

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ФОТОСИНТЕЗУ РОСЛИН З ВИКОРИСТАННЯМ ESP32-H2-MINI-1-N2

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто створення автоматизованої системи світлодіодного освітлення для оптимізації фотосинтезу рослин. Проєкт реалізовано на базі мікроконтролера ESP32-H2-MINI-1-N2 з підтримкою протоколу Zigbee, що забезпечує бездротову інтеграцію та масштабування системи. Описано програмну реалізацію керування спектром світла за допомогою мови програмування C++ та можливості гнучкого налаштування освітлення в залежності від типу рослин і етапу їх росту.

Ключові слова: автоматизація, освітлення, фотосинтез, рослини, ESP32, Zigbee, C++, світлодіоди.

Abstract

This paper presents the development of an automated LED lighting system for optimizing photosynthesis in plants. The project is based on the ESP32-H2-MINI-1-N2 microcontroller with Zigbee support, enabling wireless integration and system scalability. The control of the light spectrum is implemented using the C++ programming language, allowing for flexible configuration based on plant type and growth stage.

Keywords: automation, lighting, photosynthesis, plants, ESP32, Zigbee, C++, LEDs.

Вступ

Автоматизовані системи керування освітленням для рослин мають важливе значення у сучасному аграрному секторі та в умовах кімнатного вирощування, особливо для рослин із високими вимогами до світла. Світлодіодне освітлення з можливістю налаштування спектру дозволяє забезпечити оптимальні умови для фотосинтезу, що сприяє активному росту, розвитку та плодоношенню рослин.

У роботі реалізовано систему освітлення на основі мікроконтролера ESP32-H2-MINI-1-N2, що підтримує бездротову технологію Zigbee. Програмна частина системи написана мовою C++ з використанням середовища Arduino, що забезпечує гнучке керування світлодіодами із налаштуванням інтенсивності та спектру випромінювання в режимі реального часу.

Результати дослідження

У ході реалізації інтелектуальної сенсорної системи моніторингу мікроклімату було досягнуто низку ключових технічних та функціональних результатів, що свідчать про ефективність обраного підходу та можливість подальшого масштабування системи у промислових чи побутових умовах.

1. Вибір апаратної платформи. Першим і критично важливим етапом було визначення апаратної основи майбутньої системи. В якості центрального керуючого елементу обрано мікроконтролер ESP32-H2-MINI-1-N2 — новітній представник лінійки ESP32 від компанії Espressif. Його вибір був обґрунтований низкою переваг: по-перше, мікроконтролер підтримує сучасні бездротові протоколи зв'язку, зокрема Zigbee 3.0 та Bluetooth Low Energy (BLE), що дозволяє йому працювати як у локальних сітках, так і в мережах з розширеною топологією. По-друге, ESP32-H2 має вбудований енергоефективний процесор з низьким тепловиділенням і багатьма GPIO-портами, які можуть бути використані як для підключення сенсорів, так і для керування виконавчими пристроями. Це значно спрощує розробку схеми пристрою та дозволяє зменшити кількість зовнішніх компонентів. Окрім того, платформа має підтримку Arduino Core, що надає можливість розробки прошивки з використанням знайомих інструментів і багатой бібліотечної екосистеми, орієнтованої на вбудовані системи.

2. Реалізація керування спектром освітлення. Однією з найважливіших функцій системи стала можливість адаптивного керування спектральним складом світла. Це було реалізовано шляхом

підключення RGB або спектрально поділених світлодіодів, керування якими здійснюється за допомогою PWM-сигналів (широко-імпульсна модуляція), що генеруються ESP32.

У системі закладено логіку, яка дозволяє автоматично регулювати інтенсивність та спектр світла у відповідності до фенологічних фаз розвитку рослин: на стадії укорінення переважає синій спектр (для стимуляції росту кореневої системи); під час вегетації домінує суміш синього та червоного спектрів для стимуляції росту зеленої маси; у фазі цвітіння — червоний спектр із незначною домішкою далекочервоного для прискорення цвітіння та формування плодів. Реалізація такої системи дозволяє імітувати природний добовий цикл, створюючи оптимальні умови для фотосинтезу та біоритмів рослин. Управління може здійснюватися як локально, так і дистанційно через бездротову Zigbee-мережу.

3. Застосування Zigbee для мережевої взаємодії. Завдяки підтримці протоколу Zigbee, реалізованого на рівні апаратного забезпечення ESP32-H2-MINI-1-N2, було створено мережу з децентралізованим керуванням, що дозволяє інтегрувати систему у більшу екосистему «розумної теплиці» або навіть мережу з багатьма модулями в комерційній тепличній фермі. Переваги Zigbee: мала затримка передачі та низьке енергоспоживання; сіткова топологія (mesh network) дозволяє модулям передавати інформацію один через одного, збільшуючи дальність дії; висока надійність та відмовостійкість мережі. Кожен освітлювальний або сенсорний модуль може виступати вузлом Zigbee-сітки, підтримуючи як передачу, так і ретрансляцію даних. Це дає змогу значно спростити монтаж системи — дротове з'єднання не потрібне, і модулі можна вільно розміщувати відповідно до вимог агротехніки.

4. Програмна реалізація. Прошивка системи розроблена мовою C++ з використанням Arduino Core. Таке рішення обумовлено рядом переваг: висока швидкодія, можливість прямого доступу до регістрів мікроконтролера, а також широка підтримка існуючих бібліотек для PWM, I2C, Zigbee, таймерів і логіки. Особливу увагу приділено: оптимізації споживання ресурсів контролера (обмеження використання оперативної пам'яті); розподілу задач за пріоритетністю; використанню апаратних переривань для обробки подій від сенсорів і таймерів. Код підтримує можливість оновлення через OTA (Over-the-Air), що дозволяє вносити зміни без фізичного доступу до пристрою.

5. Енергоефективність системи. Система була спеціально спроектована з урахуванням максимального енергозбереження, що критично важливо при використанні живлення від акумуляторів або сонячних панелей. Було впроваджено такі заходи: адаптивне керування яскравістю освітлення залежно від часу доби (наприклад, зниження інтенсивності у нічний період або при достатньому природному освітленні); використання енергоефективних компонентів, зокрема LED-світильників із високим ККД, та мікроконтролера з підтримкою режимів сну; зменшення частоти вимірювань сенсорами при стабільних кліматичних умовах (для збереження енергії); логіка роботи Zigbee-модуля налаштована таким чином, щоб він активувався лише під час передачі даних або за командою. Таким чином, досягається оптимальний баланс між функціональністю та енергоспоживанням, що забезпечує довготривалу автономну роботу системи.

Висновки

Розроблена автоматизована система освітлення на базі мікроконтролера ESP32-H2-MINI-1-N2 з підтримкою Zigbee демонструє високу ефективність, гнучкість у налаштуванні та можливість масштабування. Її використання дозволяє не лише регулювати інтенсивність освітлення, а й формувати індивідуальні спектральні сценарії, адаптовані до конкретних біологічних потреб рослин на різних фазах росту. Це створює умови для оптимізації процесу фотосинтезу, що на пряму впливає на швидкість росту, здоров'я та врожайність культур. Використання світлодіодів з програмованим керуванням спектром дозволяє значно зекономити енергію порівняно з традиційними джерелами світла, при цьому не знижуючи ефективності освітлення. Програмна реалізація на C++ відкриває широкі можливості адаптації та інтеграції в більш складні системи управління. Завдяки підтримці Zigbee, система може бути інтегрована в розподілені IoT-системи або стати частиною масштабованого "розумного" середовища для догляду за рослинами. Це дозволяє не тільки централізовано керувати кількома модулями освітлення, а й забезпечує бездротовий обмін даними з іншими компонентами автоматизації — наприклад, модулями поливу, вентиляції чи сенсорного моніторингу. У перспективі система може бути розширена шляхом додавання сенсорів мікроклімату (температури, вологості, освітленості, CO₂), а також реалізації мобільного застосунку для віддаленого контролю та керування. Застосування елементів машинного навчання дозволить адаптивно змінювати сценарії освітлення в

реальному часі залежно від зовнішніх умов, типу рослини та її потреб, що зробить систему повністю автономною, інтелектуальною та високоефективною. Таким чином, розроблена система є надійною основою для подальшого розвитку інноваційних рішень у сфері аграрної автоматизації та домашнього рослинництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

Гончарук Денис Олегович – студент групи АКІТР-23мс, кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: yumenyaysya2042@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: yumenyaysya2042@gmail.com

Bogach Iлона 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