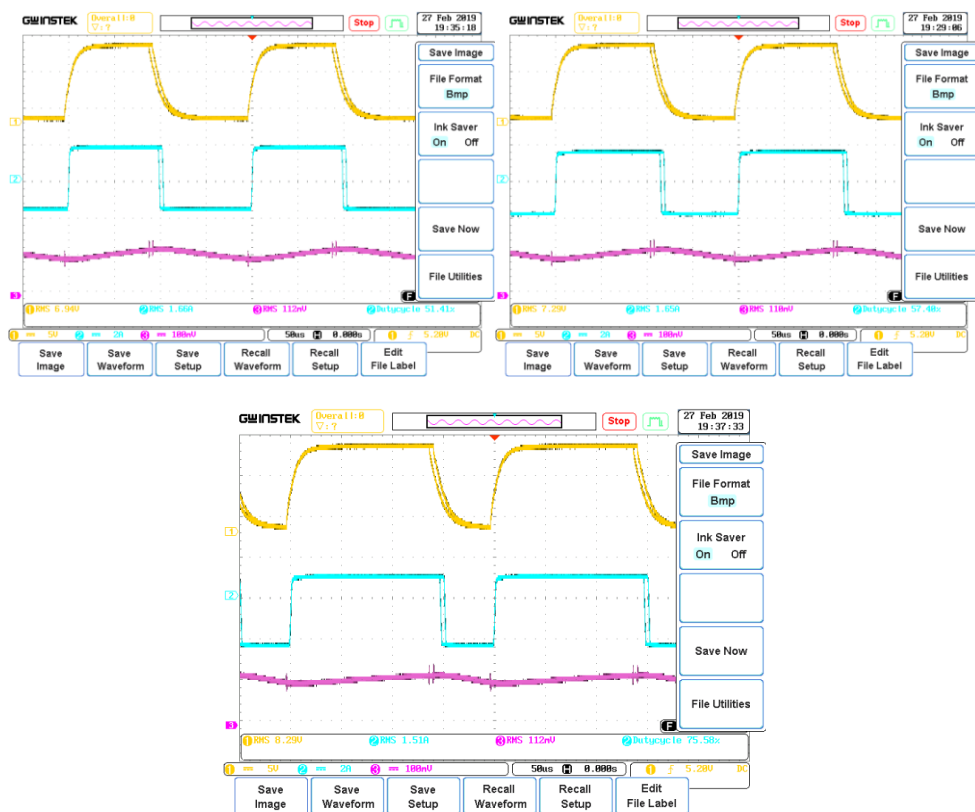


Рисунок 3.5 - Осцилограми напруги VGS, струму стоку ID, напруги датчика E1 системи з XML2 світлодіод живлення при  $E_{zew} = 200 \text{ lx}$  (а),  $E_{zew} = 100 \text{ lx}$  (б) і  $E_{zew} = 0$  (с).

Таблиця 3.2 - Значення електричних та оптичних параметрів для вибраних значень зовнішньої освітленості для системи зі світлодіодом живлення XML2.

$E_{zad}$ (lx)	750		500		
$E_{zew}$ (lx)	0	100	200	100	200
$I_D$ (A)	2.54	1.99	1.7	0.978	0.719
$P_D$ (W)	8.79	6.29	5.19	2.86	1.97
$V_{OUT}$ (mV)	110	110	112	78.9	81.9
d (%)	75.58	57.4	49.38	65.53	47.58

На малюнку 3.6 показано форми сигналів напруги та струму в системі з модулем Ring XRE, із заданою освітленістю джерела  $E_{zad} = 750 \text{ lx}$  та зовнішньою освітленістю  $E_{zew}$ , що дорівнює  $200 \text{ lx}$  (а) або  $100 \text{ lx}$  (б) відповідно. Конвенція для визначення відповідних форм сигналу така ж, як на малюнку 3.5.

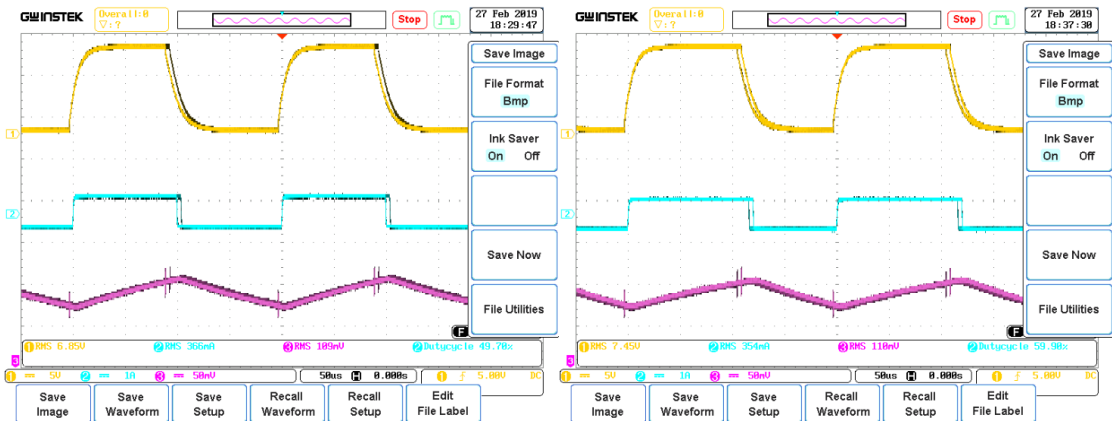


Рисунок 3.6 - Осцилограми напруги VGS, струму стоку ID, напруги датчика E1 системи з модулем Ring XRE при  $E_{zew} = 200 \text{ lx}$  (а) і  $E_{zew} = 100 \text{ lx}$  (б).

У цьому випадку система поводить себе так само, як система зі світлодіодом живлення XML2. Збільшення зовнішньої освітленості відбувається так само, як зменшення значення шпаруватості  $d$  керуючого сигналу та зменшення середньоквадратичного значення струму, що протікає через модуль Ring XRE. З іншого боку, середньоквадратичне значення напруги на фотоприймачі змінюється несуттєво. Значення отриманих електричних та оптичних параметрів досліджуваної системи наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Значення електричних і оптичних параметрів для вибраних значень зовнішньої освітленості для в системі з модулем Ring XRE.

$E_{zad}$ (lx)	750		500	
$E_{zew}$ (lx)	100	200	100	200
$I_D$ (A)	0.48	0.372	0.22	0.171
$P_D$ (W)	9.37	5.63	3.53	2.56
$V_{OUT}$ (mV)	109	110	82.7	82.6
d (%)	59.9	49.7	68.26	48.93

При аналізі роботи системи керування для різних заданих значень освітленості  $E_{zad}$  для обох точкових джерел світла, видно, що система керування для нижчого значення  $E_{zad}$  характеризується більш високою точністю налаштування. Про це свідчить отримана більша різниця в шпаруватості сигналу керування при однаковій зміні значення зовнішньої освітленості.

Порівнюючи два перевірені точкових джерела світла, можна зробити висновок, що у випадку модуля Ring XRE ми отримуємо нижче значення прямого струму, ніж у випадку світлодіода живлення XML2, для якого нам потрібно трохи більше значення робочого циклу керуючого сигналу для отримання однакового значення освітленості при однаковому зовнішньому  $E_{zew}$ .

Важливу роль в системі управління відіграє його динаміка, а точніше швидкість роботи алгоритму, тобто час, за який система повертається до заданого значення після зміни інтенсивності зовнішнього освітлення. Для модуля Ring XRE було виконано два тести. У першому випадку задане значення освітленості  $E_{zad}$  системи керування становило 500 lx. Зовнішнє освітлення в початковий момент приймало значення рівне 200 lx. Під час випробування значення послідовного опору було змінено з 10 Вт на 20 Вт, що призвело до зміни значення зовнішньої освітленості  $E_{zew}$ . Час адаптації системи до такої зміни становив 0,36 с, що ілюструється осцилограммами, представленими на рисунку 3.7.

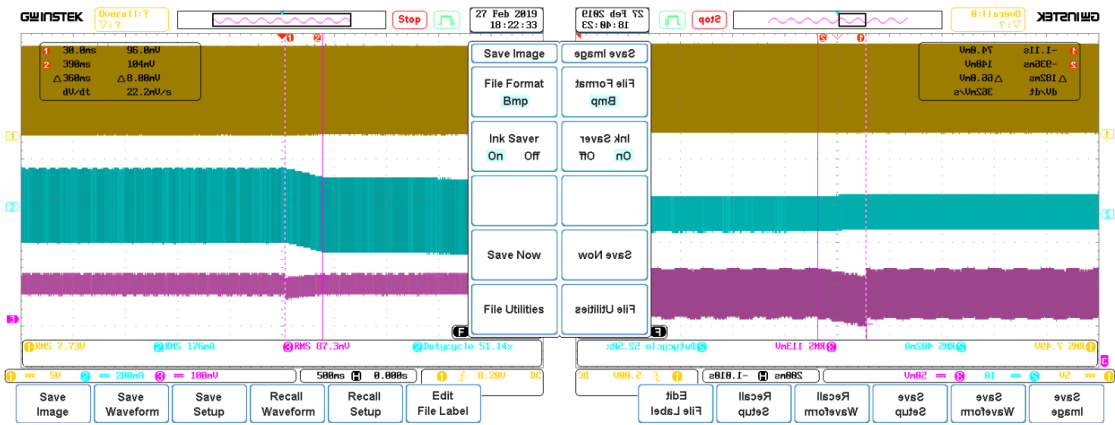


Рисунок 13. Тестування динаміки системи керування з модулем Ring XRE при  $E_{zad} = 500$  lx та  $E_{zew} = 200$  lx (a)  $E_{zad} = 750$  lx та  $E_{zew} = 200$  lx (б).

Інший тестовий приклад охоплював таку саму зміну зовнішньої освітленості, але встановлене значення в системі відрізнялося від 750 lx. Час роботи алгоритму становив 0,182 с, а форми сигналів для цього випадку показані на малюнку 13б.

Далі були проведені випробування з використанням світлодіода XML-B2 як точкового джерела світла. Було проведено три випробування для зміни зовнішньої освітленості від 200 lx до 100 lx при  $E_{zad} = 500$  lx, від 200 lx до 100 lx при  $E_{zad} = 750$  lx і від 200 lx до 0 при  $E_{zad} = 750$  lx.

Аналізуючи таблицю 3.4, можна побачити, що чим більша різниця в робочому циклі між двома станами, тим довший час адаптації системи керування. Це є результатом вищезгаданого недоліку ітераційних алгоритмів. Однак, як видно, жоден час не перевищує навіть однієї секунди, тому його можна вважати майже непомітним, і в той же час зміна плавна і не викликає мерехтіння світла.

Таблиця 3.4. Час реакції системи керування для різних випадків.

	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4		Case 5	
Point Light Source	Ring XRE Module		Ring XRE Module		XML-B2 LED		XML-B2 LED		XML-B2 LED	
$E_{zad}$ (lx)	500		750		500		750		750	
$E_{zew}$ (lx)	200	100	200	100	200	100	200	100	200	0
$d$ (%)	48.93	68.26	49.7	59.9	47.58	65.63	49.38	57.4	51.41	75.58
time to adjust the system (s)	0.36		0.182		0.505		0.215		0.675	

Аналізуючи результати розрахунків електричної потужності, споживаної точковим джерелом світла, наведені в табл. 4 (XML2) і в табл. У світлодіодних панелях (рисунок 3.4) зменшується потужність, споживана точковими джерелами світла. Це зменшення потужності впливає на обидва точкові джерела світла. Спостережене зниження споживання електроенергії призводить до довгострокової економії енергії за рахунок використання запропонованої авторами системи керування.

## ВИСНОВКИ

У роботі представлено вбудовану систему автоматичного керування освітленням офісної станції з точковим джерелом світла та системою керування, яка має мікроконтролер з архітектурою ARM (Advanced Risc Machine). Проводячи експериментальні дослідження системи-прототипу, було доведено, що вона працює відповідно до попередніх припущень.

Правильна робота системи полягає в підтримці заданого значення освітленості шляхом автоматичного регулювання струму, що живить точкове джерело світла. Користувач може контролювати встановлене значення освітленості, і система здатна підтримувати кожне зі значень, зазначених у вищезгаданих стандартах. Однорідність, яка відповідає вимогам стандартів, не була досягнута зі світлодіодом XML-B2. Охарактеризовано рівномірність  $\sigma = 0,673$  для робочої зони, яка не перевищує порогу 0,7, а використання модуля Ring XRE забезпечило значення однорідності, що відповідає стандартам.

Доведено, що система працює стабільно, мерехтіння освітлення та інші незручності, пов'язані з недостатнім освітленням робочої зони, відсутні. Цього вдалося досягти завдяки достатній точності контролю та правильному підбору алгоритму.

Такі рішення дозволяють скоротити витрати і є зручними для користувача. Завдяки гнучкості системи він пропонує можливість розвитку проекту, розширення його додатковими можливостями та додатками або використання більш складних рішень, таких як згадана вище плата розробки, адаптована до IoT. Це уможливить обчислення в хмарі або віддалений перегляд і зміни налаштувань. Це може мати багато переваг у просторах робочих місцях або для людей з обмеженою мобільністю. У такому випадку систему можна розширити новими функціями, такими як керування більшою кількістю точок освітлення, які можуть співпрацювати одна з одною, або розрахунок споживання електроенергії та відповідних витрат.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. PN-EN 12464-1:2022-01; Light and Lighting. Lighting of Workplaces, Part 1: Interior Workplaces. Official Journal of the European Union: Luxembourg, 2015.
2. Schubert, E.F. Light Emitting Diodes, 3rd ed.; Rensselaer Polytechnic Institute: Troy, NY, USA, 2018.
3. Lasance, C.J.M.; Poppe, A. Thermal Management for LED Applications; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2014.
4. Smith, W.J. Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems, 4th ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA, 2008.
5. Górecki, K.; Ptak, P. Modelling LED lamps with thermal phenomena taken into account. *Microelectron. Reliab.* 2017, 79, 440–447. [CrossRef]
6. Winder, S. Power Supplies for LED Driving, 2nd ed.; Elsevier BV: Aalborg, Denmark, 2017.
7. Ptak, P.; Górecki, K.; Wnuczko, S. Embedded system to control lighting of the office workplace. *Przegląd Elektrotechniczny* 2018, 94, 76–79.
8. Afshari, S.; Mishra, S. A Plug-and-Play realization of decentralized feedback control for smart lighting systems. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2016, 24, 1317–1327. [CrossRef]
9. Chew, I.; Kalavally, V.; Pin Tan, C.; Parkkinen, J. A Spectrally tunable smart LED lighting system with closed-loop control. *IEEE Sens. J.* 2016, 16, 4452–4459. [CrossRef]
10. Fleck, J.L.; Cassandras, C.G.; Geng, Y. Adaptive quasi-dynamic traffic light control. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 2016, 24, 830–842. [CrossRef]
11. Nam, T.P.; Van Doai, N. Application of intelligent lighting control for street lighting system. In Proceedings of the International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Dong Hoi, Vietnam, 20–21 July 2019; pp. 53–56.

12. Hsia, S.C.; Sheu, M.H.; Ciou, J.J. Cost-effective LED dimming driver with single chip design for smart lighting system. *IEEE Access* 2020, 8, 141025–141032. [CrossRef]
13. Boscarino, G.; Moallem, M. Daylighting control and simulation for LED-based energy-efficient lighting systems. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2016, 12, 301–309. [CrossRef]
14. Pandharipande, A.; Caicedo, D.; Wang, X. Sensor-driven wireless lighting control: System solutions and services for intelligent buildings. *IEEE Sens. J.* 2014, 14, 4207–4215. [CrossRef]
15. Apostolidou, N.; Valsamas, F.; Baros, D.; Loupis, M.; Dasteridis, V.; Kokkinis, C. Innovative Energy-recovery unit for the LED-lighting system of heavy-duty vehicles. *Clean Technol.* 2021, 3, 581–593. [CrossRef]
16. Qin, L.; Pena-Garcia, A.; Leon, A.S.; Yu, J.C. Comparative study of Energy savings for various control strategies in the tunnel lighting system. *Appl. Sci.* 2021, 11, 6372. [CrossRef]
17. Plorer, D.; Hammes, S.; Hauer, M.; Van Karsbergen, V.; Pfluger, R. Control strategies for daylight and artificial lighting in office buildings—a bibliometrically assisted review. *Energies* 2021, 14, 3852. [CrossRef]
18. Haus, J. *Optical Sensors. Basics and Applications*; Wiley-VCH Verlag: Weinheim, Germany, 2010.
19. Ptak, P.; Górecki, K.; Gensikowski, M. Comparison of dynamic properties of the selected photometric sensors. *Przegląd Elektrotechniczny* 2020, 96, 110–114.
20. Deng-feng, L.; Yun-ting, B.; He, W.; Hu, L. Design of intelligent lighting control system. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems*, Kunming, China, 20–23 March 2011; pp. 134–137.
21. Chiradeja, P.; Yoomak, S.; Ngaopitakkul, A. Economic analysis of improving the Energy efficiency of nanogrid solar road lighting using adaptive lighting control. *IEEE Access* 2020, 8, 202623–202638. [CrossRef]

22. Shahzad, G.; Yang, H.; Ahmad, A.W.; Lee, C. Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control. *IEEE Sens. J.* 2016, 16, 5397–5405. [CrossRef]
23. Jiang, J.; Mohagheghi, A.; Moallem, M. Energy-efficient supplemental LED lighting control for a proof-of-concept greenhouse system. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020, 67, 3033–3042. [CrossRef].