

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ФІТООСВІТЛЕННЯ З ДИНАМІЧНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ СПЕКТРУ НА ОСНОВІ ESP32-H2-MINI

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Робота присвячена розробці інтелектуальної системи керування світлодіодним освітленням для максимізації ефективності фотосинтетичних процесів у рослин. Система побудована на основі сучасного мікроконтролера ESP32-H2-MINI-1-N2 із вбудованою підтримкою бездротових протоколів зв'язку, що дозволяє створювати масштабовані мережі освітлювальних пристроїв. Представлено алгоритмічне забезпечення для прецизійного управління спектральними характеристиками світла, розроблене мовою C++, з можливістю адаптивного налаштування параметрів освітлення відповідно до біологічних потреб конкретних культур на різних стадіях вегетації.

Ключові слова: автоматизація, світлодіодне освітлення, фотосинтез, агротехнології, ESP32-H2, бездротовий зв'язок, спектральне керування, мікроконтролери, інтелектуальні системи.

Abstract

This thesis focuses on developing an intelligent LED lighting control system designed to maximize photosynthetic efficiency in plants. The system is built upon the advanced ESP32-H2-MINI-1-N2 microcontroller featuring integrated wireless communication protocols, enabling the creation of scalable lighting device networks. The work presents algorithmic solutions for precise spectral light control, implemented in C++, with adaptive parameter adjustment capabilities tailored to the biological requirements of specific crops across different vegetation stages.

Keywords: automation, LED lighting, photosynthesis, agricultural technologies, ESP32-H2, wireless communication, spectral control, microcontrollers, intelligent systems.

Вступ

Інтелектуальні системи автоматизованого освітлення відіграють ключову роль у сучасних агротехнологіях та контрольованому вирощуванні рослин, особливо для культур з підвищеними фотосинтетичними потребами. Застосування LED-технологій із динамічним регулюванням спектрального складу створює можливості для створення ідеальних світлових умов, що стимулює інтенсивний ріст, морфогенез та репродуктивні процеси у рослин.

Практична реалізація базується на використанні мікроконтролера ESP32-H2-MINI-1-N2 з інтегрованою підтримкою бездротового протоколу Zigbee. Програмне забезпечення розроблено на мові C++ у середовищі Arduino IDE, що забезпечує адаптивне управління світлодіодними модулями з можливістю оперативного коригування яскравості та спектральних характеристик випромінювання.

Результати дослідження

У процесі створення розумної системи автоматизованого освітлення для рослин було отримано ряд важливих технологічних досягнень, що підтверджують правильність вибраної концепції та перспективи її впровадження в різноманітних середовищах вирощування.

1. Обґрунтування технологічної основи. Фундаментальним рішенням стало використання мікроконтролера ESP32-H2-MINI-1-N2 як центрального елемента системи керування. Цей інноваційний чіп від Espressif Systems характеризується рядом вагомих переваг: інтегрована підтримка передових комунікаційних стандартів, включаючи Zigbee 3.0 та Bluetooth LE, що забезпечує функціонування як в локальних кластерах, так і в розподілених мережевих структурах. Крім того, архітектура ESP32-H2 включає енергооптимізований процесорний блок з мінімальним тепловим профілем і численними програмованими входами-виходами для підключення датчиків та актуаторів. Це істотно спрощує конструкцію та знижує потребу в додатковій периферії. Наявність сумісності з Arduino Framework створює можливості для швидкої розробки з використанням потужної екосистеми готових рішень.

2.Динамічне управління світловим спектром. Центральною особливістю системи є здатність до інтелектуального коригування спектрального розподілу випромінювання. Це досягається через інтеграцію мультиспектральних LED-елементів, керованих високочастотними PWM-контролерами мікроконтролера. Система реалізує біологічно обґрунтовану логіку освітлення: початкові етапи розвитку характеризуються домінуванням короткохвильового синього спектру для активації кореневого морфогенезу; активна вегетація супроводжується збалансованим поєднанням синьо-червоного випромінювання для максимізації фотосинтетичної ефективності; репродуктивна фаза передбачає акцент на червоній та дальньо-червоній областях для стимуляції генеративних процесів. Така методологія дозволяє відтворювати природні світлові цикли та оптимізувати фізіологічні відгуки рослин на штучне освітлення.

3.Мережева архітектура на базі Zigbee. Використання вбудованих можливостей Zigbee у ESP32-H2-MINI-1-N2 дозволило створити децентралізовану мережеву інфраструктуру, здатну інтегруватися в комплексні системи розумного землеробства. Ключові характеристики Zigbee-реалізації: мінімальна латентність та оптимізоване енергоспоживання; mesh-топологія з можливістю багатошляхової маршрутизації для розширення зони покриття; висока стійкість до збоїв завдяки самовідновлювальним властивостям мережі. Кожен модуль функціонує як активний вузол, здатний до передачі та ретрансляції інформації, що забезпечує гнучкість розгортання без необхідності фізичного з'єднання компонентів.

4.Програмне забезпечення та алгоритми. Мікропрограмне забезпечення створено на C++ з використанням Arduino Core, що забезпечує: високу продуктивність виконання та прямий доступ до апаратних ресурсів; ефективне використання доступних бібліотек для роботи з PWM, I2C, мережевими протоколами; оптимізацію використання пам'яті та розподіл обчислювальних завдань за пріоритетами; впровадження апаратних переривань для реагування на зовнішні події. Архітектура коду підтримує дистанційне оновлення через OTA-механізми, що дозволяє модернізувати функціональність без фізичного втручання.

5.Енергетична оптимізація. Система розроблена з особливим акцентом на мінімізацію енергоспоживання для забезпечення автономної роботи: інтелектуальне регулювання яскравості з урахуванням циркадних ритмів та рівня природного освітлення; застосування високоефективних LED-компонентів та енергооптимізованих мікросхем з підтримкою sleep-режимів; адаптивна частота моніторингу сенсорів залежно від динаміки параметрів середовища; селективна активація Zigbee-модуля виключно під час комунікаційних сесій. Результатом є досягнення оптимального співвідношення функціональності та енергетичної ефективності для тривалої безперервної експлуатації.

Висновки

Створена інтелектуальна система керування освітленням, побудована на платформі ESP32-H2-MINI-1-N2 із вбудованою підтримкою Zigbee, відзначається високими показниками продуктивності, адаптивності та потенціалом для розширення функціональності. Система забезпечує не лише динамічне регулювання світлової інтенсивності, а й формування персоналізованих спектральних профілів, точно налаштованих під специфічні фізіологічні вимоги рослин протягом різних стадій їх життєвого циклу. Це створює передумови для максимізації фотосинтетичної ефективності, що безпосередньо корелює з інтенсивністю розвитку, стійкістю до захворювань та продуктивністю сільськогосподарських культур. Впровадження LED-технологій з програмованим спектральним контролем забезпечує істотне зниження енергетичних витрат у порівнянні з конвенційними системами освітлення, зберігаючи при цьому високу світлову ефективність. Програмна архітектура на мові C++ створює фундамент для гнучкої кастомізації та інтеграції в комплексні системи автоматизації. Zigbee-функціональність відкриває можливості для включення системи в розгалужені IoT-екосистеми або інтеграції в масштабні платформи "розумного" агровиробництва. Це забезпечує централізоване управління множинними освітлювальними вузлами та дозволяє створювати синергетичні зв'язки з іншими компонентами автоматизації: системами зрошення, кліматичного контролю та сенсорного моніторингу. Перспективи розвитку системи включають інтеграцію датчиків мікрокліматичних параметрів (температурні, гігрометричні, фотометричні сенсори, аналізатори концентрації CO₂), а також створення мобільних інтерфейсів для дистанційного моніторингу та управління. Імплементація алгоритмів машинного навчання дозволить системі адаптивно модифікувати освітлювальні сценарії в режимі реального часу на основі аналізу зовнішніх факторів, видових особливостей рослин та їх

поточних потреб, трансформуючи систему в повністю автономне, самонавчальне та високоефективне рішення. Отже, розроблена платформа становить міцний технологічний фундамент для подальшого прогресу в галузі агротехнологічної автоматизації та приватного садівництва, відкриваючи нові горизонти для інноваційних підходів у рослинництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Espressif Systems – Офіційна документація ESP32-H2. URL: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32-h2> (дата звернення: 20.03.2025).
2. Zigbee Alliance – Zigbee Specification. URL: <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/> (дата звернення: 20.05.2025).
3. Arduino – PWM LED Control Tutorial/ URL: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM> (дата звернення: 20.05.2025).
4. Photosynthetic Efficiency and Light Spectrum for Plant Growth. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847220300936> (дата звернення: 20.05.2025).
5. IoT системи автоматичного освітлення для рослин URL: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-smart-grow-light/> (дата звернення: 20.05.2025).

Гончарук Денис Олегович – здобувач вищої освіти групи АКІТР-23мс, кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: ymenyaysya2042@gmail.com

Богач Ілона Віталіївна – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: ilona.bogach@gmail.com

Honcharuk Denys Olehovich – student of ACITR-23MC group, Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Faculty of Intelligent Information Technology and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ymenyaysya2042@gmail.com

Bogach Ilona Vitaliivna – Associate Professor of Automation and Intelligent Information Technologies Department, Faculty of Intelligent Information Technology and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: ilona.bogach@gmail.com