

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Розробка системи керування енергоефективним освітленням
теплиць

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТс-41
спеціальнос
ті 141

електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Ковтонюк М.А.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Філюк Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Габрусєв Г.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 23 » січня 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Ковтонюку Максиму Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи керування енергоефективним освітленням теплиць

Керівник роботи ... Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н.

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

Затверджені наказом ректора від « 22 » Січня 2024 року № 4/7-47

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи Проаналізувати існуючі системи освітлення на базі світлодіодів

Розробити системи керування для енергоефективного світлодіодного освітлення в тепличних умовах

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 23 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	30.01.2024	
2	Аналітичний розділ	26.02.2024	
3	Проектно-конструкторський розділ	29.03.2024	
4	Розрахунковий розділ	22.04.2024	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	13.05.2024	
6	Висновки	31.05.2024	
7	Оформлення пояснювальної записки	07.06.2024	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2024	

Студент

(підпис)

Ковтонюк М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2024.

Стор.58; рис.21 ; табл.5 ; джерел 14; додатків –.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка системи керування енергоефективним освітленням теплиць».

Мета кваліфікаційної роботи є розробка та впровадження системи керування зі зворотним зв'язком для енергоефективної світлодіодної системи освітлення в тепличних умовах.

Запропонована система керування була розроблена та впроваджена в чотири етапи. Спочатку було визначено модель освітлення для червоного та синього світла окремо, щоб забезпечити рівномірний розподіл світла під куполами рослин. Потім за допомогою середовища MATLAB/Simulink було побудовано модель денного освітлення. Продуктивність системи була оцінена в системі підтвердження концепції за допомогою серії симуляцій для перевірки ефективності керування.

Ключові слова: світлодіодне освітлення, управління освітленням, енергоефективність.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Система освітлення в теплицях	8
1.2 Вимога до світла для росту рослин	9
1.3 Вплив світла з контролем змішування кольорів на ріст рослин і продуктивність сільськогосподарських культур	11
1.3 Стратегія та пристрої для керування освітленням	13
1.3 Висновки до розділу	18
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Аналіз світлодіодної системи для теплиці	19
2.2 Розробка та впровадження системи управління освітленням з пропорцією змішування червоного із синім і регулюванням денного світла	21
2.2.1 Збір та обробка даних системи управління	23
2.2.2 Послідовний зв'язок зі світлодіодними панелями	24
2.3 Алгоритм керування системою управління освітленням	25
2.4 Моделювання та експериментальні результати системи управління освітленням	29
2.5 Висновки до розділу	34
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	35
3.1 Моделювання системи освітлення та керування зворотнім зв'язком	35
3.2 Впровадження системи та експериментальні результати	39
3.3 Ідентифікація розробленої моделі керування	42
3.4 Результати моделювання	46
3.5 Висновки до розділу	50
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	51
4.1. Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж	51

4.2. Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	57

ВСТУП

Актуальність роботи. Безперервний розвиток технології освітлення на основі світлодіодів (LED) протягом останніх десятиліть дозволив знизити собівартість виробництва, підвищити енергоефективність і збільшити термін експлуатації. При розробці світлодіодного освітлення виникають нові виклики, які вимагають нових стратегій управління, орієнтованих на різні умови навколишнього середовища.

У звичайних сценаріях освітлення світлодіодні світильники встановлюються в декількох місцях, щоб розподілити належну інтенсивність світла залежно від вимог об'єкта освітлення. В офісних і житлових приміщеннях комфорт людських очей враховується разом з освітлювачем для регулювання освітленості таким чином, щоб досягти оптимальної продуктивності та енергоефективності. Ці системи здебільшого працюють з урахуванням зайнятості простору і денного світла як перешкод, мінімізуючи при цьому енергоспоживання.

Іншим сценарієм застосування є система додаткового освітлення в теплицях, яка забезпечує додаткове світло для росту рослин і продуктивності врожаю. Завдяки використанню набору різних критеріїв освітлення, додаткове світло для росту адаптується до досягнення цільової кількості фотосинтетичних фотонів, необхідних для росту рослин. Світлодіодне освітлення, що складається з поєднання кольорових світлодіодів і програмованого регулювання яскравості та спектрального контролю, може запропонувати значні переваги у додатковому освітленні в садівництві, такі як масове виробництво, якість рослин та енергоефективність.

Дослідження та розробка стратегій керування світлодіодними освітлювальними приладами були темою для обговорення протягом багатьох років. Хоча існують пропозиції щодо методів досягнення деяких бажаних цілей управління, ці пропозиції обмежуються середовищем житлових і комерційних будівель, зосереджуючись на факторах, пов'язаних з людиною. Тоді як лише невелика кількість запропонованих методів контролю застосовується до сценарію вирощування сільськогосподарських культур у закритому ґрунті, і всі вони не враховують енергозбереження. Останній аспект мотивував подальші дослідження

систем керування освітленням для росту рослин у тепличних умовах, що є предметом цієї роботи.

Мета роботи є розробка та впровадження системи керування зі зворотним зв'язком для енергоефективної світлодіодної системи освітлення в тепличних умовах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Провести аналіз впливу світла з контролем змішування кольорів на ріст рослин і продуктивність сільськогосподарських культур.
- Розробити енергоефективну систему управління, яка здатна досягти оптимальних умов освітлення для росту рослин в теплиці
- Провести симуляційні перевірки ефективності керування запропонованою системою.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Система освітлення в теплицях

Спираючись на попередній досвід, дослідницька робота в цій дисертації полягає в розробці нової інтелектуальної системи додаткового освітлення для теплиць. Зокрема, фотосинтетично активна радіація (ФАР) є ключовим процесом у рості рослин та продуктивності сільськогосподарських культур. Протягом зимового та осіннього сезонів добова кількість (ФАР) від сонячного світла, яку також називають добовим інтервалом світла (ДІС), набагато менша за мінімум, необхідний для росту рослин. У тепличному господарстві світлодіодні світильники для вирощування були визнані потенційною заміною традиційного додаткового освітлення, такого як система розрядного освітлення високої інтенсивності (HID). Світлодіоди мають такі помітні особливості, як висока ефективність перетворення енергії в світло, гнучкість у регулюванні інтенсивності світла, спектральний розподіл і тривалий термін служби. Однак їх використання в додатковому освітленні теплиць все ще знаходиться в зародковому стані, і потрібні подальші інноваційні продукти, щоб повною мірою скористатися їхніми можливостями, щоб зробити їх економічно життєздатними.

Використовуючи інтелектуальні датчики, які фізично розкидані в навколишньому середовищі, отримана розподілена система дозволить отримувати точну інформацію в режимі реального часу про змінні навколишнього середовища в багатьох точках всередині теплиці. Ця інформація збирається та використовується запропонованим нами контролером. Контролер може виконувати наступні функції, які інакше були б неможливі при використанні звичайних систем автоматизації теплиць:

- Недороге вимірювання кліматичних змінних навколишнього середовища, включаючи інтенсивність фотосинтетичного світла, температуру, відносну вологість і вуглекислий газ.
- Контроль додаткового освітлення (і затінення) для досягнення послідовного інтегралу добового освітлення для максимізації активності фотосинтезу з мінімальним споживанням енергії.

- Впровадження стратегій, заснованих на непікових тарифах на електроенергію, вартості енергії та вуглецевому сліді.
- Підвищення продуктивності сільськогосподарських культур за рахунок використання можливості селективності спектру світлодіодної технології.
- Забезпечення системи моніторингу даних про навколишнє середовище, яка може повідомляти операторам про стан і стан теплиці в режимі реального часу та попереджати їх про можливі несправності та небезпеку

Інші можливі переваги використання світлодіодних світильників з вибором спектру та інтенсивності включають можливість збільшення грошової вартості врожаю за рахунок покращення якості, такої як смак, колір, форма листя та кількість щоденного споживання світла за допомогою інтелектуального зондування та керування.

Сучасні традиційні системи керування освітленням на ринку не мають функціональних можливостей для підвищення енергоефективності в умовах тепличного господарства. Однак останніми роками спостерігається поштовх до розробки світлодіодних систем освітлення для тепличної галузі, оскільки світлодіодні технології стали доступнішими. Інновація включає в себе стратегії управління зворотним зв'язком і сенсорне обладнання, спрямоване на оптимізацію енергоефективності та ефективності фотосинтезу для досягнення більш високої продуктивності установок.

1.2 Вимога до світла для росту рослин

Люмен, одиниця вимірювання, заснована на кількості сприйманого світла, широко використовується як еталонний вхід для освітлювальних приладів у житлових і комерційних будівлях. Хоча ця одиниця виміру корисна в цих середовищах, вона не корисна в тепличних умовах, оскільки чутливість до світла відрізняється у людей і рослин.

Фотосинтетично активна радіація (ФАР) визначає спектральний діапазон, в якому фотосинтезуючі організми піддаються фотосинтезу. Цей діапазон становить від 400 до 700 нанометрів сонячної радіації. У процесі фотосинтезу різні довжини хвиль світла показують різну ефективність використання. Червоне світло (600-700

нм), а також синє світло (400-500 нм) представляє основні частини; Тоді як зелене світло набагато менше поглинається рослинами, відбиваючись у зеленому кольорі листя, які зазвичай можна побачити [1].

Фотосинтетичний фотонний потік (ФФП) — це одиниця вимірювання, яка використовується для опису загальної кількості фотонів ФАР, випромінюваних системою освітлення. Враховуючи, що ріст рослин залежить від активності фотосинтезу, кількість ФФП, яка досягає поверхні рослинного покриву, а також тривалість, протягом якої він доступний, є важливим вимірюванням. Ми називаємо цю величину щільністю фотосинтетичного фотонного потоку (ЩФФП), яка вимірюється в мікромолях на квадратний метр в секунду, $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. У зв'язку з перепадами світлового дня ЩФФП на рівні рослинного покриву змінюється. Для представлення загального впливу ППФД, отриманого протягом 24 годин, можна використовувати добовий інтеграл світла (ДІС), який виражається як $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$.

В даний час найбільш поширений метод, який використовується для росту рослин в тепличних умовах, вимагає використання додаткового освітлення, яке збільшує ДІС за рахунок подовження тривалості і посилення ЩФФП протягом зимового та осіннього сезонів. У великомасштабних закритих приміщеннях і теплицях в основному використовуються системи високоінтенсивного газорозрядного (HID) освітлення, такі як натрієві (HPS) і легкі та металогалогенні (НМ). Однією з характеристик HPS є те, що велика частина випромінюваного світлового випромінювання знаходиться на дальньому кінці світлової хвилі, яка виробляє високу температуру, що робить її енергонеефективною системою. Загалом, системи HID-освітлення генерують велику кількість відпрацьованого тепла та мають низький коефіцієнт перетворення електроенергії в світло. Більш того, через надлишок відпрацьованого тепла зазвичай потрібні вентилятори для усунення надлишкового тепла, збільшуючи споживання енергії. Однак у деяких випадках додаткове виділення тепла може бути корисним для прогріву теплиць під час холодних погодних умов. Отже, опалювальні системи, що використовуються в теплицях для підтримки оптимальних температурних діапазонів, працюють з кращою енергоефективністю. Таким чином, не потрібно використовувати надлишок тепла, що виділяється джерелами освітлення.

Для порівняння, світлодіоди є більш енергоефективними і показали 30% економії електроенергії в порівнянні зі звичайними системами освітлення в теплицях і в приміщенні [2] [3] [4]. Викиди відпрацьованого тепла від світлодіодів відносно низькі, а потреба в додатковому охолодженні зменшується. В результаті в тепличних умовах знижується занепокоєння з приводу оптимального підтримання температури.

1.3 Вплив світла з контролем змішування кольорів на ріст рослин і продуктивність сільськогосподарських культур

Спектральна якість світла джерела світла відіграє вирішальну роль у процесі фотосинтезу. Відповідно до кривої чутливості рослин, також відомої як крива Мак-Крі, спектр світла на різних довжинах хвиль керує фотосинтезом по-різному. У червоному і синьому спектрі світло легше поглинається під час фотосинтезу, ніж у зеленому; вплив на процес розвитку росту рослин [5].

Червоне або далеке червоне світло поглинається для перетворення фітохрому з однієї форми в іншу, безпосередньо стимулюючи такі процеси, як цвітіння, подовження стебла, розгортання листя та утворення хлорофілу. Крім того, реакція уникнення тіні, що визначається як активація до подовження гіпокотилу і спроба стебла випередити навколишні рослини, викликається червоною і далеко-червоною фотоморфогенною реакцією [6].

Криптохромі та фототропіни, білки-фоторецептори, які мають активний вплив на різні аспекти росту рослин, високо реагують на синє світло [6]. Як правило, певні рівні синього світла можуть обмежувати висоту рослин, що може принести користь рослинам з точки зору виробництва плодів. Подібно до використання червоного та далекого червоного світла, поєднання синього та ближнього ультрафіолетового світла відіграє необхідну роль у механізмі рослинництва; Зокрема, у контролі висоти стебла та площі листя, а також смаку плодів.

Хоча досі невідомі механізми впливу на ріст рослин; Широко проводилися дослідження впливу змішування кольірних співвідношень. Результати продемонстрували важливу кореляцію між спектральним розподілом,

інтенсивністю світла та іншими умовами навколишнього середовища. Ефективність корисних переваг, які приносять світлодіодні світильники, варіюється і залежить від конкретного виду та вимог до росту рослин.

Порівняння між світлодіодними світильниками та звичайними освітлювальними приладами, такими як освітлювальні прилади HPS та НМ, оцінюється на основі різних спектральних співвідношень, які зазвичай називають *рецептами світла*. У дослідженні, присвяченому впливу різних співвідношень кольорів червоного та синього кольорів, світлодіоди показали, що співвідношення 7:3 (червоний: синій) збільшує вміст води та свіжу вагу м'яоти перцевої; а також скорочує період цвітіння для кімнатних квітів. Для порівняння, менше покращень спостерігалось в середовищі білого світла [7]. На основі поставлених цільових параметрів врожайності та якості було проведено дослідження салату з метою порівняння різних співвідношень кольорів світла (9:1, 7:3, 5:5, світлодіод червоний: синій, білий світлодіод та світло HPS відповідно) з ідентичними кількостями ЩФФП при $200 \text{ нмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ та фотоперіодом 16 годин [8]. Результати показали, що салат, зібраний під червоним: синім світлом, показав найвищий вміст сухої маси та розчинного цукру порівняно з ним. Крім того, у дослідженні зазначається, що співвідношення червоного: синього, коли синє світло знаходиться на рівні 30% або вище, не збільшує результати. Це вказує на те, що для досягнення оптимального посилення росту рослин необхідно використовувати правильне співвідношення червоного та синього світла. Необхідно також зазначити, що кожен вид рослин фотосинтезує при різних рівнях насиченості світлом, і повинен бути адаптований для досягнення найвищої ефективності. Рівень насиченості світлом складається з конкретних співвідношень різнокольорових світлових виділень для фотосинтезуючої активної радіації, а також питомої кількості кумулятивного ЩФФП, що представляє оптимальну обробку світла. Це пов'язано з тим, що навіть при однаковому співвідношенні спектрального розподілу світлові обробки працюють по-різному при різних виходах ЩФФП.

У дослідженні впливу різних результатів ЩФФП рослини гороху були протестовані та порівняні на основі росту сільськогосподарських культур, врожайності та смаку. Усі методи лікування використовували фіксоване співвідношення 4:1 (червоний: синій) і відрізнялися за рівнями ЩФФП (0, 50, 80,

110 і 140 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) [9]. Результати свідчать про те, що обробка в діапазоні 110-140 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ підвищує загальну пружність і дає найбільшу врожайність, однак вона має найнижчий рівень соковитості. Для порівняння, обробка з використанням природного денного світла показує найнижчу стійкість стебла та врожайність, але найвищий рівень соковитості. На практиці бажаною метою буде рівень легкої насиченості, який збалансує смак і продуктивність сільськогосподарських культур, щоб задовольнити вимоги клієнтів і бути економічно ефективним.

1.3 Стратегія та пристрої для керування освітленням

В останні кілька десятиліть енергоефективність та поєднання інших міркувань, заснованих на використанні освітлення для досягнення оптимальної функціональності, широко обговорюються в різних стратегіях освітлення. З них найважливішим є енергоефективність. Інші фактори в основному залежать від вимог до конкретних об'єктів і в основному обговорюються в двох середовищах: середовищах, заснованих на комфорті людини, таких як офіси та житлові будинки, і середовищах, заснованих на зростанні рослин, таких як теплиці та закрите господарство.

Далі в офісному середовищі, в приміщенні та в тепличному середовищі впроваджуються програми керування з системою освітлення, орієнтованою на кілька досягнень, відповідно.

На рисунку 1.1 зображена структурна схема управління системою управління освітленням з двома режимами управління для енергозбереження і колірної настройки з урахуванням комфорту людини [10]. У цьому дослідженні будується карта транспорту світла на основі даних, зібраних з датчиків освітленості, і модель системи ідентифікується за допомогою рівнянь рослини:

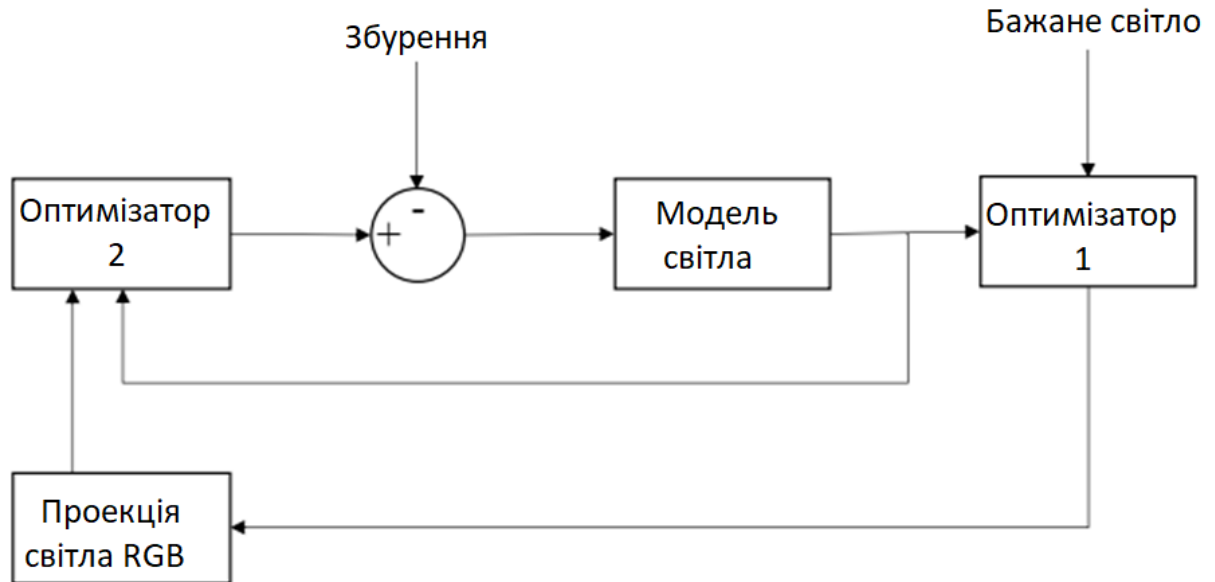


Рисунок 1.1: Система управління освітленням з двома режимами управління з урахуванням енергозбереження і колірної настройки світла [10].

$$\begin{cases} \phi = Pu + \psi \\ d = C\phi + v \end{cases} \quad (1.1)$$

де C представляє карту переносу світла, v представляє зашумлені дані, отримані від датчиків, d представляє показання датчиків, P представляє карту входу системи u , ψ - збурення, а ϕ - генерований світловий потік.

Для досягнення економії енергії метод на основі градієнта застосовується до функції витрат і моделей, які були побудовані за допомогою карти легкого транспорту, представлені вище. Задача оптимізації виражається у вигляді

$$\underset{u}{\text{minimize}} J(u) \quad (1.2)$$

де

$$J(u) = \alpha_L \|\phi_L^{des} - \phi_L^{meas}(u)\|_2^2 + \alpha_a \|\phi_a^{des} - \phi_a^{meas}(u)\|_2^2 + \alpha_b \|\phi_b^{des} - \phi_b^{meas}(u)\|_2^2 + \alpha_u \Gamma_u u \quad (1.3)$$

У рівнянні 1.11 бажане задане значення і вимірювання освітленості позначені як des і $meas$, а вага для кожного члена позначена як α . Отже, закон керування для k -го кроку часу виражається як

$$u_{k+1} = u_k + \varepsilon \cdot \left(\begin{bmatrix} \alpha_L^{1/2} \nabla_u (\phi_L^{des} - \phi_L^{meas}) \\ \alpha_a^{1/2} \nabla_u (\phi_a^{des} - \phi_a^{meas}) \\ \alpha_b^{1/2} \nabla_u (\phi_b^{des} - \phi_b^{meas}) \end{bmatrix}_k^\top \begin{bmatrix} \alpha_L^{1/2} (\phi_L^{des} - \phi_L^{meas}) \\ \alpha_a^{1/2} (\phi_a^{des} - \phi_a^{meas}) \\ \alpha_b^{1/2} (\phi_b^{des} - \phi_b^{meas}) \end{bmatrix}_k - \alpha_u \Gamma_u \right) \quad (1.4)$$

де ε та $\Delta u(-)$ - розмір кроку та градієнт відповідно.

У цьому контролі якість кольору від джерела світла враховується на додаток до споживання енергії. Для досягнення цієї мети застосовуються два оптимізатори, щоб отримати оптимальну точку з найвищою енергоефективністю та вхідними даними для необхідного затемнення світлодіодів для виконання бажаних умов освітлення. Оптимізаційна задача енергоефективності та якості світла задається формулою

$$\underset{\phi_x^*, \phi_u^*}{\text{minimize}} \mu_E(u) \quad (1.5)$$

за умови

$$\begin{aligned} (\phi_x^*, \phi_y^*, \phi_L^*) &\in \mathbb{S}, \\ \phi_L^* &= \phi_L^{des} \\ \underset{u}{\text{minimize}} \mu_Q(\phi^{des}, \phi^{meas}) \end{aligned} \quad (1.6)$$

при дотриманні $\phi^{meas} = Au + w$

де ϕ^{des} позначається як бажаний світловий стан проектованого вектора ϕ_x, ϕ_y, ϕ_L на колірний простір XYZ, розроблений Міжнародною комісією з освітлення (МКО). Результати цього дослідження показали енергозбереження до 20%. Однак головний недолік полягає в тому, що підвищення енергоефективності працює найкраще, коли не застосовується, що є нереалістичним. Незважаючи на те, що цей елемент керування надійний і світлоєфективний, все ще потрібні вдосконалення проблем, пов'язаних із підтриманням якості світла в задовільному діапазоні.

Виявлення присутності є одним з найбільш поширених методів управління освітленням, які застосовуються як ефективний спосіб економії на витратах на електроенергію [11], [12], [13]. Дослідження, яке формулює збирання та зайнятість денного світла в управлінні освітленням приміщень, показало, що було досягнуто 60% економії енергії [14]. Поняття системи управління показано на рис.1.2. Для

кожного окремого світильника освітленість на рівні робочого місця, що позначається як E , виражається наступним чином

$$E = \sum_{i=1}^K d_i \cdot l^i = \sum_{i=1}^K d_i \cdot \begin{bmatrix} l_{11}^i & \dots & l_{1n}^i \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1}^i & \dots & l_{mn}^i \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

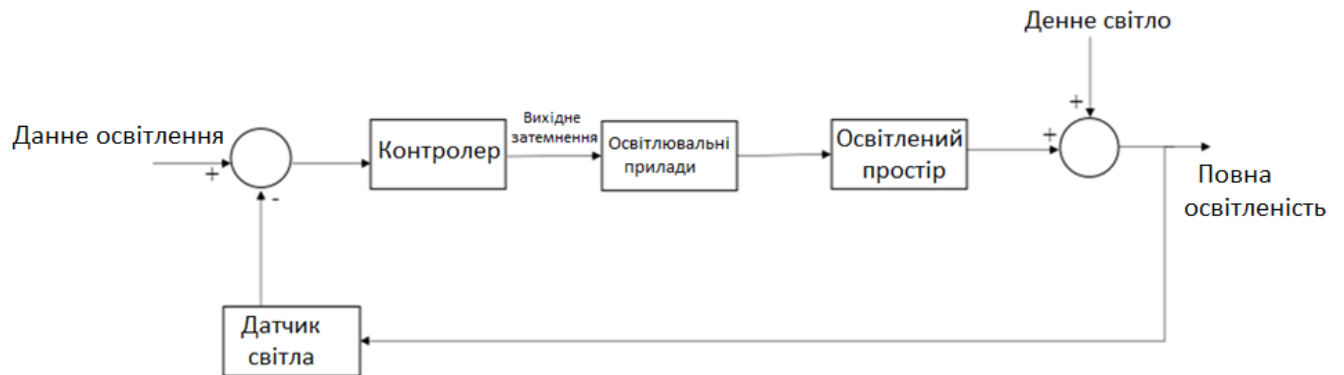


Рисунок 1.2: Система управління освітленням з двома режимами управління для енергозбереження і комфорту очей людини.

де d_i представляє рівень затемнення i -го світильника, а матриця l^i представляє підсумовування всього офісного простору, пов'язаного з K світильниками.

Занадто часте затемнення з міцністю може підвищити енергозбереження, але також спричинить дискомфорт. Таким чином, беручи до уваги толерантність і чутливість мешканця, застосовується певний індекс толерантності наступним чином

$$\begin{cases} Ld \leq T_0 + \varepsilon_{tol}, \\ Ld \geq T_0 - \varepsilon_{tol}, \end{cases} \quad \begin{bmatrix} L \\ -L \end{bmatrix} \cdot d \leq \begin{bmatrix} T_0 + \varepsilon_{tol} \\ -T_0 + \varepsilon_{tol} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

де T_0 - бажане значення освітленості, ε_{tol} - діапазон індексів, який допускає система, $DimLevel$ і $DimLevelmax$ обмежують діапазон затемнення фізичних освітлювальних приладів.

Перевага цього елемента керування при застосуванні в середовищі офісної робочої станції полягає в тому, що він дає можливість користувачам на кожному офісному столі налаштувати бажану світловіддачу. Однак показники енергоефективності визначаються конфігурацією користувача та умовами

заповнюваності. Наприклад, цей елемент керування не покаже видимої економії енергії, якщо всі робочі місця зайняті у звичайний робочий час, а бажаний світловий потік на кожному столі встановлено на повну яскравість. Дослідження, проведене в [15], використовує аналогічну технологію управління, але додає вимірювання значення освітленості денного світла для підвищення продуктивності балансу між енергоефективністю та користувацьким досвідом.

Крім стабільності світлового потоку, рівномірність розподілу освітленості є ще одним ключовим фактором, який безпосередньо впливає на комфорт людини. У комерційних будівлях і великих офісних приміщеннях часто вікна знаходяться з одного боку кімнати, що спричиняє незбалансований розподіл денного світла. Робота в [13] демонструє локалізований

$$\left| \frac{E(x, y, z; d) - L}{L} \right| \leq C_{th} \quad (1.9)$$

де контраст рівномірності визначається як C_{th} , для рівня освітленості L в діаграмі освітленості E . Розподіл освітленості вважається рівномірним, якщо значення освітленості E дорівнює або нижче значення контрастності рівномірності. З міркувань енергоефективності поряд з рівномірним розподілом застосовується виявлення заповнюваності, де до зайнятих і незайнятих зон застосовуються два різних правила візуалізації. Таким чином, обмеження в займаній зоні формулюється як

$$\left| \frac{E_T(x, y, z; d) - \bar{E}_{T,m}(d)}{\bar{E}_{T,m}(d)} \right| \leq C_{th} \quad (1.10)$$

а обмеження в незайнятій зоні формулюється як

$$E_T(x, y, z; d) \geq L_{min} \quad (1.11)$$

де $\bar{E}_{T,m}(d)$ - середній рівень освітленості при контрольованому затемненні d , L_{min} - мінімальне значення освітленості.

Для врахування як рівномірності відтвореної освітленості, так і енергоефективності, а також оптимальний вектор затемнення і відповідні обмежувачі формулюються наступним чином. Метод візуалізації освітленості для

вирівнювання розподілу світла за рахунок використання денного світла в займаній зоні. Однорідність визначається як

$$\min_d \sum_{m=1}^M (\alpha_m \eta P_{on} d_m + (1 - \alpha_m) U_m(\bar{E}_{T,m}(d), E_D, m))$$

$$s.t. \begin{cases} \left| \frac{E_T(x, y, z; d) - \bar{E}_{T,m}(d)}{\bar{E}_{T,m}(d)} \right| \leq C_{th} \\ E_T(x, y, z; d) \geq L_{min} \\ 0 \leq d_m \leq 1 \end{cases} \quad (1.12)$$

де α_m позначається як вагове значення балансу між рівнем енергоефективності та рівномірності, P_{on} - енергоспоживання світлодіода, d_m - рівень затемнення.

Результати рівномірності в умовах відсутності денного світла показують кращі показники, ніж результати в умовах денного світла. Спостерігаються відхилення фактичного рівня освітленості від бажаного заданого значення освітленості і знаходяться в межах допустимого діапазону [14].

1.3 Висновки до розділу

У першому розділі детально описано проблему, що стосується додаткового освітлення для росту рослин у теплицях, а також проаналізовано енергоефективність, рівномірність розподілу світла, а також кількість світла якого необхідно забезпечити для оптимальних умов продуктивності культур.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз світлодіодної системи для теплиці

Світлодіод (LED), як енергоефективне джерело світла, становив 65,2% від загального ринку світла в Україні. У порівнянні зі звичайними додатковими світильниками для вирощування, такими як натрій високого тиску (HPS) і галогенід металів (MD), світлодіод забезпечує збільшення економії енергії до 45% [3]. В результаті система управління освітленням різко розвивалася разом зі зростанням ринку світлодіодного світла та Інтернету речей в розумних додатках.

Останніми роками все більше уваги приділяється використанню переваг збирання денного світла в системі керування освітленням для скорочення споживання енергії. Багато досліджень довели, що це одне з корисних рішень для енергозбереження. Запропоновано стратегію керування з програмуванням нечіткої логіки, застосовану в системі внутрішнього освітлення для зниження енергоспоживання. Оцінили рівень освітленості денного світла на основі датчика, розташованого на стелі, щоб зменшити недостатнє освітлення та споживання енергії в робочому середовищі. Також була розроблена і розглянута нейромережева система управління освітленням, яка не потребувала моделі ідентифікації та інформації про збурення. Крім того, інші фактори, такі як комфорт людини, рівномірний розподіл світла, стабільність системи, доцільність експлуатації також були враховані в системі освітлення для різних середовищ. Усі стратегії спрямовані на досягнення вищої енергоефективності, більш рівномірної світловіддачі та кращого досвіду роботи з людьми в офісі чи житловому середовищі.

З іншого боку, світлодіоди також продемонстрували багато переваг у масовому виробництві, якості рослин та енергоефективності в садівництві, виходячи з попередніх досліджень. Експерименти, проведені різними вченими, показали, що серія світлових обробок зі специфічними пропорціями змішування світлодіодного червоного та синього світла значно скоротила час збирання врожаю та підвищила врожайність. Було проведено серію порівняльних тестів, щоб

визначити деякі з найбільш підходящих варіантів світла (специфічні світлодіодні співвідношення кольорів змішування) для ефективного покращення поживних якостей солодкого базилика та полуниці.

Однак досі обговорювалися обмежені дослідження системи управління освітленням при денному світлі, що застосовується в теплицях. Дочлідники застосовували ПД-керування до своєї запропонованої системи освітлення для досягнення бажаної щільності фотонного потоку (ЩФП) та коефіцієнтів змішування світлодіодних ламп із кількома діапазонами довжин хвиль. Оскільки їх система була розроблена для внутрішнього землеробства, денне світло не враховувалося. Схема планування освітлення і рухомих плафонів були об'єднані для підтримки інтенсивності світла в певному оптимальному діапазоні для досягнення умов росту. Він був здатний досягти певної міри енергозбереження, але не враховував рівномірний розподіл світла.

Незважаючи на те, що більшість міркувань були зосереджені на економії енергії та рівномірності освітлення, метою є те, що відрізняється в управлінні освітленням між теплицями та в офісних та житлових приміщеннях. Останній сценарій ставить людський комфорт у список пріоритетів. Але оскільки об'єктом є рослина на колишній ділянці, то освітлювальна система повинна забезпечувати стабільну світловіддачу і запланований фотоперіод для оптимізації виробництва врожаю. При цьому на різних стадіях росту різних рослин колірне співвідношення світла змінюється. В офісному середовищі дослідники використовують переваги контролю за професією, щоб зменшити споживання енергії.

Збирання денного світла, яке регулює рівень затемнення світлодіодних ламп росту на основі освітленості денного світла, виявленого датчиком світла, є ефективним способом заощадити на споживанні енергії. Денне світло також зазвичай вважається джерелом перешкод для керування освітленням системи, як правило, потрапляють у приміщення з одного боку вікна. Однак жодне з пов'язаних рішень не застосовується до тепличного середовища, оскільки ця проблема менш поширена в тепличних умовах.

Другою проблемою є ефект перехресного освітлення. У тепличному просторі немає перегородки для ізоляції джерел світла. Виходи яскравості різних джерел світла викликають ефект перехресного освітлення, що впливає один на одного

сильніше, ніж джерела світла в офісній зоні з частковою перегородкою. Таким чином, моделювання та ідентифікація систем освітлення в теплицях є більш складними. Оптимізація освітлення для вирощування рослин та енергоефективність є двома найважливішими проблемами, пов'язаними з системою освітлення в теплицях. Під час збирання денного світла важко підтримувати відносно рівномірний світловий потік при оптимізації енергоспоживання.

У цьому розділі ми вперше розглянули енергоефективність, скориставшись перевагами збирання врожаю при денному світлі. Денне світло також відіграє роль вхідного сигналу перешкод в алгоритмі управління зворотним зв'язком. По-друге, досягнення рівномірного розподілу світла враховується в системі управління шляхом встановлення декількох датчиків освітленості на випробувальному стенді. По-третє, беручи до уваги червоно-синє співвідношення змішування світла для росту рослин, запропонована система забезпечує бажане співвідношення червоно-синього змішування.

Організація цього розділу полягає в наступному. У розділі 2.2 була описана розробка програми. У розділі 2.3 було детально представлено реалізацію та ідентифікацію керуючої частини в системі. У розділі 2.4 представлені та обговорені імітаційно-експериментальні результати. Подальші вдосконалення та резюме були описані в розділі 2.5.

2.2 Розробка та впровадження системи управління освітленням з пропорцією змішування червоного із синім і регулюванням денного світла

Було побудовано тестове середовище для системи, налаштованої на експериментальному етапі. Як показано на системній схемі рис.2.1, намет для вирощування, встановлений у лабораторії, використовувався для ізоляції відволікаючих факторів освітлення зовні. Два блоки лампи були використані в системі як емулятор денного світла та підвішені на середній та верхній частині випробувального стенду. Світловіддача світла змінювалася контролером.

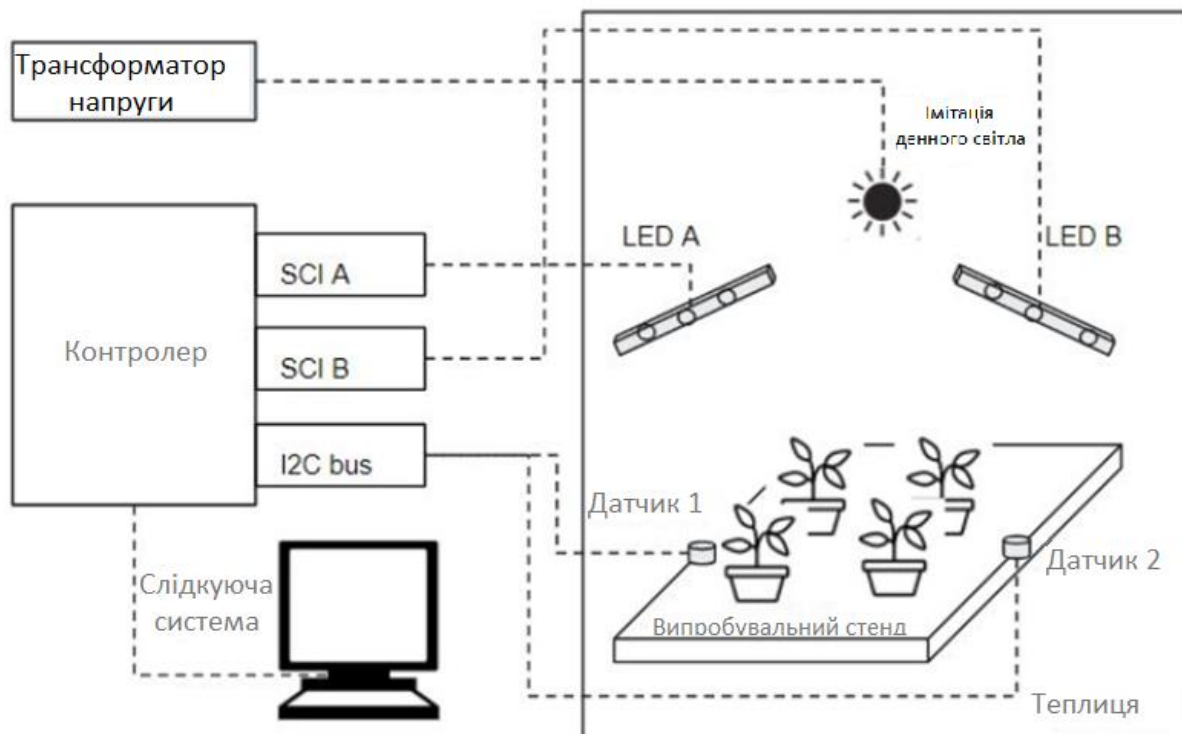


Рисунок 2.1: Схема установки системы освещения для роста растений.

Були розглянуті різні типи датчиків освітленості. Очікується, що ідеальний датчик освітленості, застосований у запропонованій системі, надаватиме серію даних про освітленість у різних діапазонах довжин хвиль, таких як червоне світло (620-750 *нм*) і синє світло (450-495 *нм*) для досягнення пропорцій змішування. Датчики освітленості широко використовуються в управлінні офісним освітленням. Вони дають *люкс* як одиницю вимірювання інтенсивності світла, засновану на сприйнятті людським оком, але не рослинними об'єктами. Тоді як квантовий датчик використовувався для вимірювання фотосинтетично активного випромінювання (ФАР, $\text{мкмоль м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) у теплицях. Оскільки квантовий датчик здатний давати загальне значення фотонів, відкаліброване лише на конкретних джерелах світла, таких як сонячне світло та люмінесцентні лампи, його все ще неможливо використовувати для вимірювання рівнів фотонів на різних довжинах колірних хвиль. Тому ми вирішили використовувати в запропонованій системі датчик освітленості RGB для вимірювання освітленості на червоних і синіх довжинах хвиль.

Світлодіодні блоки є контрольованою мішенню в запропонованій системі. Інтерфейс програми ІП передбачалося розробити для універсального послідовного зв'язку. Для експериментів на випробувальному стенді в наметі було встановлено

два блоки програмованих червоних і синіх світлодіодних світильників. В якості центрального контролера для запропонованої системи управління експлуатувався потужний мікроконтролер F28335

2.2.1 Збір та обробка даних системи управління

У запропонованому застосуванні датчики освітленості (TCS3472, TAOS Inc.) були здатні вловлювати світлове випромінювання трьома різними кольірними каналами (червоним, зеленим і синім) і передавати дані через зв'язок I2C. Оскільки всі датчики освітленості ідентичні, вони мають однакову адресу I2C і не змінюють адресу. Ми не можемо безпосередньо підключити кілька однакових датчиків освітленості на шинній лінії I2C. Для вирішення цієї проблеми в запропонованій системі був застосований мультиплексор (TCA9548A). Як показано на рис.2.2, всі датчики освітленості RGB були підключені до різних каналів мультиплексора, а потім спрацьовували для відправки даних по порядку. Затримка перемикання була дуже короткою і мінімально впливала на продуктивність системи.

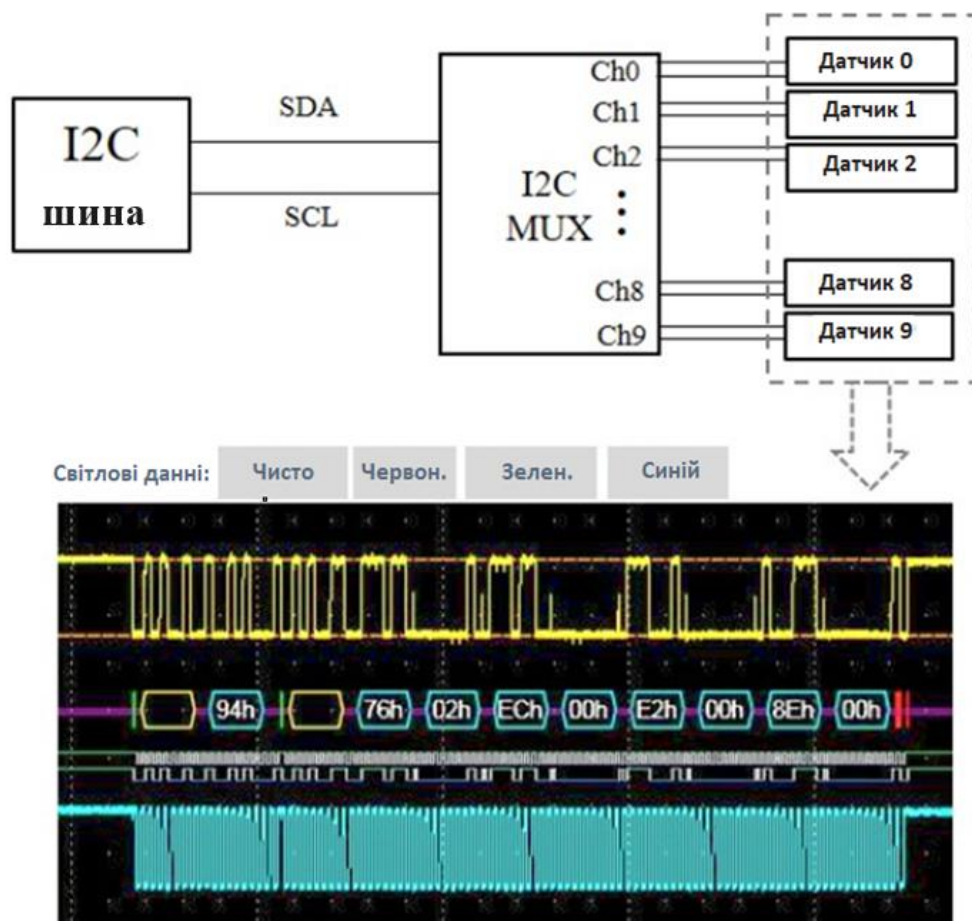


Рисунок 2.2: Збір даних та знімок екрану сигналу датчиків освітленості I2C.

Система ініціалізувала мультиплексор для скидання та ввімкнення його. Потім система ініціалізувала датчик I2C на першому каналі і почала посилати команду зчитування для зчитування даних. Безперервно датчики на 2-му каналі, 3-му каналі, 4-му каналі до 10-го каналу чекали показань відповідно. Для кожного каналу під час спрацьовування було надіслано серію даних датчиків світла, які включали явне світлове опромінення, червоне кольорове випромінювання, зелене кольорове випромінювання та випромінювання синього кольору. Для експериментів на випробувальному стенді в нижній частині кожної світлодіодної панелі розташовувалися два блоки RGB-датчиків. Крім того, в якості вихідних даних для збору даних використовувалися тільки дані про освітленість червоним і синім кольорами. У таблиця 2.1 представлено конфігурація зв'язку ІІЗ зі світлодіодними панелями

Таблиця 2.1 - Конфігурація зв'язку ІІЗ зі світлодіодними панелями.

Порт ІІЗ 1	LED А	Нахилу	35°
Порт ІІЗ 2	LED Б	Нахилу	145°
Швидкість передачі даних	115200	Висота від випробувального стенду	1 метр
Біти даних	8	Діапазон команд затемнення	0 - 255
Біти запуску/зупинки	1	Діапазон рівнів затемнення	0% - 100%
Біти парності	Ніхто	Застосований світлодіодний канал	Синій і червоний
Управління потоком	Ніхто	SCI ІІЗ comds	ЗАПУСК ІІЗ; ІІЗ УВІМКНЕНО;

2.2.2 Послідовний зв'язок зі світлодіодними панелями

Команди затемнення передаються з мікроконтролера на світлодіодні панелі через інтерфейс Serial Communication Interface (ІІЗ). Конфігурація послідовного зв'язку, що включає швидкість передачі даних, біти даних, зведена в таблицю 2.1 для обох світлодіодних панелей. Порт ІІЗ А і порт В були з'єднані зі світлодіодною

панеллю А і світлодіодною панеллю В відповідно. Обидві світлодіодні панелі були ідентичні з червоними світлодіодними блоками та синіми світлодіодними блоками, які мали рівні затемнення від 0 до 255.

Як показано на схемі потоку управління на рис.2.3, зв'язок порту ІПЗ ініціалізувався командами 'ІПЗ увімкнено' і 'ІПЗ початок'. «ІПЗ увімкнено» було надіслано для спрацьовування на світлодіодній панелі. «ІПЗ початок» було надіслано для перемикання світлодіода з локального режиму на «дистанційне керування» та ініціалізовано всі пристрої до попереднього стану за замовчуванням.

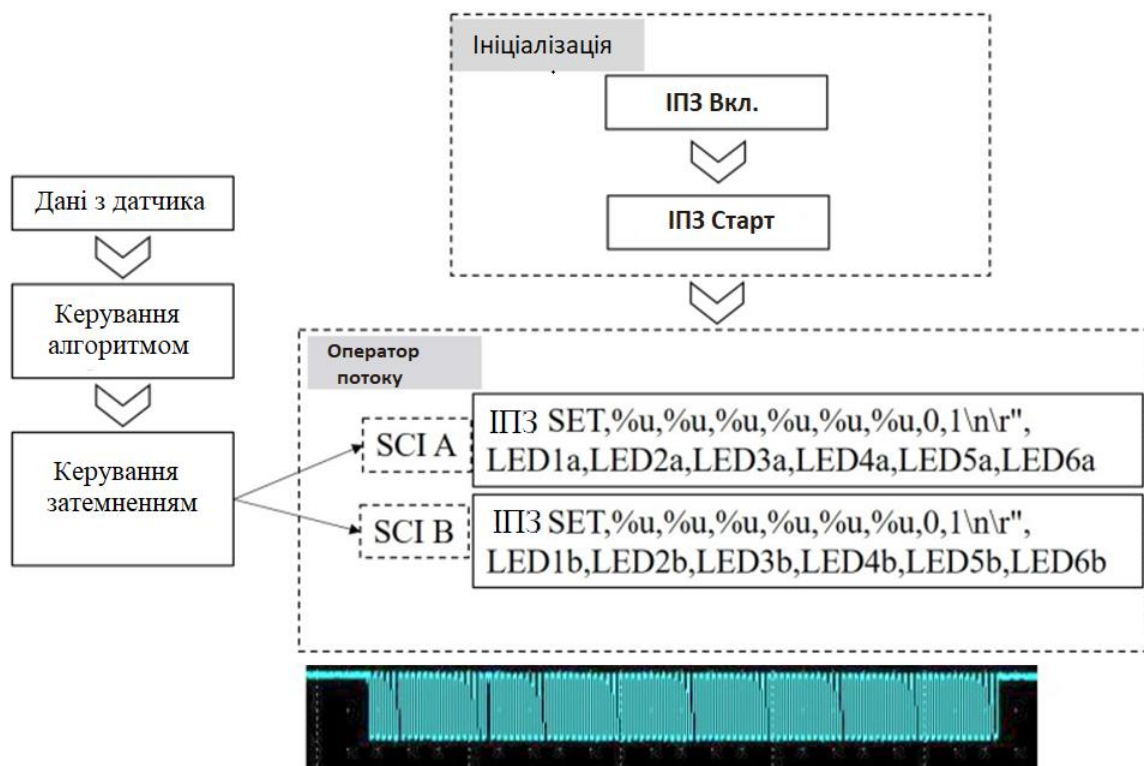


Рисунок 2.3: Блок-схема зв'язку ІПЗ зі світлодіодними панелями.

Після успішної ініціалізації та ввімкнення панелі безперервно генерується команда «ІПЗ встановлення» для надсилання виходів керування.

2.3 Алгоритм керування системою управління освітленням

На рисунку 2.4 показана структурна схема запропонованого алгоритму управління. Y_l визначається як вхід збурення, який відноситься до емуляваного денного світла. Y_d позначає бажане світлове випромінювання, а Y визначається як вихідні рівні освітленості, що відноситься до даних, отриманих датчиками

освітленості, розташованими на випробувальному стенді. Передбачалося, що вся система буде багатовходовою і багатовиходовою системою зворотного зв'язку із замкнутим циклом. Експерименти, показали, що вихід освітленості лінійно пов'язаний з вхідною потужністю світлодіодного блоку, а також команда затемнення (0 ~ 255 рівнів затемнення, еквівалентно відсотку затемнення від 0% до 100%) була безпосередньо лінійно пов'язана з вхідною потужністю світлодіода.

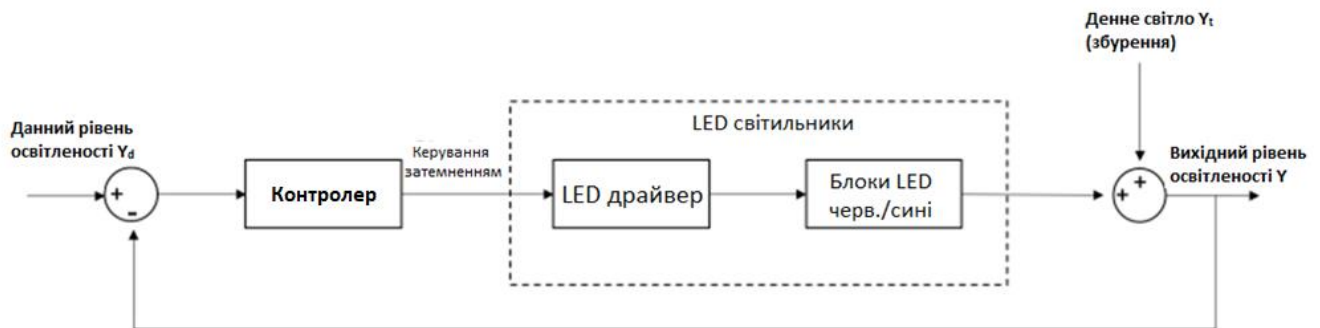


Рисунок 2.4: Структурна схема запропонованої системи управління освітленням.

Якщо припустити, що вихід освітленості має лінійну залежність від вхідної потужності світлодіодних блоків, то зв'язок між інтенсивністю світла, виявленою датчиком, і освітленістю, що випромінюється джерелом світла, представляється наступним чином

Таблиця 2.2: Системна ідентифікація червоного світлодіодного каналу.

Рівень затемнення 0~255	%Відсоток затемнення	T11_sensor червоний	T12_sensor червоний	t21_sensor червоний	t22_sensor червоний
0	0%	10	55	10	54
25.5	10%	523	248	170	807
51	20%	1080	463	343	1617
75.5	30%	1648	683	521	2446
102	40%	2184	894	692	3226
127.5	50%	2735	1114	868	4036
153	50%	3184	1354	1035	4786
178.5	70%	3698	1573	1207	5558
204	80%	4265	1781	1372	6285
229.5	90%	4664	1995	1541	7025
255	100%	5203	2233	1725	7942

$$E_j = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{d_{ij}^2} \quad (2.1)$$

де E_j вказує на освітленість, виявлену датчиком освітленості j , d_{ij} вказує на відстань між i джерело світла та j sensor і $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ визначається як вихід освітленості з 1-го, 2-го, 3-го, ..., n -го джерело світла.

Розгорнемо формулу для всіх n одиниць освітленості та m датчиків освітленості, щоб отримати такий вираз

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_{11}^2} & \cdots & \frac{1}{d_{1n}^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{d_{m1}^2} & \cdots & \frac{1}{d_{mn}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P_{d1} \\ P_{d2} \\ \vdots \\ P_{dn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

де $P_{d1}, P_{d2}, \dots, P_{dn}$ визначаються як вхідна потужність 1-го, 2-го, ..., n -й світлодіодний блок і $E_1, E_2, \dots, E_m$ визначаються як освітленість, виміряна 1-м, 2-м, ..., m -ним датчик освітленості відповідно. Таким чином, рослина представляється у вигляді лінійної моделі T , а $m \times n$ матриці.

Таблиця 2.3: Системна ідентифікація каналу синього світлодіода.

Рівень затемнення 0~255	% відсотка затемнення	T11_sensor синій	T12_sensor синій	t21_sensor синій	t22_sensor синій
0	0%	8	44	8	44
25.5	10%	941	314	343	919
51	20%	2070	640	746	1980
76.5	30%	3228	974	1166	3081
102	40%	4326	1290	1565	4137
127.5	50%	5442	1613	1976	5214
153	60%	6500	1918	2362	6225
178.5	70%	7564	2226	2759	7278
204	80%	8562	2516	3134	8264
229.5	90%	9595	2814	3514	9262
255	100%	10774	3155	3966	10449

Як зазначалося раніше, запропонована система була спрямована на те, щоб наблизитися до бажаного світлового випромінювання, визначеного користувачами, і усунути ефект перехресного освітлення для досягнення рівномірності світла. Таким чином, модель T ідентифікується до того, як буде проведена матриця підсилення K . Виходячи з налаштування тестового стенду та тестового середовища, ми розглянули T як матрицю повного рангу 2×2 наступним чином

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

де t_{ij} - унікальні коефіцієнти, що представляють взаємозв'язок між i -м світильником і j -м датчиком освітленості.

Процес ідентифікації проводиться для виявлення взаємозв'язку між відсотком затемнення вхідного сигналу (від 0% до 100%) світлодіодних блоків (які називаються *LEDA* та *LEDB*) та даними про освітленість, отриманими датчиком світла RGB. З даних, наведених у таблицях 2.2 і 2.3, зв'язок між рівнем затемнення і даними освітленості, виміряними датчиком, подається як

$$E_{1red} = 20.386x_{1r} + 6.724x_{2r} \quad (2.4)$$

$$E_{2red} = 8.582x_{1r} + 30.695x_{2r} \quad (2.5)$$

де x_1 і x_2 визначається як відсоток затемнення червоного каналу на *світлодіоді* та *світлодіоді*, а E_1 та E_2 визначаються як дані про освітленість червоного каналу на 1-му та 2-му датчиках відповідно.

Таким чином, об'єднуємо (2.4) і (2.5), щоб отримати модель

$$T_{red} = \begin{bmatrix} 20.386 & 6.724 \\ 8.582 & 30.695 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Застосовуючи той самий процес ідентифікації для результатів, ми отримаємо

$$T_{blue} = \begin{bmatrix} 42.342 & 15.551 \\ 12.234 & 40.902 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

де T_{red} і T_{blue} представляють модель системи в середовищі червоного світла і синьому світлі відповідно.

Виходячи з теорії LQR, якщо припустити, що матриці системи формату простір станів $A = 0$, $B = -T$, симетричні додатно-визначені вагові матриці $Q = qI$ і $R = rI$, то алгебраїчне рівняння Ріккати виражається наступним чином [37]

$$qI - \frac{1}{r}P(-T)I(-T^T)P = 0 \quad (2.8)$$

Таким чином, P можна виразити наступним чином

$$P = \sqrt{rq}(TT^T)^{-1/2} \quad (2.9)$$

Отже, коефіцієнт зворотного зв'язку *стану* K задається формулою

$$K = -R^{-1}B^TP = \sqrt{q/r}T^T(TT^T)^{-1/2} \quad (2.10)$$

У поєднанні з ідентифікаційною моделлю T з результатів в (6) і (7) в [39], ми можемо отримати підсилення зворотного зв'язку стану.

$$K_{red} = \begin{bmatrix} 0.9993 & 0.0363 \\ -0.0363 & 0.9993 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$K_{blue} = \begin{bmatrix} 0.9992 & -0.0398 \\ 0.0398 & 0.9992 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

де K_{red} і K_{blue} - виграші для червоного і синього каналів відповідно.

2.4 Моделювання та експериментальні результати системи управління освітленням

Ми встановили різні сценарії для симуляцій, що виконуються в середовищі MATLAB/Simulink, щоб перевірити продуктивність керування. В першу чергу ми орієнтуємося на наступні аспекти:

А. Чи здатна система бути стабільною на потрібному рівні освітленості, який ми встановлюємо;

Б. Чи здатна система подолати ефект надмірної освітленості, щоб отримати рівномірний розподіл світла;

В. При застосуванні збурюючого світла фактична потужність освітленості, виміряна датчиком, близька до бажаних рівнів освітленості для кожного діапазону довжин хвиль (червоний і синій).

Сценарій 1 : Відсутність сонячного світла в теплиці, відноситься до нічного часу. Цей сценарій стосується нічного часу, коли немає сонячного світла, але рослинам все одно потрібне додаткове освітлення для оптимального росту. Тому ми встановлюємо 4 різні бажані рівні освітленості 500, 2000, 5000, 9000 відповідно, а рівень освітленості перешкод дорівнює нулю. Як ми і очікували, результати моделювання, показані на рисунку 2.5, показали, що система змогла досягти бажаних рівнів освітленості рівномірно з невеликим перевищенням.

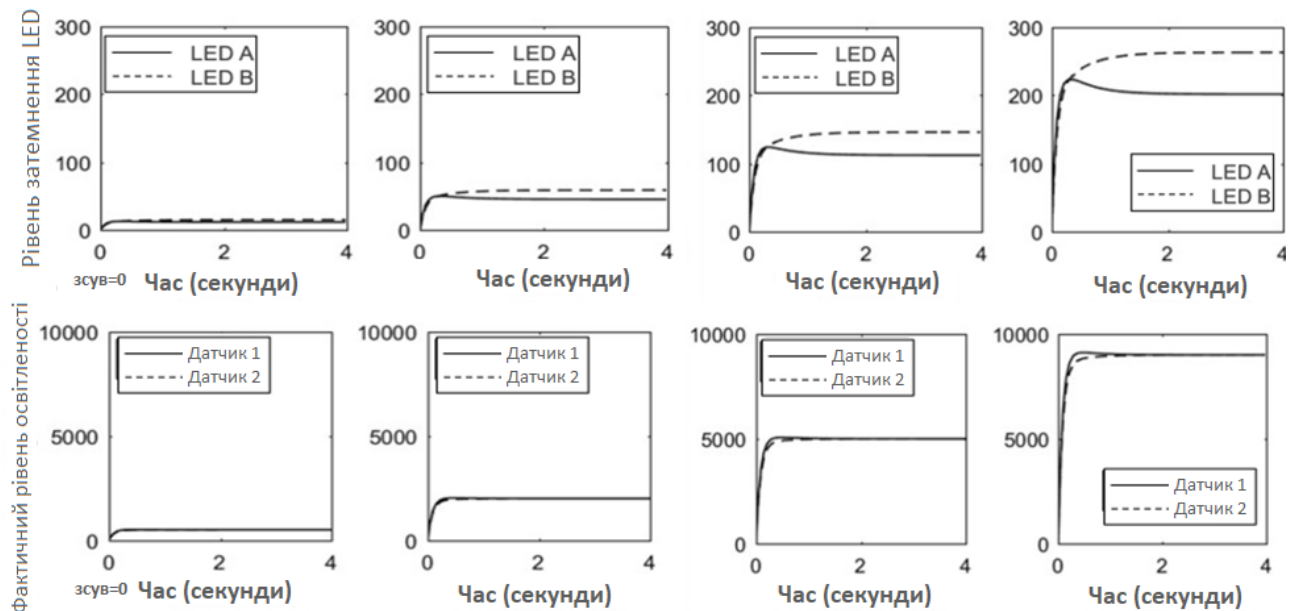


Рисунок 2.5: Результати моделювання сценарію 1, коли денне світло не застосовується, а бажані рівні знаходяться на 500, 2000, 5000, 9000 у порядку зліва направо.

Сценарій 2: сонячне світло опромінюється в теплиці. Всі налаштування такі ж, як і в сценарії 1, за винятком того, що в систему введено сонячне світло на 3000 рівнях. Результати, наведені на рис.2.6, показали, що у всіх чотирьох випадках

виникав значний імпульс, а потім швидко переводився в рівноважний стан. Ми помітили, що світлодіоди А і світлодіоди В були затемнені до нуля після того, як денне світло перервало роботу системи на 1-му і 2-му зображеннях, показаних на рисунку 2.6. Це вказувало на те, що система працює лише тоді, коли потреба в освітленні вища або дорівнює денному, тому вона здатна підтримувати рівномірний світловий потік. В іншому випадку він має таку ж продуктивність, як і схема керування плануванням часу, яка вимикає додаткове світло.

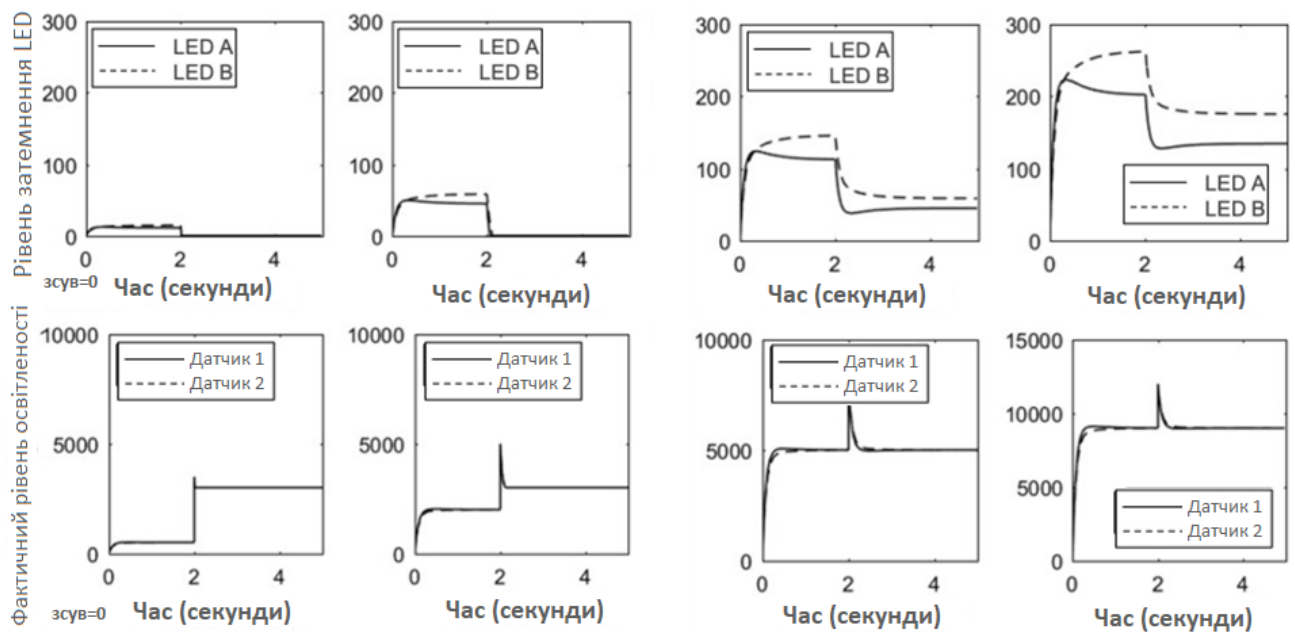


Рисунок 2.6: Результати моделювання сценарію 2, коли застосовується занепокоєння денного світла і бажані рівні знаходяться на 500, 2000, 5000, 9000 в порядку зліва направо.

Сценарій 3: Різний рівень світлового дня, різні часові години доби.
Грунтуючись на узагальнених результатах у сценарії 2, ми провели чотири моделювання, щоб спостерігати за продуктивністю при різних значеннях збурень денного світла для ідентичних бажаних налаштувань освітлення. Ми припустили, що оптимальний рівень освітленості для конкретної рослини знаходиться на рівні 8000 і встановили рівень денного світла на рівні 500, 2000, 4000 і 6000 відповідно, що імітує денне світло на світанку, рано вранці, вранці, пізно вранці і опівдні відповідно. З рис.2.7 видно, що зміна імпульсу залежить від сили джерела збурення. Система успішно використовувала збирання денного світла, зберігаючи

рівномірний світловий потік за допомогою світлодіодів А та LED В, що затемнюються, відповідно.

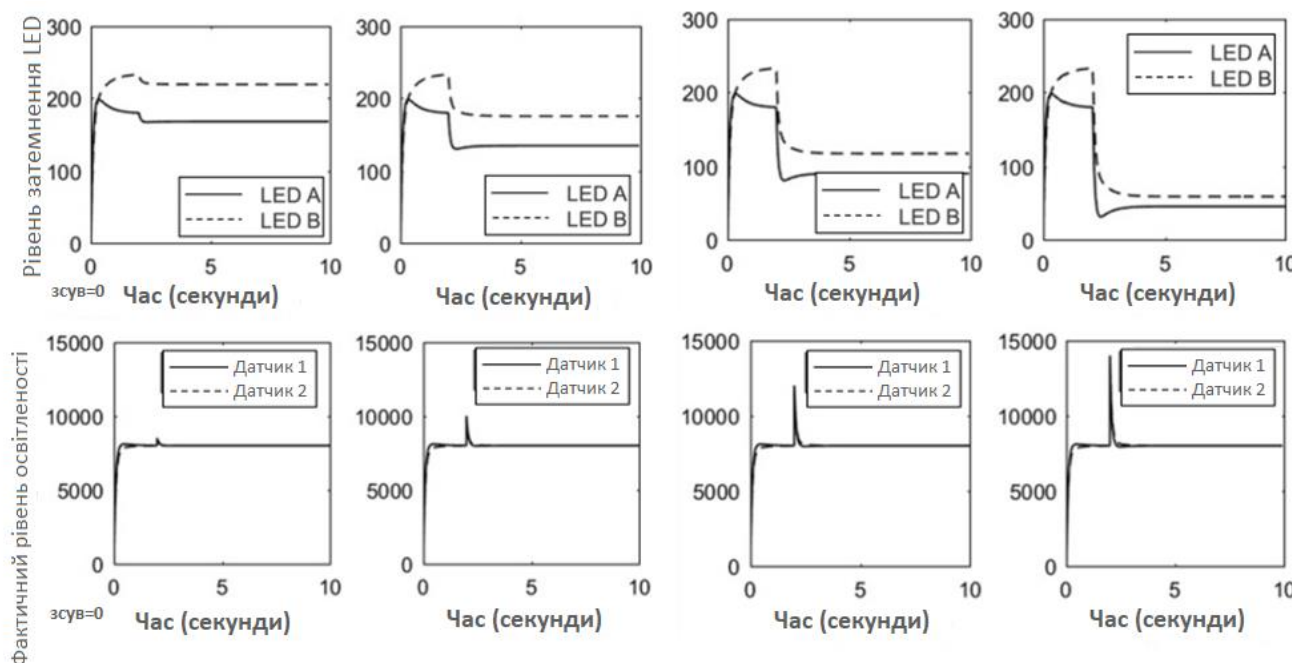


Рисунок 2.7: Результати моделювання сценарію 3, різні збурення денного світла застосовуються на 500, 2000, 4000, 6000 в порядку зліва направо.

Сценарій 4: Денне світло моделюється як крива зміни денного часу. Зміна світлового дня з 6 ранку до 7 вечора в денний час спрощена у вигляді дискретної синусоїди напівциклу. Як

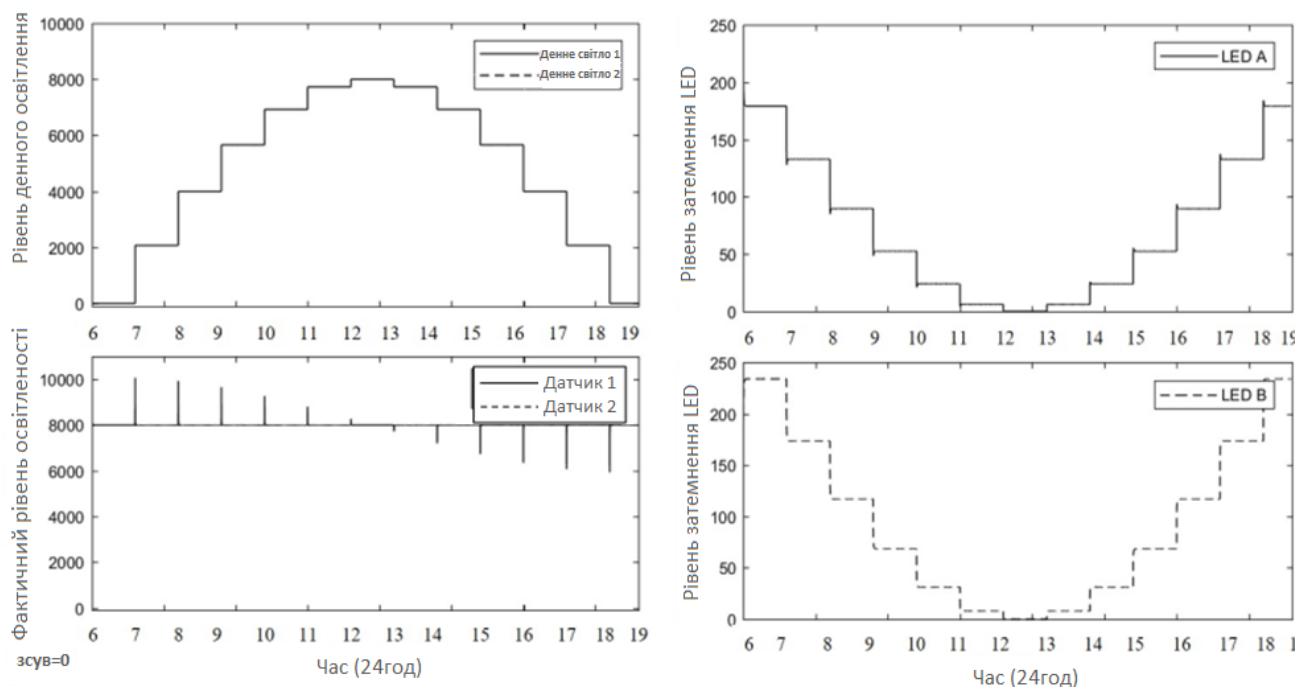


Рисунок 2.8: Результати моделювання сценарію 4, світловий день змінюється в залежності від денного часу з 6 ранку до 7 вечора.

На першому зображенні рис.2.8 пік знаходиться на позначці 8000, а час вибірки - одна година. Оскільки бажаний рівень освітлення встановлено на 8000, світлодіоди А та LED В поступово зменшуються вранці та повністю вимикаються, коли денне світло збільшується до пікового значення близько полудня. Перевищення все одно неминуче. Фактичний рівень освітленості в обох місцях датчика 1 і датчика 2 рівномірний і стабільний на рівні 8000.

Сценарій 5: Денне світло було змодельовано в різних місцях, а також пронизливо криву зміни з 6 ранку до 7 вечора вдень. Як ми помітили, датчик у різних місцях, ймовірно, виявлятиме різний рівень денного світла через кут сонячного світла, затінення та інші фактори в реальних випадках. Незважаючи на те, що модель, яку ми визначили в розділі 2.3, виправила вплив надмірної освітленості, моделювання з урахуванням різних рівнів денного світла все ще розглядається. Таким чином, денне світло, виявлене датчиком 1 і датчиком 2, моделюється як 4000 і 3000 відповідно. Бажані рівні освітлення такі ж, як і в сценарії 4. Як показано на рисунку 2.9, фактичні рівні освітленості як на датчику 1, так і на датчику 2 успішно досягли рівномірної цілі. Світлодіодні блоки на панелі А відрізнялися від світлодіодів В, що, як ми і очікували, було викликано дисбалансом денного світла.

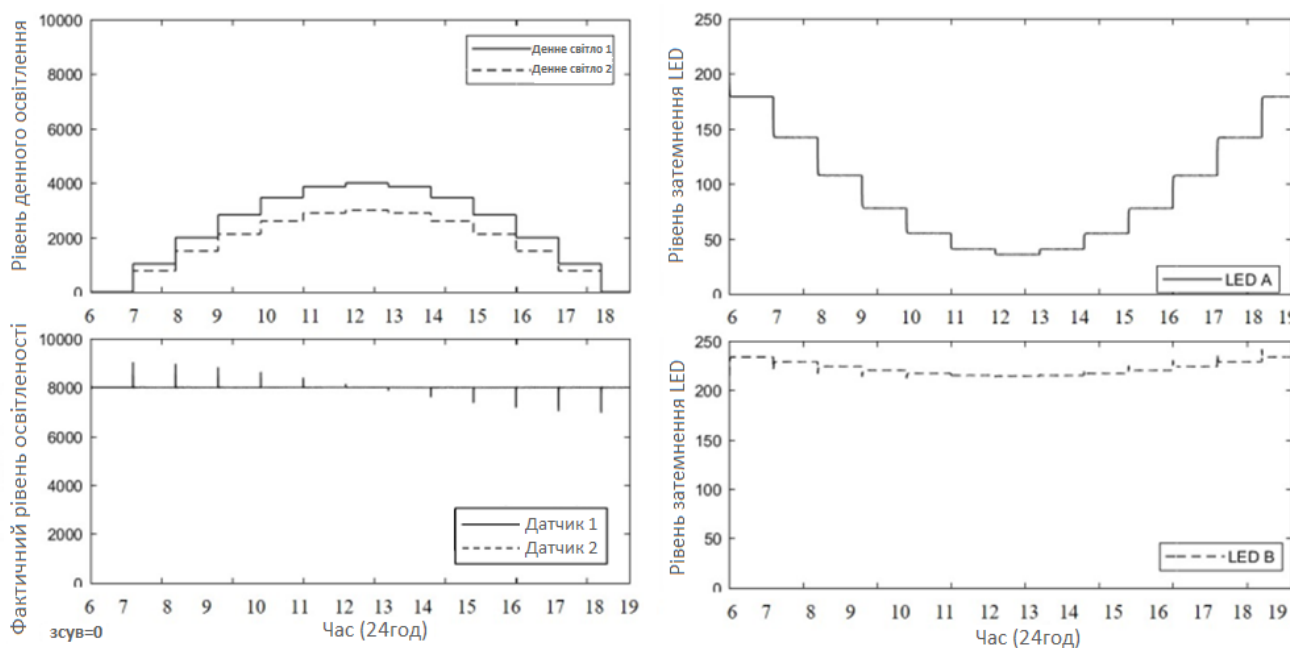


Рисунок 2.9: Результати моделювання сценарію 5, денне світло виявляється по-різному в різних положеннях і змінюється в залежності від денного часу з 6 ранку до 7 вечора.

У тестовому середовищі проводиться серія експериментів, дотримуючись усіх сценаріїв, які ми обговорювали в попередньому розділі. Для сценаріїв 1, 2 і 3 результати експерименту показують успішність роботи системи управління в практичних випадках. Реакція управління подібна до результатів, показаних у результатах моделювання.

2.5 Висновки до розділу

У даній роботі ми розробили алгоритм управління освітленням, заснований на управлінні простором стану, який спрямований на досягнення бажаних рівнів освітленості в поєднанні зі збиранням денного світла. Метод контролю показав продуктивність з точки зору похибки і стабільності при моделюванні

Було вивчено та експериментально перевірено апаратну реалізацію, включаючи збір даних з датчиків та послідовний зв'язок із програмованими світлодіодними світильниками. Спочатку модель освітлення була ідентифікована на запропонованому робочому місці та змодельована в середовищі MATLAB/Simulink з різними умовами денного освітлення. Він показав, що за допомогою запропонованого методу управління освітленням можна досягти бажаних заданих точок світла як на червоному, так і на синьому каналах.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Моделювання системи освітлення та керування зворотнім зв'язком

Структурна схема запропонованої системи управління зображена на рис.3.1, в якій установка моделюється матрицею T ; $E(t)$ - похибка між бажаним і фактичним рівнями освітленості; Y_d і Y - бажаний і фактичний вихідний рівні освітленості відповідно; K - коефіцієнт підсилення контролера, а $X(t)$, $U(t)$ - вхід і вихід контролера відповідно. Зауважимо, що на рис.3.1 денне світло змодельовано як вектор збурень; для досягнення нульової похибки відстеження використовується термін інтегратора, а елементи матриці T представляють залежність між прикладеною потужністю до світил і вихідним світловим потоком в потрібних точках.

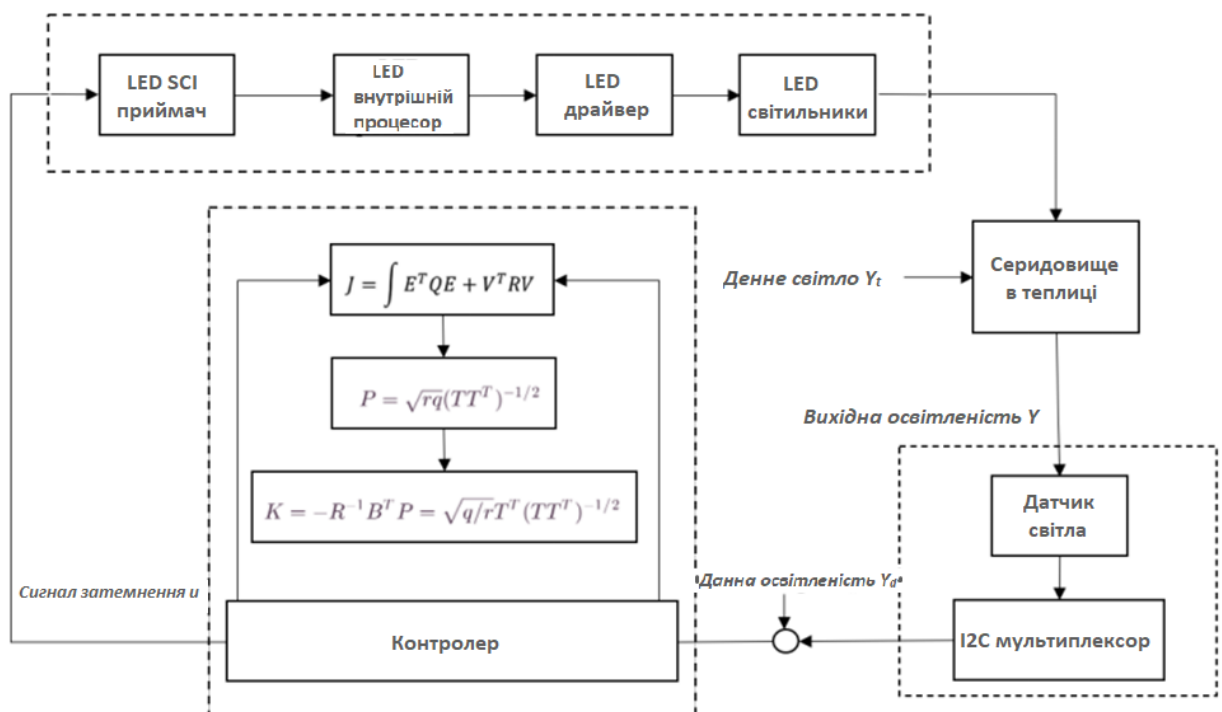


Рисунок 3.1: Додаткова система управління освітленням.

Щоб знайти T , система моделюється як каскадне з'єднання трьох підсистем: світлодіодних світильників, світлодіодних силових драйверів і внутрішнього середовища з денним світлом. У підсистемі драйверів можна припустити лінійну залежність між входами і виходами при нормальних умовах експлуатації. Існує

приблизно лінійна залежність між вхідною потужністю P і вихідним вектором світлового потоку f світлодіодних блоків для $P < P^*$, де P^* - точка максимуму для ϕ . Крім того, освітленість лінійно залежить від світлового потоку, що випромінюється освітлювальними приладами. В результаті повна система може бути представлена лінійною, статичною, інваріантною в часі системою МІМО в наступному вигляді

$$Y(t) = T U(t) \quad (3.1)$$

де $Y(t) \in R^m$ і $U(t) \in R^n$ - вектори виходу і входу відповідно, а $T \in R^{m \times n}$ - матриця моделі системи.

Представимо модель заводу у вигляді $n \times n$ повного рангу квадратної матриці T . Розглядаючи систему управління, наведену на рис.3.1, визначимо

$$X(t) = \int_0^t E(\lambda) d\lambda \quad (3.2)$$

де $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ — вектор стану, $E(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]$ — вектор похибки між шуканим і фактичним виходами, а λ — фіктивна змінна визначеного інтеграла. Змінна визначеного інтеграла посилаючись на рис.3.1, маємо

$$E = -TU(t) + Y_d - Y_l \quad (3.3)$$

і

$$\dot{X}(t) = -TU(t) + (Y_d - Y_l) \quad (3.4)$$

Використовуючи закон управління станом зворотного зв'язку $U(t) = KX(t)$, маємо, який являє собою взаємозв'язок між станом і виходом системи.

$$Y(t) = TKX(t) + Y_l \quad (3.5)$$

Мета управління полягає в тому, щоб досягти точного регулювання світла в цільових точках, мінімізуючи споживання енергії додатковими світлодіодними світильниками. З цією метою теорія лінійно-квадратичної регламентації (LQR) може бути використана для мінімізації наступного квадратичного показника продуктивності

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (E^T(t)QE(t) + V^T(t)RV(t))dt \quad (3.6)$$

де $E(t)$ являє собою системну помилку; Q і R є симетричними додатно-визначеними ваговими матрицями; і $V(t)$ - похідна за часом від вхідного вектора $U(t)$, тобто

$$\dot{U}(t) = V(t) \quad (3.7)$$

Припускаючи постійне збурення (тобто $Y_d - Y_l = \text{const}$), з (3.3) випливає, що

$$\dot{E}(t) = -TV(t) \quad (3.8)$$

Таким чином, закон управління зворотним зв'язком, який мінімізує індекс продуктивності (3.6), задається

$$V(t) = -R^{-1}B^T P E(t) \quad (3.9)$$

де P отримано розв'язанням алгебраїчного рівняння Ріккати, тобто

$$PA + A^T P + Q - PRB^{-1}B^T P = 0 \quad (3.10)$$

в якій A , B - матриці системи простору станів. Крім того, величину $U(t)$ можна отримати наступним чином

$$U(t) = \int_0^t V(\lambda) d\lambda = -R^{-1}B^T P X(t) = K X(t). \quad (3.11)$$

У звичайній задачі LQR $U(t)$ сходиться до нуля для підтримки обмеженої функції витрат. Включаючи похідну за часом $U(t)$ в індекс продуктивності, $U(t)$ не повинен збігатися до нуля, а натомість збігається до відповідного постійного значення.

Для системи управління освітленням маємо $A = 0$, $B = -T$. Взявши $Q = qI$ і $R = rI$, (3.10) можна записати наступним чином

$$ql - \frac{1}{r}P(-T)I(-T^T)P = 0 \quad (3.12)$$

з якого можна отримати P ,

$$P = \sqrt{rq}(TT^T)^{-1/2} \quad (3.13)$$

Таким чином, коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку *стану* K може бути явно отриманий у вигляді

$$K = -R^{-1}B^T P = \sqrt{q/r}T^T(TT^T)^{-1/2}. \quad (3.14)$$

На практиці в систему освітлення вводиться тимчасова затримка, викликана обладнанням датчиків і виконавчих механізмів, каналами зв'язку. Тимчасові затримки призводять до немінімальних фазових систем високого порядку, і якщо видимий час затримки перевищує домінуючу константу часу системи, система може бути нестабільною навіть за наявності найкращої настройки контролера. У цьому випадку, навіть якщо контролер стабілізує систему, це призведе до вкрай повільної реакції. Щоб вирішити вищезазначену проблему, ми використовуємо затримку, щоб уникнути зниження коефіцієнта посилення управління для підтримки стабільності замкнутого циклу. Запропонована система затримки і контролер показані на рис.3.2, в якому компенсатор Сміта прогнозує відкладений ефект, який вхід надасть на вихід, і виробляє компенсаційний термін для отримання бажаного виходу в стабільний стан.

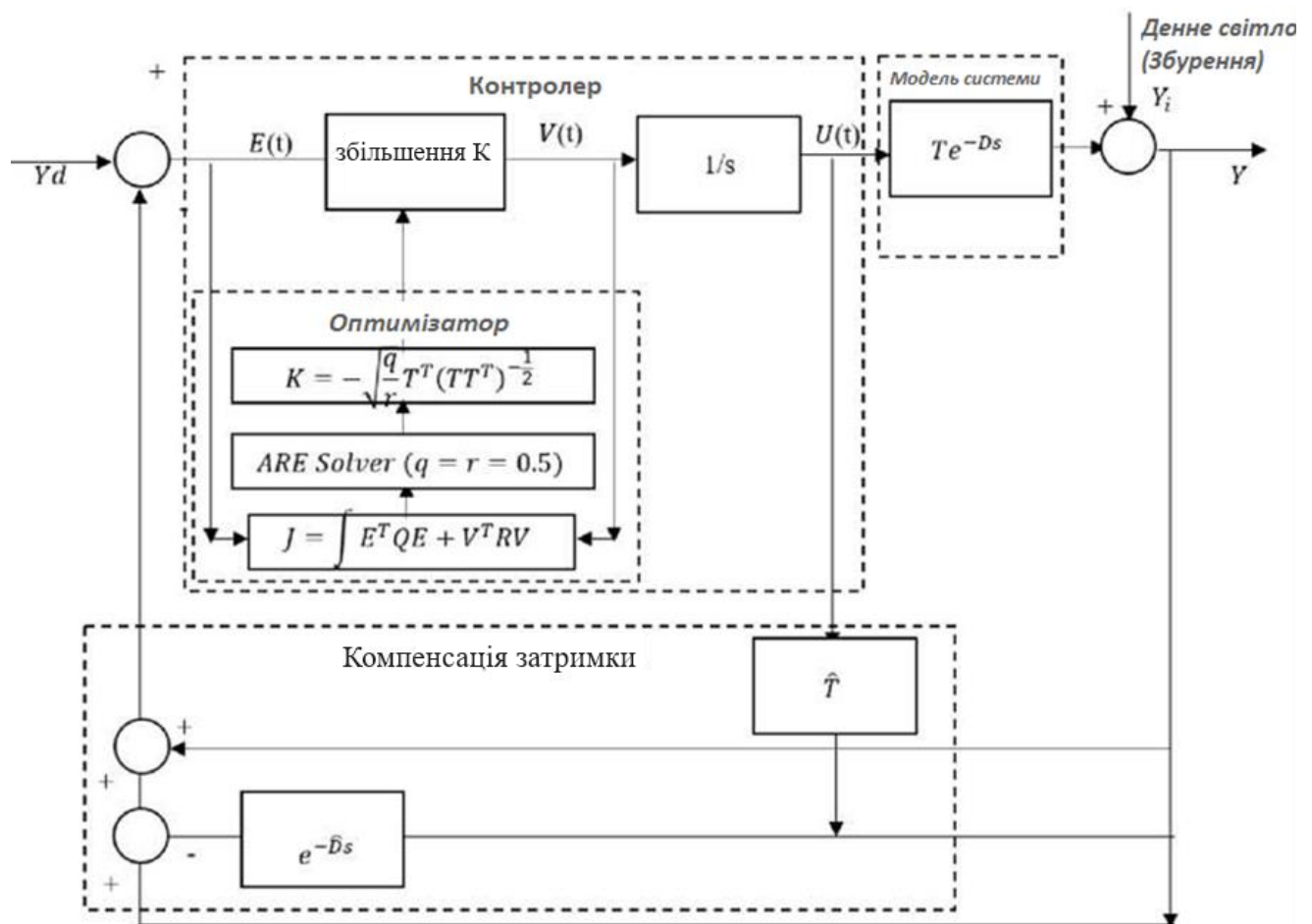


Рисунок 3.2: Оптимальні деталі системи управління з компенсацією затримки.

З цією метою оновимо (3.4), щоб включити компенсатор Сміта, заснований на оцінках T і D моделі системи T і затримці в часі D , відповідно. Таким чином, динаміка нової системи виглядає наступним чином

$$\dot{X}(t) = Y_d - Y_t - \hat{T}KX(t) + \hat{T}KX(t - \hat{D}) - TKX(t - D) \quad (3.15)$$

де K - коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку стану, розрахований в (3.14). Далі буде показано, що ця структура призводить до рівномірної граничної межі стану $X(t)$. Гранична межа може бути зроблена як завгодно малою шляхом зменшення похибки в моделі системи ($\Delta T = T - \hat{T}$) і похибки вимірювання затримки ($\Delta D = D - \hat{D}$) поряд з налаштуванням деяких інших розрахункових параметрів.

3.2 Впровадження системи та експериментальні результати

Встановлена система була розміщена в наметі розміром 5 x 5 футів (від Gorilla Inc.), який використовувався як міні-теплиця, як показано на рис 3.3.

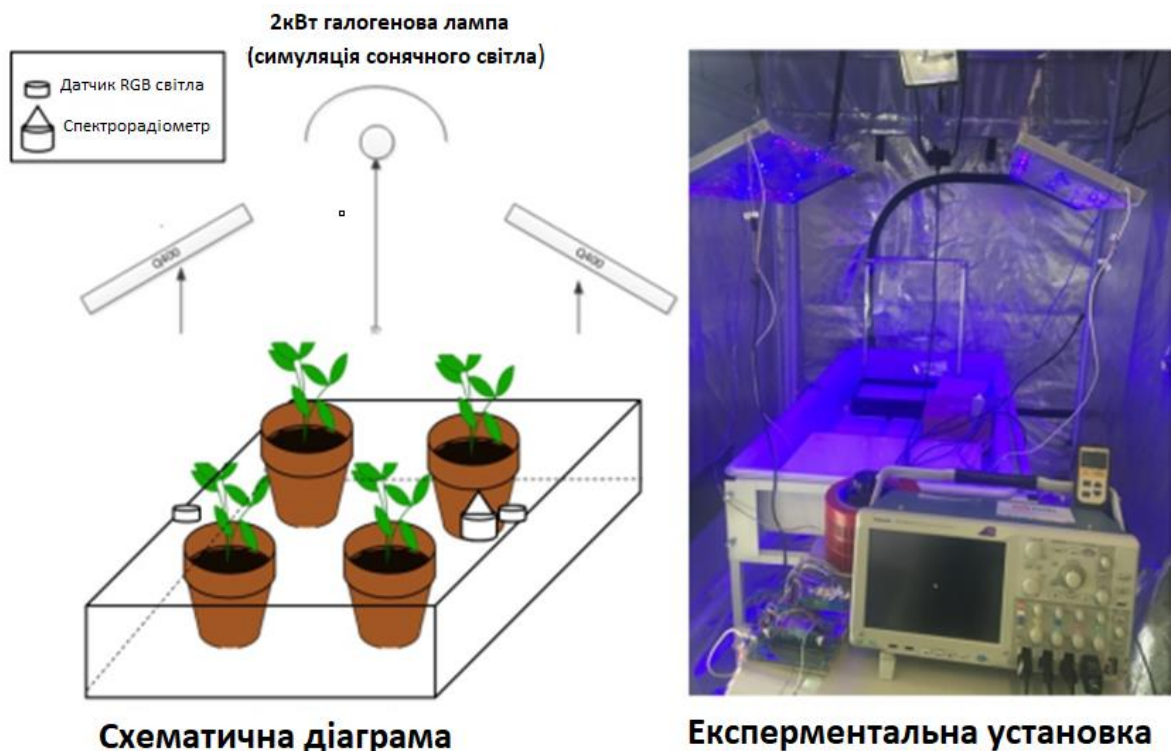


Рисунок 3.3: Принципова схема системи (ліва сторона) і експериментальної установки (права сторона).

Дві одиниці спектрально регульованих світлодіодних світлових панелей повісити на верхню частину намету, який діє як додаткові світильники для вирощування, що складаються з програмованих синіх і червоних світлодіодних блоків, які можуть забезпечити до фотосинтетичного фотонного потоку (ФФП) 960 $\mu\text{моль/с}$ з рівнем затемнення від 0 до 100% за 255 кроків. Крім того, два блоки галогенних ламп потужністю 1 кВт висять над центром даху намету, щоб імітувати денне світло. Ці блоки затемнюються варіаком 2 кВА для імітації змінного сонячного світла. Дві одиниці TCS34725 датчиків освітленості від Adafruit Industries використовуються для отримання індексу освітленості світла на різних довжинах колірних хвиль, включаючи червоний (615 нм) і синій (465 нм). У синьому та червоному каналах використовуються світлодіоди високої яскравості InGaP та AlInGaP відповідно. Дані передаються по протоколу зв'язку I2C на плату мікроконтролера F28335, як показано на рис 3.4. Команда управління обчислюється і передається через послідовний комунікаційний порт ПЗ на панель для зміни співвідношення спектрального розподілу та інтенсивності світла світлодіодних ламп. ПК пов'язаний з мікроконтролером для моніторингу даних.

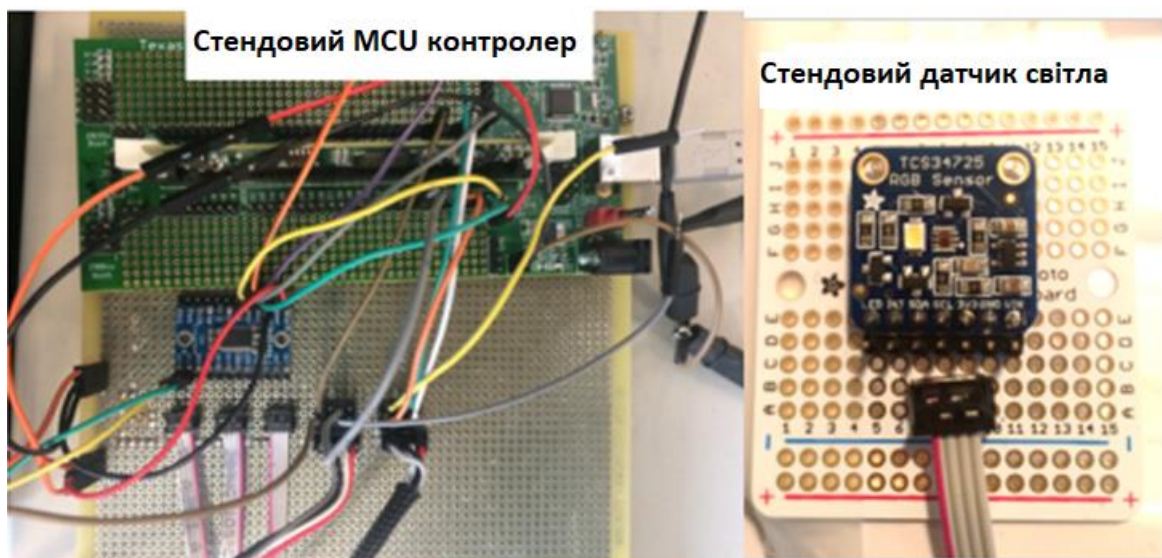


Рисунок 3.4: Плата контролера і датчика освітленості.

Було проведено серію експериментів з вивчення світлових характеристик галогенної лампи та синьо-червоного світлодіода змішаного кольору. На першому

етапі дані спектру від галогенної лампи та світлодіодних ламп змішаного кольору були зібрані спектро радіометром SS-110 Field, як показано на рис. 3.5.

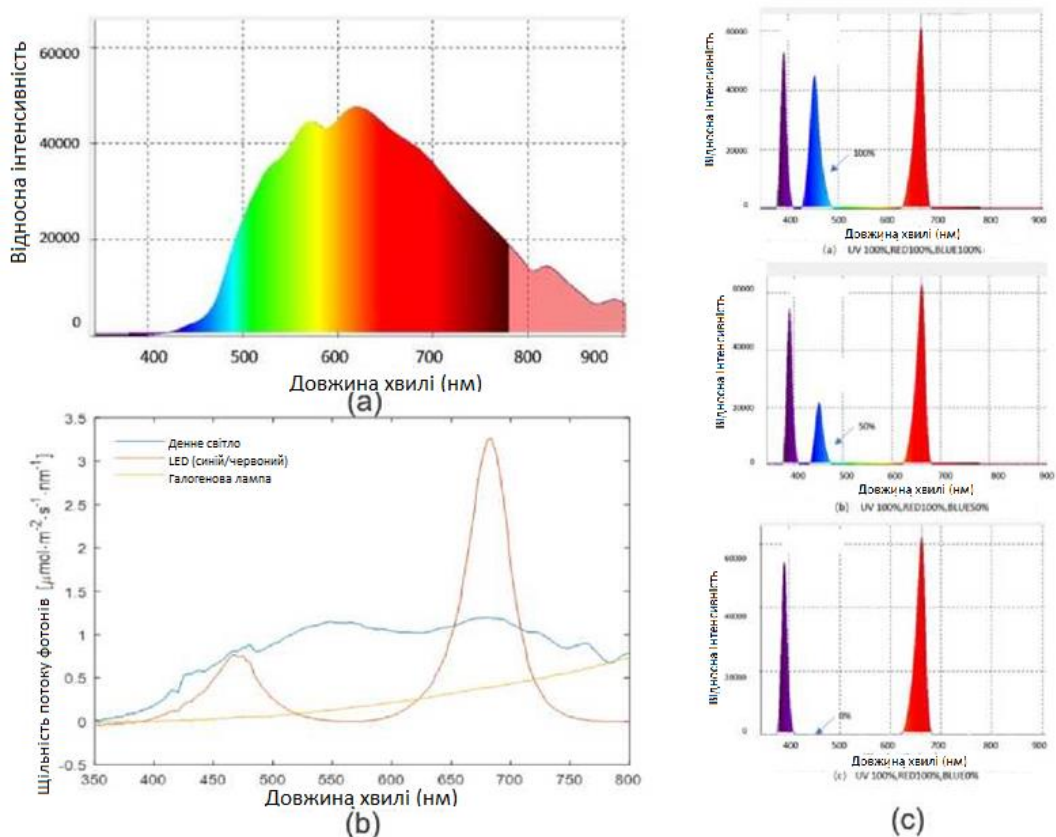


Рисунок 3.5: Спектральний розподіл денного світла (а), галогенної лампи (б) і світлодіодного світла (в) з різним співвідношенням кольорів червоного, синього і ультрафіолету.

Рівні затемнення червоного та синього світла були відрегульовані на 100%, 100% відповідно. Далі ми отримали залежність між інтенсивністю світла та рівнями затемнення світлодіодних червоних та синіх блоків. З цією метою рівні затемнення синього та червоного світлодіодів були збільшені з 0% до 100% з кроком 10%. Червоний і синій блоки тестувалися окремо. Як видно на рис 3.6, інтенсивність світла як червоного, так і синього світла лінійно залежить від рівня затемнення.

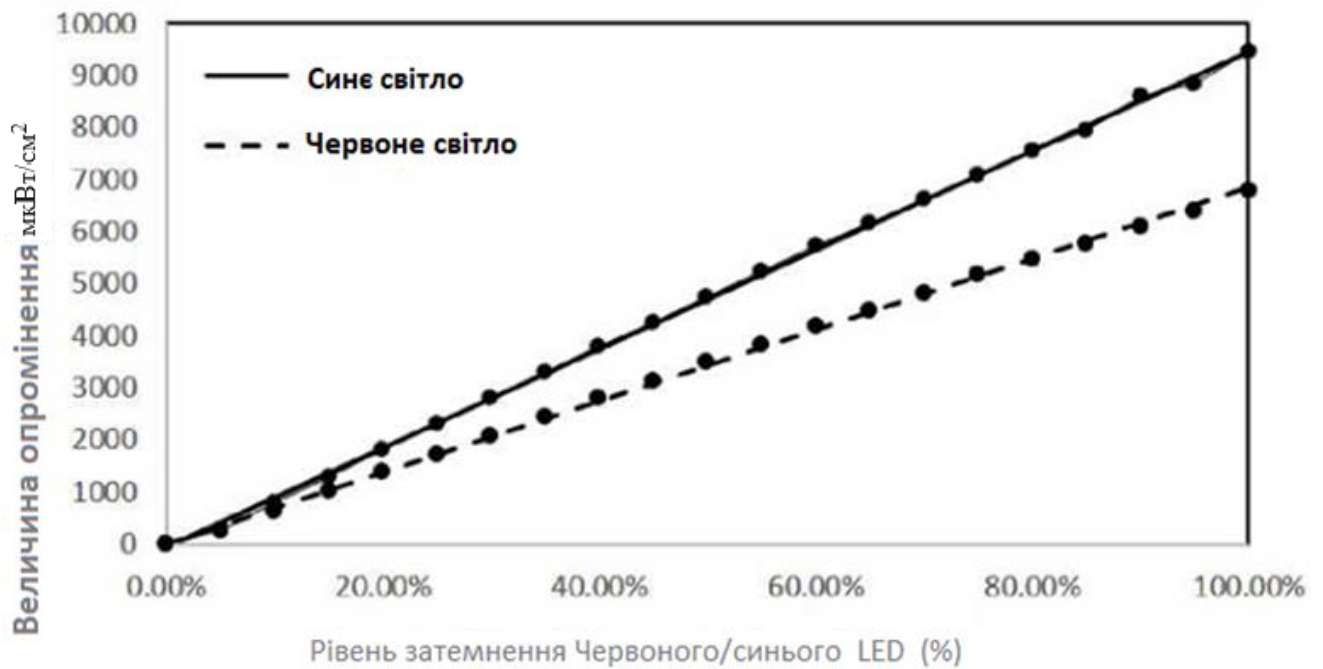


Рисунок 3.6: Дані про інтенсивність світла синього та червоного світла, виміряні окремо датчиком світла RGB.

3.3 Ідентифікація розробленої моделі керування

Оскільки в експерименті було використано дві одиниці світлодіодних панелей та дві одиниці датчиків червоного, зеленого, синього (RGB) світла, було розглянуто дві матриці T_{blue} та T_{red} розміром 2×2

$$T_{red/blue} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

де t_{ij} - коефіцієнти, що представляють зв'язок між i - м світильником і j - м датчиком освітленості, і тому матриця системи дорівнює

$$T = \begin{bmatrix} T_{red} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & T_{blue} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Було проведено чотири ідентифікаційні тести, щоб отримати взаємозв'язок між датчиками та світлодіодними панелями для синього та червоного світла відповідно. Датчики позначалися RGB1 і RGB2, а світлодіодні панелі - LED1 і LED2. Оскільки синій і червоний канали на світлодіодній панелі налаштовувалися незалежно, ідентифікаційні тести проводилися окремо для кожного колірного

каналу. Отже, синій і червоний канали на двох блоках світлодіодної панелі були визначені як LED1b, LED2b, LED1r і LED2r відповідно. Канали збору даних для синього та червоного світла на двох блоках датчика світла RGB визначені як RGB1b, RGB2b, RGB1r та RGB2r.

По-перше, був включений тільки синій канал на панелі LED1, який збільшувався з кроком 10% (тобто 0%, 10%, 20%... 100%) і записані дані з каналів LED1b і LED2b. Така ж процедура була виконана для червоного каналу на панелі LED2. Результати ідентифікаційних випробувань наведені на рис.3.7.

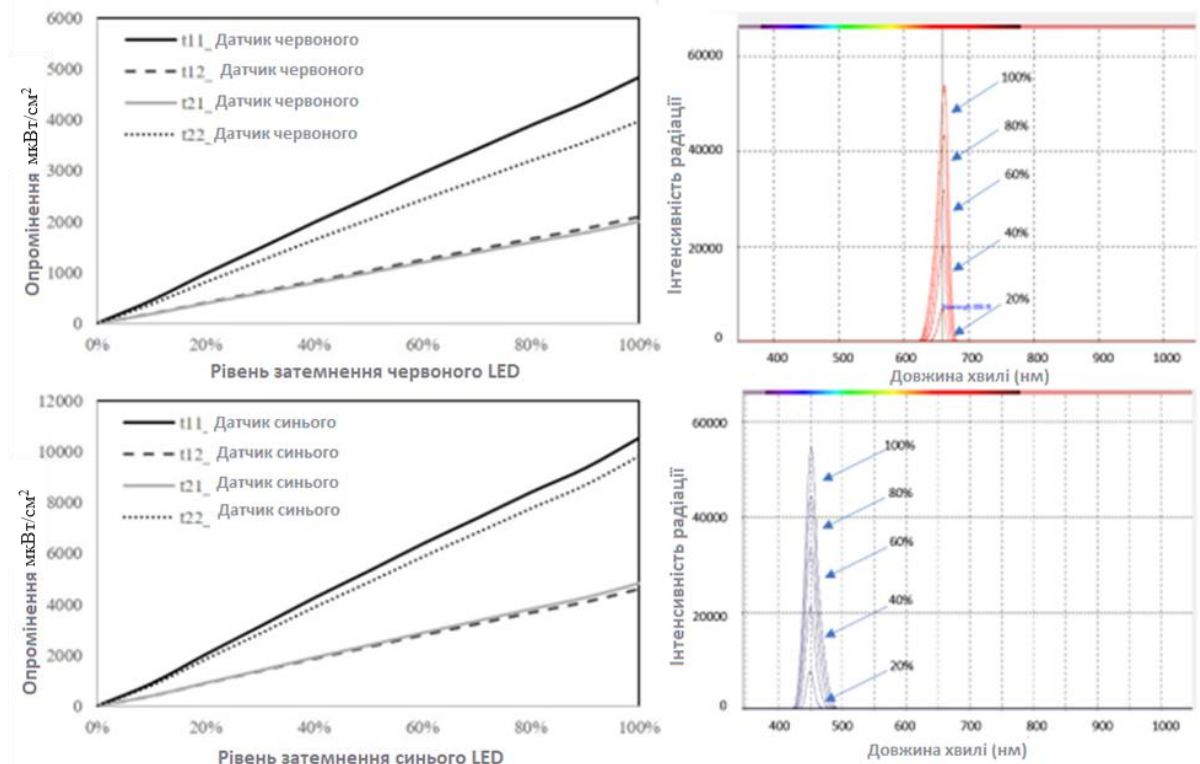


Рисунок 3.7 - Ідентифікація системи у відповідь на червоний і синій світлодіодні канали.

Використовуючи оцінку найменших квадратів, найкращі варіанти для отриманих наборів даних червоного каналу задаються за формулою

$$\begin{aligned}
 y_{11r} &= 18.997x_{1r} + 13.455 \\
 y_{12r} &= 8.192x_{1r} - 136.682 \\
 y_{21r} &= 7.831x_{2r} - 6.954 \\
 y_{22r} &= 15.593x_{2r} + 15.364
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

де y_{ij} представляє вплив i - го світильника на j - чий датчик, а x_i - рівень затемнення i - го світильника. Крім того, набори даних для синього світла представлені

$$\begin{aligned}y_{11b} &= 41.489x_{1b} - 48.001 \\y_{12b} &= 18.143x_{1b} - 18.318 \\y_{21b} &= 18.921x_{2b} - 44.955 \\y_{22b} &= 38.695x_{2b} - 96.227\end{aligned}\quad (3.19)$$

Освітленість на будь-якому рівні є сумою інтенсивності світла всіх світил навколишнього середовища. Таким чином, ми маємо

$$\begin{aligned}y_1 &= y_{11} + y_{21} \\y_2 &= y_{12} + y_{22}\end{aligned}\quad (3.20)$$

де y_i - сумарний рівень освітленості на i - му датчику. В результаті

$$\begin{aligned}y_{1r} &= 18.997x_{1r} + 7.8307x_{2r} + 6.5 \\y_{2r} &= 8.1922x_{1r} + 15.593x_{2r} - 121.32\end{aligned}\quad (3.21)$$

і

$$\begin{aligned}y_{1b} &= 41.489x_{1b} + 18.921x_{2b} - 92.955 \\y_{2b} &= 18.143x_{1b} + 38.695x_{2b} - 114.545\end{aligned}\quad (3.22)$$

Звідси матриця $T_{red/blue}$ задається формулою

$$T_{red} = \begin{bmatrix} 18.997 & 7.8307 \\ 8.1922 & 15.593 \end{bmatrix}\quad (3.23)$$

і

$$T_{blue} = \begin{bmatrix} 41.489 & 18.921 \\ 18.143 & 38.695 \end{bmatrix}\quad (3.24)$$

де T_{red} і T_{blue} представляють модель системи в середовищі червоних і синіх спектрів відповідно.

Підставляємо T_{red} і T_{blue} в (3.14) і вибираємо $q = r = 0.5$ Щоб надати однакову вагу мінімізації похибки та енергоспоживання, підсилення зворотного зв'язку стану отримують, де K_{red} та K_{blue} є підсиленнями для червоного та синього каналів відповідно.

$$K_{red} = \begin{bmatrix} 0.9999 & 0.0105 \\ -0.0105 & 0.9999 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$K_{blue} = \begin{bmatrix} 1 & -0.0097 \\ 0.0097 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Добовий інтеграл світла (ДІС), що позначає кількість фотосинтетично активних фотонів, накопичених у квадратному метрі протягом 24-годинного періоду, широко використовується як одиниця вимірювання освітленості для росту рослин. Перець і помідори є двома найбільш популярними культурами для тепличного виробництва, на які припадає 80% площ тепличного вирощування. Для оптимального росту рослин різні типи рослин мають різні потреби в добовому освітленні (ДІС). Рекомендований індекс ДІС для різних рослин був узагальнений, і вказує на те, що і помідорам, і перцю потрібно близько $14-30 \text{ мол} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{д}^{-1}$ середній ДІС для досягнення хорошої якості продукції.

Щоб використовувати галогенне світло для імітації сонячного світла, необхідне моделювання погодинного сонячного ЩФФП. Сонячна ЩФФП моделюється у вигляді напівсинусоїдальної кривої, де схід і захід сонця розташовані в початковій і кінцевій точках відповідно.

У зв'язку з відбиттям і поглинанням світла конструкцією намету і теплиці очікуються питомі втрати ДІС в межах від 30% до 70%. Таким чином, потрапляння сонячного ЩФФП в теплицю $ДІС$ задається формулою

$$ДІС_s = ДІС_{max} \cdot (1 - L) \quad (3.27)$$

де $ДІС_{max}$ - значення ДІС в умовах ясного неба, L - постійна втрат.

Об'єднавши (3.27) і (3.28), отримаємо зв'язок між погодинним ЩФФП і ДІС наступним чином

$$ДІС_s = \sum_{s=1}^n ЩФФП_{max} \cdot \sin\left(\frac{t}{T} \cdot \pi\right) \quad (3.28)$$

Припустимо, що $ДІС_{max} = 10 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{д}^{-1}$, $L = 0.3$, а $T = 10$, об'єднуємо (3.27)(3.28), щоб отримати погодинне значення ЩФФП за день, як показано в

таблиці 3.1. Виходячи з розрахунку, модель годинного сонячного світла показана на рис.3.8. Видно, що лінія тренду годинного сонячного світла наближається до спрощеної сонячної синусоїдальної кривої, що підтверджує реалістичність запропонованої моделі.

Таблиця 3.1: погодинні дані ППФД сонячної енергії в зимовий день з ясним небом.

Час	відносний сонячний ЩФФП (%)	сонячний ЩФФП на відкритому повітрі (мол ⁻¹ м ⁻² год ⁻¹)	сонячний ППФД в теплиці (мол ⁻¹ м ⁻² год ⁻¹)
7:00 ранку	0	0.00	0
8:00 ранку	0.31	0.49	0.34
9:00 ранку	0.59	0.93	0.65
10:00 годин	0.81	1.28	0.90
11:00 годин	0.95	1.51	1.05
12:00 вечора	1.00	1.5838	1.10866
13:00 вечора	0.95	1.51	1.05
14:00 вечора	0.81	1.28	0.90
15:00 вечора	0.59	0.93	0.65
16:00 вечора	0.31	0.49	0.34
17:00 вечора	0.00	0.00	0.00
Загалом	6.313752	9.99972	6.999804

3.4 Результати моделювання

Сонячне світло, яке називають збурюючим світлом у системі керування, не є контрольованим і передбачуваним через зміни погоди. Наприклад, очікується, що світлове випромінювання від сонячного світла буде найвищим опівдні в сонячний день; Однак раптова тінь хмар може зменшити очікуване світлове опромінення. Завданням системи управління є підтримання значення освітленості, близького до заданого значення в теплиці при різних умовах сонячного світла.

Галогенне світло було приглушене відповідно до рис.3.8, щоб імітувати зміни денного світла з 7 ранку до 5 вечора в день з ясним небом у лютому.

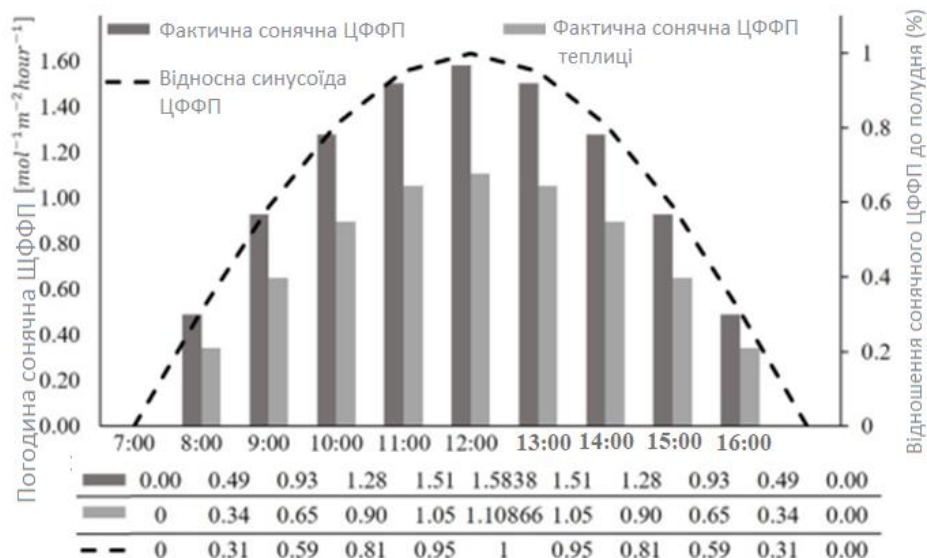


Рисунок 3.8: Спрощена модель погодинного сонячного ЩФФП (ясного неба лютневого дня).

На рисунку 3.9 показано порівняння продуктивності запропонованої системи управління і звичайного часового планування для підтримки освітленості на рівні $8000 \text{ нВт} \cdot$

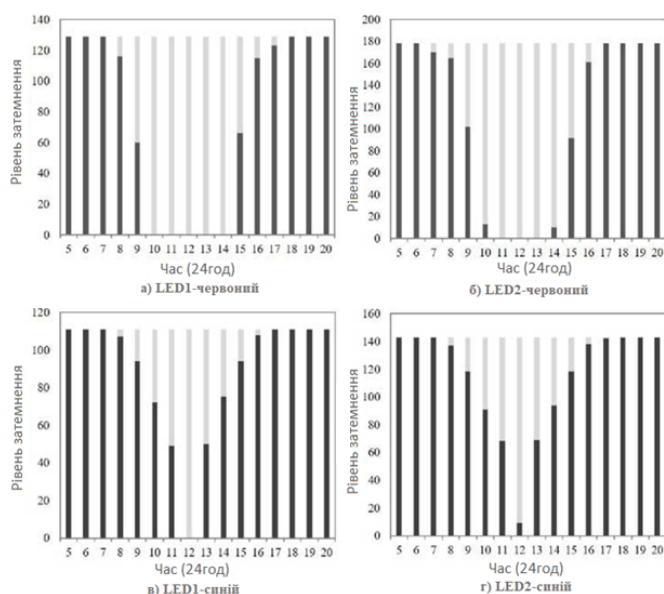


Рисунок 3.9: Регулювання рівнів затемнення червоних і синіх каналів на світлодіодах1 і світлодіодах2 за допомогою запропонованого управління (чорна лінія) і звичайного управління часовим плануванням (сіра лінія) при зміні світлового дня з 5 ранку до 8 вечора.

Таблиця 3.2: Результати керування освітленням МІМО при різних співвідношеннях кольорів змішування червоно-синій.

Бажане світло Y_d (синій/червоний, LED A/LED B)	сонячне світло Y_i ; (%)	Світловіддача Y_t $mWatt/cm^2$)		Частота помилки (червоний /синій)	час до стабільного стану (зразки)
		LED A	LED B		
Червоний/LED A+B :3000	0%	2965	2987	0.82%	40
Червоний/LED A: 3000 Червоний/ LED B: 3500	0%	2989	3491	0.34%	35
	75%	2996	3474	0.5%	50
	87.5%	3088	3505	1.52%	50
Синій/LED A+B: 4000	100%	2989/3980	3002/4001	0.21%/0.26%	60
Червоний/LED A+B:3000	0%	2963 /4037	2989/3976	0.8%/1.02%	60

$см-2$ на синьому каналі і $4\ 000\ джВт \cdot см-2$ на червоному каналі при зміні світлового дня. Метод, який ми використовували для порівняння, є одним із загальноприйнятих методів планування часу, які широко використовуються в тепличному господарстві. Це розімкнутий контур на основі керування увімкненням/вимкненням для забезпечення певної кількості годин штучного освітлення з фіксованою інтенсивністю світла. Як показано на рис.3.9-(а), рис.3.9-(б), рис.3.9-(в) і рис.3.9-(г), за допомогою нашого методу всі світлодіоди приглушуються до повного вимкнення опівдні через збирання денного світла та збільшення емульованого сонячного світла. Період насичення на синіх світлодіодах коротший, ніж на червоних, якщо порівнювати (а) з (в) і (б) з (г). Це розумно, тому що кількість ЩФП на синьому кольорі, що забезпечується сонячним світлом, набагато менша, ніж кількість ЩФП у червоному спектрі. Крім того, крива рівня затемнення на LED1 і LED2 децю відрізняється (тобто LED2-червоний затемнений більше, ніж LED1-червоний), що пов'язано зі світлом, що просочується в намет ззовні. Що стосується звичайного методу управління часовим плануванням, то і світлодіоди1, і світлодіоди2 зберігають фіксований рівень

затемнення з 5 ранку до 8 вечора, показаний сірою лінією на рис. 3.9. Виходи загального EFD, що визначаються червоним і синім каналним датчиками світла, підтримуються відносно стабільними і фіксованими разом із цільовими бажаними значеннями, позначеними як *Sensor1 - синій*, *Sensor1 - червоний*, *Sensor2 - синій* і *Sensor2 - червоний* на рис.3.10. Єдиний виняток відбувається на червоному каналі близько полудня, що пов'язано з перенасиченням від випромінювання червоного спектра денного світла, в той час як червоні світлодіоди повністю приглушені, щоб мінімізувати споживання енергії.

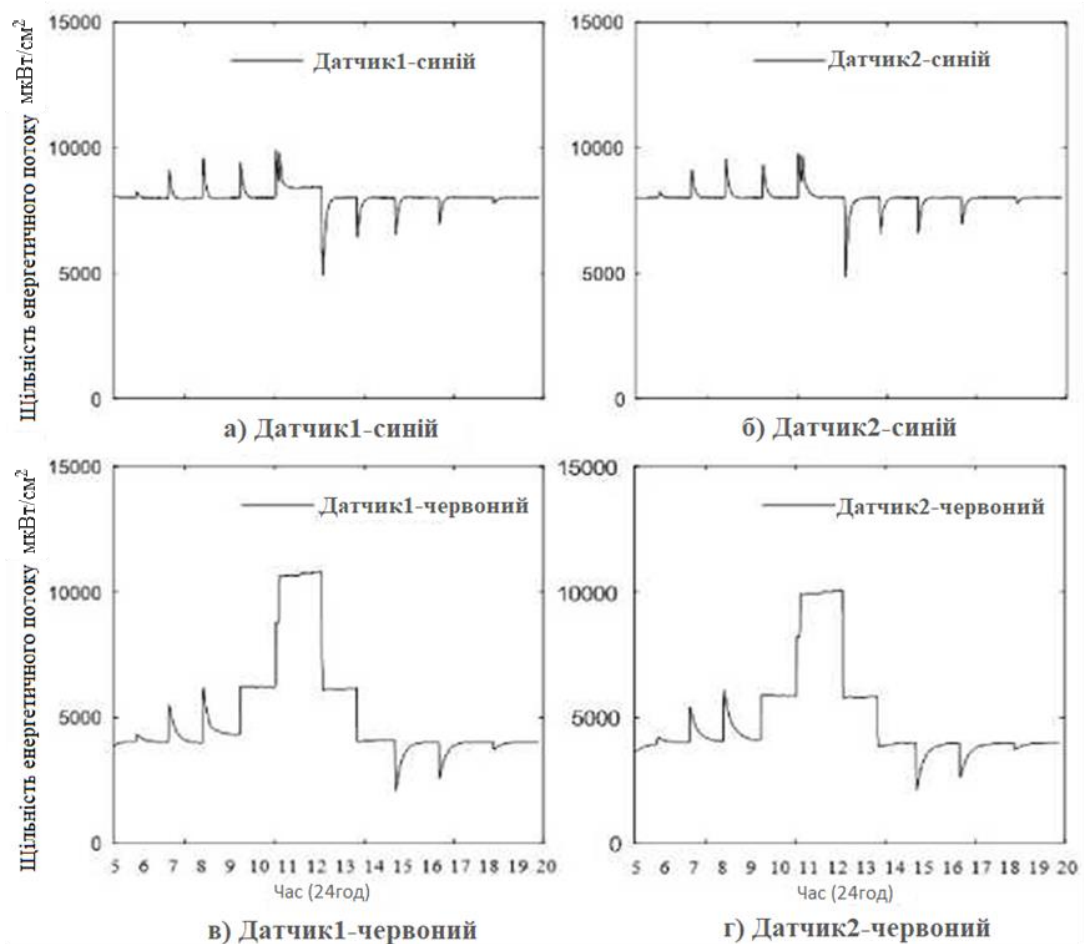


Рисунок 3.10: Щільність потоку енергії, що сприймається датчиками освітленості в присутності завад денного світла з 5 ранку до 8 вечора із застосуванням запропонованої системи управління.

Оскільки споживана потужність лінійно пов'язана із загальною світловіддачею, загальне споживання енергії за день визначається формулою

$$W = \sum_{i=1}^{N_p} \{P_{red} \times \sum_{n=1}^{N_l} D_{rni} + P_{blue} \times \sum_{n=1}^{N_l} D_{bni}\} \quad (3.29)$$

де W - сумарне добове енергоспоживання системи освітлення; D_{rni} і D_{bni} - це відсотки затемнення (від 0% до 100%) червоної і синьої одиниць n -го світлодіода в i -й годині відповідно; N_p - загальний час фотоперіоду, а N_l - кількість світлодіодних блоків.

Рисунок 3.10 демонструє здатність запропонованого контролера відстежувати задані значення при економії енергії в нашій експериментальній установці. Однак експерименти показують, що апаратне забезпечення вносить в систему затримку часу, яка, незважаючи на те, що не викликає жодних проблем при використанні невеликої кількості датчиків і виконавчих механізмів ($D = 20$ мс), призведе до зниження продуктивності та втрати відносної стабільності в міру збільшення системи.

3.5 Висновки до розділу

Для регулювання світлодіодних світильників була розроблена система управління освітленням, яка може бути використана для додаткового регулювання освітлення в теплицях. Запропонована багатовходова багатовихідна система керування (МІМО) отримує зворотний зв'язок від кількох датчиків освітленості та керує додатковим світлодіодним світлом для досягнення індивідуальної інтенсивності світла. Результати експериментів свідчать про те, що запропонована система була здатна досягти бажаного інтеграла добового світла (ДІС) для конкретних культур і підтримувати бажане співвідношення червоного та синього кольорів. До розробленого контролера був доданий компенсатор Сміта, щоб компенсувати небажані ефекти затримки в системі в більших масштабах. Результати вказують на більш стабільну систему з плавною перехідною характеристикою, що забезпечує менше споживання енергії світлодіодними панелями.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1. Техніка безпеки при експлуатації електрообладнання та електромереж

До обслуговування електрообладнання допускаються особи не молодше 18 років, які не мають медичних протипоказань, що заважають виконанню робіт, що отримали вступний і первинний інструктажі на робочому місці, виробниче навчання, перевірку знань.

Електромонтер повинен знати схему електропостачання об'єктів виробництва, повинен мати навички прийомів технічних методів обслуговування електроустановок. Він забезпечується усіма засобами індивідуального захисту та спецодягом. Інструменти і засоби захисту повинні бути випробувані, справні та використовуються за призначенням [13, с. 76].

При експлуатації діючих електроустановок застосовують електрозахисті засоби та запобіжні пристосування. Ручне включення і відключення устаткування напругою понад 1000 В необхідно виконувати в діелектричних рукавичках, колошах або на килимку. Відключення виконують таким чином: відключають роз'єднувачі, знімають плавкі вставки запобіжників, від'єднують привод мережі. Після вивішування плаката перевіряють відсутність напруги на відключеній ділянці мережі. В оперативному журналі роблять запис про відключення. Включення проводять тільки після відмітки в журналі про закінчення робіт із зазначенням відповідальної особи.

Безпека виконання забезпечується також організаційними заходами. До них відноситься оформлення роботи нарядів, оформлення допуску до роботи, нагляд під час виконання роботи [13, с. 78].

Наряд є письмовим дозволом на роботу в електроустановках, що визначає місце, час, початок і закінчення робіт; умови безпечного його проведення, склад бригади та осіб, відповідальних за безпеку. Без наряду по усному чи письмовому розпорядження, але з обов'язковим записом в журналі можуть

виконуватися такі роботи, як прибирання приміщень до огороження електрообладнання, чистка кожухів, доливка масла в підшипники, догляд за колекторами, контактними кільцями, щітками, заміна запобіжників. При роботі з електроустановками напругою до 1000 В без зняття напруги необхідно: захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмовідні частини, що знаходяться під напругою, до яких можливий випадковий дотик; працювати в діелектричних калошах або стоячи на ізолюючій підставці, або на діелектричному килимі; застосовувати інструмент з ізолюючими рукоятками (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень), за відсутності такого інструменту користуватися діелектричними рукавичками.

При виконанні робіт без зняття напруги на струмовідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно: тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукоятки до обмежувального кільця; розташовувати ізолюючі частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмоведучими частинами двох фаз чи замикання на землю; користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

При виявленні порушення лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними має бути негайно припинене [13, с. 81].

Щозмінні огляди електрообладнання та мереж повинен проводити черговий електрик-ремонтник. При огляді слід звертати увагу на наступне: відсутність змін стану електрообладнання при його функціонуванні; ступінь корозії, фарбування труб, кріпильних елементів; справність введів проводів та кабелів в електроустановку; справність заземлюючих пристроїв; наявність попереджувальних плакатів та знаків маркування на вибухонебезпечному електрообладнанні; наявність всіх передбачених конструкцією болтів, що кріплять елементи оболонки (вони повинні бути добре затягнуті); потрапляння на електрообладнання бризок, крапель і пилу.

При виявленні ненормальної роботи силового трансформатора черговий електрик-ремонтник повинен вивести його з роботи з обов'язковим дотриманням усіх заходів особистої безпеки, використовуючи необхідні засоби індивідуального

захисту. Таке відключення проводиться при: сильному нерівномірному шумі і потріскуванні всередині трансформатора; ненормальному і постійно зростаючому нагріванні трансформатора при номінальному навантаженні і роботі пристроїв охолодження; викид масла з розширювача або розриві діафрагми вихлопної труби; течі масла з пониженням його рівня нижче мінімально допустимого.

При цьому робиться запис в оперативному журналі і повідомляється відповідальному за електрогосподарство [13, с. 83].

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів вимагають проводити регулярні огляди та ремонт електромереж, а також вимірювання опору та ізоляції.

4.2. Проведення планування заходів цивільного захисту на підприємстві у випадку надзвичайних ситуацій

Екологічна обстановка у світі останніми роками погіршилась і вважається несприятливою. Засоби масової інформації майже щодня повідомляють про надзвичайні ситуації, що відбуваються у світі: лісові пожежі, повені, цунамі, землетруси, обвали, зсуви, селеві потоки, виверження вулканів, урагани, смерчі, снігові й пилові бурі та інші стихійні лиха, аварії і катастрофи на підприємствах і транспорті, що супроводжуються загибеллю людей, руйнуванням населених пунктів і об'єктів господарювання, у тому числі й у сільському господарстві, а часто забрудненням і зараженням довкілля.

Щорічно в нашій країні виникають надзвичайні ситуації природного та техногенного характеру, що призводить до загибелі багатьох людей і значних матеріальних збитків.

Масштаби, характер руйнувань і кількість постраждалих людей залежать від типу, масштабу і місця аварії, катастрофи або стихійного лиха, від швидкості розвитку надзвичайної ситуації, особливостей регіону, об'єктів господарювання і населених пунктів, що опинилися в районі надзвичайної ситуації. Таку ситуацію можна порівнювати з воєнними діями. Для проведення рятувальних робіт потрібне залучення великої кількості людей і матеріальних ресурсів, а несподіваний розвиток подій скорочує час на підготовку і проведення таких заходів [30].

Зниження масштабів людських втрат та матеріальних збитків, запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного і природного характеру, ліквідація їх наслідків є важливою загальнодержавною проблемою і одним з найважливіших завдань органів виконавчої влади, всіх органів керування цивільної оборони, керування всіх рівнів, спеціалістів і населення. Кардинальне вирішення проблем захисту населення і територій України від НС, зменшення їх соціально-економічних і екологічних наслідків можливе лише шляхом проведення цілого комплексу заходів.

У значній мірі досягнення цієї мети залежить від уміння керівників усіх рівнів (від об'єктового до урядового), спрогнозувати усі можливі наслідки НС, чітко спланувати заходи щодо їх запобігання та ліквідації, організувати керування під час їх виконання, високого стану готовності до дій у НС органів керування, сил і населення [Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 №5403-VI, ст. 130]. Виконання всіх умінь, завдань, перш за все, буде залежати від якості планування та повноти виконання запланованих заходів на об'єктовому рівні [16, с. 395].

Суть планування заходів ЦЗ, на випадок НС полягає в аналізі стану ЦЗ;

- оцінка обстановки, яка може скластися при виникненні аварій, катастроф і стихійних лих та застосування противником сучасних засобів ураження;
- розробка заходів, спрямованих на захист населення та підвищення стійкості функціонування в мирний час та в особливий період;
- установа послідовності, строків, способів здійснення намічених заходів і виконавців та визначенні необхідних ресурсів для їх проведення.

Головною метою планування заходів ЦЗ є створення умов для:

- організованого і своєчасного проведення заходів захисту робітників, службовців, їх сімей і населення, яке мешкає в зоні можливого ураження;
- забезпечення успішного проведення рятувальних і невідкладних робіт (РiНР) при ліквідації наслідків НС техногенного та природного характеру;
- участі в територіальній обороні та антитерористичній діяльності в особливий період.

Планування має бути також спрямоване на те, щоб запобігти або максимально знизити людські та матеріальні втрати, а також забезпечити життєдіяльність галузі, регіону підпорядкованих їм об'єктів і населення у разі виникнення вищезазначених ситуацій.

При плануванні заходів ЦЗ на особливий період повинно забезпечуватися взаємне узгодження і ув'язка їх із заходами мобілізаційного розгортання народного господарства та заходами, які проводять військове командування та органи керування ЦЗ [16, с. 396].

Планування повинно бути реальним, цілеспрямованим, конкретним, точним, гнучким, перспективним, базуватися на глибоко продуманих рішеннях, обґрунтованих розрахунках та враховувати специфіку і особливості діяльності. Воно повинно здійснюватися завчасно та забезпечувати своєчасний ввід планів ЦЗ в дію, особливо під час раптового виникнення НС техногенного та природного характеру і в особливий період.

Документами для планування є укази Президента України, законодавчі акти ВРУ, постанови та розпорядження КМУ, «План реагування на НС державного рівня», витяги з рішення начальника ЦЗ області, району по організації та веденню ЦЗ на території області або району, витяг з «Плану організації евакозаходів та визначення місць розміщення евакуйованого населення».

На об'єктах господарювання повинні бути розроблені два плани, а саме:

- дій з попередження та ліквідування НС (на мирний час);
- цивільного захисту (на воєнний час) [30].

Головна мета цих планів – максимальне зниження людських та матеріальних втрат у будь-яких умовах обстановки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було запропоновано енергоефективну систему керування освітленням у тепличному середовищі; досліджено її ефективність з точки зору енергоефективності, рівномірності розподілу світла та продуктивності сільськогосподарських культур у декількох системах керування. Запропонована система керування освітленням може збільшити економію енергії порівняно з традиційними системами керування освітленням, що базуються на часовому плануванні, одночасно досягаючи необхідного рівня освітленості для росту рослин у теплицях.

Представлено концепцію запропонованої системи освітлення та спроектовано архітектуру системи. Потім було вивчено та експериментально перевірено апаратну реалізацію, включаючи збір даних з датчиків та послідовний зв'язок із програмованими світлодіодними світильниками. Спочатку модель освітлення була ідентифікована на запропонованому робочому місці та змодельована в середовищі MATLAB/Simulink з різними умовами денного освітлення. Він показав, що за допомогою запропонованого методу управління освітленням можна досягти бажаних заданих точок світла як на червоному, так і на синьому каналах.

Додаткова система освітлення, оснащена програмованими червоними, синіми, ультрафіолетовими світлодіодними світильниками, датчиками RGB-світла та платою контролера, була встановлена в наметі для вирощування з імітованим денним світлом, щоб імітувати тепличне середовище. Запропонована система управління освітленням пройшла програмні випробування на контролері реального часу. Імітоване джерело денного світла, з різними рівнями освітленості, імітувало денне світло від сходу до сходу сонця. Побудовано картографування одноденного сонячного годинного PPFD у зимовий день з умовами ясного неба, а також досліджено контрольну продуктивність протягом 24-годинного світлового дня.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Y. Xu, Y. Chang, G. Chen, and H. Lin, "The research on LED supplementary lighting system for plants," *Optik (Stuttg)*., vol. 127, pp. 7193-7201, 2016.
2. B. Zhang, L. Yang, J. Zhu, Y. Zhao, and N. Liu, "Intelligent monitoring system of light intensity and CO₂ concentration in strawberries greenhouse," 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)., 2017, pp. 101-106
3. S. Y. Hui and Y. X. Qin, "A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 8, pp. 1967-1976, 2009
4. E. M. Gutsait, "Analysis of LED modules for local illumination," *J. Commun. Technol. Electron.*, vol. 52, no. 12, pp. 1377-1395, Dec. 2007.
5. N. Yeh and J. P. Chung, "High-brightness LEDs-Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2175-2180, 2009.
6. Андрійчук В.А. Дослідження світлодіодних джерел світла у випадку імдіодного живлення / Андрійчук В.А., Наконечний М.С., Осадца Я.М., Філюк Я.О. // Технічна електродинаміка, 2021. – №1. – Стор. 68-72. <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.068>.
7. L. Poulet, G. D. Massa, R. C. Morrow, C. M. Bourget, R. M. Wheeler, and C. A. Mitchell, "Significant reduction in energy for plant-growth lighting in space using targeted LED lighting and spectral manipulation," *Life Sci. Sp. Res.*, vol. 2, pp. 43-53, 2014
8. Kinetics of narrow-spectrum LED glow under pulsed power / Volodymir Andriichuk, Myroslav Nakonechnyi, Yaroslav Filiuk // *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*, 2023. — Vol 26, P. 230-235. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo26.02.230>.
9. L. H. P. Pinho, K. Jokinen, "The influence of the LED light spectrum on the growth and nutrient uptake of hydroponically grown lettuce," *Light. Res. Technol.*, pp. 1-16, 2016.

10. Philips Lighting. (2014, Sep.) "Light recipes for horticulture"[Online]. Available: http://www.lighting.philips.com/b-dam/b2b-li/en_AA/products/Horticulture/general-booklet-philips-led-lighting-in-horticulture-EU.pdf.
11. Дослідження кінетики свічення світлодіодних джерел світла / Андрійчук, В. А., Наконечний, М. С., і Філюк, Я. О, Костик Л. М., Осадца, Я. М. // Вісник Хмельницького національного університету: 2023. — Том 1. — №5. —С.
12. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. ОкіДЖний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
13. P. Pinho, T. Hytonen, M. Rantanen, P. Elomaa, and L. Halonen, “Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment,” *Light. Res. Technol*, vol. 45, no. 3, pp. 295-304, 2013.
14. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник/ В.Ц.Жидецький, В.С Джигирей, О.В.Мельников. – Вид. 5-те, доповнене. – Львів: Афіша, 2000. – 350 с.