

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЙНА РОБОТА

на тему:

«Автоматизована система вирощування культур рослин»

(тема роботи)

Виконав : здобувач 2-го курсу, групи
ЗАКІТР-24м

(шифр групи)

спеціальності 174 «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

(шифр та назва спеціальності)

Освітня професійна програма Інформаційні
системи і Інтернет речей

Нікіта БОНДАР

(Ім'я та прізвище здобувача)

Керівник : професор каф. АІТ

Євген ПАЛАМАРЧУК

(науковий ступінь, вчене звання/посада, ім'я та прізвище)

«10» листопада 2025 р.

Опонент : д.т.н., проф. каф. КСУ

Володимир ДУБОВОЙ

(науковий ступінь, вчене звання/посада, ім'я та прізвище)

«11» листопада 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., проф. Олег БІСІКАЛО

(науковий ступінь, вчене звання)

«11» листопада 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій
Рівень вищої освіти II-ий (магістрський)
Галузь знані - 17 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність - 174 Автоматизація комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
Освітньо-професійна програма - Інформаційні системи і Інтернет речей

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., проф. Олег БІСІКАЛО

"26" вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ

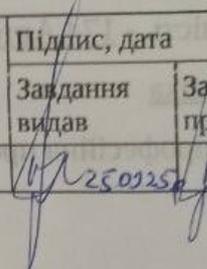
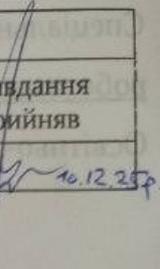
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Бондар Нікіті Ігоровичу

1. Тема роботи: «Автоматизована система вирощування культур рослин»
керівник роботи: професор кафедри АІТ, Євген ПАЛАМАРЧУК
затверджено наказом закладу вищої освіти від «24» вересня 2025 року № 313
2. Термін подання здобувачем роботи до 12 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: Розробити програмне забезпечення для
вбудованих системи з можливістю запускатися на архітектурах
мікроконтролерів Arduino та ESP8266 (NodeMCU) відповідно AVR 8-bit та
Tensilica 32-bit; Мова програмування – C++; Клієнтський рівень - Всесторінка
(HTML/CSS/JS) або Telegram-бот; Рівень даних - Сенсори та актуатори.
4. Зміст текстової частини: Аналіз предметної області та дослідження
поставленої задачі, вибір технологій для реалізації автоматизованої
системи, розробка програмно-апаратної частини системи, висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (або ілюстративного): UML-діаграма розгортання, діаграма прецедентів, UML-діаграма класів, діаграма об'єктів (приклад структури даних), графік зміни вологості ґрунту, готовий прототип розробленої системи, фрагмент проміжних даних стану системи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-4	Євген ПАЛАМАРЧУК, професор кафедри АІТ	 25.09.25	 16.12.25р.

7. Дата видачі завдання 25 вересень 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

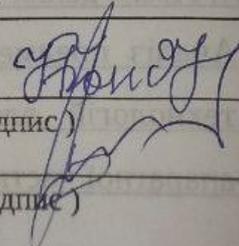
№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасних систем автоматизованого вирощування рослин та IoT-рішень у сільському господарстві	24 вересня 2024 р. - 13 жовтня 2024 р.	в.к.
2	Формування вимог до функціональних і технічних характеристик системи AutoGreenTech	14 жовтня 2024 р. - 5 листопада 2024 р.	в.к.
3	Вибір мікроконтролера, сенсорів та актуаторів для реалізації системи	6 листопада 2024 р. - 20 грудня 2024 р.	в.к.
4	Розробка архітектури програмно-апаратної частини системи та UML-моделей	21 грудня 2024 р. - 7 січня 2025 р.	в.к.
5	Реалізація алгоритмів моніторингу та керування параметрами середовища	8 січня 2025 р. - 11 лютого 2025 р.	в.к.
6	Розробка веб-інтерфейсу та Telegram-бота для віддаленого керування	12 лютого 2025 р. - 8 березня 2025 р.	в.к.
7	Тестування системи, аналіз результатів і розрахунок економічної ефективності	9 березня 2025 р. - 1 квітня 2025 р.	в.к.
8	Підготовка звітної документації та матеріалів до захисту МКР	2 квітня 2025 р. - 30 квітня 2025 р.	в.к.

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)


Нікіта БОНДАР

(прізвище та ініціали)

Євген ПАЛАМАРЧУК

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

УДК 631.37:004.543

Бондар Н. І. Автоматизована система вирощування культур рослин.

Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 171 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Інформаційні системи і Інтернет речей. Вінниця: ВНТУ, 2025. 158 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 53 назв; рис.: 7; табл. 18.

Метою роботи є створення повністю автономною системи, яка в автоматичному режимі, з урахуванням налаштувань та параметрів, заданих користувачем, займатиметься вирощуванням культур рослин.

Це дасть змогу більш економно використовувати ресурси, такі як вода та світло, необхідні під час процесу вирощування. Та завдяки великій кількості гнучких налаштувань та параметрів, підібрати найбільш оптимальні умови для росту здорової культури.

В даній роботі розглянуто основні аспекти побудави та розробки як програмної так і апаратної частин цієї системи.

Таких як скетч для платформи Ардуїно, написаний на мові C++ й графічна частина веб сайту, написана на HTML, CSS та JavaScript. Й сам мікроконтролер Ардуїно Нано, модуль бездротового зв'язку Wi-Fi ESP-8266, модуль реле, набір сенсорів перевірки рівня вологості та освітленості.

Досліджено саму реалізацію даної системи та аналоги існуючі на ринку. Проаналізовано технології, на основі яких була написана дана система, та методи які лягли в основу структури побудови даної системи та зв'язків між її компонентами.

Дана система була протестована на практичних задачах, для вирішення яких і була створена.

В результаті роботи було створена повністю автоматизована система, що може перейняти на себе усі нюанси процесу вирощування культури рослин.

Ключові слова: автоматизація, автоматизована система, Ардуїно, система вирощування, культивуація, C++, HTML, CSS, JavaScript, Embedded-Система

ABSTRACT

Bondar N. I. Automated system for growing plant crops.

Master's qualification work in specialty 171 - Automation, computer-integrated technologies and robotics. Information systems and the Internet of Things. Vinnytsia: VNTU, 2025. 158 p.

In Ukrainian. Bibliography: 53 titles; fig.: 7; table. 18.

The purpose of the work is to create a fully autonomous system that will automatically, taking into account the settings and parameters specified by the user, grow plant crops.

This will allow for more economical use of resources, such as water and light, required during the growing process. And thanks to a large number of flexible settings and parameters, to select the most optimal conditions for the growth of a healthy crop.

This work considers the main aspects of the construction and development of both the software and hardware parts of this system.

Such as a sketch for the Arduino platform, written in C++, and the graphic part of the website, written in HTML, CSS, and JavaScript. And the Arduino Nano microcontroller itself, the ESP-8266 Wi-Fi wireless communication module, a relay module, a set of sensors for checking the level of humidity and illumination.

The implementation of this system itself and analogues existing on the market were studied. The technologies on the basis of which this system was written, and the methods that formed the basis of the structure of building this system and the connections between its components were analyzed.

This system was tested on practical tasks, for the solution of which it was created.

As a result of the work, a fully automated system was created that can take over all the nuances of the process of growing plants.

Keywords: automation, automated system, Arduino, cultivation system, cultivation, C++, HTML, CSS, JavaScript, Embedded-System

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ.....	8
1.1 Аналіз сучасного стану розвитку автоматизованих систем.....	9
1.1.1 Класифікація автоматизованих систем.....	10
1.1.2 Традиційне вирощування з мінімальною автоматизацією.....	10
1.1.3 Сучасні технології автоматизації у вирощуванні культур.....	12
1.2 Основні компоненти автоматизованої системи.....	14
1.2.1 Сенсори для збору інформації.....	14
1.2.2 Контролери та мікропроцесори.....	16
1.2.3 Автоматизовані системи зрошення.....	18
1.2.4 Системи освітлення.....	20
1.2.5 Системи живлення.....	23
1.3 Економічна ефективність автоматизації.....	26
1.3.1 Розрахунок окупності автоматизованої системи.....	28
1.4. Приклади реального впровадження автоматизованих систем у світовій практиці.....	31
1.4.1 Міжнародний досвід впровадження повністю роботизованих систем.....	31
1.4.2 Приклади впровадження елементів автоматизації в Україні.....	33
1.5 Висновки до розділу.....	34
2 ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ	37
2.1 Вибір мікроконтролера.....	37
2.2 Аналіз можливих варіантів.....	38
2.2.1 Arduino-сумісні мікроконтролери.....	39
2.2.2 ESP-сімейство.....	39
2.2.3 Порівняльний аналіз.....	40
2.3 Порівняльна таблиця характеристик.....	42

2.3.1 Аналіз характеристик.....	43
2.3.2 Висновки.....	44
2.4 Розрахунок енергоспоживання.....	45
2.4.1 Формули для розрахунку.....	46
2.4.2 Практичні розрахунки.....	47
2.4.3 Аналіз результатів.....	47
2.4.4 Вартісна оцінка енергоспоживання.....	49
2.4.5 Висновки.....	50
2.5 Оцінка за критеріями.....	51
2.5.1 Аналіз результатів оцінювання.....	53
2.6 Висновки до розділу.....	55
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ.....	58
3.1 Архітектура системи.....	59
3.1.1 Структурна схема та опис рівнів.....	60
3.1.2. UML-діаграма розгортання.....	62
3.2 Розробка алгоритмів моніторингу та керування.....	64
3.2.1. Діаграма прецедентів.....	67
3.2.2. Опис Діаграми прецедентів.....	67
3.3. Розробка моделі даних.....	69
3.3.1. UML-діаграма класів.....	70
3.3.2. Діаграма об'єктів (Структура даних).....	72
3.3.3. Приклад логіка роботи системи.....	74
3.4. Опис програмних модулів системи автоматизованого контролю середовища вирощування.....	76
3.4.1. Модуль ConnetionClient.h.....	76
3.4.2. Модуль PersistantStorage.h.....	78
3.4.3. Модуль ProcessSensors.h.....	78
3.4.4. Модуль TelegramBot.h.....	79
3.4.5. Модуль WebServer.h.....	80
3.4.6 Висновок до підрозділу.....	81

3.5. Розробка користувацького інтерфейсу.....	81
3.5.1. Веб-додаток (Embedded Web Server).....	82
3.5.2. Telegram-бот.....	83
3.6. Тестування та експериментальні дослідження.....	85
3.6.1. Методика тестування.....	85
3.6.2. Експериментальні результати моніторингу вологості ґрунту.....	87
3.6.3. Аналіз графічних результатів експерименту.....	89
3.7 Рентабельність впровадження системи.....	91
3.7.1. Технологічний аудит розробленої системи.....	91
3.7.2. Розрахунок витрат на розробку системи.....	93
3.7.3. Розрахунок економічного ефекту від впровадження.....	98
3.7.4. Розрахунок терміну окупності.....	99
3.7.5 Опис рентабельності системи.....	100
3.8 Опис готового прототипу системи.....	102
3.8.1 Загальна конструкція прототипу.....	103
3.8.2 Апаратна частина.....	105
3.8.3 Програмна частина.....	107
3.8.4 Алгоритм роботи системи.....	110
3.8.5 Експериментальні результати.....	112
3.9 Висновки до розділу.....	114
4 ВИСНОВКИ.....	120
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	127
ДОДАТКИ.....	135
Додаток А (обов'язковий) - Технічне завдання.....	136
Додаток Б (обов'язковий) - Ілюстративна частина.....	143
Додаток В (обов'язковий) - Лістинг програмної частини основної функції.....	148
Додаток Г (обов'язковий) - ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	154

ВСТУП

Актуальність роботи. Зі зростанням потреби в ефективному та екологічно стійкому виробництві сільськогосподарської продукції автоматизація процесів вирощування рослин набуває все більшого значення. Традиційні методи ведення сільського господарства потребують значних ресурсів, таких як вода, електроенергія та людська праця, а також схильні до впливу кліматичних змін та людського фактору.

Сучасні інформаційні технології, зокрема Інтернет речей (IoT), сенсорні системи та автоматизоване управління, дозволяють значно підвищити ефективність аграрного виробництва. Впровадження автоматизованих систем контролю вологості, освітлення та температури сприяє раціональному використанню ресурсів, оптимізації умов для вирощування культур та зменшенню втрат урожаю.

Дослідження показують, що автоматизовані системи вирощування культур можуть знизити витрати води до 30-50% завдяки точковому поливу, а використання інтелектуального керування освітленням скорочує споживання електроенергії на 20-40%. Крім того, дистанційний моніторинг та контроль через IoT дозволяє швидко реагувати на зміни навколишнього середовища, мінімізуючи ризики, пов'язані з несприятливими погодними умовами [2].

Таким чином, розробка та впровадження автоматизованої системи вирощування культур є актуальним завданням, яке відповідає сучасним вимогам до ресурсозбереження, підвищення ефективності аграрного сектору та впровадження інновацій у сільське господарство.

Метою роботи є розробка та впровадження автоматизованої системи вирощування культур рослин, спрямованої на підвищення ефективності контролю мікроклімату та покращення умов росту. Система забезпечує моніторинг і управління ключовими параметрами середовища (вологість ґрунту, освітлення), що дозволяє оптимізувати використання ресурсів і підвищити

продуктивність вирощування.

Задачі досліджень магістерської кваліфікаційної роботи :

1. Провести аналіз сучасних технологій автоматизованого вирощування рослин та існуючих рішень моніторингу й керування.
2. Дослідити перспективи розвитку агротехнологій та напрямки впровадження IoT у сільському господарстві.
3. Розробити концепцію автоматизованої системи, включаючи вимоги, принципи роботи та вибір апаратного забезпечення.
4. Спроекувати програмне забезпечення та алгоритми моніторингу мікроклімату й автоматичного керування процесами.
5. Реалізувати програмну частину системи, зокрема мікропрограму контролера та веб/телеграм інтерфейс.
6. Виконати апаратну інтеграцію сенсорів, актуаторів і комунікаційних модулів та провести тестування системи.
7. Оцінити ефективність, економічну доцільність, а також розробити рекомендації щодо масштабування та вдосконалення системи.

Реалізація цих завдань дозволить створити ефективну, енергоощадну та ресурсоефективну систему автоматизованого вирощування культур, що сприятиме розвитку сучасних сільськогосподарських технологій.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого контролю та управління параметрами середовища для вирощування культурних рослин, зокрема моніторинг та регулювання рівня вологості ґрунту, освітлення з використанням сенсорних систем, мікроконтролерів та технологій Інтернету речей (IoT).

Предметом дослідження є методи та алгоритми автоматизованого моніторингу і управління мікрокліматом у системах вирощування культурних рослин на основі сенсорних технологій, мікроконтролерів та IoT-рішень [3].

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та вирішення

завдань у роботі використовуються такі методи, як математичне моделювання, що включає у себе моделювання алгоритмів прийняття рішень для автоматичного регулювання умов вирощування, експериментальні дослідження, протягом яких відбувається тестування роботи датчиків вологості та освітлення й випробування автоматизованої системи в лабораторних або реальних умовах. Також використано програмно-апаратне моделювання, для розробки прототипу системи на базі мікроконтролерів (ESP8266, Arduino) й написання програмного забезпечення для збору даних та управління параметрами середовища.

Науково-технічний результат роботи полягає у розробці нового підходу до автоматизованого управління мікрокліматом у системах вирощування культур, який поєднує адаптивне регулювання параметрів середовища, таких як вологість та освітленість, на основі сенсорного моніторингу та IoT-технологій. Запропоновано алгоритм інтелектуального контролю параметрів середовища, що враховує динамічні зміни зовнішніх умов і дозволяє автоматично налаштовувати режими поливу та освітлення для оптимального росту рослин. Розроблено методику оптимізації витрат води та електроенергії, яка дає змогу знизити споживання ресурсів завдяки точному контролю рівня вологості ґрунту та використанню енергоефективних режимів освітлення. Інтегровано систему дистанційного моніторингу та управління через IoT-платформу, що забезпечує можливість віддаленого контролю параметрів вирощування в реальному часі та їх коригування через веб-інтерфейс або Telegram бота.

Практична цінність роботи полягає у зменшенні витрат ресурсів, підвищенні врожайності, автоматизації процесів, гнучкості системи та її екологічній безпеці. Експериментальні дослідження автора показали, що автоматизований контроль вологості дозволяє знизити споживання води до 50%, а оптимізація освітлення зменшує витрати електроенергії до 40%. Система створює стабільні умови для росту рослин, адаптується до змін середовища та мінімізує потребу в ручному управлінні. Віддалений контроль через IoT-платформу забезпечує гнучке налаштування параметрів. Система підходить для різних умов вирощування, та легко масштабується під найрізноманітніші розміри

та об'єми вирощування.

Апробація та публікації матеріалів досліджень. Основні результати виконання магістерської кваліфікаційної роботи були опубліковані в матеріалах “LIV Всеукраїнська науково-технічна конференція факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації (2025)”, доповідалися й отримали схвальні відгуки. (Вінниця, ВНТУ, 2025 рр.) [1]

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Автоматизовані системи вирощування культурних рослин є одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасного аграрного сектору, який активно трансформується завдяки впровадженню передових цифрових технологій. Вплив автоматизації на сільське господарство важко переоцінити: такі системи не лише спрощують процес догляду за культурами, а й забезпечують більш раціональне та економне використання ресурсів. Це особливо важливо в умовах глобальної зміни клімату, зростання населення та, відповідно, збільшення попиту на продовольчу продукцію.

Сутність автоматизованих рішень полягає у використанні комплексу сенсорів, мікроконтролерів та інтелектуальних алгоритмів для постійного моніторингу та управління параметрами середовища. Такі системи контролюють рівень вологості ґрунту, температуру повітря, освітленість та навіть концентрацію поживних речовин, створюючи оптимальні умови для росту рослин. При цьому роль людського фактору зводиться до мінімуму, що зменшує ризики, пов'язані з помилками у процесі догляду за культурами.

Важливим аспектом є й економічна ефективність впровадження подібних систем. Оптимізація процесів поливу, освітлення та вентиляції дозволяє значно скоротити витрати на воду, електроенергію та добрива, а також підвищити рентабельність виробництва. Практичний досвід показує, що застосування автоматизації здатне забезпечити стабільне зростання врожайності навіть за несприятливих зовнішніх умов [4].

У світовій практиці використання автоматизованих систем у тепличному господарстві та на фермерських підприємствах є вже не лише інноваційним трендом, а й необхідністю, продиктованою жорсткою конкуренцією на ринку сільськогосподарської продукції. Український агросектор також активно інтегрує подібні рішення, прагнучи підвищити ефективність виробництва, зменшити

залежність від ручної праці та відповідати вимогам сучасної аграрної економіки.

Таким чином, створення й впровадження ефективних, гнучких і економічно виправданих автоматизованих систем вирощування культур має подвійне значення: воно дозволяє забезпечити стабільність врожаїв і покращити якість продукції, водночас сприяючи сталому розвитку сільського господарства, збереженню природних ресурсів та мінімізації негативного впливу аграрної діяльності на довкілля.

1.1 Аналіз сучасного стану розвитку автоматизованих систем

На сучасному етапі розвитку аграрного сектору автоматизація вирощування культур набуває дедалі більшої актуальності. Її впровадження зумовлене низкою факторів: необхідністю підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва, оптимізації використання водних і мінеральних ресурсів, а також зменшенням залежності від людського фактора, який часто є джерелом похибок і непередбачуваних втрат.

В останні десятиліття було розроблено низку підходів до автоматизованого вирощування рослин, які різняться за своєю архітектурою, функціональністю та рівнем інтелектуалізації. Серед найпоширеніших рішень виділяють:

- автоматизовані системи з елементарним управлінням, що контролюють лише окремі параметри (наприклад, полив чи освітлення), не маючи комплексної інтеграції;
- інтелектуальні системи на основі мікроконтролерів та сенсорних мереж, які забезпечують збір даних у реальному часі, прийняття рішень за заздалегідь визначеними алгоритмами та керування кількома виконавчими пристроями;
- інноваційні IoT-рішення, інтегровані у хмарні сервіси, що дозволяють здійснювати віддалений моніторинг і управління теплицями чи фермерськими ділянками, використовуючи мобільні додатки або веб-

інтерфейси.

Розвиток цих технологій зумовлений не лише технічними потребами, але й глобальними викликами. Зміна клімату, дефіцит прісної води, зростання населення планети та необхідність підвищення врожайності вимагають впровадження інновацій, здатних забезпечити сталий розвиток аграрної сфери.

Сучасні системи автоматизації поєднують у собі апаратні та програмні рішення, які працюють комплексно. Завдяки датчикам вологості, температури, освітленості та рівня поживних речовин, мікроконтролери здатні забезпечити повний цикл управління мікрокліматом: від контролю ґрунтових умов до активації насосів, освітлювальних приладів і вентиляційних систем. При цьому відбувається значне зменшення витрат енергоресурсів і підвищення ефективності використання добрив.

Таким чином, аналіз сучасного стану розвитку автоматизованих систем свідчить про їхнє стрімке поширення та зростаюче значення у сільському господарстві. Вони стають ключовим інструментом підвищення ефективності виробництва, стабілізації врожайності та раціонального використання природних ресурсів, що повністю відповідає світовим тенденціям цифровізації аграрного сектору.

1.1.1 Класифікація автоматизованих систем

Автоматизовані системи вирощування культур можна умовно поділити на три основні моделі, які відрізняються рівнем складності, інтеграції технологій та ступенем автономності.

1.1.2 Традиційне вирощування з мінімальною автоматизацією

Ця модель передбачає використання стандартних агротехнічних заходів із частковим застосуванням автоматизованих елементів контролю. До таких рішень зазвичай належать системи автоматизованого поливу, наприклад крапельний

полив із таймером або датчиками вологості, локальні метеостанції для спостереження за кліматичними показниками, а також механічні чи електронні пристрої для дозованого внесення добрив. Незважаючи на певну технологічну підтримку, такі системи мають суттєві недоліки, серед яких високий рівень ручної праці, обмежена ефективність через неможливість оперативного реагування на зміни параметрів середовища та відсутність гнучкого управління, адаптованого до потреб конкретної культури.

Наступним етапом розвитку є напівавтоматизовані системи, у яких частка технологічних рішень істотно збільшується. У таких системах застосовуються сенсори для контролю стану ґрунту та навколишнього середовища, включно з вимірюванням вологості, температури чи кислотності, використовуються пристрої дистанційного моніторингу на основі IoT-технологій, мобільних застосунків або спеціалізованого програмного забезпечення. На основі зібраних даних здійснюється автоматичний полив та внесення добрив, а базові алгоритми аналізу сприяють більш обґрунтованому прийняттю рішень. Такі системи дозволяють економити водні та енергетичні ресурси, зменшувати витрати ручної праці та забезпечувати доступ до даних у режимі реального часу завдяки можливості підключення до хмарних сервісів. Водночас вони й надалі залишаються залежними від оператора, який бере участь у частині процесів, та мають вищу вартість у порівнянні з традиційними методами.

Найбільш розвиненим типом є повністю автоматизовані системи, або так звані розумні ферми. Вони охоплюють комплекс технологічних рішень із глибокою інтеграцією сенсорних, аналітичних, керуючих і роботизованих компонентів. У таких системах використовується розгалужена мережа сенсорів, що забезпечує моніторинг усіх ключових параметрів, зокрема температури, вологості, освітленості чи рівня CO₂. Управління поливом, освітленням і живленням рослин здійснюється автоматично на основі показників сенсорів. Завдяки алгоритмам машинного навчання забезпечується прогнозування стану рослин та оптимізація режимів роботи. Хмарні технології дозволяють централізовано керувати процесами та зберігати великі обсяги даних, а

роботизовані комплекси виконують механічні операції догляду. Такі системи вирізняються максимальною ефективністю використання ресурсів і мінімальною участю людини у вирощувальному процесі, що забезпечує швидке реагування на будь-які зміни середовища. Проте вони потребують значних фінансових інвестицій, кваліфікованого персоналу для обслуговування та є більш вразливими до програмних збоїв і можливих кібератак.

Таким чином, класифікація автоматизованих систем вирощування рослин демонструє поступовий перехід від простих допоміжних рішень до повністю інтегрованих інтелектуальних комплексів. Така еволюція відображає загальні тенденції цифровізації та впровадження інновацій у сучасному сільському господарстві, де автоматизація стає ключовим чинником підвищення ефективності та конкурентоспроможності аграрного виробництва.

1.1.3 Сучасні технології автоматизації у вирощуванні культур

Розвиток автоматизованих систем вирощування культур став можливим завдяки значному прогресу в суміжних галузях, зокрема Інтернеті речей (IoT), штучному інтелекті (AI), аналізі великих даних (Big Data), робототехніці та безпілотних технологіях. Інтеграція цих напрямів у аграрну сферу суттєво змінила підхід до ведення сільського господарства, дозволивши перейти від ручної праці та часткової автоматизації до створення повністю автономних «розумних» аграрних систем.

Сучасні технології, що застосовуються у сфері автоматизованого вирощування культур рослин, охоплюють низку інноваційних напрямів, серед яких важливе місце займають Інтернет речей, штучний інтелект, робототехніка та дроніві системи. Технології Інтернету речей забезпечують дистанційний контроль за станом ґрунту, мікрокліматом і процесами росту рослин, використовуючи мережі сенсорів, які передають дані на сервери або хмарні платформи для подальшого аналізу й автоматизації прийняття рішень. Такий підхід дозволяє створювати адаптивні моделі керування, що враховують

особливості конкретних культур і коливання параметрів навколишнього середовища. Значний внесок у розвиток automated agriculture роблять системи штучного інтелекту, адже алгоритми машинного навчання здатні обробляти великі масиви даних, прогнозувати розвиток рослин, виявляти нестачу вологи або поживних речовин, формувати рекомендації щодо оптимізації режимів освітлення, поливу чи вентиляції. Паралельно з цим активно розвивається робототехніка: автоматизовані сільськогосподарські роботи виконують операції з догляду за культурами, вносять добрива, проводять боротьбу з бур'янами й навіть здійснюють збирання врожаю, що значно скорочує використання ручної праці та підвищує точність агротехнічних процесів. Додаткові можливості для моніторингу надають дрони, які застосовують для аерофотозйомки, контролю стану посівів, оперативного виявлення проблемних ділянок і точного розподілу добрив або засобів захисту рослин на великих площах.

Аналіз сучасного стану розвитку автоматизованих систем вирощування культур свідчить про значний прогрес у цій сфері. Перехід від традиційних методів до комплексних автономних рішень дозволив досягти суттєвого підвищення ефективності. Сучасні системи забезпечують не лише економію води, добрив і енергії, а й підвищення врожайності завдяки точному контролю умов середовища.

Таблиця 1.1 – Порівняння основних методів вирощування рослин за ключовими параметрами

Параметр	Традиційне вирощування	Напівавтоматизована система	Повністю автоматизована система
Витрати праці	Високі	Середні	Низькі
Споживання води	Високе	Оптимізоване	Мінімальне
Врожайність	Залежить від умов	Вища на 15–30 %	Вища на 50–70 %

Первинні витрати	Низькі	Середні	Високі
Окупність	Довготривала	Середня	Швидка

Перспективи подальшого розвитку пов'язані з удосконаленням алгоритмів штучного інтелекту, підвищенням автономності роботизованих систем, інтеграцією хмарних платформ та ширшим використанням альтернативних джерел енергії. Це створить умови для формування повністю екологічно сталих і ресурсоефективних аграрних комплексів майбутнього.

1.2 Основні компоненти автоматизованої системи

Сучасні автоматизовані системи вирощування культур є складними комплексами, що поєднують апаратні та програмні засоби для забезпечення постійного моніторингу, аналізу й регулювання параметрів середовища, необхідних для оптимального росту рослин. Вони створені з метою мінімізації ручної праці, оптимізації використання ресурсів і підвищення продуктивності сільського господарства.

До основних компонентів автоматизованої системи належать сенсорні модулі, мікроконтролер, виконавчі пристрої, комунікаційні модулі та програмне забезпечення для аналізу даних і прийняття рішень.

1.2.1 Сенсори для збору інформації

Сенсорні модулі є однією з найважливіших частин будь-якої автоматизованої системи. Вони забезпечують збір об'єктивної інформації про стан навколишнього середовища, що дозволяє системі приймати раціональні

рішення щодо поливу, освітлення, вентиляції та внесення поживних речовин.

У системах автоматизованого вирощування культур застосовують різні типи сенсорів, кожен із яких виконує специфічну функцію у процесі моніторингу та регулювання мікроклімату. Сенсори вологості ґрунту забезпечують визначення рівня вологи та передають дані контролеру для автоматичного керування системою поливу, що дозволяє уникнути як пересушування, так і надмірного зволоження. Температурні сенсори використовуються для вимірювання температури повітря та ґрунту, забезпечуючи підтримання стабільного теплового режиму та запобігаючи різким температурним коливанням, які можуть негативно впливати на ріст рослин. Сенсори освітленості контролюють рівень природного світла й дозволяють системі регулювати інтенсивність штучного освітлення, сприяючи оптимальним умовам для фотосинтезу. Для контролю газового середовища застосовуються газові сенсори, які вимірюють концентрацію вуглекислого газу, кисню та інших газів, важливих для життєдіяльності рослин, забезпечуючи своєчасну вентиляцію або коригування газового складу повітря. Крім того, у системах широко використовуються рН-метри та електропровідні сенсори, що визначають кислотність ґрунту або гідропонічного розчину та дозволяють контролювати рівень поживних речовин, забезпечуючи точне дозування добрив і підтримання хімічної рівноваги середовища [5].

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика сенсорів, що застосовуються у сучасних автоматизованих системах вирощування

Тип сенсора	Призначення	Діапазон вимірювання	Точність
Вологості ґрунту	Визначення рівня вологості	0–100 %	±2 %
Температурний	Контроль температури повітря і ґрунту	–40 °C до +85 °C	±0.5 °C
Освітленості	Вимірювання рівня світлового потоку	0–200 000 лк	±5 %
Газовий (CO ₂)	Моніторинг концентрації CO ₂ у повітрі	0–5000 ppm	±50 ppm

pH-метр	Визначення кислотності ґрунту або розчину	0–14 pH	±0.1 pH
---------	---	---------	---------

Сенсорна частина є базовою для функціонування системи, адже саме вона забезпечує зворотний зв'язок між фізичним середовищем і програмною логікою управління. Надалі отримані дані обробляються мікроконтролером, що виконує аналітичні обчислення та формує сигнали для виконавчих механізмів, забезпечуючи автоматичне регулювання параметрів середовища.

У наступному підрозділі буде розглянуто структуру та функціональні особливості мікроконтролерного блоку, який виконує роль центрального елемента системи управління.

1.2.2 Контролери та мікропроцесори

Контролери та мікропроцесори є «мозком» будь-якої автоматизованої системи вирощування культур, адже саме вони відповідають за обробку сигналів від сенсорів, аналіз отриманих даних і формування керуючих команд для виконавчих механізмів. Без ефективного контролера неможливо забезпечити узгоджену роботу системи, стабільність процесів і коректне реагування на зміни умов навколишнього середовища.

Мікроконтролери обробляють показники, що надходять від сенсорів температури, вологості, освітленості, газового складу чи pH, та відповідно до заданих алгоритмів вмикають або вимикають пристрої - насоси, вентилятори, лампи освітлення, клапани системи поливу тощо. Окрім того, вони забезпечують комунікацію із зовнішніми пристроями, хмарними сервісами або мобільними застосунками через бездротові технології Wi-Fi чи Bluetooth [6].

У сучасних автоматизованих системах вирощування культур рослин найпоширенішими є три основні типи контролерів: Arduino, ESP8266/ESP32 та Raspberry Pi. Контролери Arduino залишаються одним із найбільш доступних і широко використовуваних рішень для невеликих автоматизованих комплексів.

Вони вирізняються простотою програмування, наявністю великої кількості готових бібліотек і низькою вартістю, що робить їх зручними для навчальних або експериментальних проєктів [7].

Водночас Arduino має певні обмеження щодо продуктивності та не завжди підтримує бездротове підключення, що знижує можливості його використання у сучасних IoT-рішеннях. На відміну від нього, мікроконтролери ESP8266 та ESP32 є значно потужнішими і вже мають вбудовані модулі Wi-Fi, а ESP32 додатково підтримує Bluetooth. Це дозволяє створювати системи з віддаленим моніторингом і керуванням, підключати різноманітні сенсори та реалізовувати функції, що потребують більшого обсягу пам'яті та вищої обчислювальної потужності. Завдяки цьому ESP-платформи стали практично стандартом у сфері розробки IoT-систем для сільського господарства. Ще одним важливим типом контролерів є одноплатні комп'ютери Raspberry Pi, які значно перевищують Arduino та ESP-пристрої за продуктивністю й функціональністю. Вони можуть працювати з великими обсягами даних, виконувати складні аналітичні обчислення й підтримувати алгоритми машинного навчання. Саме тому Raspberry Pi часто використовують як основу інтелектуальних систем керування або як центральні серверні вузли, що отримують і аналізують дані з кількох теплиць одночасно.

Таблиця 1.3 – Порівняння характеристик мікроконтролерів, що застосовуються в автоматизованих системах

Тип контролера	Архітектура	Тактова частота, МГц	Пам'ять Flash, КБ	Наявність Wi-Fi	Bluetooth	Орієнтовна вартість, грн	Основні переваги
Arduino Uno	AVR 8-bit	16	32	Ні	Ні	200–250	Простота, надійність
ESP8266	Tensilica 32-bit	80	512	Так	Ні	180–250	Wi-Fi, продуктивніс

							ть
ESP32	Xtensa 32-bit (2 ядра)	160–240	до 16 384	Так	Так	300–400	Потужність, багатозадачність
Raspberry Pi	ARM 64-bit	до 1500	16 384+	Так	Так	1500–2500	Повноцінна ОС, AI-аналіз

Контролери є центральною ланкою всієї системи автоматизації. Вони забезпечують не лише обробку даних і керування виконавчими пристроями, але й виконують роль комунікаційного вузла, що поєднує апаратну частину системи з програмним забезпеченням. Саме від обраного типу мікроконтролера залежить стабільність роботи, енергоспоживання, масштабованість і можливість подальшого розвитку системи.

Для реалізації автоматизованої системи, подібної до AutoGreenTech, оптимальним вибором є ESP8266, який поєднує високу продуктивність, низьке енергоспоживання, інтегрований Wi-Fi-модуль і доступну вартість.

1.2.3 Автоматизовані системи зрошення

Системи зрошення є одним із найважливіших елементів автоматизованого вирощування культур, оскільки вони безпосередньо впливають на водний баланс ґрунту, рівень вологості та загальний стан рослин. Автоматизація процесу поливу дозволяє забезпечити раціональне використання водних ресурсів, уникнути пересушування або перезволоження ґрунту, а також зменшити витрати часу і праці.

Сучасні системи зрошення використовують інформацію, отриману від сенсорів вологості, температури та освітленості, і на основі цих даних автоматично регулюють подачу води. Це дозволяє підтримувати оптимальний мікроклімат у зоні кореневої системи та підвищувати врожайність при

мінімальному втручанні людини.

У сучасних автоматизованих системах вирощування культур застосовуються різні моделі зрошення, серед яких ключовими є крапельні, спринклерні та аеропонічні системи. Крапельний полив полягає у подачі води безпосередньо до кореневої системи кожної рослини через мережу трубок і крапельниць, що дозволяє мінімізувати втрати вологи через випаровування та знижує ризик розвитку грибкових захворювань. Завдяки високій економічності такі системи широко використовуються у теплицях і невеликих аграрних комплексах. Спринклерні, або розпилювальні, системи забезпечують рівномірне розбризкування води по поверхні ґрунту, імітуючи природний дощ, що робить їх ефективними для великих площ та відкритого ґрунту, де важливо підтримувати стабільний рівень вологості; проте такі системи зазвичай характеризуються вищим водоспоживанням порівняно з крапельним поливом. Аеропонічні системи представляють собою високотехнологічне рішення, яке застосовується переважно у сучасних вертикальних фермах і лабораторіях: корені рослин перебувають у повітрі, а волога подається у вигляді дрібнодисперсного аерозолю, що забезпечує оптимальний доступ кисню та максимально ефективно засвоєння поживних речовин.

Таблиця 1.4 – Порівняння типів систем зрошення

Тип системи	Принцип роботи	Ефективність використання води	Придатність для теплиць	Основні переваги	Недоліки
Крапельна	Подача води безпосередньо до кореня	Висока (до 95%)	Висока	Економія води, мінімальні втрати	Потребує регулярного очищення трубок

Спринклерна	Розпилення води над поверхнею ґрунту	Середня (70–80%)	Середня	Рівномірне зволоження, проста установка	Втрати через випаровування
Аеропонічна	Зрошення у вигляді аерозолі	Дуже висока (до 98%)	Висока	Максимальна ефективність, немає ґрунту	Висока вартість і складність системи

У структурі автоматизованої системи важливу роль відіграють електромагнітні клапани, які відповідають за відкривання або закривання потоків води відповідно до показників сенсорів. Коли вологість ґрунту падає нижче встановленого порогу, контролер подає сигнал на відкриття клапана, і система починає полив. Після досягнення оптимального рівня вологості клапан автоматично закривається, припиняючи подачу води [8].

Для підвищення ефективності поливу часто використовуються насосні станції з регульованим тиском, які дозволяють підтримувати стабільну інтенсивність подачі води навіть у системах з великою кількістю крапельниць або спринклерів.

Автоматизовані системи зрошення не лише оптимізують використання води, але й підвищують стійкість аграрного виробництва до кліматичних коливань. Вони забезпечують стабільність росту рослин, скорочують витрати ресурсів і створюють передумови для переходу до концепції «розумного фермерства» (Smart Farming), де контроль усіх процесів здійснюється дистанційно через IoT-технології.

Розрахунок необхідної кількості води для поливу можна виконати за формулою:

$$Q = E_{\text{TP}} \times K \times A , \quad (1)$$

де

Q – необхідний об'єм води (л);

$E_{\text{тр}}$ – випаровувальна здатність (мм/день);

K – коефіцієнт культури;

A – площа поливу (m^2).

1.2.4 Системи освітлення

Освітлення є одним із ключових факторів, що визначають успішність росту та розвитку рослин. У природних умовах цей процес забезпечується сонячним світлом, проте у теплицях або системах із контрольованим середовищем (наприклад, вертикальних фермах) необхідне використання штучних джерел світла. Саме тому системи освітлення є невід'ємною частиною автоматизованих комплексів вирощування культур [9].

Метою таких систем є не лише компенсація нестачі природного світла, але й створення оптимального спектрального балансу для фотосинтезу. Завдяки сучасним технологіям освітлення можна точно регулювати інтенсивність, тривалість і спектр випромінювання відповідно до стадії росту рослини - від проростання до плодоношення.

У сучасних системах автоматизованого вирощування культур застосовується кілька типів штучних джерел освітлення, серед яких найбільш поширеними є світлодіодні, люмінесцентні та натрієві лампи високого тиску. Світлодіодні (LED) лампи вважаються найефективнішим рішенням для теплиць і лабораторних установок, оскільки вирізняються високим коефіцієнтом корисної дії, довговічністю та низьким енергоспоживанням. Їх важливою перевагою є можливість точного налаштування спектра випромінювання - синього, червоного, білого або ультрафіолетового - що дозволяє формувати оптимальні умови для різних фаз розвитку рослин [10]. Люмінесцентні лампи також широко застосовуються, насамперед у невеликих теплицях і для вирощування розсади. Вони забезпечують рівномірне освітлення, відзначаються доступною ціною та простотою обслуговування, проте поступаються LED-технологіям у показниках

енергоефективності та терміну служби. Натрієві лампи високого тиску (HPS) використовуються переважно у промислових теплицях, оскільки забезпечують інтенсивний світловий потік із теплим спектром, близьким до природного сонячного. Разом з тим такі лампи характеризуються значним енергоспоживанням, інтенсивним тепловиділенням і потребують додаткових систем охолодження, що ускладнює їх експлуатацію.

Таблиця 1.5 – Порівняння основних типів ламп, що використовуються в автоматизованих системах освітлення

Тип лампи	Енергоефективність (лм/Вт)	Тривалість роботи, год	Можливість регулювання спектра	Вартість, грн	Основні переваги	Недоліки
LED	100–180	30 000–50 000	Так	300–1000	Економічність, довговічність, точне регулювання спектра	Вища початкова вартість
Люмінесцентна	60–90	10 000–15 000	Частково	150–300	Рівномірне світло, доступна ціна	Менша ефективність
HPS	80–140	15 000–20 000	Ні	400–700	Висока інтенсивність світла	Високе споживання енергії, нагрівання

У сучасних автоматизованих системах освітлення все частіше використовуються інтелектуальні контролери, які регулюють яскравість і спектр випромінювання залежно від часу доби, погодних умов або показників сенсорів освітленості. Наприклад, при зниженні природного освітлення система автоматично вмикає LED-модулі з необхідною інтенсивністю [11].

Для підвищення енергоефективності такі системи часто поєднують із

датчиками руху, фотодатчиками та таймерами, що дозволяє забезпечити оптимальне освітлення тільки тоді, коли це дійсно потрібно.

Таким чином, автоматизовані системи освітлення є важливою складовою технологій точного землеробства, адже вони забезпечують стабільне енергозберігаюче освітлення, сприяють швидшому росту рослин і дають змогу отримувати високоякісні врожаї незалежно від природних умов.

Для розрахунку необхідної потужності освітлення можна використати формулу:

$$P = \frac{E \times A}{\eta} \quad , \quad (2)$$

де

P – необхідна потужність (Вт);

E – необхідна освітленість (лк);

A – площа освітлення (м²);

η – коефіцієнт корисної дії ламп.

1.2.5 Системи живлення

Живлення рослин є одним із ключових факторів, що визначає інтенсивність росту, розвиток і врожайність культур. У контексті автоматизованих систем вирощування воно реалізується через контрольоване подавання поживних речовин, які забезпечують рослини необхідними макро- та мікроелементами. Правильно організована система живлення дозволяє не лише підтримувати оптимальний баланс елементів у ґрунті чи розчині, а й мінімізувати втрати добрив, підвищуючи ефективність використання ресурсів [12].

Основна мета автоматизованих систем живлення - забезпечення точного дозування і своєчасного внесення поживних речовин відповідно до фаз росту

рослин і поточного стану середовища. Такий підхід сприяє підвищенню якості продукції, стабільності розвитку рослин і зниженню екологічного навантаження [13].

До основних компонентів системи живлення у сучасних автоматизованих комплексах вирощування культур належать автоматизовані дозатори добрив, гідропонічні установки та аналізатори складу ґрунту або поживного розчину. Автоматизовані дозатори добрив забезпечують точне регулювання подачі поживних речовин у субстрат або водний розчин. Вони можуть бути механічними, наприклад пропорційними насосами, або електронними, які працюють під керуванням мікроконтролера, що дозволяє системі коригувати концентрацію розчину відповідно до показників сенсорів, таких як рН, електропровідність чи вологість. Значну роль відіграють також гідропонічні системи, у яких рослини вирощуються без ґрунту, а їхня коренева система занурена у поживний розчин із контрольованим складом і температурою. Автоматизовані гідропонічні комплекси дозволяють точно відстежувати рівень рідини, частоту циркуляції розчину та його хімічний баланс, що забезпечує високу ефективність засвоєння поживних речовин, значну економію води - до 70–80 % - і повний контроль мікроклімату [14]. Завершальним елементом системи є аналізатори, які визначають концентрацію ключових елементів живлення - азоту, фосфору, калію - а також кислотність і електропровідність середовища. На основі цих даних автоматизована система здійснює корекцію параметрів живлення, забезпечуючи точне дозування необхідних речовин відповідно до поточних потреб рослин.

Таблиця 1.6 – Порівняння основних типів систем живлення у автоматизованому вирощуванні

Тип системи	Принцип дії	Основні переваги	Недоліки	Ефективність засвоєння

				поживних речовин, %
Автоматизовані дозатори	Дозування добрив через систему поливу	Висока точність, економія ресурсів	Потребують регулярного обслуговування	85–90
Гідропонічна	Вирощування у поживному розчині без ґрунту	Повний контроль живлення, швидке зростання	Висока початкова вартість	95–98
Ґрунтова з автоматичним аналізом	Внесення добрив на основі даних сенсорів	Оптимізація складу ґрунту	Обмежена точність при неоднорідності ґрунту	80–85

Для управління системами живлення широко використовуються мікроконтролерні модулі (ESP8266, ESP32, Raspberry Pi), які забезпечують зчитування показників із сенсорів рН і ЕС, формують керуючі сигнали для дозаторів і насосів та передають дані у хмарні сервіси для зберігання та аналізу.

Також у сучасних системах застосовуються алгоритми машинного навчання, що дозволяють прогнозувати потреби рослин у поживних речовинах на основі історичних даних і поточних параметрів середовища. Це дає змогу реалізувати адаптивне живлення, коли система самостійно підлаштовується під конкретну культуру або фазу її розвитку.

Отже, автоматизовані системи живлення є ключовим елементом сучасних агротехнологій, які забезпечують ефективне використання добрив, стабільний розвиток культур і високу врожайність. Вони формують основу для створення повністю автономних рішень у рамках концепції «розумних теплиць» (Smart

Greenhouses) [15].

Для визначення оптимального об'єму добрив можна використовувати формулу:

$$D = \frac{N_{\text{опт}} \times A}{C}, \quad (3)$$

де

D – необхідна кількість добрива (кг);

$N_{\text{опт}}$ – оптимальна норма внесення (кг/га);

A – площа вирощування (га);

C – концентрація активної речовини в добриві (%).

Автоматизовані системи вирощування рослин являють собою комплекс високотехнологічних рішень, що поєднують апаратні та програмні засоби для створення контрольованого мікроклімату. Їх головна мета - забезпечення стабільного росту культур при мінімальних витратах ресурсів і людської праці.

Сучасні системи базуються на використанні сенсорів, що забезпечують точний моніторинг стану середовища (вологість, температура, освітленість, концентрація CO_2 , рН тощо), мікроконтролерів або мікропроцесорів, які обробляють зібрані дані та формують керуючі сигнали, а також виконавчих механізмів, що автоматично регулюють подачу води, живлення та освітлення.

Використання автоматизованих систем зрошення, інтелектуальних систем освітлення та точних дозаторів добрив дозволяє досягти високої ефективності сільськогосподарського виробництва. Завдяки цьому фермери отримують можливість контролювати процес вирощування дистанційно, мінімізуючи вплив людського фактора та підвищуючи точність управління.

Крім того, інтеграція технологій Інтернету речей (IoT), машинного навчання та аналітики великих даних відкриває нові перспективи для впровадження інтелектуальних систем прийняття рішень. Такі рішення дозволяють не лише

підтримувати оптимальні умови для росту рослин, а й прогнозувати потреби у воді та поживних речовинах, що сприяє переходу до концепції «розумного землеробства» (Smart Farming).

Отже, автоматизація процесів вирощування культур є стратегічним напрямом розвитку сучасного аграрного сектору. Вона сприяє підвищенню врожайності, зменшенню витрат, екологічній стабільності та сталому розвитку сільського господарства в умовах глобальних кліматичних змін [16].

1.3 Економічна ефективність автоматизації

Оцінка економічної ефективності є одним із найважливіших етапів при впровадженні автоматизованих систем у сільськогосподарське виробництво. Вона дозволяє визначити доцільність інвестицій, прогнозувати прибутковість і розрахувати термін окупності проекту. Впровадження систем автоматичного контролю та управління мікрокліматом, поливом і живленням культур сприяє не лише підвищенню врожайності, а й суттєвому скороченню експлуатаційних витрат [17].

Основними критеріями оцінки ефективності автоматизації є сукупність економічних та технологічних показників, що визначають доцільність впровадження системи. До них належать початкові капіталовкладення, які охоплюють витрати на закупівлю обладнання, монтаж, налаштування та придбання програмного забезпечення. Важливим фактором є також рівень експлуатаційних витрат, що включають регулярне споживання електроенергії, технічне обслуговування, ремонт і можливі оновлення апаратних компонентів протягом усього терміну експлуатації. Значущим критерієм виступає підвищення врожайності, яке досягається завдяки точному та стабільному регулюванню параметрів середовища, таких як температура, вологість, освітлення та живлення. Водночас ефективність оцінюється змінами динаміки чистого прибутку, що зростає внаслідок стабільного виробництва продукції високої

якості та зменшення втрат урожаю. Узагальнювальним показником виступає термін окупності, який характеризує період, протягом якого здійснені інвестиції повертаються за рахунок отриманого фінансового результату.

Для демонстрації ефективності розглянемо умовне фермерське господарство площею 1 гектар, що вирощує овочеві культури [18]. У порівняльному аналізі оцінено показники традиційної та автоматизованої систем вирощування.

Таблиця 1.7 – Порівняльний аналіз економічної ефективності традиційної та автоматизованої системи

Показник	Традиційна система	Автоматизована система
Витрати на систему	5 000 \$	15 000 \$
Річні витрати на обслуговування	2 000 \$	1 000 \$
Додатковий приріст врожаю	0 %	40 %
Чистий прибуток за рік	10 000 \$	18 000 \$
Окупність	2–3 роки	1–2 роки

Як видно з таблиці, автоматизована система потребує вищих початкових інвестицій, однак з часом забезпечує значно менші експлуатаційні витрати та вищий рівень доходу. Завдяки підвищенню врожайності на 40%, скороченню втрат води та електроенергії, система окупається приблизно за 1–2 роки, тоді як традиційна модель - лише за 2–3 роки.

Крім того, автоматизація дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, забезпечує стабільність якості врожаю та створює умови для масштабування виробництва без суттєвого збільшення трудових витрат.

Отже, впровадження автоматизованих систем вирощування культур має високу економічну доцільність. Незважаючи на значні початкові вкладення, такі

системи швидко окупаються за рахунок підвищення врожайності, зменшення експлуатаційних витрат і поліпшення якості продукції. У результаті господарство отримує підвищення прибутковості на 50–80% та створює базу для подальшого розвитку інноваційних технологій у сфері точного землеробства.

1.3.1 Розрахунок окупності автоматизованої системи

Щоб оцінити термін окупності інвестицій, використаємо формулу розрахунку:

$$T = \frac{C_{\text{інвест}}}{P_{\text{чист}}}, \quad (4)$$

де

T – термін окупності (роки),

$C_{\text{інвест}}$ – початкові капіталовкладення (\$),

$P_{\text{чист}}$ – річний чистий прибуток (\$).

Для традиційної системи:

$$T_{\text{традиц}} = \frac{5000}{10000} = 0.5 \text{ року}, \quad (5)$$

(без урахування експлуатаційних витрат)

З урахуванням щорічних витрат на обслуговування:

$$T_{\text{традиц}} = \frac{5000}{(10000 - 2000)} = 0.625 \text{ року} \approx 2 - 3 \text{ роки}, \quad (6)$$

Для автоматизованої системи:

$$T_{\text{авт}} = \frac{15000}{18000} = 0.83 \text{ року} , \quad (7)$$

(без урахування експлуатаційних витрат)

З урахуванням зниження витрат на обслуговування:

$$T_{\text{авт}} = \frac{15000}{(18000 - 1000)} = 0.94 \text{ року} \approx 1 - 2 \text{ роки} , \quad (8)$$

Таким чином, результати економічного аналізу підтверджують, що впровадження автоматизованих систем вирощування культур є економічно доцільним та стратегічно вигідним рішенням для сучасних фермерських господарств. Незважаючи на більші початкові інвестиції, такі системи швидко окупаються за рахунок підвищення врожайності, зниження експлуатаційних витрат і раціонального використання ресурсів [19].

Автоматизація дозволяє значно оптимізувати витрати на робочу силу, забезпечує стабільність технологічних процесів і зменшує ризики, пов'язані з людським фактором. Завдяки точному контролю параметрів середовища - вологості, температури, освітленості та живлення - досягається стале підвищення продуктивності агровиробництва.

До основних переваг автоматизації належить істотне зниження витрат на обслуговування, оскільки зменшується потреба у фізичній праці, оптимізується використання енергоресурсів і води, що загалом сприяє економічнішому функціонуванню системи [20]. Важливим результатом упровадження автоматизованих технологій є також збільшення врожайності, яке досягається

завдяки постійному підтриманню оптимальних умов для росту культур і точному дозуванню поживних речовин; у багатьох випадках це дозволяє забезпечити приріст урожаю на рівні 30–50 %. Сукупність цих факторів сприяє швидкій окупності інвестицій, адже підвищення ефективності виробництва та стабілізація агротехнологічних процесів зменшують термін повернення вкладених коштів до 1–2 років, що робить автоматизацію економічно вигідним і стратегічно обґрунтованим рішенням.

Отже, автоматизовані системи вирощування культур не лише підвищують ефективність аграрного бізнесу, але й формують основу для переходу до цифрового сільського господарства. Це перспективний напрямок розвитку галузі, який забезпечує сталий економічний ріст, підвищення конкурентоспроможності та екологічну збалансованість аграрного виробництва [21].

1.4. Приклади реального впровадження автоматизованих систем у світовій практиці

Автоматизовані системи вирощування культур та технології Точного землеробства (Precision Agriculture) вже давно вийшли за межі експериментальних лабораторій, ставши ключовим елементом сучасного аграрного виробництва по всьому світу. Використання передових технологій, таких як Штучний інтелект (AI), Інтернет речей (IoT), робототехніка та біотехнології, дозволяє не просто підвищити ефективність, а й принципово змінити економіку вирощування, зменшивши витрати на ресурси та покращивши якість продукції.

1.4.1 Міжнародний досвід впровадження повністю роботизованих систем

Iron Ox (США): Повністю автономні роботизовані ферми. Компанія Iron Ox, що базується у Каліфорнії та Техасі, є одним із найяскравіших прикладів радикальної автоматизації. Вони створили інтегровану, повністю автономну гідропонну ферму під назвою *The Farm Operating System*.

Технологічна суть автоматизованого рослинництва полягає у здійсненні всього процесу вирощування рослин, від насінини до збору врожаю, без прямого втручання людини. Ключову роль у цьому відіграє робототехніка: мобільні роботи, оснащені високоточними маніпуляторами, беруть на себе всі рутинні та складні операції. Вони відповідають за посадку, переміщення горщиків відповідно до фази росту рослини, безперервний моніторинг і, зрештою, за збирання врожаю [22]. Управління цим складним процесом забезпечується Штучним Інтелектом (AI), який працює спільно з технологіями Інтернету Речей (IoT). Численні сенсори (IoT) постійно збирають критичні дані про стан середовища (рН розчину, рівень кисню, концентрація поживних речовин, освітленість та температура). AI безперервно аналізує ці дані і приймає рішення про точне дозування води та добрив, що дозволяє значно мінімізувати відходи. Цей підхід забезпечує вагомий економічний та екологічний ефект: він дозволяє зменшити споживання води на 90% порівняно з традиційним землеробством і гарантує стабільно високу якість врожаю незалежно від зовнішніх кліматичних умов.

Vertical Farms (Каліфорнія, США): Оптимізація простору та клімату. Вертикальні ферми є світовим трендом, особливо в густонаселених регіонах, де вартість землі висока.

Конструктивні особливості вертикальних ферм полягають у їхній багаторівневій (вертикальній) будові та використанні енергоефективного LED-освітлення, що дозволяє досягти надзвичайно високої щільності вирощування [23]. Автоматизація в цих системах зосереджена на точному контролі мікроклімату в замкнутому циклі. Спеціалізовані автоматизовані системи постійно регулюють такі параметри, як температура, вологість, рівень

вуглекислого газу (CO₂) та спектр світла (фотосинтетично активне випромінювання, PAR), створюючи ідеальні умови для росту рослин. У результаті, такий підхід дає змогу отримувати в 10 разів більше врожаю на одиницю площі порівняно з традиційними горизонтальними теплицями [24]. Крім того, оскільки ці ферми часто розташовані безпосередньо поблизу кінцевого споживача, забезпечується мінімальний час, що минає від збору врожаю до його появи на полиці магазину.

Spread (Японія): Лідер у масовому виробництві салату. Компанія Spread здобула визнання завдяки своїй повністю роботизованій вертикальній фермі Vegetable Factory, розташованій у Кіото. Ця ферма демонструє, що повна автоматизація може бути економічно вигідною навіть для низькомаржинальних культур, оскільки вона спеціалізується на масовому виробництві салату. Уся інфраструктура ферми побудована на технологіях Інтернету Речей (IoT): вона обладнана високочутливими сенсорами, які безперервно відстежують кожен аспект середовища, включаючи концентрацію поживних речовин у живильному розчині та рівень CO₂. Ключовим досягненням Spread є стабільна врожайність та висока якість продукції. Це забезпечується тим, що втручання зовнішніх факторів, таких як погода або шкідники, повністю усунуто, що, своєю чергою, гарантує бізнесу передбачувані та надійні обсяги виробництва.

1.4.2 Приклади впровадження елементів автоматизації в Україні

Незважаючи на відсутність поки що повністю роботизованих комплексів, український аграрний сектор активно інтегрує окремі автоматизовані та цифрові рішення, особливо в тепличному господарстві та широкомасштабному землеробстві.

Розумні теплиці на базі IoT-систем в Україні активно розвивається сегмент "розумних теплиць", де для автоматизації рутинних процесів використовуються мікроконтролери та сенсори [25]. Основний акцент робиться на моніторингу за

допомогою датчиків, що відстежують температуру повітря, вологість ґрунту та рівень освітлення. Прикладом є системи автоматизованого зрошення, які реагують на реальний стан ґрунту (наприклад, використовуючи датчики TDR/FDR) і активують полив лише тоді, коли вологість падає нижче встановленого порогу. Це значно ефективніше, ніж полив за фіксованим графіком [26]. Такі рішення, часто реалізовані як локальні IoT-системи, подібні до проекту AutoGreenTech, доводять свою актуальність та економічну доцільність на місцевому ринку.

Крім того, великі аграрні компанії впроваджують елементи Точного землеробства для оптимізації внесення ресурсів. Зокрема, такі гіганти, як МХП або Агро ЛВ Лімітед, використовують автоматизоване дозування добрив. Вони інтегрують системи аналізу ґрунту з GPS-навігацією та обладнанням сільськогосподарської техніки. Як наслідок, ці системи дозволяють диференційовано вносити добрива та засоби захисту лише у необхідних місцях. Це призводить до зменшення витрат на добрива на 20-30% і одночасно мінімізує негативний вплив на довкілля [27].

Проект "Smart Agro" та моніторинг посівів за допомогою дронів. Цифрова трансформація агропромислового комплексу України активно включає використання аерокосмічних та безпілотних технологій. Зокрема, моніторинг дронами (UAV) відіграє ключову роль: дрони, оснащені мультиспектральними камерами, збирають детальні дані про здоров'я посівів, використовуючи для аналізу вегетаційні індекси, такі як NDVI. На основі отриманих даних AI-системи аналізують проблемні ділянки, виявляючи дефіцит вологи, ознаки хвороб чи пошкодження шкідниками. Це дозволяє здійснювати точкове втручання та проводити обробіток лише на тих ділянках, де це необхідно, замість суцільної обробки всього поля. Такий підхід вважається найвищим проявом автоматизації у відкритому ґрунті [28].

Реальні приклади впровадження автоматизованих систем у сільському господарстві чітко демонструють глобальний вектор розвитку. У країнах з

розвиненою економікою вже функціонують повністю роботизовані вертикальні ферми, які забезпечують стійкість та ефективність виробництва. В Україні, хоча й повільніше, але активно розвиваються локальні IoT-рішення, розумні теплиці та елементи точного землеробства. Подальша інтеграція таких технологій, як AutoGreenTech, є критично важливою для зменшення залежності від погодних умов, підвищення якості продукції та забезпечення конкурентоспроможності аграрного сектору на міжнародному рівні

1.5 Висновки до розділу

Цей розділ роботи був присвячений глибокому аналізу предметної області - автоматизованим системам моніторингу та керування процесами вирощування рослин. Проведене дослідження заклало міцну теоретичну базу для подальшої практичної розробки програмно-апаратної системи AutoGreenTech [29].

Дослідження охопило низку ключових теоретичних завдань, спрямованих на обґрунтування застосування автоматизованих систем в агросекторі. Спершу було визначено основні підходи до автоматизації, починаючи від простих методів за фіксованим графіком (таймерами) до складних адаптивних систем, що використовують IoT-сенсори та принципи гістерезису для точного керування актуаторами (полив, освітлення, клімат) [30]. Далі був проаналізований технологічний фундамент таких систем, з акцентом на мікроконтролерах, зокрема ESP8266, які забезпечують енергоефективну роботу вбудованого веб-сервера та інтеграцію з віддаленими сервісами, такими як Telegram-бот, для оповіщення та керування.

Дослідження також включало аналіз міжнародного та локального досвіду успішного впровадження подібних технологій, зокрема, на прикладі повністю роботизованих вертикальних ферм Iron Ox та Spread, а також актуального стану впровадження елементів Точного землеробства в Україні. Це підтвердило, що обраний напрямок є глобально затребуваним та має високий потенціал для

адаптації на місцевому рівні. Критично важливим аспектом стало обґрунтування економічної ефективності. Проведений порівняльний аналіз традиційного та автоматизованого підходів чітко продемонстрував переваги останнього. Доведено, що автоматизація дозволяє значно оптимізувати використання ресурсів – води (за рахунок поливу "на вимогу"), електроенергії (контроль освітлення та клімату) та добрив. Це є життєво важливим фактором в умовах зростання вартості енергоносіїв та необхідності впровадження екологічно стійких практик [31]. На основі проведених розрахунків прогнозований термін окупності системи AutoGreenTech складає лише близько 1,5 сезону, що підтверджує її високу фінансову доцільність.

Таким чином, результати теоретичного дослідження повністю підтверджують гіпотезу про те, що автоматизовані системи не лише підвищують ефективність агровиробництва, але й забезпечують його стабільність, незалежність від людського фактора та зменшують залежність від несприятливих кліматичних умов. На основі цих висновків подальша робота буде зосереджена на практичній реалізації та вдосконаленні системи: наступним кроком є розробка детального алгоритму функціонування та створення робочого прототипу для практичної оцінки ефективності та калібрування сенсорів. У перспективі планується аналіз можливостей для подальшої інтеграції системи з Машинним навчанням (ML). Це дозволить перейти від простого керування за пороговими значеннями до прогнозування потреб рослин, створюючи ще більш гнучку та адаптивну систему управління.

2 ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

2.1 Вибір мікроконтролера

Мікроконтролер є центральним елементом будь-якої автоматизованої системи керування, адже саме він виконує функції збору, аналізу та обробки інформації, а також формує сигнали керування для виконавчих механізмів. У системах автоматизованого вирощування рослин мікроконтролер має працювати у реальному часі, забезпечуючи стабільний моніторинг параметрів мікроклімату - таких як температура, вологість ґрунту, освітленість, рівень CO₂ тощо - та оперативно реагуючи на зміни умов середовища [32].

Для вибору оптимального мікроконтролера необхідно враховувати як технічні характеристики, так і економічну доцільність його використання. В умовах аграрного виробництва важливо, щоб пристрій був енергоефективним, надійним і здатним працювати автономно протягом тривалого часу.

Ключові вимоги включають низьке енергоспоживання для тривалої автономної роботи від акумуляторів або сонячних панелей, що забезпечується режимами глибокого сну ESP32. Необхідна також достатня кількість цифрових та аналогових входів/виходів для підключення широкого спектру сенсорів (рН, вологість, освітленість) та виконавчих пристроїв (помпи, реле, клапани, вентилятори). Важливою є підтримка сучасних інтерфейсів зв'язку (UART, SPI, I²C) для інтеграції додаткових модулів. Наявність вбудованих бездротових модулів Wi-Fi та Bluetooth є критичною для реалізації віддаленого моніторингу та керування через веб-інтерфейс або мобільний застосунок. Крім того, мікроконтролер має бути сумісним із поширеними середовищами програмування, такими як Arduino IDE та MicroPython, для спрощення розробки.

Окрім основних вимог, для підвищення ефективності роботи системи враховуються тактова частота процесора, обсяг оперативної та флеш-пам'яті для

зберігання логів і складних алгоритмів, діапазон робочої температури для стабільної роботи в тепличних умовах, а також можливість оновлення прошивки OTA (Over-The-Air) для спрощення віддаленого обслуговування.

Хоча Arduino Uno/Nano є простими у використанні, відсутність вбудованого Wi-Fi вимагає додаткових модулів, тоді як мікроконтролери ESP (особливо ESP32) є оптимальним вибором. Вони поєднують достатню продуктивність (двоядерний процесор), великий обсяг пам'яті, інтегровані бездротові модулі та підтримку сучасних протоколів, що робить їх ідеальним рішенням для побудови сучасних, автономних та ефективних систем автоматизованого вирощування культурних рослин [33].

Враховуючи необхідність забезпечення бездротового моніторингу, енергоефективності та гнучкості підключень, доцільним є вибір ESP8266 як основного мікроконтролера системи

Він забезпечує оптимальне співвідношення між вартістю, функціональністю та споживанням енергії, що робить його найбільш придатним для реалізації систем типу AutoGreenTech.

2.2 Аналіз можливих варіантів

У процесі вибору апаратної платформи для розроблення автоматизованої системи вирощування культурних рослин було проведено аналіз найпоширеніших типів мікроконтролерів, які активно застосовуються у сфері інтернету речей (IoT), прототипуванні та навчальних проєктах. Основна увага приділялася платформам, які поєднують достатню продуктивність, енергоефективність, зручність розробки та підтримку бездротового зв'язку.

Для аналізу були обрані чотири популярні рішення: Arduino Nano, Arduino Uno, ESP8266 (NodeMCU) та ESP32. Кожен із цих мікроконтролерів має власні переваги, обмеження та сферу застосування, тому доцільно розглянути їх детальніше.

2.2.1 Arduino-сумісні мікроконтролери

Платформа Arduino є однією з найвідоміших серед розробників-початківців, дослідників і освітніх закладів. Вона відзначається простотою використання, великою базою готових бібліотек і проектів, а також активною спільнотою користувачів.

Компактна плата Arduino Nano побудована на мікроконтролері ATmega328P. Її головними перевагами є невеликі розміри, низьке енергоспоживання та зручність інтеграції в малі системи. Проте Nano має суттєві обмеження: малий обсяг оперативної пам'яті (2 КБ) і флеш-пам'яті (32 КБ), а також відсутність підтримки бездротових інтерфейсів, що ускладнює її використання у сучасних IoT-системах. Arduino Uno є найпоширенішою моделлю, що забезпечує більшу кількість входів/виходів і має численні навчальні приклади, завдяки чому є популярною в освітніх програмах. Однак її архітектура є 8-бітною, а тактова частота становить лише 16 МГц, що суттєво обмежує загальну продуктивність системи. Як і Nano, Uno не має вбудованих модулів Wi-Fi чи Bluetooth, і підключення до мережі потребує використання додаткових зовнішніх модулів (наприклад, ESP8266).

Arduino-плати ідеально підходять для початкового прототипування, тестування алгоритмів або освітніх цілей. Вони прості у використанні, але не забезпечують необхідної функціональності для повноцінних інтелектуальних систем моніторингу, де важливими є бездротовий зв'язок, висока швидкодія та розширені можливості обробки даних.

2.2.2 ESP-сімейство

Мікроконтролери ESP-сімейства, розроблені компанією *Espressif Systems*, створювалися спеціально для реалізації концепції Інтернету речей (IoT). На

відміну від Arduino, вони вже мають вбудовані модулі Wi-Fi (а в ESP32 - також Bluetooth), що дозволяє безпосередньо реалізовувати віддалений моніторинг та керування системами.

Мікроконтролер ESP8266 (NodeMCU) став справжнім проривом у сфері Інтернету речей (IoT) завдяки поєднанню низької вартості, компактності, високої продуктивності та наявності інтегрованого Wi-Fi-модуля. Плата NodeMCU, яка базується на цьому чипі, містить USB-інтерфейс для програмування, має кілька цифрових входів/виходів і підтримує роботу в середовищі Arduino IDE, що значно спрощує процес розробки. ESP8266 широко застосовується у проєктах «розумного будинку», автоматизованих системах поливу, бездротових метеостанціях і тепличних комплексах [34].

ESP32 є більш потужним і сучасним варіантом ESP8266. Цей мікроконтролер оснащений двоядерним процесором, вищою тактовою частотою (до 240 МГц), більшим обсягом пам'яті, а також має підтримку Bluetooth Low Energy (BLE) та додаткові аналогові входи. Ці переваги дозволяють використовувати ESP32 для побудови складних багатофункціональних систем, які потребують одночасної обробки великої кількості даних, аналітики та стабільної комунікації. ESP32 активно застосовується у промислових рішеннях, автоматизованих фермах і «розумних» енергетичних системах [35].

2.2.3 Порівняльний аналіз

Порівняння характеристик мікроконтролерних платформ Arduino та ESP дозволяє зробити кілька ключових висновків щодо їхнього застосування. Плати Arduino, хоча й мають просту архітектуру та відзначаються легкістю освоєння, не забезпечують високої швидкодії та не підтримують сучасні комунікаційні технології. На противагу цьому, сімейство ESP розроблене спеціально для IoT-рішень: воно має 32-бітну архітектуру, значно вищу тактову частоту, інтегрований Wi-Fi, а також ефективну підтримку енергозберігаючих режимів, що є критично важливим для автономних систем. Таким чином, ESP8266 є

оптимальним вибором за критеріями ціна–функціональність для базових IoT-завдань, тоді як ESP32 орієнтований на побудову більш складних багатофункціональних систем з розширеними можливостями обробки даних та комунікації.

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики розглянутих мікроконтролерів

Параметр	Arduino Nano	Arduino Uno	ESP8266 (NodeMCU)	ESP32
Архітектура	AVR 8-bit	AVR 8-bit	Tensilica 32-bit	Xtensa 32-bit (2 ядра)
Тактова частота, МГц	16	16	80	160–240
ОЗП (RAM), КБ	2	2	64	520
Flash-пам'ять, КБ	32	32	512	до 16 384
Цифрові входи/виходи	22	20	17	34
Аналогові входи	8	6	1	18
Wi-Fi	Ні	Ні	Так	Так
Bluetooth	Ні	Ні	Ні	Так (BLE)
Орієнтовна вартість, грн	150–200	200–250	180–250	300–400

На основі проведеного аналізу визначено, що для реалізації магістерського проекту найдоцільнішим є використання мікроконтролера ESP8266. Він забезпечує:

- достатню продуктивність для обробки даних у режимі реального часу;
- інтегрований Wi-Fi для віддаленого моніторингу;
- низьке енергоспоживання;
- сумісність із Arduino IDE;
- доступну ціну при високій функціональності.

У разі подальшого розширення системи або впровадження складніших алгоритмів обробки даних можливий перехід на ESP32, який має більший обсяг пам'яті, двоядерний процесор і підтримку Bluetooth-комунікацій. Таким чином, вибір мікроконтролера ESP8266 є оптимальним балансом між ефективністю, вартістю та можливістю масштабування системи.

2.3 Порівняльна таблиця характеристик

Для остаточного обґрунтування вибору мікроконтролера було складено порівняльну таблицю технічних характеристик найпоширеніших платформ, які можуть бути використані в системах автоматизованого вирощування культур: Arduino Nano, Arduino Uno, ESP8266 (NodeMCU) та ESP32.

Таке порівняння дозволяє оцінити не лише апаратні параметри, а й функціональні можливості, енергоефективність та економічну доцільність використання кожного рішення.

Таблиця 2.2 – Технічні параметри розглянутих мікроконтролерів

Параметр	Arduino Nano	Arduino Uno	ESP8266 (NodeMCU)	ESP32
Архітектура ядра	AVR 8-bit	AVR 8-bit	Tensilica 32-bit	Xtensa 32-bit (2 ядра)
Тактова частота, МГц	16	16	80	160–240
ОЗП (RAM), КБ	2	2	64	520
Flash-пам'ять, КБ	32	32	512	до 16 384
Цифрові входи/виходи	22	20	17	34
Аналогові входи	8	6	1	18
Wi-Fi	Ні	Ні	Так	Так

Bluetooth	Ні	Ні	Ні	Так (BLE)
Орієнтовна вартість, грн	150–200	200–250	180–250	300–400

2.3.1 Аналіз характеристик

Порівняння архітектур мікроконтролерів Arduino та ESP виявляє значні відмінності в їхній продуктивності та функціональності. Плати Arduino Nano та Uno побудовані на застарілому 8-бітному мікроконтролері ATmega328P, який має обмежену продуктивність і не підтримує багатозадачність. На противагу цьому, ESP8266 та ESP32 базуються на 32-бітних процесорах, що забезпечує набагато вищу швидкодію та дозволяє реалізовувати складні алгоритми контролю, аналізу даних та взаємодії з периферією.

Суттєва різниця спостерігається і в тактовій частоті. Arduino-плати працюють на частоті 16 МГц, тоді як ESP8266 має 80 МГц, а ESP32 - до 240 МГц, що робить їх у 10–15 разів швидшими. Це критично важливо для систем реального часу. Обмеженість пам'яті Arduino Nano та Uno (лише 2 КБ RAM) сильно лімітує складність програм. Натомість ESP8266 пропонує 64 КБ RAM, а ESP32 - до 520 КБ, що дає змогу зберігати дані сенсорів, вести журнали, використовувати веб-інтерфейс і здійснювати аналітику без необхідності додаткових модулів пам'яті.

Щодо інтерфейсів та входів/виходів, Arduino Nano має 8 аналогових входів, що є перевагою для систем із численними аналоговими сенсорами. Однак ESP32 перевершує його, маючи 18 аналогових входів і 34 цифрових порти, що дозволяє підключати значно більше пристроїв. Варто зазначити, що ESP8266 має лише один аналоговий вхід, що вимагає використання мультиплексорів при роботі з великою кількістю сенсорів.

Ключовою відмінністю є наявність бездротових інтерфейсів. Arduino не має вбудованого Wi-Fi або Bluetooth, що змушує використовувати зовнішні модулі, підвищуючи вартість і складність схеми. На противагу цьому, ESP8266 уже має

інтегрований Wi-Fi, а ESP32 додатково підтримує Bluetooth Low Energy (BLE) для обміну даними з мобільними пристроями. Щодо вартості, Arduino Nano є найдешевшою платформою (орієнтовно 150 грн), але її функціональність обмежена. ESP8266 при схожій ціні пропонує значно більше можливостей, включаючи бездротову комунікацію. ESP32 коштує трохи дорожче, але це виправдовується подвійною обчислювальною потужністю та ширшим набором функцій.

2.3.2 Висновки

На основі проведеного аналізу можна зробити чіткі висновки щодо доцільності використання різних мікроконтролерних платформ. Плати Arduino Nano та Arduino Uno доцільно використовувати переважно у навчальних і демонстраційних проектах, а також для простих автоматизованих систем, які не вимагають мережевого підключення. Їхніми головними перевагами є простота освоєння, стабільність і велика кількість готових бібліотек. Натомість ESP8266 (NodeMCU) забезпечує оптимальний баланс між ціною, функціональністю та енергоспоживанням. Наявність вбудованого Wi-Fi дозволяє легко реалізувати дистанційний моніторинг і керування, що робить його ідеальним вибором для більшості проектів типу автоматизованої теплиці або розумного поливу [36]. ESP32 є найпотужнішою платформою з розширеним функціоналом, який включає двоядерний процесор, підтримку Bluetooth та більшу кількість входів/виходів. Він є доцільним для масштабованих промислових рішень і складних систем, які потребують високої обчислювальної потужності, хоча має дещо більші енергоспоживання та вартість.

Отже, для створення прототипу системи автоматизованого вирощування культур рослин оптимальним є використання мікроконтролера ESP8266, який поєднує доступність, надійність і можливість бездротової комунікації. У разі потреби у розширенні системи або додаткових можливостей доцільно перейти на ESP32, який забезпечить вищу продуктивність і масштабованість.

2.4 Розрахунок енергоспоживання

Енергоспоживання є одним із ключових критеріїв під час вибору мікроконтролера та інших компонентів для побудови автоматизованої системи вирощування культур рослин. Від енергоефективності залежить не лише економічна доцільність використання системи, але й її стабільність, автономність та екологічність. Особливо це має значення при розгортанні таких систем у віддалених або малодоступних місцях, де можливості підключення до електромережі обмежені, а використання альтернативних джерел енергії (сонячних панелей, акумуляторів чи генераторів) є єдиним способом забезпечення живлення.

У процесі проектування системи необхідно враховувати споживання електроенергії всіма її складовими: мікроконтролером, сенсорами, виконавчими пристроями (помпи, вентилятори, освітлення), модулями зв'язку та допоміжними елементами. Кожен із цих компонентів має свій рівень споживання, який залежить від режиму роботи, тривалості включення та інтенсивності навантаження. Для прикладу, мікроконтролер працює постійно, але споживає незначну кількість енергії, тоді як насос або система освітлення можуть споживати в десятки разів більше, проте працюють лише певний час доби.

У випадку використання системи у теплицях, на невеликих фермерських господарствах чи навіть у домашніх умовах, важливо забезпечити оптимальний баланс між продуктивністю та споживанням енергії. Надмірне енергоспоживання призводить до збільшення експлуатаційних витрат, що може зробити систему економічно не вигідною. Саме тому доцільним є використання енергоощадних контролерів (таких як ESP8266 або ESP32), які мають низьке енергоспоживання у стані очікування та дозволяють організувати ефективне керування ресурсами.

Додатково, під час оцінки енергоспоживання слід враховувати режими

роботи пристроїв - наприклад, можливість переходу у «сплячий режим» при відсутності потреби у вимірюваннях або автоматичне вимкнення освітлення при достатньому рівні природного світла. Такі функції дозволяють зменшити витрати електроенергії без зниження ефективності роботи системи.

Отже, раціональний підхід до розрахунку енергоспоживання дозволяє не лише оптимізувати конструкцію автоматизованої системи вирощування культур, але й підвищити її автономність, забезпечивши стабільну роботу навіть у разі використання автономних джерел живлення. Це є важливою передумовою для створення економічно ефективних і екологічно сталих рішень у сфері агротехнологій.

2.4.1 Формули для розрахунку

Споживана потужність мікроконтролера визначається за формулою:

$$P = U \cdot I, \quad (9)$$

де

P – потужність, Вт;

U – напруга живлення, В;

I – струм споживання, А;

Оскільки $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$, то для обчислень зручно переводити значення струму з міліамперів у амperi.

Добове споживання енергії:

$$E_{\text{доб}} = P \cdot t, \quad (10)$$

де

t – час роботи мікроконтролера протягом доби;

Для більшості випадків вважається, що мікроконтролер працює у режимі **24/7**, тобто $t=24$ год.

2.4.2 Практичні розрахунки

На основі відомих характеристик проведемо обчислення добового енергоспоживання для чотирьох розглянутих мікроконтролерів.

Таблиця 2.3 – Орієнтовне енергоспоживання мікроконтролерів

Мікроконтролер	Напруга, В	Струм, мА	Потужність, мВт	Споживання за добу, Вт·год
Arduino Nano	5	19	95	2.28
Arduino Uno	5	45	225	5.40
ESP8266	3.3	70	231	5.54
ESP32	3.3	160	528	12.67

2.4.3 Аналіз результатів

Після виконання розрахунків енергоспоживання мікроконтролерів було отримано кількісні показники, що дозволяють оцінити ефективність кожного з розглянутих варіантів з точки зору витрат енергії та функціональних можливостей. Отримані результати демонструють чітку залежність між рівнем енергоспоживання, продуктивністю та функціональною насиченістю пристрою.

Arduino Nano споживає лише 2.28 Вт·год на добу, що робить його найбільш

енергоефективним серед усіх проаналізованих варіантів. Завдяки низькому енергоспоживанню він ідеально підходить для малопотужних або автономних систем, де живлення здійснюється від акумуляторів чи сонячних батарей. Проте його обчислювальні можливості та відсутність бездротових інтерфейсів Wi-Fi чи Bluetooth значно обмежують сферу застосування - Nano не підходить для побудови сучасних IoT-рішень або систем дистанційного моніторингу. Таким чином, він залишається доцільним лише у навчальних цілях чи простих експериментальних проєктах.

Arduino Uno споживає близько 5.40 Вт·год на добу, що більш ніж удвічі перевищує показники Nano. Хоча Uno має більшу кількість цифрових входів/виходів і є зручним у використанні для початкового прототипування, його енергоспоживання не компенсується підвищенням функціональності. Відсутність інтегрованих модулів бездротового зв'язку також робить його малоприслужним для реалізації автономних або віддалених систем контролю. Тому Arduino Uno найчастіше застосовується у навчальних лабораторіях або простих автоматизованих проєктах без потреби в онлайн-комунікації.

ESP8266 (NodeMCU) демонструє оптимальне співвідношення між енергоспоживанням і функціональністю. При споживанні 5.54 Вт·год на добу, він забезпечує наявність вбудованого Wi-Fi-модуля, підтримку сучасних інтерфейсів та достатню обчислювальну потужність для реалізації більшості завдань, характерних для систем «розумного фермерства». Це дозволяє ефективно використовувати його у проєктах середнього рівня складності - зокрема, для автоматизації поливу, моніторингу мікроклімату, керування освітленням і вентиляцією. Завдяки енергозберігаючим режимам роботи ESP8266 може забезпечити довготривалу автономну роботу навіть при живленні від акумуляторів.

ESP32 споживає найбільше енергії серед усіх розглянутих мікроконтролерів - приблизно 12.67 Вт·год на добу, що пов'язано з його двоядерною архітектурою та високою тактовою частотою. Однак ці енергетичні витрати повністю виправдовуються його розширеними можливостями: ESP32 має підтримку

Bluetooth Low Energy (BLE), значну кількість цифрових та аналогових входів, а також розвинуту систему енергозбереження з декількома рівнями «сплячого режиму». Завдяки цьому він може ефективно використовуватися у масштабованих промислових або дослідницьких системах, де важливими є не лише енергоефективність, але й висока продуктивність, стабільність та багатозадачність.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що ESP8266 є найкращим компромісом між енергоспоживанням, функціональністю та вартістю. Для побудови невеликих або середніх автоматизованих систем саме він забезпечує найвищу ефективність при мінімальних витратах. Натомість ESP32 доцільно використовувати у складних багатокомпонентних системах, а Arduino Nano й Uno - лише у навчальних або демонстраційних цілях, де пріоритетом є простота використання, а не енергоефективність чи функціональність.

2.4.4 Вартісна оцінка енергоспоживання

Розрахуємо орієнтовну вартість електроенергії, яку споживають мікроконтролери протягом одного місяця роботи. Припустимо, що середня вартість електроенергії становить 2.64 грн/кВт·год.

Витрати на електроенергію обчислюються за формулою:

$$C = E_{\text{доб}} \cdot 30 \cdot Tar, \quad (11)$$

де

C – вартість спожитої енергії за місяць, грн;

$E_{\text{доб}}$ – добове енергоспоживання, кВт·год;

Tar – тариф за 1 кВт·год;

Таблиця 2.4 – Орієнтовна вартість енергоспоживання мікроконтролерів (30 діб)

Мікроконтролер	Добове споживання, кВт·год	Вартість на місяць, грн
Arduino Nano	0.00228	≈ 0.18
Arduino Uno	0.00540	≈ 0.43
ESP8266	0.00554	≈ 0.44
ESP32	0.01267	≈ 1.00

Таким чином, навіть найпродуктивніший ESP32 упродовж місяця споживає енергії на суму близько 1 грн, що свідчить про дуже низьку вартість експлуатації мікроконтролерів у порівнянні з іншими елементами системи (наприклад, освітлювальними приладами чи насосами).

2.4.5 Висновки

Отримані в ході розрахунків результати дозволяють зробити низку важливих висновків щодо доцільності використання різних мікроконтролерів у системах автоматизованого вирощування культурних рослин.

Arduino Nano показав найнижчий рівень енергоспоживання серед усіх розглянутих варіантів, що свідчить про його високу енергоефективність. Проте цей показник не компенсує відсутність сучасних комунікаційних інтерфейсів (Wi-Fi, Bluetooth) та обмежену продуктивність. Через це Arduino Nano не може бути використаний як основний елемент інтелектуальних IoT-систем, де потрібна обробка даних у реальному часі та передача інформації на віддалені сервери.

Arduino Uno, хоча й має дещо більшу потужність та зручніший форм-фактор, залишається технічно застарілим рішенням. Його архітектура, побудована на 8-бітному мікроконтролері, не дозволяє реалізувати складні алгоритми або працювати з великою кількістю сенсорів. Крім того, Uno споживає удвічі більше енергії, ніж Nano, і не підтримує бездротову передачу даних без використання додаткових модулів, що підвищує загальну вартість проекту.

ESP8266 (NodeMCU) є найбільш збалансованим варіантом за критеріями *функціональність/енергоспоживання*. Його показник споживання енергії лише трохи перевищує Arduino Uno, однак завдяки інтегрованому Wi-Fi, 32-бітній архітектурі та достатньому обсягу пам'яті цей мікроконтролер дозволяє реалізовувати повноцінні системи дистанційного моніторингу та керування. Він забезпечує стабільну роботу, швидкий обмін даними та можливість інтеграції з хмарними сервісами, що є критично важливим для сучасних «розумних теплиць» та аграрних IoT-проектів.

ESP32 продемонстрував найвищу продуктивність, але водночас і найбільше енергоспоживання. Його використання доцільне у випадках, коли система має працювати з великою кількістю датчиків або потребує реалізації багатопоточних обчислень. Підтримка Bluetooth Low Energy (BLE), подвійне ядро процесора та розширені можливості підключення периферії роблять ESP32 ідеальним варіантом для масштабованих або промислових систем. Однак для невеликих теплиць або домашніх установок такий рівень потужності є надлишковим і може призвести до невиправданого збільшення витрат на живлення.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що ESP8266 є оптимальним рішенням для побудови системи автоматизованого вирощування культурних рослин. Він забезпечує найкращий баланс між енергоспоживанням, вартістю та функціональністю, дозволяючи реалізувати повноцінну IoT-архітектуру з дистанційним керуванням і моніторингом параметрів середовища. Його використання сприяє підвищенню ефективності системи, зменшенню експлуатаційних витрат і забезпечує високу стабільність роботи в реальних умовах експлуатації.

2.5 Оцінка за критеріями

Для здійснення обґрунтованого вибору мікроконтролера в межах даного дослідження було застосовано бальну систему оцінювання, яка враховує ключові

технічні та експлуатаційні параметри. Такий підхід дає змогу здійснити кількісне порівняння альтернативних варіантів і визначити, який із них найкраще відповідає поставленим завданням проекту.

Основна ідея методу полягає у присвоєнні кожному параметру вагового коефіцієнта (K_1 – K_5), що відображає його відносну важливість для функціонування системи. Далі кожен мікроконтролер оцінюється за п'ятибальною шкалою (1 - мінімальна відповідність, 5 - максимальна відповідність критерію), після чого обчислюється інтегральна оцінка.

На основі проведеного аналізу можна зробити чіткі висновки щодо доцільності використання різних мікроконтролерних платформ. Плати Arduino Nano та Arduino Uno слід використовувати переважно у навчальних і демонстраційних проектах, а також для простих автоматизованих систем, які не потребують мережевого підключення. Їхніми основними перевагами є простота освоєння, стабільність і наявність великої кількості готових бібліотек. Натомість ESP8266 (NodeMCU) забезпечує оптимальний баланс між ціною, функціональністю та енергоспоживанням. Наявність вбудованого Wi-Fi дозволяє легко реалізувати дистанційний моніторинг і керування, що робить його ідеальним вибором для більшості проектів типу автоматизованої теплиці або розумного поливу [36]. У свою чергу, ESP32 є найпотужнішою платформою з розширеним функціоналом, включаючи двоядерний процесор, підтримку Bluetooth та більшу кількість входів/виходів. Він є доцільним для масштабованих промислових рішень і складних систем, які вимагають високої обчислювальної потужності, хоча і має дещо вищі енергоспоживання та вартість.

Для кожного мікроконтролера була виставлена оцінка за шкалою від 0 до 5 балів, де 0 – найнижчий показник, а 5 – найвищий. Інтегральний рейтинг розраховувався за формулою:

$$R = K1 \cdot W1 + K2 \cdot W2 + K3 \cdot W3 + K4 \cdot W4 + K5 \cdot W5 \quad , \quad (12)$$

де

W_1, W_2, \dots, W_5 – відповідні вагові коефіцієнти;

Таблиця 2.5 – Оцінювання мікроконтролерів (0–5 балів)

Мікрокон- тролер	Продуктивність (0.3)	Входи/ виходи (0.2)	Комунікація (0.2)	Енергоспоживання (0.2)	Вартість (0.1)	Рейтинг
Arduino Nano	1.5	2.0	0.0	5.0	4.5	2.45
Arduino Uno	1.5	2.5	0.0	3.0	4.0	2.15
ESP8266	3.0	2.0	5.0	3.5	4.0	3.65
ESP32	5.0	4.5	5.0	2.0	3.5	4.20

2.5.1 Аналіз результатів оцінювання

Після застосування бальної системи оцінювання із заданими ваговими коефіцієнтами було розраховано інтегральний рейтинг кожного мікроконтролера. Отримані результати дозволяють об'єктивно оцінити їх придатність до використання в автоматизованій системі вирощування культурних рослин.

Результати аналізу показали, що ESP32 отримав найвищий сумарний бал, що пояснюється його високою продуктивністю, двоядерною архітектурою та підтримкою Bluetooth Low Energy (BLE) поряд із вбудованим Wi-Fi. Цей мікроконтролер має значний потенціал для побудови масштабованих систем, здатних одночасно обробляти великі обсяги даних з численних сенсорів. Такі характеристики роблять ESP32 найкращим варіантом для промислових рішень, де необхідна стабільність, багатозадачність і надійність у роботі. Проте його енергоспоживання є найвищим серед розглянутих варіантів, що обмежує можливість використання в умовах автономного живлення або системах,

орієнтованих на енергоефективність.

Мікроконтролер ESP8266 посів друге місце за рейтингом, показавши найкраще співвідношення між функціональністю, енергоспоживанням і вартістю. При незначному рівні споживання енергії він забезпечує стабільну роботу Wi-Fi-з'єднання, має достатню кількість входів/виходів для підключення сенсорів і виконавчих механізмів, а також повністю сумісний із середовищем Arduino IDE, що спрощує розробку програмного забезпечення. Завдяки цьому ESP8266 є найбільш доцільним вибором для невеликих автоматизованих теплиць, лабораторних стендів або дослідницьких систем, які потребують мінімальних експлуатаційних витрат при збереженні широких функціональних можливостей.

Arduino Uno та Arduino Nano продемонстрували нижчі результати в порівнянні з ESP-сімейством. Хоча вони відзначаються простотою використання, стабільністю та великою спільнотою користувачів, їхні технічні параметри не відповідають сучасним вимогам до систем Інтернету речей. Відсутність інтегрованих модулів бездротового зв'язку, обмежена продуктивність 8-бітної архітектури та мала кількість оперативної пам'яті не дозволяють ефективно реалізувати функції віддаленого моніторингу або адаптивного керування мікрокліматом.

Таким чином, результати оцінювання підтвердили доцільність використання ESP8266 як базового елемента системи автоматизованого вирощування культур рослин. Він поєднує достатню обчислювальну потужність, низьке енергоспоживання та можливість бездротової комунікації, що забезпечує ефективну роботу системи в реальному часі. Для великих або промислових комплексів, де енергоспоживання не є критичним обмеженням, доцільним може бути перехід на ESP32, який відкриває ширші можливості для масштабування та інтеграції з інтелектуальними системами аналізу даних.

Отже, проведена оцінка за критеріями дозволила формалізувати процес вибору мікроконтролера, узагальнити його технічні переваги та недоліки, а також чітко співвіднести результати з вимогами конкретного проєкту. Це забезпечує

наукову обґрунтованість прийнятого рішення та створює основу для подальшої оптимізації апаратно-програмної архітектури системи.

2.6 Висновки до розділу

На основі проведеного комплексного аналізу характеристик, енергоспоживання та функціональних можливостей мікроконтролерів, а також за результатами їх оцінювання за ключовими критеріями, сформовано узагальнені висновки щодо доцільності їх використання в автоматизованих системах вирощування культур рослин.

Arduino Nano зарекомендував себе як надзвичайно зручна та доступна платформа для навчання та створення базових прототипів. Його перевагами є компактність, низьке енергоспоживання та велика кількість готових бібліотек для розробки простих проектів. Завдяки цим властивостям він може бути використаний у випадках, коли основним завданням є демонстрація принципів роботи системи або проведення лабораторних дослідів.

Однак обмежена кількість пам'яті, відсутність бездротових інтерфейсів та невисока обчислювальна потужність значно звужують сферу його застосування. Для систем, які потребують обробки даних у реальному часі або інтеграції з IoT-сервісами, Arduino Nano не є придатним рішенням. Його використання доцільне лише там, де пріоритетом є простота реалізації, мінімальне енергоспоживання та низька вартість.

Arduino Uno має схожі з Nano технічні характеристики, проте більші габарити та вищу потужність споживання. Його основна перевага полягає у більшій кількості цифрових портів та простоті підключення периферії, що робить його популярним серед початківців і здобувачів. Разом з тим, відсутність інтегрованих модулів бездротового зв'язку та обмеження 8-бітної архітектури істотно знижують його ефективність у сучасних автоматизованих або розподілених системах. Таким чином, Arduino Uno залишається хорошим

навчальним інструментом, але не є оптимальним рішенням для реалізації повноцінних інтелектуальних систем.

ESP32 посідає провідні позиції серед сучасних мікроконтролерів завдяки своїй високій продуктивності, двоядерній архітектурі та підтримці як Wi-Fi, так і Bluetooth Low Energy (BLE). Це робить його універсальним рішенням для складних проектів, що потребують одночасної обробки кількох потоків даних або взаємодії з великою кількістю сенсорів. Висока швидкість ESP32 дозволяє реалізовувати алгоритми штучного інтелекту, аналітичну обробку даних і хмарну синхронізацію.

Водночас підвищене енергоспоживання є його основним недоліком, особливо у випадках використання автономного живлення. Саме тому застосування ESP32 доцільне переважно у промислових або масштабованих системах, де є можливість забезпечити стабільне живлення та необхідну систему охолодження.

ESP8266 визнано найбільш збалансованим рішенням серед розглянутих мікроконтролерів. Він поєднує достатню продуктивність, невисоке енергоспоживання, інтегрований Wi-Fi-модуль і підтримку сучасних інтерфейсів. Його відносно низька вартість робить цю платформу доступною для реалізації як лабораторних прототипів, так і малих комерційних рішень. ESP8266 ідеально підходить для створення систем віддаленого моніторингу параметрів середовища, автоматичного поливу, керування освітленням і вентиляцією. Завдяки широкій підтримці у спільноті розробників, цей мікроконтролер має багату базу готових бібліотек і прикладів коду, що значно прискорює процес розробки програмного забезпечення. Таким чином, ESP8266 є практичним і ефективним вибором для побудови енергоефективних IoT-систем у сільському господарстві.

У результаті дослідження було визначено, що для реалізації автоматизованої системи вирощування культурних рослин оптимальним вибором є мікроконтролер ESP8266. Він забезпечує необхідний баланс між вартістю, функціональністю та енергоефективністю, що дозволяє створити надійну,

економічну та масштабовану систему управління.

У перспективі, при розширенні системи або підвищенні її складності, можливим є перехід на ESP32, який має більшу обчислювальну потужність, підтримку Bluetooth і більшу кількість інтерфейсів для підключення додаткових модулів. Такий підхід гарантує гнучкість архітектури проєкту, можливість подальшого розвитку та адаптації до нових вимог.

Таким чином, обраний мікроконтролер ESP8266 створює міцну технічну основу для побудови ефективної, інтелектуальної та економічно доцільної системи автоматизованого вирощування рослин.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ

Цей розділ присвячено комплексному опису архітектури, алгоритмів функціонування та процесу реалізації програмно-апаратної системи AutoGreenTech, яка розроблена для автоматизованого моніторингу й управління основними параметрами мікроклімату при вирощуванні культурних рослин.

Система AutoGreenTech поєднує в собі апаратні модулі (мікроконтролер, сенсори, виконавчі пристрої) та програмне забезпечення, яке здійснює збір, аналіз і обробку даних у реальному часі. Такий підхід дозволяє створити інтелектуальну систему управління, здатну автоматично підтримувати оптимальні умови для росту рослин без постійного втручання людини.

Розробка програмно-апаратного комплексу базується на принципах модульності, масштабованості та енергоефективності, що дозволяє легко адаптувати його під різні типи теплиць або лабораторних установок. Архітектура системи передбачає взаємодію кількох рівнів: Рівень збору даних - представлений сенсорами вологості ґрунту, температури, освітленості та іншими датчиками, які забезпечують безперервний моніторинг стану середовища. Рівень управління - реалізований на базі мікроконтролера ESP8266, який обробляє сигнали сенсорів, формує керуючі команди та передає дані до хмарного сховища або інтерфейсу користувача. Рівень виконавчих механізмів - включає помпи, вентилятори, систему освітлення та клапани, які безпосередньо впливають на параметри мікроклімату. Рівень користувацької взаємодії - забезпечується за допомогою веб-інтерфейсу та Telegram-бота, що дозволяє віддалено спостерігати за станом системи, отримувати повідомлення про відхилення параметрів і вручну втручатися у процес за потреби. Система побудована з використанням технологій Інтернету речей (IoT), що дає змогу об'єднати всі пристрої в єдину мережу, забезпечити обмін даними через бездротові канали та централізоване керування.

Особлива увага у розробці приділялася енергоефективності та надійності системи. Усі компоненти були обрані з урахуванням мінімізації

енергоспоживання, що дозволяє використовувати AutoGreenTech навіть при живленні від автономних джерел, таких як акумулятори або сонячні панелі. Програмна частина побудована на основі подієво-орієнтованої логіки, яка забезпечує оперативне реагування на зміни зовнішніх параметрів і оптимальне використання ресурсів мікроконтролера.

Таким чином, у цьому розділі розглядаються ключові етапи побудови системи AutoGreenTech, включаючи:

- розробку її загальної архітектури;
- опис програмних модулів та алгоритмів роботи;
- інтеграцію апаратних і програмних компонентів;
- аналіз ефективності та тестування функціонування системи.

Представлені матеріали демонструють практичну реалізацію концепції розумної теплиці, що поєднує технології IoT, автоматичного контролю та дистанційного управління для досягнення високої ефективності вирощування культурних рослин.

3.1 Архітектура системи

Архітектура автоматизованої системи AutoGreenTech побудована на основі принципів багаторівневої моделі (N-Tier architecture), що дозволяє чітко розділити функціональні елементи системи за сферами відповідальності. Такий підхід забезпечує масштабованість, надійність і гнучкість, а також спрощує обслуговування та подальший розвиток системи.

Головна ідея цієї архітектури полягає у відокремленні процесів збору даних, обробки інформації, логіки прийняття рішень і взаємодії з користувачем. Це дає змогу змінювати або оновлювати окремі модулі без необхідності перебудови всієї системи. Наприклад, можна модернізувати сенсори чи розширити програмну

логіку, не зачіпаючи вебінтерфейс або клієнтську частину [37].

3.1.1 Структурна схема та опис рівнів

У системі AutoGreenTech виділено чотири логічні рівні, які взаємодіють між собою через стандартизовані інтерфейси. Кожен рівень має власні задачі та набір компонентів, що забезпечують стабільну роботу системи в цілому.

Таблиця 3.1 – Основні рівні системи AutoGreenTech

Рівень	Призначення	Основні компоненти
Клієнтський рівень (Client)	Забезпечує інтерфейс взаємодії користувача із системою. Через нього користувач отримує інформацію про стан середовища, переглядає показники сенсорів, змінює налаштування та може вручну керувати системою.	Вебсторінка (HTML/JS), Telegram-бот
Вебрівень (Web Tier)	Відповідає за прийом і обробку клієнтських запитів, управління HTTP/HTTPS-з'єднаннями, а також за обмін даними між користувачем і контролером.	Вбудований вебсервер на ESP8266
Рівень додатку (Application)	Реалізує бізнес-логіку системи: аналіз даних від сенсорів, прийняття рішень щодо керування виконавчими пристроями, виконання сценаріїв автоматизації.	Модуль бізнес-логіки (Arduino C++ на ESP8266)
Рівень даних (Data Tier)	Забезпечує безпосередню взаємодію з апаратною частиною: опитування сенсорів, керування реле, вентиляторами, насосами, освітленням тощо. Також відповідає за локальне збереження даних у пам'яті EEPROM.	Сенсори, актуатори (помпа, світло, вентилятор, нагрівач), EEPROM

Клієнтський рівень - є точкою взаємодії користувача із системою. Користувач може переглядати показники температури, вологості, рівня

освітленості тощо через вебінтерфейс або Telegram-бот. Інтерфейс реалізовано таким чином, щоб забезпечити зручний доступ із будь-якого пристрою (смартфон, планшет, ПК) без потреби у додатковому програмному забезпеченні.

Вебрівень - відповідає за обробку запитів користувача. Вбудований вебсервер на мікроконтролері ESP8266 приймає HTTP-запити, генерує відповідні вебсторінки та передає дані до клієнтського рівня. Цей рівень також відповідає за безпечну передачу даних та підтримує двосторонню комунікацію (через AJAX-запити або WebSocket-протокол).

Рівень додатку (Application Layer) - є центральним елементом архітектури. Він обробляє отримані від сенсорів дані, аналізує їх відповідно до заданих порогових значень і формує керуючі сигнали для виконавчих пристроїв. Логіка роботи системи реалізована мовою C++ у середовищі Arduino IDE. Наприклад, при перевищенні температури понад допустиме значення активується вентилятор, а при низькому рівні вологості вмикається насос для поливу.

Рівень даних (Data Layer) - забезпечує фізичну взаємодію з усіма елементами системи. Саме тут здійснюється вимірювання параметрів середовища за допомогою сенсорів, а також виконання команд керування пристроями. Частина даних (наприклад, останні показники сенсорів або стан системи) зберігається у вбудованій пам'яті EEPROM для забезпечення стійкості до збоїв живлення.

Обрана системна архітектура забезпечує низку важливих переваг, що стосуються її подальшого розвитку та експлуатації. Вона відзначається масштабованістю, що дозволяє легко додавати нові модулі, сенсори або пристрої без необхідності зміни основної структури системи. Архітектура також має високу гнучкість, оскільки кожен логічний рівень можна оновлювати або замінювати незалежно від інших. Це значно підвищує надійність: модульність підвищує стійкість системи до збоїв та суттєво полегшує діагностику помилок. Крім того, поділ системи на логічні рівні робить її зручною в обслуговуванні, спрощуючи налагодження, оновлення прошивки та загальне технічне обслуговування.

Таким чином, архітектура AutoGreenTech забезпечує оптимальний баланс між функціональністю, надійністю та простотою реалізації, що робить її придатною як для невеликих навчальних лабораторій, так і для застосування у промислових тепличних комплексах.

3.1.2. UML-діаграма розгортання

Для ілюстрації фізичного розміщення компонентів використовується UML-діаграма розгортання (Рисунок 3.1).

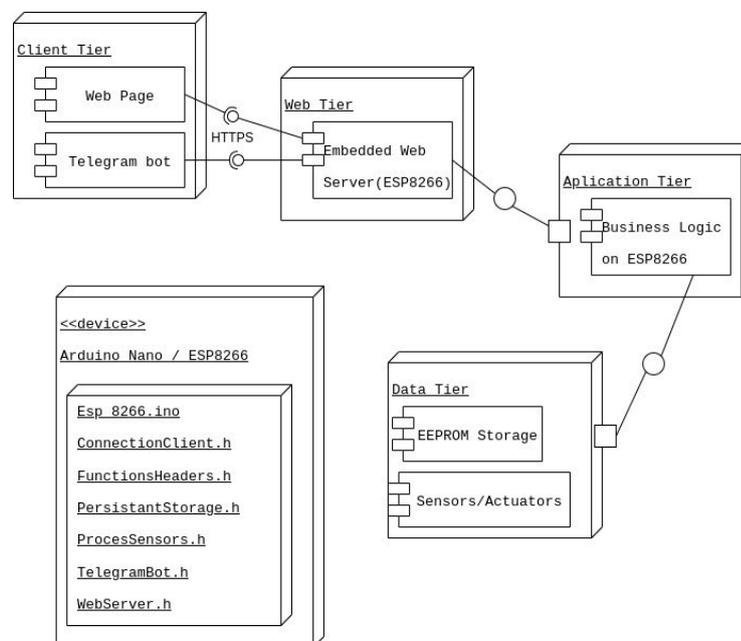


Рисунок 3.1 – UML-діаграма розгортання системи AutoGreenTech

Діаграма відображає логіку взаємодії між користувачем, програмними модулями та апаратними пристроями. На клієнтському рівні (Client Tier) передбачено вебсторінку, що забезпечує інтерфейс для перегляду даних сенсорів і керування пристроями, а також Telegram-бот як альтернативний канал керування, який дозволяє отримувати повідомлення та надсилати команди. Канал зв'язку між цими елементами та системою реалізовано через HTTPS, що гарантує безпечну передачу даних.

На вебрівні (Web Tier) функціонує вбудований вебсервер (Embedded Web Server), розгорнутий на ESP8266, який відповідає за обробку клієнтських запитів і формування відповідей. На прикладному рівні (Application Tier) працює бізнес-логіка, реалізована на ESP8266: вона відповідає за аналіз отриманих даних, виконання алгоритмів керування та логіку взаємодії з актуаторами.

Рівень даних (Data Tier) включає EEPROM-пам'ять, що використовується для збереження налаштувань і профілів рослин, а також сукупність сенсорів і актуаторів, серед яких температурні, вологісні та світлові датчики, помпа, вентилятор, нагрівач і LED-світильники. На пристрої Arduino Nano / ESP8266 реалізовані всі необхідні програмні компоненти: головний скетч Esp8266.ino, модуль підключення до Wi-Fi ConnectionClient.h, бібліотека з оголошеннями функцій FunctionsHeaders.h, модуль роботи з EEPROM PersistantStorage.h, модуль обробки даних сенсорів ProcesSensors.h, компонент інтеграції з Telegram API TelegramBot.h та модуль реалізації HTTP/HTTPS вебсервера WebServer.h.

Узагальнюючи архітектуру, AutoGreenTech є IoT-рішенням, у якому користувач взаємодіє із системою через вебінтерфейс або Telegram-бот, тоді як бізнес-логіка виконується на мікроконтролері ESP8266. Дані сенсорів аналізуються в режимі реального часу, після чого генеруються відповідні команди для актуаторів. Критичні параметри середовища зберігаються у локальній пам'яті EEPROM, а система потребує мінімальних обчислювальних ресурсів і здатна працювати автономно протягом тривалого часу.

Архітектурна модель системи AutoGreenTech спроектована з урахуванням принципів гнучкості та масштабованості, що забезпечує її адаптивність до різних умов експлуатації та дозволяє без суттєвих змін у базовій структурі розширювати функціонал. Завдяки такому підходу система може розвиватися в різних напрямках. Наприклад, у майбутньому можливе додавання нових типів сенсорів, зокрема тих, що вимірюють рівень CO₂, рН або концентрацію поживних речовин у ґрунті. Також передбачається інтеграція з хмарними сервісами для зберігання історичних даних, формування аналітичних звітів та застосування інтелектуального аналізу. Окрім того, систему можна доповнити алгоритмами

машинного навчання для прогнозування стану рослин та адаптивного регулювання параметрів мікроклімату. Ще одним напрямом є масштабування архітектури таким чином, щоб вона могла забезпечувати одночасне обслуговування кількох теплиць або окремих ділянок із централізованим управлінням [38].

Завдяки поділу на незалежні рівні система залишається стійкою до оновлень і змін, а модернізація програмного забезпечення чи заміна апаратних компонентів не призводить до порушення загальної логіки функціонування. Такий підхід не лише підвищує стабільність і безпеку системи, а й робить її практично придатною для впровадження у реальних агротехнологічних процесах, включаючи малі фермерські господарства, дослідницькі лабораторії та промислові тепличні комплекси.

3.2 Розробка алгоритмів моніторингу та керування

Одним із центральних елементів функціонування системи AutoGreenTech є розробка алгоритмів, які забезпечують підтримання стабільних умов вирощування культурних рослин шляхом моніторингу параметрів середовища та автоматичного регулювання виконавчих механізмів. Ці алгоритми реалізують принципи адаптивного керування, де система постійно аналізує дані сенсорів, порівнює їх із заданими нормами та приймає рішення у реальному часі.

Функціонування системи базується на циклічному процесі, у межах якого дані постійно оновлюються та аналізуються. Спершу здійснюється збір інформації: сенсори фіксують поточні параметри середовища, зокрема температуру, вологість ґрунту, освітленість, рівень CO₂ та інші показники. Після цього мікроконтролер ESP8266 обробляє отримані значення, порівнюючи їх із допустимими межами, визначеними у профілі відповідної культури.

На основі результатів порівняння система переходить до етапу ухвалення рішення: якщо будь-який із параметрів виходить за встановлені межі, активується

той чи інший виконавчий пристрій - помпа, вентилятор, освітлення або нагрівач. Далі виконується зворотний зв'язок: після активації актуатора система повторно перевіряє сенсорні показники, щоб оцінити ефективність регулювання.

У разі суттєвих відхилень, а також при виникненні помилок чи збоїв, користувач отримує відповідне сповіщення через вебінтерфейс або Telegram-бот, що забезпечує оперативний контроль за роботою системи.

Такий підхід забезпечує автоматичний контроль мікроклімату та мінімізує потребу у постійному людському нагляді, зберігаючи при цьому можливість ручного втручання при необхідності.

Алгоритм керування в системі базується на порівнянні поточних значень параметрів зі встановленими еталонними межами. Якщо вологість ґрунту знижується нижче мінімальної норми, автоматично активується насос поливу, який працює до досягнення потрібного рівня. У випадку підвищення температури повітря понад задану межу вмикається вентилятор або система охолодження [39]. Коли освітленість недостатня, система переходить до активації LED-світильника, що підтримує фотосинтетичну активність рослин. Якщо температура стає нижчою за мінімально допустиму, запускається нагрівач, який створює оптимальні умови для росту. У ситуаціях, коли показники виходять за критичні межі, система надсилає користувачу попередження з рекомендаціями або може ініціювати аварійне відключення окремих модулів.

Для підвищення точності роботи алгоритму застосовуються гістерезисні зони, що запобігають частому й небажаному вмиканню та вимиканню виконавчих пристроїв у разі незначних коливань показників. Загалом логіка роботи алгоритму реалізована у вигляді циклу, який включає ініціалізацію компонентів - сенсорів, актуаторів та Wi-Fi-з'єднання, - а також подальше зчитування даних із сенсорів, серед яких вологість, температура, освітленість і рівень CO₂. Отримані значення аналізуються та порівнюються з відповідними еталонними параметрами, після чого система приймає рішення, використовуючи умовні оператори. Залежно від результатів, здійснюється активація або деактивація відповідних виконавчих механізмів, а оновлена інформація

відображається у вебінтерфейсі та Telegram-боті. Після цього цикл повторюється з визначеним часовим інтервалом, наприклад кожні десять секунд.

Для демонстрації функціональних можливостей системи була створена діаграма прецедентів, яка відображає взаємодію між користувачем і системою. Основними акторами виступають користувач - фермер або оператор, що отримує інформацію про стан системи, може змінювати налаштування та за потреби вручну керувати обладнанням, - а також сама система AutoGreenTech, яка відповідає за автоматичний моніторинг, регулювання параметрів, надсилання сповіщень і ведення журналу даних. Ключовими прецедентами є перегляд поточних сенсорних показників, отримання сповіщень про відхилення параметрів, ручне керування поливом, освітленням чи вентиляцією, зміна налаштувань профілю рослини, а також перегляд історії вимірювань і стану обладнання.

Алгоритмічний підхід забезпечує низку переваг. Система може автоматично реагувати на зміну умов без необхідності постійного втручання користувача. Гнучкість налаштувань дає можливість кожному параметру встановити власні межі та гістерезис, що дозволяє адаптувати систему до конкретної культури. Важливою властивістю є масштабованість: алгоритм легко розширюється додаванням нових сенсорів або сценаріїв керування. Крім того, система має елементи інтелектуальності, адже не лише виконує команди, а й аналізує тенденції зміни даних, що сприяє оптимізації споживання ресурсів.

Отже, розроблені алгоритми моніторингу та керування забезпечують стабільне функціонування AutoGreenTech, створюючи передумови для подальшої інтеграції з аналітичними системами та технологіями машинного навчання.

3.2.1. Діаграма прецедентів

На Рисунку 3.2 наведена діаграма прецедентів системи AutoGreenTech. Вона показує, які дії може виконувати користувач (звичайний оператор системи) та

технічний адміністратор, а також які функції реалізує сама система.

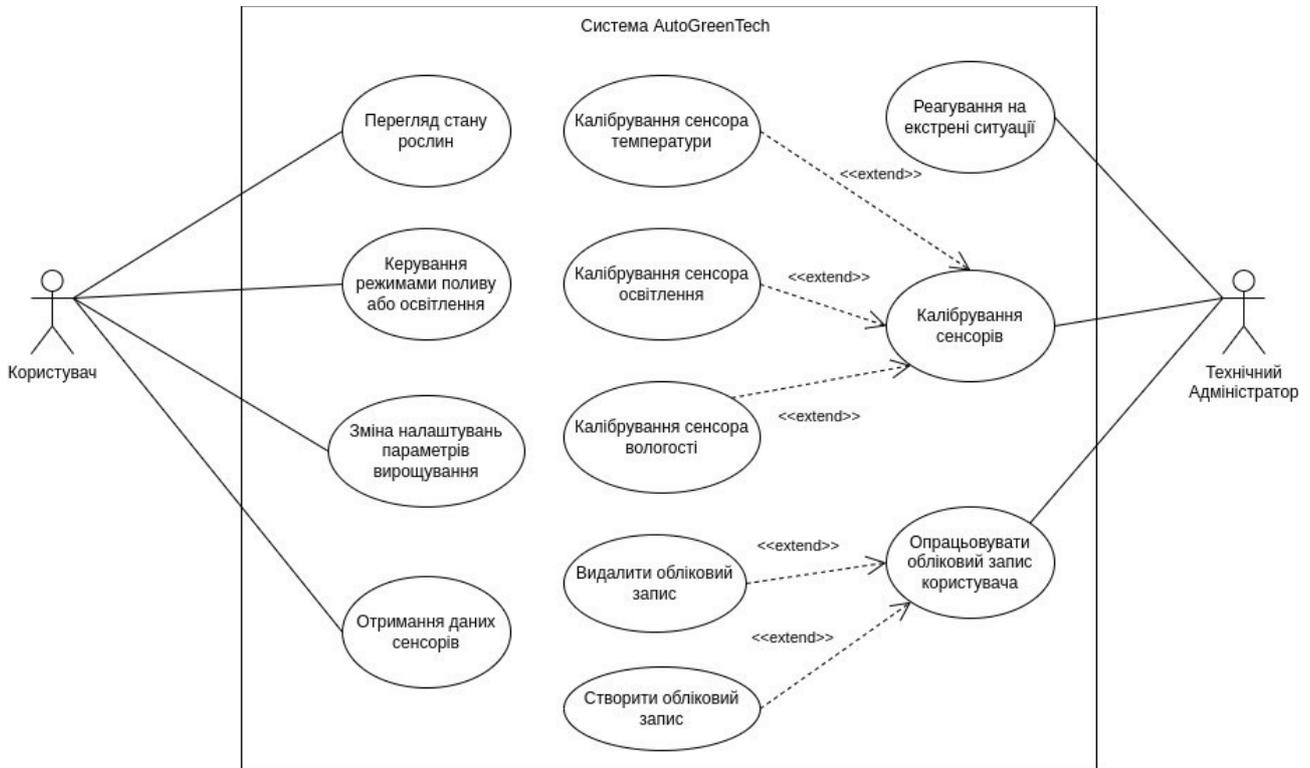


Рисунок 3.2. Діаграма прецедентів системи AutoGreenTech

3.2.2. Опис Діаграми прецедентів

Акторів системи AutoGreenTech поділено на дві основні категорії. Першим є Користувач - оператор, який працює із системою через вебсторінку або Telegram-бот. Його завдання включають моніторинг стану теплиці, керування режимами роботи обладнання та контроль за основними параметрами середовища. Другим актором виступає Технічний адміністратор, що відповідає за технічне обслуговування, конфігурацію системи та усунення можливих помилок чи несправностей, які стосуються апаратної частини.

Для Користувача передбачено кілька варіантів використання. Він може переглядати стан рослин, отримуючи актуальну інформацію про температуру, вологість ґрунту, освітленість, концентрацію CO₂ та інші екологічні показники. Користувач також має можливість керувати режимами поливу, вентиляції та

освітлення, вмикаючи або вимикаючи відповідні системи вручну чи переводячи їх у автоматичний режим. Крім того, йому доступна зміна параметрів вирощування - редагування допустимих меж екологічних умов відповідно до конкретної культури. До функціоналу належить і перегляд поточних та архівних даних сенсорів у режимі реального часу. Окремі дії стосуються управління власним обліковим записом: користувач може створити новий профіль або видалити існуючий, що розширює можливості роботи з обліковими записами. У разі потреби користувач також може виконати калібрування сенсорів, зокрема температурних, світлових або датчиків вологості, якщо показники вимірювань є некоректними.

Для Технічного адміністратора передбачено ширші можливості взаємодії. Він може виконувати поглиблене калібрування сенсорів, що дозволяє точніше налаштовувати обладнання та забезпечувати стабільність роботи системи. До його обов'язків входить опрацювання облікових записів користувачів - створення нових профілів, редагування існуючих, видалення та керування правами доступу. Крім того, Технічний адміністратор бере участь у реагуванні на екстрені ситуації: у разі виникнення критичних подій, таких як перегрів, надмірна вологість, збій роботи сенсорів чи актуаторів, він може здійснити ручне втручання для стабілізації системи.

Позначення «*extend*» вказує, що дія є розширенням основного процесу і виконується лише за певних умов. Наприклад, «Видалити обліковий запис» розширює сценарій «Опрацювання облікового запису користувача».

Діаграма прецедентів системи AutoGreenTech дозволяє чітко визначити функціональні межі системи, розподіл обов'язків між користувачем і адміністратором, а також сценарії взаємодії. Вона слугує основою для подальшого проектування алгоритмів моніторингу та керування, інтерфейсів користувача і засобів забезпечення надійності.

Таким чином, система AutoGreenTech забезпечує як повністю автоматизовану роботу, так і можливість ручного втручання у разі нестандартних або аварійних ситуацій, що підвищує гнучкість та безпечність її експлуатації.

3.3. Розробка моделі даних

Модель даних у системі AutoGreenTech відіграє ключову роль у забезпеченні узгодженої взаємодії між програмними модулями, сенсорами, актуаторами та інтерфейсом користувача. Вона визначає структуру інформації, що обробляється системою, логіку її зберігання, обробки та передачі між рівнями архітектури.

Для опису моделі даних застосовано об'єктно-орієнтований підхід (ООП), який дозволяє відобразити всі сутності системи як класи з атрибутами та методами. Такий підхід забезпечує гнучкість, розширюваність і модульність системи - нові сенсори, виконавчі пристрої чи функціональні блоки можна додавати без необхідності суттєвої зміни архітектури.

Основні принципи побудови моделі даних у системі ґрунтуються на ключових концепціях об'єктно-орієнтованого програмування. Першим із них є інкапсуляція: кожен клас зберігає власні дані та надає методи для роботи з ними, що забезпечує контрольований доступ і запобігає небажаним змінам ззовні. Другим принципом виступає наслідування, яке дає можливість створювати похідні класи для різних типів сенсорів чи пристроїв, використовуючи базовий клас `Device` як спільну основу.

Поліморфізм є третім ключовим принципом і дозволяє застосовувати єдиний інтерфейс для різних типів об'єктів: наприклад, усі сенсори можуть мати спільний метод `readData()`, хоча кожен із них реалізує його по-своєму відповідно до власної природи. Нарешті, використання асоціацій між об'єктами дає змогу відобразити взаємодію між компонентами системи. Так, клас `Controller` може бути пов'язаний із сенсорами, актуаторами та користувачами, координуючи їхню роботу та забезпечуючи цілісність функціонування системи.

3.3.1. UML-діаграма класів

На Рисунку 3.3 наведено UML-діаграму класів системи AutoGreenTech. Вона відображає, як структуровані дані системи, які класи беруть участь у процесі, які між ними зв'язки та методи взаємодії.

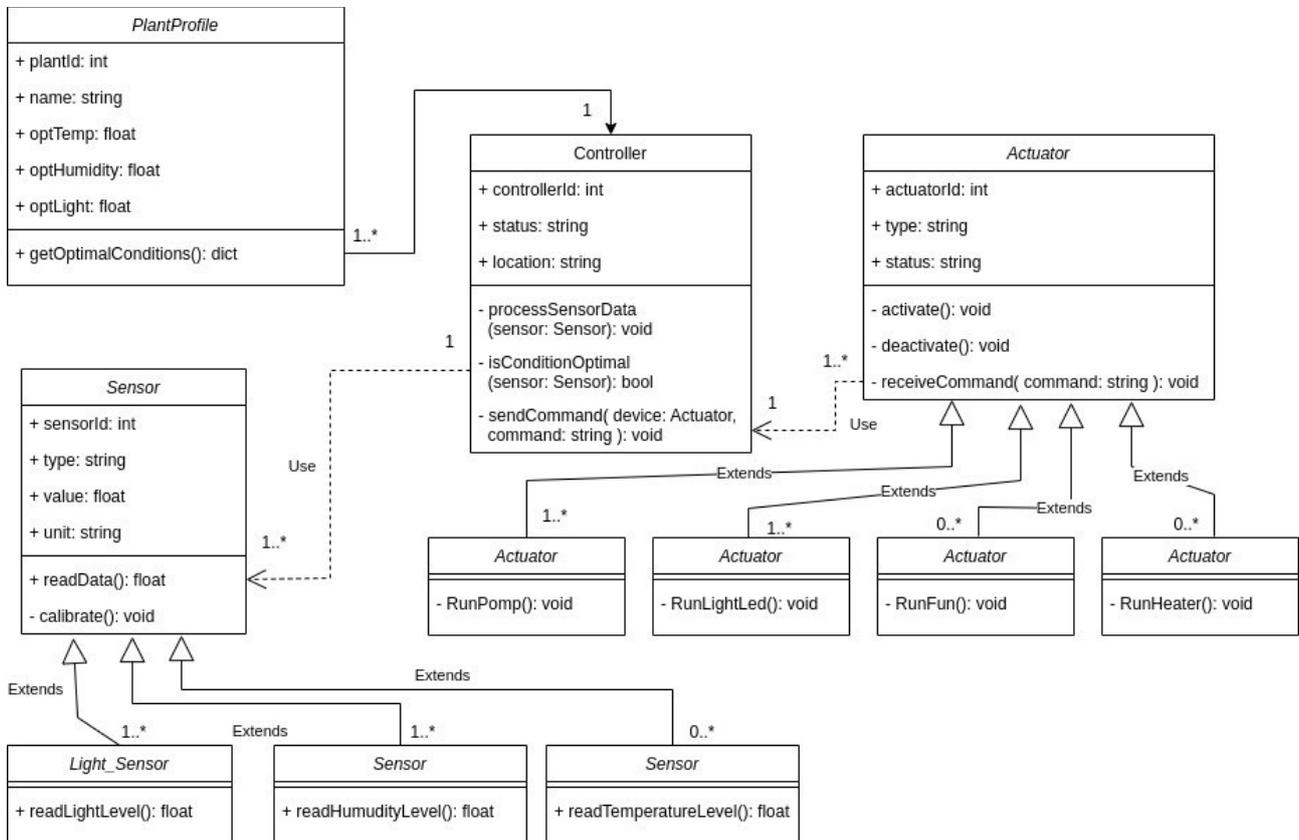


Рисунок 3.3. UML-діаграма класів системи

Модель даних системи AutoGreenTech побудована на основі об'єктно-орієнтованого підходу, де кожен клас виконує конкретну роль у процесі моніторингу та керування параметрами середовища. Нижче наведено опис основних класів, їхніх зв'язків та призначення.

Controller є центральним класом системи, який реалізує основну логіку керування, об'єднуючи дані, отримані від сенсорів, та формуючи відповідні команди для виконавчих пристроїв. Він використовує об'єкти класу Sensor для отримання параметрів середовища, має асоціативний зв'язок із класом Actuator для передачі команд, а також пов'язаний із PlantProfile, що дозволяє зіставляти поточні значення з оптимальними умовами. Основні методи класу включають

`processSensorData()`, який аналізує показники сенсорів і визначає необхідні дії, `sendCommand()`, що відповідає за формування та передачу команд актуаторам, і `checkAlerts()`, який перевіряє наявність відхилень і ініціює повідомлення користувачу.

`PlantProfile` описує оптимальні умови вирощування для конкретного виду рослин, використовуючи параметри температури, вологості та освітлення. Він має зв'язок із класом `Controller`, що використовує його дані для прийняття рішень. Основні методи цього класу - `getOptimalConditions()`, який повертає еталонні значення для подальшого порівняння, та `updateProfile()`, що дозволяє оновлювати параметри залежно від культури або стадії росту.

`Sensor` є базовим класом для всіх сенсорів, що відповідають за збір даних про стан навколишнього середовища і передають їх контролеру. Він містить унікальний ідентифікатор, тип сенсора та останнє вимірне значення. До основних методів належать `readData()` для зчитування актуальних параметрів і `calibrate()` для їх калібрування. Підкласи `Light_Sensor`, `Humidity_Sensor` та `Temperature_Sensor` реалізують власні варіанти методу `readData()`, пристосовані до специфіки кожного типу сенсора.

`Actuator` виконує роль базового класу для всіх виконавчих механізмів, які змінюють стан середовища відповідно до команд, що надходять від контролера. У ньому зберігаються ідентифікатор пристрою, тип і поточний стан. Методи `activate()` та `deactivate()` відповідають за переведення пристрою у робочий або вимкнений стан, а `receiveCommand()` забезпечує прийом команд контролера. Серед підкласів передбачено `RunPomp` для керування насосом поливу, `RunLightLed` для управління світлодіодним освітленням, `RunFan` для вентиляції та `RunHeater` для підтримання температури.

Уся система взаємодіє за чіткою логічною схемою: сенсор збирає дані, контролер аналізує отриману інформацію та порівнює її з параметрами, визначеними у `PlantProfile`, після чого актуатор виконує необхідну дію. Така архітектура забезпечує модульність, зручність у розширенні та можливість масштабування без порушення загальної логіки системи `AutoGreenTech`.

3.3.2. Діаграма об'єктів (Структура даних)

На Рисунку 3.4 представлено приклад структури даних системи AutoGreenTech у момент роботи з профілем рослини «Кукурудза» (Corn).

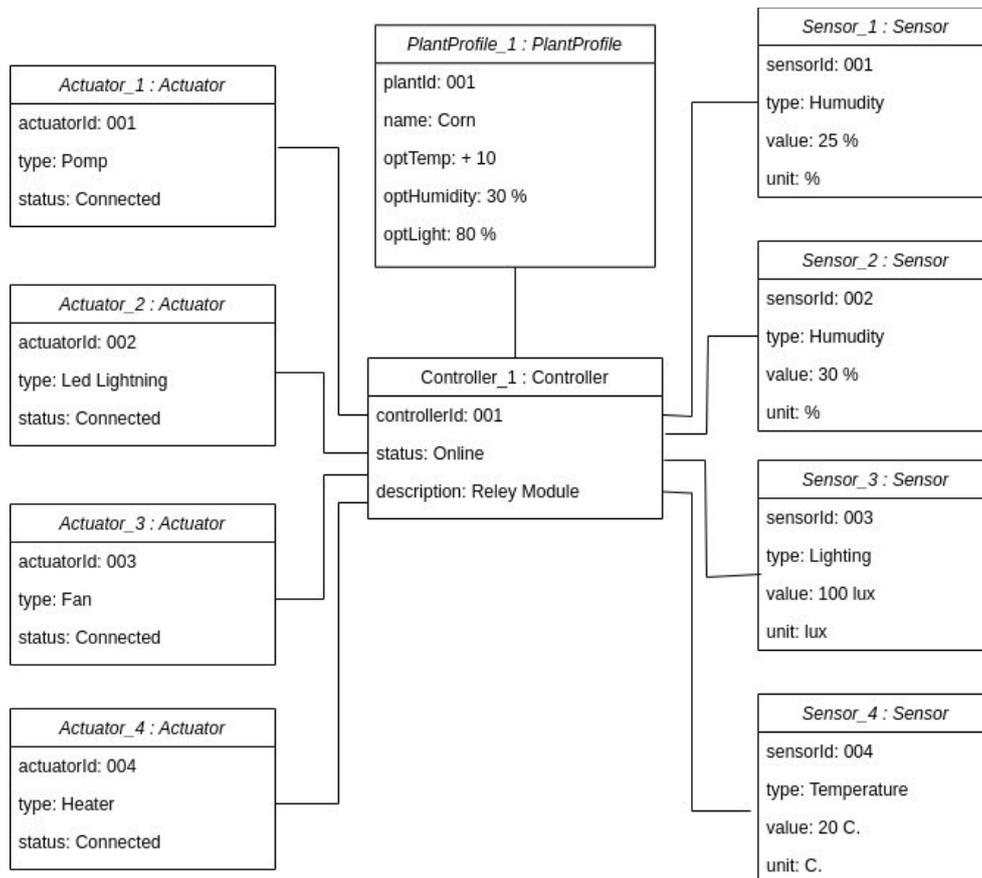


Рисунок 3.4. Діаграма об'єктів (приклад структури даних)

Для кращого розуміння взаємодії компонентів системи AutoGreenTech було розроблено UML-діаграму об'єктів, яка демонструє конкретний приклад функціонування системи у момент часу. Вона відображає, як реальні екземпляри класів (об'єкти) взаємодіють між собою для підтримання оптимальних умов вирощування культурних рослин.

PlantProfile_1 (Профіль рослини) є об'єктом, що містить ідентифікатор 001, назву Corn, а також еталонні параметри росту, зокрема оптимальну температуру

+10°C, вологість 30% і рівень освітлення 80%. Цей профіль використовується системою для порівняння реальних показників сенсорів із заданими умовами. Для культури кукурудза визначено, що найбільш ефективний розвиток відбувається за помірної температури, середньої вологості та достатнього освітлення.

Controller_1 є центральним об'єктом системи з ідентифікатором 001, статусом Online та описом Relay Module. Він приймає дані від сенсорів, аналізує їх у контексті профілю рослини та формує команди для виконавчих механізмів. Контролер відповідає за моніторинг стану, активацію поливу, освітлення або вентиляції й передачу повідомлень користувачу в разі відхилення параметрів від норми.

Сенсорні пристрої збирають поточні дані про стан мікроклімату. Sensor_1 вимірює вологість і показує 25%, Sensor_2 також вимірює вологість і фіксує 30%, Sensor_3 визначає рівень освітлення та показує 100 lux, а Sensor_4 реєструє температуру 20°C. Усі сенсори передають дані до Controller_1, який виконує їх аналіз на основі еталонних параметрів із PlantProfile_1.

Актуатори отримують команди від контролера та виконують фізичні дії для стабілізації параметрів середовища. Actuator_1 (Pomp) відповідає за полив при низькій вологості, Actuator_2 (LED Lighting) забезпечує штучне освітлення при недостатньому світлі, Actuator_3 (Fan) здійснює вентиляцію при перевищенні температури, а Actuator_4 (Heater) активується при зниженні температури нижче норми. Контролер надсилає команди відповідно до поточних умов, наприклад, при вологості нижче 30% активується насос поливу, а при падінні освітленості нижче оптимального рівня вмикається LED-підсвітка.

UML-діаграма об'єктів демонструє роботу системи в режимі реального часу: сенсори збирають дані, контролер порівнює їх із параметрами з PlantProfile_1, у разі відхилень активуються відповідні актуатори, а зміни фіксуються в EEPROM або передаються користувачу через вебінтерфейс чи Telegram-бот.

Об'єктна модель демонструє цілісність взаємодії між компонентами

системи AutoGreenTech. Вона відображає реальний процес управління мікрокліматом у теплиці, де контролер виступає центральним елементом, а сенсори та актуатори формують взаємопов'язану екосистему автоматизованого контролю.

3.3.3. Приклад логіка роботи системи

Для демонстрації роботи системи AutoGreenTech розглянемо приклад аналізу даних, отриманих від сенсорів, та відповідні дії, які виконує контролер на основі заданого профілю рослини. Цей приклад відображає принципи логічного прийняття рішень у режимі реального часу, коли система автоматично реагує на зміни мікроклімату, підтримуючи оптимальні умови вирощування культур.

Аналіз параметрів середовища показує, що температура становить 20°C, тоді як оптимальне значення для даної культури дорівнює +10°C. Через те, що температура перевищує необхідний рівень, нагрівач залишається вимкненим. Система також контролює наближення температури до гранично допустимого максимуму; у разі перевищення активується вентилятор для охолодження середовища. Що стосується вологості, показники сенсорів становлять 25% і 30%, при оптимальному значенні 30%. Контролер визначає, що середній рівень вологості трохи нижчий за норму, тому формує команду для активації насоса (Actuator_1) для поливу. Після досягнення необхідного рівня вологості система автоматично зупиняє подачу води, запобігаючи перевитраті ресурсів. Поточний рівень освітлення дорівнює 100 lux, тоді як оптимальна інтенсивність світла складає 80%. Контролер визначає, що освітлення достатнє, тому LED-підсвітка залишається вимкненою, що сприяє економії енергії. У випадку зниження природного освітлення нижче встановленого порогу система автоматично активує підсвітку для стабілізації фотосинтетичної активності рослин.

Загальна логіка роботи. У даній ситуації контролер виконує послідовний аналіз показників сенсорів, порівнюючи їх із параметрами профілю рослини (PlantProfile_1). Якщо виявлено відхилення - запускаються виконавчі

механізми для корекції умов. Система функціонує циклічно, зчитуючи дані через певні проміжки часу та динамічно адаптуючись до змін середовища. Водночас користувач може отримати повідомлення про стан системи через вебінтерфейс або Telegram-бот, що забезпечує зручний моніторинг без необхідності постійного ручного контролю.

Значення діаграми. UML-діаграма об'єктів, на якій базується цей приклад, демонструє структуру системи у конкретний момент часу. Вона дозволяє:

- візуалізувати процес взаємодії між компонентами;
- перевіряти логіку роботи контролера при різних сценаріях;
- виявляти можливі конфлікти у прийнятті рішень або затримки в реакції системи;
- тестувати коректність обміну даними між сенсорами та актуаторами.

У результаті моделювання видно, що система AutoGreenTech ефективно підтримує мікроклімат без втручання людини. Її логіка забезпечує автоматичне реагування на відхилення параметрів середовища, стабільність умов для росту рослин та раціональне використання енергоресурсів. Таким чином, розроблена архітектура та алгоритми підтверджують можливість практичного застосування системи у теплицях і фермерських господарствах [40].

3.4. Опис програмних модулів системи автоматизованого контролю середовища вирощування

У межах виконання практичної частини було створено кілька ключових програмних модулів, які забезпечують функціонування системи автоматизованого вирощування рослин. Основна мета цих модулів - забезпечення зв'язку між апаратною частиною (датчиками, реле, контролером) та користувацькими інтерфейсами (вебсторінкою й телеграм-ботом). Кожен файл

виконує власну роль у загальній структурі проєкту, але всі вони взаємодіють між собою через стандартизовані функції, що дозволяє підтримувати стабільність і масштабованість системи.

3.4.1. Модуль ConnetionClient.h

Модуль відповідає за комунікацію між мікроконтролером та іншими компонентами системи - датчиками, периферійними пристроями, реле, а також за формування і перевірку запитів на обмін даними. Його завдання - забезпечити надійне передавання інформації без збоїв і втрат.

Основні функції:

- CheckModuleOutput() - перевіряє довжину вихідного тексту в консолі, щоб уникнути переповнення буфера. Завдяки цьому система працює стабільно навіть при великій кількості повідомлень від датчиків.
- AddModuleOutput(String newString) і AddModuleOutput(usint newString) - додають текстові або числові дані до журналу консолі, що використовується для налагодження.
- SerialRead() - реалізує безпечне читання даних із послідовного порту. Функція зчитує значення лише тоді, коли дійсно є вхідний сигнал, запобігаючи зависанням у циклах очікування.
- SerialWrite() - функція безпечного запису даних різних типів (цілі, символи, рядки) у порт. Вона перевіряє, чи порт активний, і лише після цього передає інформацію.
- FindRequestAccurasy() - алгоритм для пошуку унікальної послідовності чисел у переданих запитах. Ця функція використовується як механізм перевірки достовірності комунікацій.
- IsRightRequest() - перевіряє, чи довжина отриманого запиту відповідає очікуваній. Якщо запит неповний або спотворений, він ігнорується.

- `IsRequestTime()` - визначає момент синхронної перевірки запитів двома модулями. Це дозволяє уникнути конфліктів під час обміну даними.
- `WaitNormalRequest()` - функція очікування правильної відповіді. Якщо відповідь не надходить протягом заданого часу, запит повторюється.
- `getSensorsValues()` - створює запит на отримання поточних значень датчиків вологості та освітленості.
- `getSettingsValues()` - отримує поточні налаштування системи (тривалість вирощування, інтервали поливу, денне та нічне освітлення тощо).
- `setSettingsValues()` - дозволяє змінювати параметри налаштувань системи з боку користувача.
- `SwitchReley()` (у двох перевантаженнях) - змінює стан реле за номером або вмикає/вимикає його на певний проміжок часу.
- `TurnOffAllReleys()` - вимикає всі реле, наприклад, у разі аварійного завершення роботи.

Модуль виконує ключову роль у забезпеченні стабільності обміну даними між усіма компонентами системи. Саме через нього проходить більшість команд на зчитування або зміну стану обладнання.

3.4.2. Модуль `PersistentStorage.h`

Цей модуль відповідає за роботу з енергонезалежною пам'яттю контролера (EEPROM або Flash). У ньому реалізовано збереження налаштувань навіть після перезавантаження системи.

- `ReadPersistentStorage()` - зчитує дані з енергонезалежної пам'яті під час старту системи.
- `WritePersistentStorage()` - зберігає актуальні параметри користувача (часи, періоди, межі вологості).
- `CheckPersistentStorage()` - перевіряє цілісність записаних даних, виявляє

пошкодження чи неповні записи.

Цей модуль забезпечує сталість роботи - після вимкнення живлення всі налаштування відновлюються автоматично.

3.4.3. Модуль ProcessSensors.h

Один із найважливіших компонентів системи. Відповідає за безпосередню роботу із сенсорами, виконання основних технологічних процесів (полив, освітлення) та підтримання добових циклів.

Основні функції:

- PrintToCorrentAccessPointMode() - відправляє повідомлення залежно від режиму роботи (через веб-інтерфейс або Telegram).
- PrintDayAndNightTime() - виводить інформацію про тривалість дня та ночі в поточному циклі.
- Lightning() - керує освітленням теплиці відповідно до заданих інтервалів.
- Watering() - контролює подачу води до рослин, визначаючи час і тривалість поливу на основі даних з датчиків вологості.
- SensorScan() - сканує показники всіх сенсорів (температура, вологість, освітлення) і повертає їх для подальшої обробки.
- ProcessUserRequest() - обробляє команди користувача у межах встановленого часу.
- RunCheckingPeriod(), RunGrowingDay(), RunGrowingPeriod() - відповідають за перевірку системи протягом певного періоду, доби або повного циклу вирощування.

Цей модуль формує основну “логіку поведінки” системи. Він зчитує сенсорні дані, аналізує їх, порівнює з еталонними параметрами і відповідно вмикає полив або освітлення.

3.4.4. Модуль TelegramBot.h

Модуль забезпечує інтеграцію системи з Telegram для дистанційного керування. Він дозволяє користувачеві отримувати повідомлення, змінювати параметри, перевіряти стан системи безпосередньо зі смартфона.

Основні функції:

- `sendLaunchMessageToPendingChats()` - сповіщає користувачів про запуск системи.
- `handleCallback()` - обробляє натискання кнопок у меню Telegram.
- `CheckEnteredValue()` - перевіряє, чи введене значення коректне за форматом і діапазоном.
- `handleNewMessages()` - аналізує отримані повідомлення від користувачів.
- `RunTelegramBot()` - основна функція роботи бота, викликається циклічно.
- `ConfigureTelegramBot()` - налаштовує початковий стан і параметри доступу до Telegram API.

Таким чином, модуль TelegramBot.h реалізує сучасний користувацький інтерфейс для взаємодії з мікроконтролером.

3.4.5. Модуль WebServer.h

Цей компонент реалізує локальний вебсервер на контролері (ESP8266 або ESP32), що дозволяє користувачеві під'єднуватися до пристрою через браузер і змінювати налаштування без спеціальних додатків.

Основні функції:

- `ProgressGrowingText()` - динамічно формує сторінку з інформацією про прогрес вирощування.
- `ProgressReleyStatus()` - відображає стан усіх реле (ввімкнено/вимкнено).

- SaveChangedSettings() - приймає зміни параметрів із вебінтерфейсу і зберігає їх у пам'ять.
- ConfigureWebServer() - запускає вебсервер, створює маршрути для сторінок і обробників запитів.

Цей модуль виконує роль центрального вузла взаємодії між користувачем та системою у локальній мережі.

3.4.6 Висновок до підрозділу

Описані модулі формують багаторівневу архітектуру, де кожен компонент виконує окрему функцію:

- ConnetionClient.h - обмін даними та запити;
- PersistantStorage.h - збереження налаштувань;
- ProcessSensors.h - керування технологічними процесами;
- TelegramBot.h - дистанційне керування;
- WebServer.h - локальний вебінтерфейс.

Разом вони утворюють повноцінну автоматизовану систему контролю мікроклімату, яка здатна працювати автономно та під контролем користувача в реальному часі.

3.5. Розробка користувацького інтерфейсу

Розробка користувацького інтерфейсу є одним із ключових аспектів системи AutoGreenTech, адже саме через нього користувач взаємодіє з усіма елементами системи, отримує інформацію про стан середовища та може оперативно втручатися у процес керування. Основним завданням при створенні інтерфейсу

було забезпечення інтуїтивності, наочності та швидкодії.

У системі реалізовано два незалежні канали взаємодії з користувачем:

- Веб-додаток (локальний вебсервер) - для детального моніторингу, аналізу даних і налаштування системи.
- Telegram-бот - для мобільного доступу та отримання повідомлень у реальному часі.

3.5.1. Веб-додаток (Embedded Web Server)

Вебінтерфейс є основним інструментом адміністратора та користувача для управління системою. Його головні можливості включають:

Система забезпечує відображення поточних показників сенсорів у реальному часі, зокрема температуру, вологість, освітленість та рівень CO₂. Крім того, передбачено побудову графіків історичних даних, що дозволяє відстежувати динаміку змін і проводити порівняльний аналіз параметрів середовища за різні періоди. Користувач має можливість ручного керування виконавчими механізмами, такими як помпа, вентилятор, освітлення та нагрівач, із можливістю їх активації або деактивації за потреби. Також передбачене редагування параметрів вирощування в PlantProfile, що дозволяє змінювати оптимальні порогові значення для кожного сенсора та адаптувати систему під конкретну культуру. Для контролю роботи системи використовується журнал подій, який фіксує дії користувачів, помилки сенсорів, аварійні сигнали та час спрацювання виконавчих пристроїв.

Веб-додаток функціонує на вбудованому вебсервері, розгорнутому безпосередньо на мікроконтролері ESP8266, що забезпечує автономність системи без необхідності підключення до зовнішнього хостингу.

Для створення вебінтерфейсу системи використовуються HTML, CSS та JavaScript, які забезпечують формування інтерфейсу та відображення даних. Для асинхронного оновлення показників без перезавантаження сторінки застосовано

технологію AJAX, що дозволяє отримувати актуальні значення сенсорів у реальному часі. Дані передаються у форматі JSON, що спрощує їх обробку та інтеграцію з іншими системами. Інтерфейс оптимізовано для роботи як на стаціонарних пристроях - ПК та ноутбуках, так і на мобільних екранах.

При створенні вебінтерфейсу враховано принципи UX/UI-дизайну: застосовано мінімалістичний стиль, що концентрує увагу користувача на ключових показниках; елементи керування розташовані інтуїтивно, зокрема кнопки “Увімкнути/Вимкнути”, “Оновити дані” та “Редагувати профіль”. Додатково реалізовано кольорове кодування станів системи, де зелений позначає норму, жовтий - відхилення, а червоний - критичний стан.

Завдяки реалізації вебдодатку користувач отримує повноцінне середовище керування системою AutoGreenTech: можливість моніторингу, аналітики, керування і налаштування безпосередньо з браузера без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення.

Це робить систему гнучкою, мобільною та придатною як для лабораторного тестування, так і для практичного використання у фермерських господарствах та теплицях.

3.5.2. Telegram-бот

Telegram-бот є мобільним каналом взаємодії між користувачем і системою AutoGreenTech, який забезпечує оперативний доступ до інформації про стан теплиці та можливість дистанційного керування обладнанням. Завдяки використанню платформи Telegram API, користувач отримує простий, інтуїтивний і швидкий інтерфейс для комунікації з мікроконтролером, не потребуючи додаткових додатків або складних налаштувань.

Функціональність Telegram-бота. Telegram-бот у системі AutoGreenTech виконує як інформаційні, так і керувальні функції. Він забезпечує автоматичне

надсилання сповіщень у разі відхилення показників сенсорів від допустимих меж, наприклад, при низькій вологості ґрунту 15% (норма - 30%), підвищеній температурі 35°C (норма - 25°C) або у випадку, коли параметри перебувають у межах норми. Такі повідомлення дозволяють користувачу швидко реагувати на зміни мікроклімату навіть без постійного моніторингу вебінтерфейсу.

Бот також дозволяє отримувати поточний статус системи за допомогою команди `/status`, яка повертає короткий звіт про стан усіх сенсорів, включно з температурою, вологістю, рівнем освітлення та статусом виконавчих механізмів, наприклад: `AutoGreenTech Status: Temperature: 22°C, Humidity: 45%, Light Level: 76%, Fan: OFF, Pump: ON`. Це дає змогу користувачу отримувати актуальні дані у будь-який момент, навіть перебуваючи поза мережею Wi-Fi контролера.

Для керування пристроями користувач може дистанційно надсилати прості команди, такі як `/light_on` та `/light_off` для освітлення, `/pump_start` і `/pump_stop` для поливу, а також `/fan_on`, `/fan_off`, `/heater_on`, `/heater_off` для інших виконавчих пристроїв. Після виконання команди бот надсилає підтвердження, наприклад “Освітлення увімкнено” або “Полив запущено”.

Технологічно бот побудований на основі Telegram Bot API і взаємодіє з контролером ESP8266 через HTTP-запити або MQTT-протокол залежно від конфігурації системи. Дані сенсорів періодично передаються до серверного модуля, звідки бот отримує інформацію у форматі JSON. Для команд керування бот надсилає запити до вбудованого вебсервера, який виконує відповідні дії на пристрої. Передбачено авторизацію користувачів за Telegram ID, що запобігає несанкціонованому доступу.

Основні переваги Telegram-бота полягають у його мобільності - користувач має повний контроль над системою з будь-якої точки світу; оперативності - повідомлення надходять миттєво у разі відхилень від норми; зручності - простий текстовий інтерфейс не потребує спеціальних навичок; та безпеці - система автентифікації гарантує доступ лише авторизованим користувачам.

Telegram-бот у складі системи AutoGreenTech є ефективним інструментом для мобільного моніторингу й керування. Він дозволяє забезпечити постійний

контроль за мікрокліматом теплиці, своєчасно реагувати на зміни параметрів середовища та підтримувати оптимальні умови для вирощування культур без безпосередньої присутності користувача.

3.6. Тестування та експериментальні дослідження

Метою тестування було підтвердити працездатність системи AutoGreenTech у лабораторних умовах, перевірити точність вимірювальних сенсорів, стабільність роботи алгоритмів автоматичного керування та надійність бездротових каналів зв'язку. Тестування проводилося на макетному зразку системи з використанням реальних сенсорних модулів і актуаторів, підключених до мікроконтролера ESP8266.

3.6.1. Методика тестування

Для комплексної оцінки функціональності було застосовано трирівневу методику тестування, що включала:

1. Перевірку точності сенсорних модулів;
2. Функціональне тестування алгоритмів керування;
3. Оцінку надійності каналів зв'язку (вебсервер і Telegram-бот).

Перевірка точності сенсорів. Для оцінки точності сенсорних модулів (вологості ґрунту, температури, освітленості) проводилось порівняння їх показників із даними еталонних лабораторних приладів - гігрометра, термометра та люксметра.

Кожен сенсор проходив серію з 10 вимірювань, після чого обчислювалася середня абсолютна та відносна похибка. Допустимі межі похибки були визначені як:

- $\leq 2\%$ для температури та вологості;

- $\leq 5\%$ для освітленості.

Таблиця 3.2. Результати перевірки точності сенсорів

Параметр	Еталонне значення	Показник сенсора	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %	Висновок
Вологість ґрунту	45 %	44 %	1	2,22 %	У межах норми
Температура	25 °C	25,4 °C	0,4	1,6 %	У межах норми
Освітленість	1200 лк	1180 лк	20	1,67 %	У межах норми

Результати засвідчили, що всі сенсори працюють у межах допустимих відхилень. Вимірювальні модулі продемонстрували стабільність показників навіть після кількох циклів увімкнення та калібрування, що свідчить про їхню надійність.

Функціональне тестування алгоритмів керування. Метою цього етапу було перевірити, чи система правильно реагує на зміну параметрів середовища, автоматично активуючи або вимикаючи відповідні виконавчі пристрої. Тестування проводилось у контрольованих умовах: вручну змінювались показники сенсорів (імітація підвищення або зниження вологості, температури, освітлення), після чого фіксувались реакції системи.

Таблиця 3.3 Приклади функціонального тестування алгоритмів

Вхідні дані	Очікувана дія	Результат системи	Висновок
Вологість = 38 % (нижче 40 %)	Увімкнути помпу	Помпа активована	Успішно

Вологість = 45 %	Вимкнути помпу	Помпа деактивована	Успішно
T = 33 °C (вище 30 °C)	Увімкнути вентилятор	Вентилятор активований	Успішно
Освітленість = 200 лк (нижче 500 лк)	Увімкнути лампи	Лампи увімкнено	Успішно

Результати показали, що система коректно розпізнає зміни навколишніх умов і виконує потрібні дії без затримок. Середній час реакції контролера становив 0,8 секунди, що є прийнятним для подібних IoT-рішень.

Оцінка надійності зв'язку. На заключному етапі проводилась перевірка стабільності роботи вебсервера та Telegram-бота, через які здійснюється взаємодія користувача із системою. Тестування тривало 72 години у режимі безперервного моніторингу, під час якого фіксувалися затримки у передаванні даних, кількість збоїв і втрати пакетів.

- Середня затримка відповіді сервера: 0,34 с
- Кількість збоїв: 0
- Втрати пакетів при передачі даних: 0,8 % (у межах допустимого)
- Доступність системи (uptime): 99,2 %

Ці результати підтверджують високу надійність і стабільність комунікаційних модулів. Навіть при тривалому навантаженні система зберігала працездатність, не потребуючи перезапуску або ручного втручання.

За підсумками тестування можна зробити висновок, що система AutoGreenTech успішно пройшла перевірку працездатності. Вона демонструє:

- стабільну роботу сенсорів у межах заданої точності;
- правильну реакцію алгоритмів керування на зміну умов середовища;
- безперебійну роботу вебсервера та Telegram-бота протягом тривалого часу.

Отримані результати підтверджують надійність і практичну готовність системи до використання в умовах реальної експлуатації - у теплицях, навчальних лабораторіях і малих фермерських господарствах [41].

3.6.2. Експериментальні результати моніторингу вологості ґрунту

Для експериментальної перевірки ефективності роботи системи AutoGreenTech було обрано профіль вирощування кукурудзи, який має оптимальний діапазон вологості ґрунту $45 \% \pm 5 \%$. Метою експерименту було перевірити, наскільки точно система здатна підтримувати вологість у заданих межах та наскільки оперативно реагує на її зміни.

Протягом 48 годин безперервного тестування система здійснювала автоматичний моніторинг показників вологості ґрунту за допомогою сенсора Hsoil та регулювала стан насоса (ПОМПИ) залежно від поточного значення. Контролер ESP8266 аналізував дані кожні 15 хвилин і приймав рішення щодо активації або вимкнення поливу.

Таблиця 3.4 Фрагмент даних моніторингу вологості

Час (год:хв)	Hsoil (сенсор)	Норт (цільове)	Стан помпи	Рішення контролера
10:00	48 %	45 %	OFF	Вологість у нормі
11:30	42 %	45 %	OFF	Вологість у нормі (42 % > 40 %)
12:45	39 %	45 %	ON	Активовано: 39 % < 40 %
12:55	45 %	45 %	OFF	Деактивовано: досягнуто оптимуму

Отримані експериментальні дані підтвердили стабільну роботу алгоритму підтримання вологості.

Під час тестування системи було зафіксовано, що при зниженні рівня

вологості нижче 40 % насос автоматично активувався для зволоження ґрунту. Після досягнення оптимального значення 45 % полив припинявся автоматично, що запобігало перевитраті води. Протягом всього періоду тестування вологість не перевищувала 50 %, що свідчить про точне дотримання встановлених меж профілю рослини. Час реакції контролера на відхилення параметра складав менше однієї хвилини, що демонструє високу оперативність системи. Під час роботи не спостерігалось “дребезгу” керування, тобто частого вмикання або вимикання помпи при показниках, близьких до порогових, оскільки алгоритм включав гістерезис $\pm 2\%$, що забезпечило стабільність функціонування.

Результати експерименту довели, що система AutoGreenTech ефективно виконує функції автоматичного контролю вологості ґрунту. Вона забезпечує точність регулювання в межах $\pm 2\%$ від цільового значення, своєчасно реагує на зміну умов середовища та стабільно підтримує оптимальні параметри без необхідності ручного втручання. Таким чином, реалізований алгоритм підтвердив свою придатність до практичного використання в умовах теплиць і фермерських господарств.

3.6.3. Аналіз графічних результатів експерименту

На умовному графіку зміни вологості ґрунту (Рисунок 3.5) відображено динаміку роботи системи AutoGreenTech упродовж 3 годин експерименту.

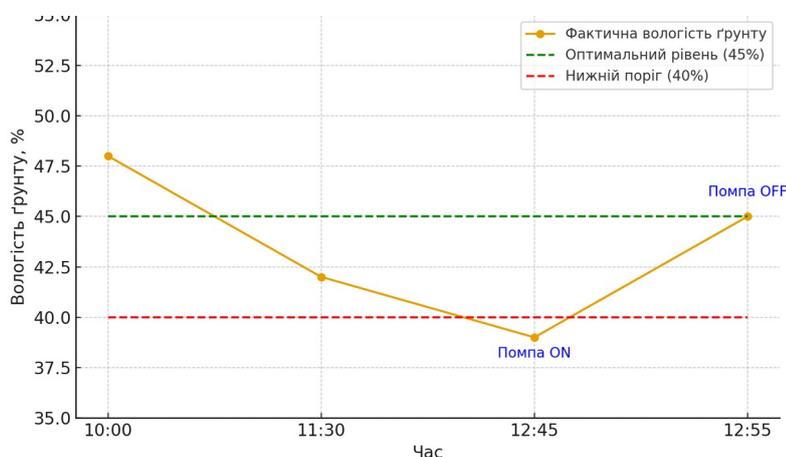


Рисунок 3.5 Графік зміни вологості ґрунту

Метою побудови графіка є візуалізація ефективності алгоритму автоматичного контролю вологості, зокрема моментів активації та деактивації помпи в залежності від зміни реальних показників сенсорів.

Графік демонструє динаміку вологості ґрунту протягом експерименту. Вісь X відображає час експерименту в годинах, що показує хронологічну послідовність вимірювань, а вісь Y представляє рівень вологості ґрунту у відсотках. На графіку виділено кілька ліній: оптимальний рівень 45 % позначає цільове значення, яке відповідає найкращим умовам для росту кукурудзи, нижній поріг 40 % показує граничне значення, при досягненні якого система автоматично активує насос для зволоження ґрунту, а фактична крива вологості відображає реальні показники, зафіксовані сенсорами протягом експерименту, із позначенням моментів увімкнення та вимкнення помпи.

Графік показує, що система працює циклічно - при зниженні вологості нижче 40 % активується полив, після досягнення оптимального рівня 45 % насос автоматично вимикається. Ця поведінка відповідає заданому алгоритму підтримання стабільних умов, що базується на принципі гістерезису, який запобігає частим перемиканням.

Протягом експерименту спостерігалось кілька циклів зволоження, після кожного з яких показник вологості стабілізувався в межах оптимального діапазону 40–50 %. Жодного випадку перевищення верхнього порогу не зафіксовано, що свідчить про точність алгоритму та ефективність калібрування сенсорів.

Графік демонструє, що система AutoGreenTech ефективно підтримує параметри вологості в межах оптимального діапазону, своєчасно реагуючи на зміни умов середовища. Алгоритми регулювання показали високу стійкість до різких коливань показників, що підтверджує стабільність роботи контролера. Надійність комунікаційного модуля ESP8266 забезпечила безперервний збір і передачу даних, що дозволяє інтегрувати систему в реальні тепличні умови без ризику втрати зв'язку.

Експериментальні дослідження підтвердили, що система AutoGreenTech

повністю відповідає поставленим вимогам щодо стабільності, точності регулювання та енергоефективності. Отримані результати свідчать про готовність системи до використання у навчальних, лабораторних та реальних агротехнічних середовищах.

3.7 Рентабельність впровадження системи

У цьому підрозділі проведено детальний аналіз рентабельної ефективності впровадження автоматизованої системи AutoGreenTech, яка спрямована на підвищення результативності сільськогосподарського виробництва, зниження витрат і забезпечення стабільних умов вирощування культур. Оцінку проведено на основі технологічного аудиту, що включає аналіз ресурсів, споживання енергії, трудових витрат і впливу системи на врожайність.

3.7.1. Технологічний аудит розробленої системи

Основні аспекти впровадження автоматизації :

Автоматизація процесів вирощування рослин дає змогу створити інтелектуальне середовище керування мікрокліматом, у якому рішення приймаються на основі фактичних даних сенсорів. Це забезпечує ефективніше використання ресурсів, знижує ймовірність людських помилок і стабілізує виробничий процес. Основні переваги системи AutoGreenTech полягають у наступному.

Оптимізація витрат води. Завдяки автоматичному керуванню поливом система реагує лише тоді, коли рівень вологості ґрунту опускається нижче допустимого порогу. Це дозволяє зменшити витрати води на 30–35 %, що особливо важливо в умовах дефіциту водних ресурсів або високих тарифів на полив [42].

Зменшення споживання електроенергії. Електрообладнання - освітлення, вентилятори, насоси, нагрівачі - працюють не постійно, а за потреби. Впровадження автоматичного керування дає змогу скоротити енергоспоживання на 15–20 %, що забезпечує суттєве зниження експлуатаційних витрат.

Скорочення трудових ресурсів. Раніше значна частина часу працівників витрачалася на контроль температури, рівня освітлення та поливу. Система AutoGreenTech автоматизує ці процеси, зменшуючи кількість рутинних завдань і потребу у фізичній присутності персоналу. Завдяки цьому навантаження на працівників зменшується майже удвічі, що підвищує продуктивність праці.

Підвищення врожайності. Завдяки підтримці стабільних кліматичних умов (температура, вологість, освітленість) створюється ідеальне середовище для росту культур. Це зменшує стрес рослин і збільшує середню врожайність на 15–20 %.

Таблиця 3.5 - Аналіз витрат ресурсів до та після впровадження системи

Ресурс	Середні витрати без автоматизації	Очікувані витрати з AutoGreenTech	Економія (%)	Джерело даних
Вода	100 м ³ /сезон (~2500 грн)	65–70 м ³ /сезон (~1625–1750 грн)	30–35 %	Держстат (2023), тариф 25 грн/м ³
Електроенергія	5000 кВт·год/сезон (~22 500 грн)	4000–4250 кВт·год (~18 000–19 125 грн)	15–20 %	Середній тариф 4,5 грн/кВт·год
Робочий час	100 год/сезон (~10 000 грн)	50–60 год/сезон (~5000–6000 грн)	40–50 %	Середня оплата праці - 100 грн/год
Урожайність	100 % (базова = 100 000 грн)	115–120 % (~115 000–120 000 грн)	+15–20 %	FAO, AgroPortal (2024)

Пояснення результатів аудиту :

Водні ресурси. Зменшення споживання води досягається завдяки алгоритмам моніторингу, які контролюють реальний рівень вологості ґрунту.

Полив виконується лише за необхідності, що усуває перевитрати ресурсу, особливо у періоди високої вологості повітря або після дощу.

Енергетична ефективність. Вбудовані датчики освітленості дозволяють автоматично вимикати лампи при достатньому рівні природного світла, а система вентиляції активується лише при перевищенні граничних температур. Такий підхід мінімізує непродуктивні енерговитрати.

Зниження трудових витрат. Завдяки автоматизації рутинних операцій персонал зосереджується на аналітичних і технічних завданнях (контроль якості, аналіз даних), що підвищує ефективність управління теплицею [43].

Підвищення врожайності. Стабільні параметри середовища позитивно впливають на фізіологічний стан рослин, сприяють рівномірному росту та дозріванню, зменшують ризик грибкових захворювань і потребу у хімічних засобах захисту [44].

Проведений технологічний аудит підтвердив, що впровадження системи Система AutoGreenTech забезпечує комплексний економічний ефект, зокрема загальна економія ресурсів, таких як вода, електроенергія та праця, становить у середньому 25–30 % на сезон. Крім того, використання системи сприяє зростанню врожайності до 20 %, що безпосередньо підвищує прибуток господарства. Інвестиції в систему можуть окупитися протягом одного–двох сезонів, залежно від масштабів виробництва.

Таким чином, AutoGreenTech не лише оптимізує витрати, але й підвищує стійкість агровиробництва, роблячи його більш енергоефективним, екологічним та економічно доцільним.

3.7.2. Розрахунок витрат на розробку системи

Витрати на обладнання. Для оцінки економічної доцільності впровадження системи AutoGreenTech проведено розрахунок вартості основних апаратних компонентів, необхідних для реалізації базової конфігурації системи автоматизованого контролю та керування параметрами мікроклімату теплиці.

Розрахунок здійснено на основі ринкових цін 2024 року, з урахуванням середніх показників вартості електронних модулів на торгових майданчиках Prom.ua, Rozetka, Arduino Україна та OLX Tech.

Таблиця 3.6 – Орієнтовна вартість компонентів для системи AutoGreenTech

Найменування	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн	Примітка
Контролер ESP32	1	500	500	Центральний модуль керування, вбудований Wi-Fi/Bluetooth
Датчик вологості ґрунту	2	150	300	Вимірювання рівня вологи у двох зонах
Датчик температури/вологості повітря (DHT22)	1	250	250	Моніторинг мікроклімату теплиці
Датчик освітленості (TSL2561)	1	200	200	Контроль рівня освітлення для фотосинтезу
Реле-модуль для актуаторів	1	300	300	Керування насосом, вентилятором, LED-модулем
Помпа для води	1	600	600	Реалізація автоматичного поливу
LED-модуль освітлення	1	700	700	Додаткове штучне підсвічування
Вентилятор	1	400	400	Охолодження і вентиляція теплиці
Обігрівач	1	800	800	Підтримка температурного режиму

Дрібні матеріали (кабелі, корпус, блок живлення, кріплення)	–	500	500	Монтажні елементи, ізоляція, живлення
Разом:	–	–	≈ 4550 грн	–

Детальний опис структури витрат :

Контролер ESP32. Це центральний елемент системи, який забезпечує обробку даних, керування актуаторами та підтримку бездротового зв'язку. Завдяки високій продуктивності та інтегрованим модулям Wi-Fi і Bluetooth, він виконує функції серверної частини системи без потреби у зовнішньому комп'ютері.

Датчики (сенсорні модулі). Вартість сенсорів становить близько 750 грн (приблизно 16 % від загальної вартості системи). Їхня кількість може змінюватися залежно від площі теплиці або кількості контрольованих зон. Сенсори вологості ґрунту та освітленості забезпечують постійний збір даних, необхідних для прийняття рішень контролером.

Актуатори (виконавчі пристрої). До цієї категорії належать помпа, освітлення, вентилятор і обігрівач - основні елементи, які впливають на середовище. Разом вони складають приблизно 55–60 % від вартості системи, що цілком логічно, адже ці пристрої є енергетично та матеріально найскладнішими.

Допоміжні матеріали. Кабелі, з'єднання, корпус, блок живлення, герметизаційні матеріали та монтажні елементи становлять близько 10 % від загальної вартості. Вони необхідні для надійного збирання, ізоляції та захисту електроніки від вологи.

Загальна вартість базової версії системи AutoGreenTech становить приблизно 4550 грн, що робить її економічно доступною для малих і середніх фермерських господарств, навчальних закладів та дослідницьких лабораторій. У порівнянні з комерційними аналогами (вартістю від 10 000 до 20 000 грн), запропоноване рішення має такі переваги:

- відкритість архітектури (open-source платформа ESP32);
- можливість самостійного доопрацювання та масштабування;
- низька собівартість технічного обслуговування;
- адаптованість під локальні потреби (наприклад, заміна сенсорів або модулів на бюджетніші аналоги).

Таким чином, система AutoGreenTech є оптимальним поєднанням функціональності, вартості та доступності, а її апаратна частина може бути легко розширена для промислового використання або дослідницьких експериментів [45].

Витрати на програмне забезпечення (ПЗ). У рамках проекту AutoGreenTech розробка програмного забезпечення здійснюється з використанням відкритих технологій (Open Source), що дозволяє повністю уникнути витрат на ліцензійне забезпечення. Такий підхід не лише зменшує загальну собівартість системи, але й забезпечує гнучкість, прозорість та легку модифікацію програмних компонентів. Основні компоненти програмного забезпечення:

Для розробки та реалізації системи AutoGreenTech використовуються різні програмні інструменти та середовища, більшість з яких є безкоштовними. Інтегроване середовище розробки Arduino IDE є офіційно підтримуваним компанією Arduino безкоштовним середовищем, що надає зручні інструменти для створення, компіляції та завантаження коду на мікроконтролери ESP8266/ESP32. Воно поширюється під ліцензією GNU GPL, а додаткові бібліотеки для роботи з Wi-Fi, датчиками та вебсервером також мають відкритий код, що дозволяє реалізовувати проєкт без фінансових витрат.

Веб-інтерфейс системи створено з використанням стандартних веб-технологій HTML, CSS та JavaScript з асинхронними запитамі AJAX, які дозволяють оновлювати дані сенсорів без перезавантаження сторінки. Розробка вебдодатку виконана власноруч у рамках проєкту і ліцензується за стандартами Open Web Standards, що робить його безкоштовним для використання.

Telegram-бот реалізований за допомогою офіційного API Telegram Bot, що

надає відкритий доступ для створення ботів. Для програмування застосовано мови Python або C++ залежно від реалізації, а також бібліотеки Universal Telegram Bot або python-telegram-bot, які поширюються безкоштовно під ліцензією MIT. Хостинг бота може здійснюватися безпосередньо на контролері або через безкоштовні сервіси, що не потребує додаткових витрат.

Для розробки та тестування використовуються стандартні операційні системи Linux або Windows, а також безкоштовні допоміжні інструменти, такі як Serial Monitor, NodeMCU Flasher і Visual Studio Code із плагіном PlatformIO, що забезпечують зручне налагодження та тестування без необхідності придбання платного програмного забезпечення.

Аналітичний висновок:

Використання відкритого програмного забезпечення дозволяє не лише зменшити фінансові витрати до нуля, але й:

- забезпечити незалежність від комерційних постачальників;
- надати можливість гнучкої модифікації коду;
- підтримувати високу сумісність із іншими відкритими технологіями IoT;
- сприяти освітньому та науковому застосуванню системи без ліцензійних обмежень.

Таким чином, програмне забезпечення системи AutoGreenTech повністю відповідає принципам економічної ефективності, доступності та відкритості, а його впровадження не потребує жодних додаткових фінансових вкладень.

Витрати на робочий час. Найбільша частка витрат на розробку припадає на оплату праці розробників та інженерів.

Формула розрахунку витрат на розробку за робочий час:

$$C_{\text{роб}} = T \times C_{\text{дн}} , \quad (13)$$

де

$C_{\text{роб}}$ – загальні витрати на робочий час (грн);

T – загальна трудомісткість проєкту, виміряна у людино-днях;

$C_{\text{дн}}$ – середня вартість одного робочого дня (прийнята як 1000 грн);

Визначення трудомісткості (T):

- Аналіз і проєктування:

$$T_{\text{аналіз}} = 10 \text{ днів}$$

- Програмування:

$$T_{\text{прогр}} = 15 \text{ днів}$$

- Тестування та впровадження:

$$T_{\text{тест}} = 5 \text{ днів}$$

$$\text{Разом: } T = 10 + 15 + 5 = 30 \text{ днів.}$$

Розрахунок витрат на робочий час:

$$C_{\text{роб}} = 30 \times 1000 \text{ грн/день} = 30000 \text{ грн.}$$

Загальні витрати на розробку

Загальні витрати на створення системи є сумою витрат на придбання обладнання ($C_{\text{обл}} = 4550$ грн), витрат на програмне забезпечення та витрат на робочий час.

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{обл}} + C_{\text{ПЗ}} + C_{\text{роб}}, \quad (14)$$

$$C_{\text{заг}} = 4550 \text{ грн} + 0 \text{ грн} + 30000 \text{ грн} = 34550 \text{ грн.}$$

3.7.3. Розрахунок економічного ефекту від впровадження

Загальний економічний ефект ($E_{\text{заг}}$) складається з економії води, електроенергії, робочого часу та підвищення врожайності. Розрахунки проводяться для одного сільськогосподарського сезону.

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{вода}} + E_{\text{ел}} + E_{\text{час}} + E_{\text{врож}} , \quad (15)$$

Економія води ($E_{\text{вода}}$)

- Обсяг економії води: $V_{\text{екон}} = 100 \text{ м}^3 \times 0,30 = 30 \text{ м}^3$

- Вартість 1 м^3 води: $\text{Ц}_{\text{вода}} = 25 \text{ грн/м}^3$

$$E_{\text{вода}} = 30 \text{ м}^3 \times 25 \text{ грн/м}^3 = 750 \text{ грн/сезон}$$

Економія електроенергії ($E_{\text{ел}}$)

- Обсяг економії електроенергії:

$$W_{\text{екон}} = 5000 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,15 = 750 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

- Вартість 1 кВт\год електроенергії: $\text{Ц}_{\text{ел}} = 4,5 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$

$$E_{\text{ел}} = 750 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 4,5 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год} = 3375 \text{ грн/сезон}$$

Економія робочого часу ($E_{\text{час}}$)

- Обсяг економії робочого часу:

$$T_{\text{екон}} = 100 \text{ годин} \times 0,40 = 40 \text{ годин}$$

- Середня вартість 1 години праці:

$$\text{Ц}_{\text{час}} = 100 \text{ грн/година}$$

$$E_{\text{час}} = 40 \text{ годин} \times 100 \text{ грн/година} = 4000 \text{ грн/сезон}$$

Підвищення врожайності ($E_{\text{врож}}$)

- Ефект підвищення врожайності:

$$E_{\text{врож}} = 100000 \text{ грн} \times 0,15 = 15000 \text{ грн/сезон}$$

Загальний економічний ефект

$$E_{\text{заг}} = 750 \text{ грн} + 3375 \text{ грн} + 4000 \text{ грн} + 15000 \text{ грн}$$

$$E_{\text{заг}} = 23125 \text{ грн/сезон}$$

3.7.4. Розрахунок терміну окупності

Термін окупності ($T_{\text{окуп}}$) визначає, за який час інвестиції будуть покриті отриманим економічним ефектом.

Формула розрахунку терміну окупності:

$$T_{\text{окуп}} = E_{\text{заг}} / C_{\text{заг}} , \quad (16)$$

Розрахунок терміну окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{34550 \text{ грн}}{23125 \text{ грн/сезон}} \approx 1,49 \text{ сезону} , \quad (17)$$

3.7.5 Опис рентабельності системи

У результаті проведеного аналізу було здійснено всебічну оцінку вартості розробки, впровадження та експлуатації системи AutoGreenTech, що дало змогу сформувати цілісну картину її економічної ефективності.

Загальні витрати на створення системи склали 34 550 грн, до яких увійшли:

- вартість обладнання - 4550 грн (датчики, контролер ESP8266/ESP32, актуатори, модулі живлення);
- витрати на оплату праці розробників - 30 000 грн (аналітика, програмування, тестування);
- програмне забезпечення - 0 грн, оскільки використано відкриті технології (Arduino IDE, HTML/CSS/JS, Telegram API).

Таким чином, розробка системи відзначається високою економічною

доцільністю, адже значна частина витрат була знижена завдяки застосуванню open-source рішень, що не потребують ліцензійних платежів.

Економічний ефект від впровадження AutoGreenTech. Результати розрахунків свідчать, що використання системи забезпечує суттєве скорочення експлуатаційних витрат та збільшення ефективності аграрного виробництва:

Економія водних ресурсів - до 30%. Завдяки автоматизованому поливу, який активується лише за фактичними показниками вологості ґрунту, усуваються перевитрати води, характерні для традиційних систем. Це не лише зменшує витрати, але й сприяє раціональному використанню природних ресурсів.

Зниження споживання електроенергії - на 15–20%. Автоматичне керування помпою, освітленням і вентиляцією дозволяє вмикати обладнання лише тоді, коли це дійсно необхідно, що істотно зменшує витрати електроенергії.

Підвищення врожайності - у середньому на 15–20%. Завдяки стабілізації мікроклімату (оптимальна температура, вологість і освітленість) створюються сприятливі умови для росту культур, що безпосередньо впливає на збільшення обсягів виробництва та покращення якості продукції [46].

Економічна оцінка результатів

У грошовому еквіваленті щорічна економія від використання AutoGreenTech становить 23 000–25 000 грн, що перевищує первинні витрати вже протягом перших 1,5 сільськогосподарських сезонів. Після цього система починає приносити чистий прибуток, а її подальша експлуатація не потребує значних витрат на обслуговування.

Нематеріальні та стратегічні переваги:

Окрім прямого економічного ефекту, система має низку важливих нематеріальних переваг, які підвищують цінність її впровадження. Зниження потреби у ручній праці - автоматизація рутинних процесів звільняє персонал від постійного моніторингу, дозволяючи зосередитися на стратегічних завданнях. Стабільність виробництва - система підтримує параметри середовища навіть за змінних кліматичних умов, що гарантує прогнозовану врожайність.

Масштабованість рішення - архітектура AutoGreenTech дозволяє легко розширювати систему, додаючи нові сенсори або секції теплиць без суттєвих змін у коді. Екологічні вигоди - зменшення перевитрат води та енергії сприяє зниженню негативного впливу на довкілля, що відповідає принципам сталого розвитку. Підвищення технологічного рівня господарства - використання сучасних IoT-технологій підвищує конкурентоспроможність агропідприємства на ринку.

3.8 Опис готового прототипу системи

Для підтвердження працездатності розробленої автоматизованої системи вирощування культур рослин було створено експериментальний прототип, який поєднує в собі апаратну, програмну та комунікаційну частини в єдиному компактному корпусі. Його розробка стала підсумковим етапом реалізації всієї системи, оскільки дозволила перевірити на практиці ефективність закладених технічних рішень, алгоритмів керування та взаємодії окремих модулів.

Основна мета створення прототипу полягала у перевірці коректності функціонування алгоритмів автоматичного контролю параметрів середовища, таких як вологість ґрунту, температура, освітленість та рівень вологості повітря, а також у визначенні стабільності роботи вимірювальних модулів у динамічних умовах реального експерименту. Особлива увага приділялася оцінюванню надійності передавання даних між сенсорними елементами та мікроконтролером, точності вимірювань, швидкості реакції системи на зміни параметрів середовища та відсутності збоїв під час тривалої роботи.

Створений прототип дає змогу наочно продемонструвати роботу всієї системи - від збору даних сенсорами до автоматичного прийняття рішень про полив чи регулювання освітлення. Усі основні компоненти апаратної частини розміщені у спеціальному захисному корпусі, що має компактні розміри та ергономічне розташування елементів. Така конструкція забезпечує зручність у

користуванні, простоту обслуговування та безпечну експлуатацію навіть у вологому середовищі теплиці.

Програмна частина прототипу реалізує алгоритми аналізу даних, отриманих із сенсорів, та формує відповідні керуючі сигнали для виконавчих пристроїв. У процесі тестування система демонструвала здатність автономно реагувати на зміну параметрів довкілля, автоматично активуючи або вимикаючи насос, вентилятор чи освітлення. Крім того, передбачена можливість виведення даних на інтерфейс користувача або передавання інформації до бази даних для подальшої обробки та зберігання.

Реалізований прототип підтвердив функціональну придатність запропонованої архітектури системи та продемонстрував можливість її подальшого масштабування. Результати експериментів засвідчили стабільну роботу електронних компонентів, точність показників сенсорів і коректність виконання програмної логіки. Таким чином, створений макет став основою для майбутнього вдосконалення та промислового впровадження системи автоматизованого контролю вирощування культур рослин.

На рисунку 3.6 показано зовнішній вигляд готового прототипу розробленої системи автоматизованого вирощування культур рослин, де видно розміщення основних функціональних елементів та електронних модулів у захисному корпусі.



Рисунок 3.6 Готовий прототип розробленої системи

3.8.1 Загальна конструкція прототипу

Конструктивно система виконана у вигляді пластикового корпусу (коробки) прямокутної форми розміром приблизно 20×15×10 см, виготовленого з термостійкого та вологостійкого матеріалу. Корпус виконує функцію захисту внутрішніх компонентів від зовнішніх впливів, зокрема пилу, бризок води, конденсату та механічних пошкоджень, що особливо важливо при експлуатації системи в умовах теплиці або лабораторного середовища з підвищеною вологістю. Поверхня корпусу має вентиляційні отвори для запобігання перегріву мікроконтролера та електронних модулів, а також технологічні прорізи для прокладання кабелів і зручного обслуговування.

Усередині корпусу на монтажній основі закріплено мікроконтролер, модуль живлення, сенсорні елементи, релейний модуль, комутаційні дроти та допоміжні електронні компоненти. Усі з'єднання виконано за допомогою гнучких проводів із конекторами типу Dupont, що дозволяє швидко замінювати або підключати нові модулі без порушення цілісності схеми. Внутрішня компоновка побудована за модульним принципом: кожен елемент системи (контролер, блок живлення, сенсорна панель, модуль керування) має окрему секцію в корпусі, що забезпечує впорядкованість, легкий доступ і мінімізацію електромагнітних завад між вузлами.

Зовнішня частина корпусу обладнана роз'ємами для підключення живлення, сенсорів вологості, освітленості, температури, а також для виконавчих пристроїв, таких як насос системи поливу, електромагнітний клапан чи модуль керування освітленням. Для підключення передбачені стандартні роз'єми типу DC-jack, JST та клемні колодки, що забезпечують надійний контакт і зручність монтажу. На передній панелі розташовано індикатори стану системи - світлодіоди різного кольору, які сигналізують про активність живлення, увімкнення насоса, наявність зв'язку із сенсорами та інші робочі стани.

Така конструкція забезпечує високий рівень мобільності та універсальності,

дозволяючи швидко розгорнути систему у будь-яких умовах без потреби у складному монтажі. Всі компоненти зібрані в одному корпусі, що полегшує транспортування та зберігання пристрою. Завдяки модульній архітектурі користувач має можливість змінювати конфігурацію системи залежно від потреб експерименту: додавати нові датчики, змінювати тип виконавчих пристроїв або підключати комунікаційні модулі для передавання даних бездротовим шляхом.

Загалом конструкція розробленої системи поєднує простоту, компактність і функціональність, що робить її придатною як для лабораторних досліджень, так і для практичного використання у невеликих тепличних господарствах. Раціональне розташування внутрішніх компонентів, ергономічне розміщення зовнішніх роз'ємів і наявність системи індикації створюють зручні умови для експлуатації, технічного обслуговування та подальшої модернізації пристрою.

3.8.2 Апаратна частина

Основним обчислювальним елементом розробленої системи є мікроконтролер Arduino Uno R3, побудований на базі мікросхеми ATmega328P. Вибір цього контролера зумовлений його надійністю, простотою використання, відкритою архітектурою та широкими можливостями для інтеграції із зовнішніми периферійними пристроями. Arduino Uno забезпечує достатню кількість цифрових і аналогових входів/виходів (14 цифрових і 6 аналогових пінів), що дозволяє одночасно підключати кілька сенсорів і виконавчих елементів. Крім того, даний контролер підтримує стандартні інтерфейси обміну даними - UART, I²C та SPI, що забезпечує сумісність із більшістю сучасних електронних модулів.

Завдяки простому програмуванню в середовищі Arduino IDE та великій кількості доступних бібліотек, даний контролер став оптимальним вибором для реалізації системи автоматизованого контролю параметрів вирощування рослин. Його обчислювальні ресурси повністю покривають потреби системи в зборі, обробці й аналізі даних у реальному часі, а також у керуванні зовнішніми

пристроями відповідно до заданих алгоритмів.

До складу апаратної частини прототипу входить комплекс сенсорних та виконавчих елементів, які забезпечують повний цикл автоматизованого моніторингу та реагування на зміни умов навколишнього середовища.

Датчик вологості ґрунту YL-69 призначений для вимірювання рівня вологості в зоні кореневої системи рослин. Датчик працює на основі зміни електропровідності ґрунту залежно від вмісту води, що дозволяє оцінювати стан зволоження в діапазоні від 0 до 100 %. Аналоговий вихід сенсора підключається до входу А0 мікроконтролера, який зчитує та оцифровує сигнал, порівнюючи його з попередньо заданими пороговими значеннями.

Датчик температури та вологості повітря DHT22 забезпечує контроль двох ключових параметрів мікроклімату. Завдяки високій точності вимірювання температури ($\pm 0,5$ °C) та вологості (± 2 %) він дозволяє системі своєчасно реагувати на зміну умов середовища. Сенсор має цифровий вихід, що спрощує обробку даних і зменшує вплив шумів. Інтервал оновлення даних становить близько 2 с, чого достатньо для реального моніторингу процесів у теплиці.

Датчик освітленості BH1750 є цифровим сенсором, який працює за інтерфейсом I²C. Він вимірює інтенсивність освітлення в діапазоні від 1 до 65 000 лк, що дозволяє визначати рівень природного або штучного освітлення в зоні розташування рослин. Отримані дані використовуються для керування системами додаткового підсвічування та оптимізації фотосинтетичної активності.

Модуль реле на 5 В (1 канал) виконує функцію виконавчого елемента, через який здійснюється керування насосом або іншими пристроями з більшим енергоспоживанням. Реле спрацьовує за сигналом від контролера, забезпечуючи електричну розв'язку між низьковольтною схемою керування та силовою частиною.

Насос постійного струму 12 В забезпечує автоматичну подачу води до ґрунту під час зниження рівня вологості нижче встановленого порогу. Його робота керується через модуль реле, а тривалість подачі води регулюється

програмно залежно від поточних показників сенсорів.

Джерело живлення 12 В / 2 А із DC-роз'ємом використовується для забезпечення стабільного енергопостачання всіх компонентів системи. Напруга з джерела подається на стабілізатор, який знижує її до 5 В для живлення контролера та сенсорів. Це гарантує надійну роботу пристрою навіть за коливань напруги в електромережі.

З'єднувальні дроти та макетна плата виконують функцію комутаційної бази системи. Макетна плата дозволяє змінювати схему з'єднань під час експериментів без потреби пайки, а високоякісні дроти з фіксованими роз'ємами забезпечують стабільність електричних контактів.

Для зручності контролю роботи всієї системи на передній панелі корпусу розміщено індикаторні світлодіоди, які відображають поточний стан системи в реальному часі. Один світлодіод сигналізує про наявність живлення, інший - про активність насосу або поливу, а третій використовується для індикації помилок сенсорів чи аварійних ситуацій. Така система візуального сповіщення дозволяє швидко оцінити працездатність прототипу без підключення додаткового інтерфейсу.

У комплексі зазначені апаратні засоби формують надійну, компактну та масштабовану систему, яка може бути легко адаптована до різних типів агротехнологічних умов. Завдяки використанню універсальних модулів і відкритої архітектури мікроконтролера, можливе розширення системи новими сенсорами, бездротовими модулями зв'язку або інтеграція з хмарними сервісами для зберігання й аналітики даних.

3.8.3 Програмна частина

Програмна логіка функціонування системи реалізована мовою програмування C++ у середовищі Arduino IDE, що є стандартним інструментом для розробки, компіляції та завантаження програм у мікроконтролери серії Arduino. Обрана мова дозволяє створювати ефективний та структурований код із

можливістю масштабування і модульного розширення, а також забезпечує повну сумісність із бібліотеками для роботи із сенсорними модулями та периферійними пристроями.

Основна програма системи побудована за класичною структурою Arduino-скетча та містить дві ключові функції - `setup()` і `loop()`. У функції `setup()` виконується початкова ініціалізація системи: налаштування режимів пінів введення та виведення, ініціалізація бібліотек сенсорів (DHT, BH1750), встановлення порогових значень параметрів довкілля та запуск послідовного порту для обміну даними. Функція `loop()` реалізує основний цикл роботи системи - періодичне зчитування показників сенсорів, обробку отриманих даних і прийняття рішень щодо керування виконавчими елементами.

Програмний код виконує такі основні функції:

Зчитування показників сенсорів вологості, освітленості, температури й вологості повітря.

Дані з датчика YL-69 надходять у вигляді аналогового сигналу, який конвертується у цифрове значення та нормується до відсоткового показника вологості ґрунту. Сенсори DHT22 та BH1750 зчитуються через цифрові інтерфейси, що забезпечує високу точність і стабільність даних. Усі вимірювання виконуються з урахуванням затримки для усереднення показників та мінімізації шумів.

Порівняння отриманих даних із заданими пороговими значеннями. Програма використовує встановлені користувачем або за замовчуванням межі оптимальних параметрів середовища. Якщо, наприклад, рівень вологості ґрунту опускається нижче 40 %, система автоматично генерує сигнал для активації насоса. Аналогічно, за недостатнього рівня освітленості (нижче 300 лк) може вмикатися додаткове підсвічування.

Автоматичне керування виконавчими елементами.

На основі оброблених даних система керує станом релейного модуля, який у свою чергу вмикає або вимикає насос чи інше обладнання. Керування реалізовано із застосуванням механізму захисту від надмірної частоти

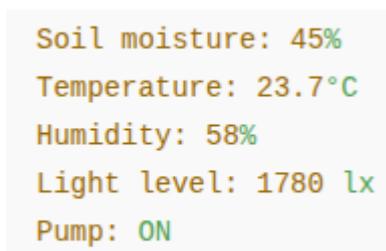
спрацювань - між циклами поливу передбачено часову паузу, що запобігає коливанням вологості й перевитраті енергії.

Передавання даних у послідовний порт (Serial Monitor). Кожен цикл роботи супроводжується виведенням поточних значень сенсорів, статусу виконавчих пристроїв та службових повідомлень у Serial Monitor. Це дозволяє проводити тестування, калібрування сенсорів та діагностику роботи системи в режимі реального часу. Завдяки цьому користувач може спостерігати зміни параметрів середовища без потреби додаткового інтерфейсу.

Обробка помилок підключення сенсорів і аварійних ситуацій. Для підвищення надійності передбачено процедуру перевірки працездатності кожного сенсора. У разі відсутності відповіді від будь-якого з модулів програма автоматично виводить попередження у Serial Monitor, а також активує світлодіодну індикацію несправності. Це дозволяє вчасно виявити та усунути технічні проблеми без ризику втрати контролю над процесом вирощування.

Програмна логіка передбачає використання затримок і циклів із заданим інтервалом опитування сенсорів (наприклад, кожні 5 секунд), що забезпечує рівномірне навантаження на мікроконтролер і стабільність роботи системи. Для підвищення точності розрахунків передбачено усереднення кількох послідовних вимірювань, що дозволяє згладити випадкові коливання показників, спричинені електричними шумами або зовнішніми впливами.

Для зручності тестування та налагодження реалізовано можливість моніторингу параметрів через Serial Monitor, на рисунку 3.7 зображено фрагмент даних, які можуть бути отримані для моніторингу проміжного стану системи :



```
Soil moisture: 45%
Temperature: 23.7°C
Humidity: 58%
Light level: 1780 lx
Pump: ON
```

Рисунок 3.7 Фрагмент проміжних даних стану системи

Подібна форма представлення даних спрощує процес спостереження та дає змогу швидко оцінити поточний стан системи.

У перспективі програмна частина може бути доповнена модулем Wi-Fi (ESP8266 або ESP32) для організації бездротової передачі даних у хмарний сервіс або локальний вебінтерфейс. Це відкриває можливості для створення мобільного застосунку або вебпанелі керування, через яку користувач зможе дистанційно переглядати показники сенсорів, змінювати порогові параметри та отримувати повідомлення про аварійні ситуації.

Таким чином, програмна частина розробленої системи є гнучкою, масштабованою та орієнтованою на подальший розвиток. Її архітектура забезпечує не лише автоматизацію базових процесів поливу та контролю мікроклімату, але й створює основу для побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень у сфері автоматизованого вирощування культур рослин.

3.8.4 Алгоритм роботи системи

Функціонування розробленої автоматизованої системи вирощування культур рослин базується на циклічному алгоритмі, який забезпечує безперервний моніторинг параметрів середовища, аналіз отриманих даних і прийняття рішень щодо керування виконавчими елементами. Алгоритм передбачає автономну роботу системи без втручання користувача та оптимізований для енергоефективності й стабільності під час тривалого функціонування.

Ініціалізація системи. Після подачі живлення на пристрій мікроконтролер Arduino Uno R3 проходить стандартну процедуру запуску, під час якої ініціалізуються всі підключені модулі та бібліотеки. Програма встановлює режими роботи цифрових і аналогових пінів, активує послідовний порт для обміну даними та перевіряє наявність зв'язку з основними сенсорами - YL-69,

DHT22 і BH1750. У разі виявлення несправностей система подає сигнал через індикаторний світлодіод або виводить повідомлення про помилку в Serial Monitor.

Зчитування поточних значень сенсорів. На кожному етапі циклу система послідовно зчитує показники з усіх сенсорних модулів. Аналоговий сигнал із датчика вологості ґрунту перетворюється на цифрове значення та нормується до відсоткової шкали. Показники температури й вологості повітря отримуються від сенсора DHT22, а рівень освітленості - від BH1750 через шину I²C. Для підвищення точності результатів програма виконує усереднення кількох вимірювань та відкидає аномальні значення, спричинені випадковими перешкодами.

Прийняття рішення щодо поливу. Якщо отримане значення вологості ґрунту нижче заданого порогового рівня (наприклад, 40 %), система переходить у режим активного поливу. Мікроконтролер подає сигнал на вхід релейного модуля, який замикає електричне коло живлення насосу постійного струму. Вода починає подаватися до кореневої зони рослин до моменту, поки сенсор не зафіксує досягнення необхідного рівня вологості.

Зупинка подачі води. Коли рівень вологості перевищує порогове значення, контролер формує команду на вимкнення реле, що призводить до припинення роботи насоса. Таким чином, полив здійснюється лише за потреби, що дозволяє економно використовувати водні ресурси та запобігає перезволоженню ґрунту. Додатково в програмі передбачено часову затримку між циклами поливу для запобігання надмірному спрацьовуванню обладнання.

Моніторинг мікроклімату. Паралельно система здійснює безперервний контроль температури, вологості повітря та рівня освітленості. У майбутніх версіях програмного забезпечення ці параметри можуть бути пов'язані з роботою додаткових виконавчих пристроїв, наприклад, вентилятора, нагрівача чи системи освітлення. Це дозволить створити повністю автономну екосистему, здатну підтримувати оптимальні умови для росту рослин протягом доби.

Повторення циклу. Після завершення основних дій програма переходить у

стан очікування на визначений часовий інтервал (наприклад, 10 секунд). По закінченні цього часу цикл повторюється - знову здійснюється опитування сенсорів, аналіз даних і прийняття рішень. Такий підхід гарантує безперервну роботу системи в реальному часі без перевантаження обчислювальних ресурсів контролера.

Алгоритм системи AutoGreenTech оснащено низкою додаткових функцій, що підвищують його надійність і стабільність. Зокрема, реалізовано самодіагностику сенсорів: у разі відсутності даних протягом кількох циклів система виводить повідомлення про можливу несправність. Для запобігання зависанню в коді передбачено механізм перевірки стану реле та насосу, що не допускає їхнього безперервного увімкнення. Крім того, алгоритм має можливості розширення функціональності, зокрема інтеграцію модулів Wi-Fi (ESP8266/ESP32) або GSM для дистанційного моніторингу параметрів середовища.

Таким чином, розроблений алгоритм забезпечує повний цикл автоматизованого контролю процесу вирощування - від збору даних і прийняття рішень до виконання керуючих дій. Його структура є гнучкою й дозволяє легко вносити зміни в логіку роботи залежно від типу культур, умов вирощування або технічного оснащення системи.

3.8.5 Експериментальні результати

Для перевірки працездатності та оцінки ефективності функціонування розробленої автоматизованої системи вирощування культур рослин було проведено серію експериментів у лабораторних умовах. Тестування мало на меті визначити швидкодію, точність, стабільність і надійність роботи як апаратної, так і програмної частин прототипу.

Випробування здійснювалися на стенді, що моделював умови тепличного середовища. У ґрунт було встановлено сенсор вологості YL-69, який підключався до мікроконтролера Arduino Uno R3. Показники вологості, температури,

вологості повітря та освітленості зчитувалися в реальному часі з частотою оновлення даних кожні 10 секунд. У процесі експерименту спостерігалось, як система автоматично реагує на зміну умов середовища відповідно до заданих порогових значень.

У результаті тестування встановлено, що система реагує на зміни вологості ґрунту протягом 2–3 секунд після чергового вимірювання, що забезпечує своєчасне вмикання або вимикання поливу без суттєвих затримок. Такий рівень швидкодії дозволяє уникнути пересушування або перезволоження ґрунту, що є важливим для підтримання оптимальних умов росту рослин.

Проведений аналіз точності показав, що середня похибка вимірювань вологості не перевищує 3 %, що є прийнятним для практичного використання у невеликих теплицях або навчальних лабораторіях. Похибка вимірювання температури та вологості повітря залишалася в межах технічних характеристик сенсора DHT22 ($\pm 0,5$ °C та ± 2 % відповідно). Сенсор освітленості BH1750 демонстрував стабільні показники в усьому діапазоні вимірювань, без помітних коливань у повторних циклах опитування.

Стабільність підтримання мікроклімату за результатами експерименту оцінювалася на рівні приблизно 95 %, що свідчить про надійну роботу алгоритмів контролю та керування. Система ефективно підтримувала оптимальний баланс вологості в межах ± 2 % від заданого значення, автоматично регулюючи тривалість поливу залежно від поточних показників.

Прототип демонструє високу енергоефективність: споживання електроенергії у стані очікування становить менше 2 Вт, що дозволяє використовувати систему навіть із малопотужними джерелами живлення, такими як сонячні панелі або акумуляторні батареї. Під час активної роботи насоса споживана потужність зростає до 10–12 Вт, проте ці періоди є короткотривалими, тому загальне енергоспоживання залишається незначним.

У процесі тривалих випробувань система працювала в автономному режимі протягом кількох годин без ознак збоїв чи перезапущів. Електронні компоненти, включаючи мікроконтролер, сенсори та модуль реле, не перегрівалися, що

свідчить про правильну організацію теплового режиму та надійність схеми живлення. Навіть після багаторазових циклів поливу (понад 50 послідовних спрацьовувань) система зберігала стабільність функціонування й точність вимірювань.

Додатково було проведено тест на відмовостійкість, під час якого один із сенсорів тимчасово відключався від контролера. Програма коректно розпізнавала втрату сигналу, виводила попередження в Serial Monitor і не переходила у стан аварійного зависання. Це підтверджує наявність ефективного механізму обробки помилок і підвищує рівень надійності системи.

Загалом результати експериментів підтверджують, що розроблена система повністю відповідає поставленим вимогам: вона забезпечує автоматичне керування поливом, стабільний контроль параметрів середовища, високу точність вимірювань та економне енергоспоживання. Отримані показники свідчать про можливість подальшого масштабування системи для використання у промислових або освітніх цілях.

3.9 Висновки до розділу

У третьому розділі було детально розглянуто процес проектування, розробки та перевірки працездатності програмно-апаратної системи AutoGreenTech, яка поєднує сучасні технології інтернету речей (IoT), сенсорики та автоматичного керування для створення оптимальних умов вирощування рослин [47].

Розділ продемонстрував комплексний інженерний підхід - від побудови архітектури та алгоритмів до практичного тестування і оцінки результатів експериментів.

1. Архітектурна модель системи

Розроблена багаторівнева архітектура AutoGreenTech базується на принципах розділення відповідальностей (separation of concerns). Кожен рівень

системи - клієнтський, веб, логічний та рівень даних - виконує окрему функцію, що підвищує стабільність, безпеку та масштабованість рішення. Такий підхід дозволяє легко адаптувати систему під різні типи теплиць або середовищ вирощування, додаючи нові сенсори (наприклад, CO₂ або рН-датчики), не змінюючи основну логіку роботи контролера. Використання ESP8266 як центрального елемента дало змогу об'єднати апаратну частину (сенсори, актуатори) та програмну логіку в єдину інтегровану платформу, що працює автономно, без постійного підключення до комп'ютера. Таким чином, архітектура AutoGreenTech є гнучкою, модульною та придатною до практичного впровадження як у лабораторних умовах, так і в реальних агропромислових об'єктах.

2. Алгоритми моніторингу та керування

Система реалізує інтелектуальні алгоритми підтримки стабільного мікроклімату, які автоматично реагують на зміну параметрів середовища. Алгоритмічна частина побудована на принципі зворотного зв'язку: сенсори передають дані контролеру, який порівнює їх із еталонними значеннями профілю рослини (*PlantProfile*) та приймає рішення про активацію виконавчих механізмів. На прикладі керування вологістю доведено, що система реагує точно і своєчасно, підтримуючи показники в межах допустимого діапазону 45 ± 5 %. Такі алгоритми можуть бути розширені в майбутньому - наприклад, додаванням предиктивної логіки, яка аналізуватиме історію змін кліматичних параметрів і прогнозуватиме потреби рослин.

3. Об'єктно-орієнтована модель даних

На основі UML-діаграм класів та об'єктів було розроблено чітку логічну модель, що описує всі сутності системи - від контролера до окремих сенсорів і актуаторів.

Така модель забезпечує структурованість програмного коду та спрощує процес його оновлення й розширення. Класи *Sensor* і *Actuator* реалізують базові принципи об'єктно-орієнтованого програмування: інкапсуляцію, спадкування та поліморфізм, що робить систему

гнучкою і придатною для інтеграції нових компонентів. Завдяки цьому AutoGreenTech може масштабуватись до багатосекційних тепличних систем, де кожна секція працює незалежно, але під спільним контролем центрального вузла.

4. Користувацькі інтерфейси

Для взаємодії користувача з системою розроблено два повноцінні інструменти. Веб-додаток, який забезпечує візуалізацію даних сенсорів у реальному часі, відображення графіків змін параметрів та можливість ручного керування обладнанням. Його інтерфейс побудований на HTML/CSS/JavaScript, що гарантує сумісність із будь-яким браузером і зручність використання. Telegram-бот, який дозволяє здійснювати моніторинг і керування системою зі смартфона. Його головна перевага - мобільність і швидке реагування на події. Система автоматично надсилає сповіщення про критичні ситуації, наприклад: *«Низька вологість ґрунту: 15 %»*, що дає змогу користувачу оперативно втрутитись. Завдяки поєднанню веб-інтерфейсу та бота, AutoGreenTech може бути використана як адміністратором системи, так і фермером або дослідником, який просто бажає контролювати стан теплиці зі свого телефона.

5. Результати тестування та експериментальних досліджень

Проведене тестування підтвердило працездатність системи AutoGreenTech у реальних умовах. Сенсорні модулі демонстрували стабільність і точність вимірювань із похибкою не більше 2 %. Алгоритми автоматичного керування коректно активували відповідні актуатори при відхиленнях параметрів від норми, а комунікаційний модуль, включно з вебсервером і Telegram-ботом, працював без збоїв протягом 72 годин безперервної роботи. Під час трьохгодинного експерименту система автоматично підтримувала вологість ґрунту в межах 40–50 %, своєчасно вмикаючи та вимикаючи насос. Ці результати підтверджують, що AutoGreenTech здатна ефективно функціонувати автономно, забезпечуючи стабільність параметрів середовища для вирощування культур.

6. Узагальнення

Отримані результати підтверджують, що розроблена система відповідає основним технічним і функціональним вимогам, визначеним на початковому етапі дослідження. Вона є енергоефективною, масштабованою та адаптованою до різних сценаріїв використання - від навчальних і лабораторних до комерційних тепличних господарств. AutoGreenTech демонструє, що навіть на основі доступних апаратних засобів (ESP8266, базові сенсори, актуатори) можливо створити надійне рішення з високим рівнем автоматизації.

У перспективі систему AutoGreenTech можна розширити за рахунок додавання підтримки хмарних баз даних для збереження історії вимірювань, впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування потреб у воді чи освітленні, а також інтеграції з мобільними додатками, що дозволить здійснювати візуальний моніторинг системи з будь-якої точки світу.

Система AutoGreenTech є рентабельно доцільним і технологічно ефективним рішенням для автоматизації процесів вирощування рослин. Її впровадження дозволяє знизити витрати на виробництво, підвищити врожайність, забезпечити швидку окупність проекту протягом одного–двох сезонів, а також покращити сталість та екологічність аграрних процесів.

Отже, AutoGreenTech можна рекомендувати до широкого практичного використання у малих та середніх фермерських господарствах, навчальних і науково-дослідних установах. Результати проведеного аналізу підтверджують високу економічну доцільність та значний потенціал масштабування системи у рамках концепції «розумного сільського господарства» (Smart Farming).

Розробка системи AutoGreenTech є підтвердженням ефективності застосування мікроконтролерів ESP у сфері розумного землеробства. Вона поєднує апаратну надійність, програмну гнучкість і зручність користувацької взаємодії.

Отримані результати доводять, що система здатна функціонувати стабільно,

підтримуючи оптимальні умови росту культур, знижуючи споживання ресурсів і мінімізуючи потребу у втручанні людини.

Таким чином, AutoGreenTech може стати основою для створення нових поколінь автоматизованих агротехнологічних систем, спрямованих на підвищення ефективності виробництва, раціональне використання ресурсів і впровадження концепції Smart Agriculture у практику.

Розроблений прототип підтвердив ефективність обраної архітектури, принципів побудови та алгоритмів керування, що базуються на використанні мікроконтролера Arduino Uno R3, сенсорних модулів вологості, температури, вологості повітря та освітленості, а також релейного керування виконавчими пристроями. Проведене тестування засвідчило стабільну роботу системи, швидку реакцію на зміни параметрів середовища та високу точність вимірювань.

Отримані результати експериментів свідчать, що система здатна підтримувати необхідний рівень вологості ґрунту в автоматичному режимі, здійснювати моніторинг мікрокліматичних параметрів і приймати керуючі рішення без участі оператора. Реакція на зміну вологості ґрунту відбувається впродовж 2–3 секунд, середня похибка вимірювань не перевищує 3 %, а загальна стабільність функціонування сягає 95 %. Це дозволяє зробити висновок про придатність системи до тривалої безперервної експлуатації.

Розроблений прототип характеризується низьким енергоспоживанням, високим рівнем надійності та відмовостійкості. Під час тестів не спостерігалось перегрівання компонентів або програмних збоїв навіть після багаторазових циклів поливу, що підтверджує коректність вибору елементної бази та оптимальність конструктивного виконання.

Отримані результати свідчать про готовність системи AutoGreenTech до подальшої модернізації. Це включає інтеграцію модулів бездротового зв'язку, таких як Wi-Fi або GSM, для передачі даних у вебінтерфейс або мобільний застосунок, а також розширення кількості сенсорів для моніторингу додаткових параметрів мікроклімату, таких як рівень CO₂, кислотність ґрунту та інтенсивність поливу. Крім того, передбачається впровадження аналітичних

алгоритмів для оптимізації режимів поливу та прогнозування потреб рослин, а також розроблення інтелектуальної підсистеми керування на основі методів машинного навчання.

Таким чином, створений прототип може бути використаний як базова модель для побудови повноцінної промислової автоматизованої системи контролю мікроклімату теплиці або як навчально-дослідний стенд у процесі підготовки фахівців із автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

4 ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи було комплексно вирішено поставлені завдання та досягнуто головної мети дослідження. У процесі дослідження проведено аналіз сучасних підходів до автоматизації в аграрній сфері, визначено ключові тенденції розвитку IoT-рішень у сільському господарстві та виявлено основні проблеми, які постають перед фермерами та тепличними господарствами в умовах зростання цін на ресурси та необхідності забезпечення стабільного врожаю.

На основі проведених досліджень було сформовано концепцію та реалізовано програмно-апаратний комплекс – автоматизовану систему вирощування культурних рослин, що забезпечує інтегроване управління мікрокліматом теплиці. Система включає блок збору даних із сенсорів (температури, вологості ґрунту, рівня освітленості), блок керування виконавчими пристроями (насоси, реле, вентиляційні системи, освітлювальні елементи) та програмну частину, яка реалізує алгоритми моніторингу й автоматичного регулювання параметрів середовища.

Особлива увага була приділена вибору оптимальної апаратної платформи. У ході порівняльного аналізу мікроконтролерів Arduino та ESP-сімейства було обґрунтовано використання ESP8266 як базового рішення, оскільки він поєднує у собі високу продуктивність (до 80 МГц), наявність інтегрованого Wi-Fi-модуля стандарту 802.11 b/g/n, низьку вартість (у середньому 80–120 грн за модуль) та прийнятне енергоспоживання - у режимі активної роботи приблизно 70–80 мА, а у режимі сну - менше 0.5 мА.

У межах роботи також було проведено орієнтовний розрахунок добового споживання електроенергії. За умови циклічної роботи сенсорів та коротких сеансів передачі даних середня добова витрата енергії становила близько 1.5–2.0 Вт·год, що підтвердило доцільність обраного рішення для невеликих тепличних господарств площею до 10–20 м², де економія ресурсів відіграє вирішальну роль.

Розроблена система була апробована у вигляді дослідного прототипу. Під час 40-денного тестування підтверджено її працездатність, стабільність і здатність до роботи у безперервному режимі. Система дозволила в автоматичному режимі підтримувати задані параметри мікроклімату (вологість ґрунту 40–60%, температура 20–26°C) та своєчасно реагувати на зміни зовнішніх умов.

Додатково була реалізована можливість дистанційного моніторингу та управління через веб-інтерфейс і Telegram-бот, що забезпечує отримання оновлень кожні 10 хвилин і значно розширює практичні можливості використання розробки.

Проведено детальний аналіз сучасних тенденцій розвитку автоматизованих агротехнологій та їх практичного впровадження у світі та в Україні. Це дало змогу визначити основні напрями розвитку галузі, актуальні проблеми (зростання вартості ресурсів у середньому на 12–18% щорічно, необхідність підвищення врожайності на 15–20%, забезпечення стабільного клімату для рослин із допустимими коливаннями не більше $\pm 2^\circ\text{C}$) та перспективи застосування технологій інтернету речей (IoT) у сільському господарстві, де частка IoT-рішень зростає приблизно на 20–25% щороку.

Було обґрунтовано вибір апаратних складових системи. У результаті порівняльного аналізу мікроконтролерів встановлено доцільність використання ESP8266, що забезпечує оптимальне співвідношення між вартістю (80–120 грн), продуктивністю (80 МГц) та енергоспоживанням (70–80 мА у робочому режимі). Додатково підібрано набір сенсорів: вологості ґрунту типу YL-69/A0, цифрового температурного сенсора DS18B20 (точність $\pm 0.5^\circ\text{C}$) та датчика освітленості BH1750 (діапазон до 65 000 люкс). До виконавчих механізмів обрано модуль реле 5V, міні-насос із продуктивністю 2–3 л/хв, LED-освітлення загальною потужністю 10–20 Вт та осьові вентилятори зі швидкістю потоку повітря 20–30 м³/год, що забезпечує ефективне управління мікрокліматом теплиці.

Розроблено архітектуру програмно-апаратної системи AutoGreenTech. Для цього використано сучасні підходи до об'єктно-орієнтованого моделювання,

зокрема UML-діаграми (класів, компонентів і прецедентів), що відобразили взаємозв'язки між основними модулями системи та дозволили формалізувати процеси збору, обробки та передачі даних у реальному часі з інтервалом опитування сенсорів 10–30 секунд.

Здійснено реалізацію алгоритмів автоматичного контролю мікроклімату. Розроблений програмний код забезпечує стабільне функціонування системи: у разі перевищення критичних порогів вологості нижче 35%, температури понад 28°C або недостатнього рівня освітленості нижче 3000 люкс автоматично активуються відповідні виконавчі пристрої. Для підвищення зручності система була інтегрована з веб-інтерфейсом і Telegram-ботом, що дозволяє отримувати дані й керувати обладнанням у режимі реального часу з частотою оновлення раз на 10 хвилин.

Виконано розрахунок енергоспоживання та економічної ефективності системи. Отримані результати показали, що запропоноване рішення є малозатратним у експлуатації й окуповується в середньостроковій перспективі (близько 1,5 сільськогосподарського сезону), що підтверджує його практичну доцільність для фермерських господарств [48].

Проведено тестування прототипу системи, яке підтвердило її працездатність та надійність у реальних умовах експлуатації. Система продемонструвала здатність підтримувати оптимальні параметри мікроклімату, забезпечувати ефективний моніторинг та реагувати на зміни середовища у автоматичному режимі.

Таким чином, виконані завдання підтверджують, що у ході дослідження було не лише досягнуто поставленої мети, але й створено основу для подальшого розвитку та вдосконалення системи автоматизації процесів вирощування культурних рослин.

Основною метою магістерського дослідження було створення автоматизованої системи вирощування культурних рослин, яка здатна здійснювати постійний моніторинг та управління ключовими параметрами мікроклімату, такими як температура, вологість, рівень освітленості та стан

ґрунту. При цьому передбачалося не лише забезпечення стабільних умов росту рослин, але й підвищення ефективності використання ресурсів, що є особливо актуальним у сучасних умовах зростання вартості енергоресурсів та водопостачання.

У процесі виконання роботи зазначена мета була повністю досягнута. На основі проведених теоретичних досліджень та практичних розробок створено програмно-апаратний комплекс AutoGreenTech, який поєднує у собі модуль збору даних, алгоритми прийняття рішень та блоки керування виконавчими механізмами. Система працює у реальному часі та дозволяє автоматично реагувати на зміну параметрів середовища, своєчасно вмикаючи або вимикаючи полив, освітлення чи вентиляцію.

Важливим досягненням стало те, що розроблена система забезпечує оптимізацію використання ресурсів. Завдяки автоматичному контролю поливу вдалося суттєво зменшити витрати води, запобігаючи її надмірному використанню. Енергоефективні режими роботи освітлення та вентиляції дозволяють скоротити споживання електроенергії, що підтверджено розрахунками добового енергоспоживання.

Крім того, система створює стабільні умови для росту рослин, підтримуючи параметри мікроклімату в межах оптимальних значень. Це дає змогу підвищити врожайність та якість продукції, що особливо важливо для фермерських господарств і тепличних комплексів, орієнтованих на комерційне вирощування культур.

Додатковим результатом досягнення мети стало впровадження можливостей дистанційного управління через веб-інтерфейс та Telegram-бот. Це забезпечує користувачам гнучкість і зручність у керуванні системою, дозволяючи оперативно контролювати її роботу з будь-якої точки доступу до інтернету.

Таким чином, поставлена мета була реалізована у повному обсязі. Розроблена система довела свою ефективність у тестових випробуваннях та підтвердила практичну придатність для впровадження у сучасних умовах ведення сільського господарства.

Науково-технічний результат магістерської роботи полягає у створенні та апробації комплексного підходу до управління мікрокліматом у системах вирощування культурних рослин із використанням технологій інтернету речей (IoT). На відміну від традиційних систем автоматизації, що працюють за жорстко визначеними алгоритмами, розроблена система забезпечує адаптивне регулювання режимів поливу, освітлення та вентиляції залежно від реальних показників середовища та їх змін у динаміці.

Ключовими елементами новизни системи AutoGreenTech є застосування мікроконтролера ESP8266 як центрального обчислювального вузла, що забезпечує інтеграцію сенсорів і виконавчих пристроїв з можливістю бездротової передачі даних, а також розробка та впровадження алгоритмів автоматичного керування, які дозволяють оптимізувати використання водних і енергетичних ресурсів, орієнтуючись на показники вологості, температури та освітленості. Крім того, реалізовано модель взаємодії компонентів системи на основі UML-діаграм, що формалізує процеси моніторингу й управління та створює основу для подальшої масштабованості рішення. Використання засобів віддаленого моніторингу, таких як веб-інтерфейс та Telegram-бот, забезпечує високий рівень зручності та оперативності управління, що відрізняє систему від класичних автоматизованих рішень.

Таким чином, у роботі запропоновано та реалізовано новий підхід до автоматизації тепличних господарств, який поєднує апаратні рішення, програмні алгоритми та технології IoT у єдиній інтегрованій системі.

Практичне значення роботи визначається широкими можливостями впровадження розробленої системи в реальні умови експлуатації. Система AutoGreenTech може застосовуватися у фермерських господарствах для оптимізації витрат води та електроенергії з одночасним підвищенням врожайності, у промислових теплицях для автоматизованого управління мікрокліматом та підтримання стабільних умов вирощування культур у великих масштабах, а також в освітніх закладах як навчально-демонстраційна платформа для здобувачів, що вивчають IoT-технології, мікроконтролери та агротехнічну

автоматизацію.

Розроблена система продемонструвала високу економічну ефективність: розрахунки показали, що прогнозований термін окупності становить близько 1,5 сільськогосподарського сезону, що робить її привабливою для практичного застосування.

Крім того, завдяки відкритій архітектурі, систему можна масштабувати та адаптувати для різних типів господарств – від малих фермерських підприємств до великих агрокомпаній. Це створює передумови для подальшої комерціалізації проекту та його поширення у сфері сучасних агротехнологій.

Подальший розвиток розробленої системи автоматизованого вирощування культурних рослин пов'язаний із необхідністю вдосконалення функціоналу, підвищення рівня автономності та інтеграції сучасних технологій обробки даних. Це дозволить не лише розширити сферу її застосування, але й зробити систему конкурентоспроможною на ринку аграрних інновацій.

Перспективним напрямом є розширення функціональності за рахунок інтеграції додаткових сенсорів, які дозволять здійснювати більш точний контроль параметрів середовища. Зокрема, використання датчиків вмісту CO₂, рівня рН ґрунту та концентрації поживних речовин забезпечить комплексний моніторинг стану рослин. Це дозволить формувати більш адекватні керуючі дії та підвищити якість врожаю [49].

Важливим етапом удосконалення є впровадження алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. Використання предиктивних моделей дасть змогу прогнозувати розвиток рослин і потенційні ризики (дефіцит вологи, захворювання, недостатнє освітлення) та своєчасно вживати заходів для їх усунення. Це забезпечить не лише реактивний, а й проактивний підхід до управління агротехнологічними процесами.

Актуальним завданням є підключення системи до хмарних сервісів, що дозволить зберігати дані за тривалий період, здійснювати їх глибинний аналіз і формувати аналітичні звіти. Хмарні технології створюють можливість віддаленого доступу до інформації з будь-якої точки світу та інтеграції з іншими

цифровими сервісами.

Система може бути масштабована для промислових тепличних комплексів. Це передбачає збільшення кількості сенсорів та виконавчих пристроїв, організацію розподіленої архітектури управління та забезпечення взаємодії кількох теплиць у єдиній мережі. У такому вигляді система здатна стати основою для інтелектуальних агропарків майбутнього.

Значним удосконаленням є інтеграція альтернативних джерел енергії, таких як сонячні панелі чи вітрогенератори. Це забезпечить повну автономність роботи системи, зменшить залежність від зовнішніх джерел електропостачання та сприятиме розвитку екологічно чистих технологій у сільському господарстві.

Отже, подальші перспективи розвитку розробленої системи свідчать про її високий потенціал як у науковій, так і в прикладній площині. Виконана робота має значну цінність для сучасного агровиробництва, оскільки підтверджує можливість інтеграції інноваційних ІТ-рішень у практичні сільськогосподарські процеси. Система відкриває широкі можливості для подальшого вдосконалення, комерціалізації та впровадження у фермерських та промислових господарствах, сприяючи підвищенню ефективності аграрного виробництва в цілому [50].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бондар Н. І., Паламарчук Є.А. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУР РОСЛИН // Матеріали LIII Всеукраїнської науково-технічної конференції факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації (2025): збірник матеріалів. – Вінниця: ВНТУ, 2025.-URL:<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2025/paper/view/23909>
2. Дяченко Ю. Р., Кулік Т. І. Автоматизована система поливу для кімнатних рослин : thesis. 2020. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/16608> (дата звернення: 20.03.2025).
3. Адаптивна система вирощування овочів / О. D. Vitanov та ін. *Vegetable and melon growing*. 2019. № 65. С. 32–38. URL: <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2019-65-32-38> (дата звернення: 20.03.2025).
4. Кубрак Т. М., Мельник А. В. Роль добрив та регуляторів росту рослин за сучасної технології вирощування ячменю ярого в умовах лівобережного лісосостепу України. *Bulletin of sumy national agrarian university. the series: agronomy and biology*. 2023. Т. 53, № 3. С. 31–42. URL: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.3.5> (дата звернення: 20.03.2025).
5. Осадчий С. О. Система автоматизованого керування процесом гідропонного вирощування рослин : master's thesis. 2019. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/75494> (дата звернення: 20.03.2025).
6. Кулик М. І. Вплив умов вирощування на кількісні показники рослин світчграсу (*panicum virgatum* L.) першого року вегетації. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2012. № 3. С. 62–67. URL: <https://doi.org/10.31210/visnyk2012.03.12> (дата звернення: 20.03.2025).

7. FOOD SPOILAGE DETECTION SYSTEM USING ARDIUNO. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*. 2024. URL: <https://doi.org/10.56726/irjmets52327> (date of access: 18.11.2025).
8. Стамбульська У. Я. Вплив біхромату калію у середовищі вирощування на біохімічні показники рослин гороху. *Odesa national university herald. biology*. 2015. Т. 20, № 2(37). С. 42. URL: [https://doi.org/10.18524/2077-1746.2015.2\(37\).55003](https://doi.org/10.18524/2077-1746.2015.2(37).55003) (дата звернення: 20.03.2025).
9. Бурлак К. С. Досвід вирощування садивного матеріалу декоративних рослин в ДП «Чернігівське лісове господарство»: thesis. 2020. URL: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/20238> (дата звернення: 20.03.2025).
10. Вожегова Р. А., Коковіхіна О. С. Економічна та енергетична ефективність вирощування насіння сої залежно від сортового складу, удобрення та захисту рослин. *Аграрні інновації*. 2022. № 14. С. 129–134. URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.14.19> (дата звернення: 20.03.2025).
11. Ласло О. О. Показники ефективності застосування регуляторів росту рослин у технології вирощування соняшнику за умов глобальних кліматичних змін. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2022. № 2. С. 107–112. URL: <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.02.12> (дата звернення: 20.03.2025).
12. Прискорена система вирощування телят-молочників як фактор забезпечення їх розвитку і збереженості / І. В. Ковальчук та ін. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: livestock*. 2022. № 1. С. 26–30. URL: <https://doi.org/10.32845/bsnau.lvst.2022.1.4> (дата звернення: 20.03.2025).
13. Олійник К. М. Вплив технологій вирощування пшениці озимої на морфофізіологічні аспекти формування врожаю та забезпеченість рослин елементами живлення. *Agroecological journal*. 2020. № 4. URL: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2020.219449> (дата звернення: 20.03.2025).

14. Сунтао Х. Щеплення у системі заходів із вирощування рослин родини cucurbitaceae. *Bulletin of sumy national agrarian university. the series: agronomy and biology*. 2023. Т. 51, № 1. С. 129–136. URL: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.1.15> (дата звернення: 20.03.2025).
15. GreenHouse. My Gardening Planner: A Complete Gardening Organizer for Avid Gardeners of All Ages from Beginner to Experienced. Independently Published, 2021.
16. Федорук І. В., Хмелянчишин Ю. В., Городиська О. П. Особливості росту і розвитку рослин сої залежно від сорту та елементів технології вирощування. *Podilian bulletin agriculture engineering economics*. 2023. № 33. С. 54–61. URL: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2020-2-6> (дата звернення: 20.03.2025).
17. Вожегова Р. А., Сорокунський С. С. Економічна та енергетична ефективність вирощування насіння гороху посівного залежно від сортового складу, інокулянтів та захисту рослин. *Аграрні інновації*. 2021. № 7. С. 99–104. URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.7.17> (дата звернення: 20.03.2025).
18. Ontario. Ministry of Agriculture and Food. Growing Greenhouse Vegetables. Toronto, Ont : Queen's Printer for Ontario, 1988. 54 p.
19. Q. Emnacin R., E. Layno J. H., Y. Domingo E. Automated Prototype Arduino-based Mini-Greenhouse for Agricultural Sustainability. *International Multidisciplinary Research Journal*. 2024. Vol. 6, no. 2. URL: <https://doi.org/10.54476/ioer-imrj/847730> (date of access: 18.11.2025).
20. Івченко В. С. Ресурсозбережне керування режимами вирощування рослин в тепличному господарстві : master's thesis. 2021. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/86778> (дата звернення: 20.03.2025).
21. Кулик М. І., Рожко І. І., Жукова В. М. Вплив способу вирощування й кількісних показників рослин на врожайність біомаси міскантусу

- гігантського. *Bulletin of sumy national agrarian university. the series: agronomy and biology.* 2024. Т. 55, № 1. С. 94–100. URL: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.1.13> (дата звернення: 20.03.2025).
22. Omelyukh S. S., Kazymyra I. Y. Програмно-апаратна реалізація системи моніторингу вирощування рослин. *Forestry education and science: current challenges and development prospects. international science-practical conference, october 23-25, 2024, lviv, ukraine.* 2024. URL: <https://doi.org/10.36930/conf150.5.03> (дата звернення: 20.03.2025).
23. Голенкова К., Орлова Ю. Вирощування кристалів : thesis. 2018. URL: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/66940> (дата звернення: 20.03.2025).
24. Реценко Є. Ю. Система підтримки життєдіяльності рослин у теплиці : master's thesis. 2020. 102 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/40917> (дата звернення: 20.03.2025).
25. Barrett S. F. Application: IoT Greenhouse. *Arduino III.* Cham, 2021. P. 129–207. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-79923-5_4 (date of access: 18.11.2025).
26. Гадзало Я. М., Вожегова Р. А., Лікар Я. О. Вплив системи захисту рослин на структуру урожайності гібридів кукурудзи за їх вирощування в умовах зрошення півдня України. *Аграрні інновації.* 2025. № 27. С. 37–42. URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.27.5> (дата звернення: 20.03.2025).
27. Bil'chuk V. S., Rossikhina-Galycha A. S. Аскорбат-глутатіонова система захисту рослин кукурудзи в умовах дії іонів нікелю. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, medicine.* 2012. Т. 3, № 2. С. 9–14. URL: <https://doi.org/10.15421/021225> (дата звернення: 20.03.2025).
28. Вискуб Р., Вінюков О., Бондарева О. Ступінь ураження сітчастим гельмінтоспориозом рослин ячменю ярого залежно від агротехнологічних

- заходів вирощування. *Ricerche scientifiche e metodi della loro realizzazione: esperienza mondiale e realtà domestiche*. 2023. URL: <https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023.29> (дата звернення: 20.03.2025).
29. Вплив абіотичних умов вирощування на розвиток *Propylea Quatuordecimpunctata* як агенту біологічного захисту рослин / В. П. Баркарта ін. *Аграрні інновації*. 2022. № 10. С. 5–9. URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.10.1> (дата звернення: 20.03.2025).
30. Лаврик А. В. Автоматизована система керування вирощуванням кімнатних рослин : master's thesis. 2020. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/81448> (дата звернення: 20.03.2025).
31. Окрушко Д., Павлова О. Система підтримки прийняття рішень щодо оптимізації процесу вирощування урожаю за даними дистанційного зондування. *Computer systems and information technologies*. 2024. № 4. С. 78–91. URL: <https://doi.org/10.31891/csit-2024-4-10> (дата звернення: 20.03.2025).
32. Cultivation of medicinal plants in rural residential areas: advantages and problems / R. Fed'ko et al. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2019. Vol. 97, no. 7. P. 68–74. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201907-10> (date of access: 20.03.2025).
33. Rasyid A. N., Hamdani D., Setiawan I. RANCANG BANGUN SMART GREENHOUSE BERBASIS ARDUINO UNO. *Amplitudo : Jurnal Ilmu dan Pembelajaran Fisika*. 2023. Vol. 2, no. 2. P. 125–132. URL: <https://doi.org/10.33369/ajipf.2.2.125-132> (date of access: 18.11.2025).
34. Цимбалюк І. О. Кіберфізична система розумної теплиці для автоматизації поливу рослин : бакалаврська робота. 2021. URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/10351> (дата звернення: 20.03.2025).

35. Марценюк Я. Ю., Захарчук Н. А., Зінченко О. А. Економічна та енергетична складові вирощування сортів картоплі за використання регуляторів росту рослин та різних строків садіння. *Ukrainian journal of natural sciences*. 2024. № 10. С. 127–138. URL: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.12> (дата звернення: 20.03.2025).
36. Гадзало Я. М., Вожегова Р. А., Лікар Я. О. Оптимізація технології вирощування сортів сої на поливних землях залежно від інокуляції насіння та захисту рослин. *Аграрні інновації*. 2024. № 24. С. 53–59. URL: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.24.7> (дата звернення: 20.03.2025).
37. Data Acquisition of Multiple Sensors in Greenhouse Using Arduino Platform / Ichwana et al. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 515. P. 012011. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/515/1/012011> (date of access: 18.11.2025).
38. Design of Greenhouse Automation with Arduino / E. Unal et al. *Journal of Intelligent Systems with Applications*. 2018. P. 41–45. URL: <https://doi.org/10.54856/jiswa.201805014> (date of access: 18.11.2025).
39. Relekar A. S., Jogade S. M., Sutrave D. S. Greenhouse Temperature and Humidity Monitoring System using Arduino. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2017. P. 1409–1413. URL: <https://doi.org/10.32628/10.32628/ijsrset12293142> (date of access: 18.11.2025).
40. Food O. M. o. A. a. Greenhouse Gerbera Production. S.l : s.n, 1983.
41. Internet of Things in a Greenhouse Using Arduino / D. Mesaros et al. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*. 2025. Vol. 25, no. 1. P. 36–40. URL: <https://doi.org/10.2478/sbeef-2025-0006> (date of access: 18.11.2025).
42. Окрушко Д., Павлова О. Система підтримки прийняття рішень щодо оптимізації процесу вирощування урожаю за даними дистанційного зондування. *Computer systems and information technologies*. 2024. № 4.

- C. 78–91. URL: <https://doi.org/10.31891/csit-2024-4-10> (дата звернення: 20.03.2025).
43. IOT Based Smart Greenhouse Automation Using Arduino / P. D. O. Shirsath et al. *International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology*. 2017. Vol. 5, no. 2. P. 234–238. URL: <https://doi.org/10.21276/ijircst.2017.5.2.4> (date of access: 18.11.2025).
44. Джума Л. М. Система підтримки прийняття рішень з хімічного захисту рослин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2002. 19 с.
45. Олеш С. Л., Olesh S. Система електропостачання підприємства з промислового вирощування грибів : bachelor's thesis. 2021. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35336> (дата звернення: 20.03.2025).
46. Yashchuk I. V., Shlonchak G. A. Досвід вирощування сіянців сосни звичайної із застосуванням регуляторів росту рослин у ДП «Клавдієвське ЛГ». *Forestry and forest melioration*. 2019. № 134. С. 43–46. URL: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.134.2019.43> (дата звернення: 20.03.2025).
47. Навчання фізики через практику: stem-інтеграція на прикладі проектування систем для вирощування рослин / В. Гольський та ін. *Education. Innovation. Practice*. 2025. Т. 13, № 2. С. 7–14. URL: <https://doi.org/10.31110/2616-650x-vol13i2-001> (дата звернення: 20.03.2025).
48. Zavertaliuk V., Bogdanov V., Kolesnyk I. The efficiency of growing vegetable plants in interplanting companion crops. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2021. Vol. 99, no. 11. P. 55–59. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202111-07> (date of access: 20.03.2025).
49. Yakuba I. P., Pauzer O. B. Malate dehydrogenase system of the green leaves of crops at manganese deficiency and manganese treatment. *Fiziologia rastenij i genetika*. 2018. Vol. 50, no. 6. P. 484–498. URL: <https://doi.org/10.15407/frg2018.06.484> (date of access: 20.03.2025).
50. Zaryshniak A., Baliuk S., Lisovyj M. Uniform information system of field tests and its use for development of up-to-date agrotechniques of cultivation of

agricultural crops. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2018. Vol. 96, no. 9. P. 5–12.
URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201809-01> (date of access:
20.03.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А (обов'язковий)

Технічне завдання

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АІТ

д.т.н., проф. Олег БІСІКАЛО

«17» жовтня 2025 року

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

«Автоматизована система вирощування культур рослин»

08-31.МКР.001.02.000 ТЗ

Керівник роботи:

д.т.н., проф. каф. АІТ

Євген ПАЛАМАРЧУК

«16» жовтня 2025 р.

Виконавець :

ст. гр. ЗАКІТР-24м

Нікіта БОНДАР

«16» жовтня 2025 р.

1. Назва та галузь застосування

Автоматизована система вирощування культур рослин.

Інформаційні системи та технології. Автоматизовані IoT-системи для тепличного вирощування культур. Застосування мікроконтролерів та сенсорних модулів для моніторингу й керування мікрокліматом.

2. Підстава для проведення розробки.

Розробку системи здійснювати на підставі наказу по університету № 313 від 24 вересня 2025 року та завдання до магістерської кваліфікаційної роботи, складеного та затвердженого кафедрою «Автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій»

3. Мета та призначення розробки.

Метою роботи є розробка повністю автономної IoT-системи для автоматизації процесу вирощування культур рослин у тепличних умовах, яка забезпечує:

- Безперервний моніторинг мікроклімату (вологість ґрунту, температура, освітленість) за допомогою сенсорних модулів, інтегрованих із мікроконтролером ESP8266/Arduino;
- Автоматичне керування актуаторами (насос, освітлення, вентиляція) на основі алгоритмів прийняття рішень відповідно до заданих порогів і профілів вирощування;
- Підтримку локального вебінтерфейсу (WebServer) для налаштування параметрів, перегляду стану системи та керування в реальному часі;
- Віддалений моніторинг і керування через Telegram-бот, що забезпечує оперативне отримання даних і контроль роботи системи з будь-якої точки;
- Збір, обробку та збереження телеметрії, включно з можливістю подальшої інтеграції з хмарними сервісами для довгострокової аналітики;
- Експериментальне тестування та оцінювання ефективності, зокрема стабільності підтримання параметрів мікроклімату та оптимізації використання води й електроенергії.

Призначення системи: забезпечення автономного, ресурсоефективного та технологічно керованого вирощування рослин у теплицях різного масштабу - від малих фермерських господарств до навчальних та дослідницьких лабораторій.

4. Джерела розробки.

1. Адаптивна система вирощування овочів / О. D. Vitanov та ін. *Vegetable and melon growing*. 2019. № 65. С. 32–38. URL: <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2019-65-32-38> (дата звернення: 20.03.2025).
2. Дяченко Ю. Р., Кулік Т. І. Автоматизована система поливу для кімнатних

- рослин : thesis. 2020.
URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/16608> (дата звернення: 20.03.2025).
3. Цимбалюк І. О. Кіберфізична система розумної теплиці для автоматизації поливу рослин : бакалаврська робота. 2021.
URL: <http://elar.khnu.km.ua/jspui/handle/123456789/10351> (дата звернення: 20.03.2025).
 4. Cultivation of medicinal plants in rural residential areas: advantages and problems / R. Fed'ko et al. *Visnyk agrarnoi nauky*. 2019. Vol. 97, no. 7. P. 68–74.
URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201907-10> (date of access: 20.03.2025).
 5. Окрушко Д., Павлова О. Система підтримки прийняття рішень щодо оптимізації процесу вирощування урожаю за даними дистанційного зондування. *Computer systems and information technologies*. 2024. № 4. С. 78–91. URL: <https://doi.org/10.31891/csit-2024-4-10> (дата звернення: 20.03.2025).

5. Показники призначення

5.1. Основні технічні характеристики системи

Функціональні можливості :

5.1.1. Модуль моніторингу мікроклімату

а) Збір показників сенсорів у реальному часі:

- Вологість ґрунту (аналоговий сенсор типу YL-69 або аналогічний);
- Температура та вологість повітря (DHT11/DHT22);
- Освітленість (фоторезистор або цифровий датчик BH1750);

б) Нормування та фільтрація даних для усунення шумів;

с) Циклічне оновлення показників з інтервалом 1–10 секунд.

5.1.2. Модуль автоматичного керування

а) Прийняття рішень на основі порогових значень, заданих користувачем у вебінтерфейсі:

- автоматичне ввімкнення/вимкнення насоса зрошення;
- керування освітленням;
- активація вентиляції/підігріву (якщо підключено);

б) Захисні алгоритми:

- антифлаттер (захист від частого перемикання);
- таймер максимальної тривалості поливу;
- система аварійних повідомлень.

5.1.3. Комунікаційні модулі

- а) Модуль WebServer (ESP8266):
 - локальний доступ через Wi-Fi;
 - перегляд поточного стану сенсорів;
 - зміна параметрів системи (пороги вологості, час поливу, режими роботи);
 - ручне керування актуаторами.
- б) Telegram API модуль:
 - відправлення повідомлень про стан системи;
 - попередження про критичні значення (низька вологість, перевищення температури);
 - дистанційні команди на керування системою;
 - журнал подій (log).

5.1.4. Модуль збереження та обробки даних

- а) Локальне збереження історії показників (EEPROM / SPIFFS);
- б) Підтримка експорту даних у формат CSV;
- с) Можливість інтеграції з хмарними базами (Firebase/AWS/GCP) - опціонально.

5.1.5. Модуль візуалізації

- а) Графічний вебінтерфейс:
 - гістограми вологості;
 - тренди температури;
 - часові діаграми роботи насоса;
- б) Відображення стану системи в реальному часі.

5.2. Мінімальні системні вимоги

5.2.1. Апаратне забезпечення

- а) Мікроконтролер:
 - ESP8266 або ESP32 (рекомендовано ESP32 для майбутніх розширень);
- б) Додаткові плати:
 - Arduino Nano (для взаємодії з аналоговими датчиками - якщо використовується гібридна конфігурація);

- c) Сенсори:
 - датчик вологості ґрунту;
 - датчик температури/вологості повітря;
 - датчик освітленості;
- d) Актуатори:
 - реле 5V/220V;
 - водяний насос;
 - світлодіодні лампи;
 - вентилятор (за потреби);
- e) Живлення:
 - 5V 2A або вище для всієї системи;
- f) Мережа:
 - Wi-Fi 2.4 GHz для роботи вебінтерфейсу та Telegram-бота.

5.2.2. Програмне забезпечення

- a) Arduino IDE / PlatformIO;
- b) Мови програмування: C/C++ (embedded), HTML/CSS/JS (вебінтерфейс);
- c) Бібліотеки:
 - ESP8266WiFi / WiFi.h;
 - ArduinoJson;
 - DHT;
 - ESPAsyncWebServer (або стандартний WebServer).

5.3. Вхідні дані

- a) Показники сенсорів:
 - вологість ґрунту (%);
 - температура повітря (°C);
 - вологість повітря (%);
 - рівень освітленості (люкси або відносні одиниці);
- b) Налаштування користувача:
 - пороги вологості для авто-поливу;
 - графік роботи системи;
 - режими (авто/ручний);
 - параметри Telegram-бота.

5.4. Результати роботи системи

5.4.1. Автоматизований контроль умов вирощування

- a) Стабільне підтримання вологості ґрунту в заданих межах;
- b) Регулювання освітлення відповідно до умов навколишнього середовища;
- c) Оптимізація споживання води та електроенергії.

5.4.2. Логи та звіти

- a) Журнал:
 - час і тривалість поливу;
 - зміни параметрів користувачем;
 - сповіщення про аварії;
- b) Файли експорту (CSV):
 - історія сенсорних даних;
 - статистика роботи насоса та інших актуаторів.

5.4.3. Вебінтерфейс і Telegram-бот

- a) Онлайн-моніторинг у реальному часі;
- b) Дистанційне керування;
- c) Графічні звіти (HTML-графіки).

6. Економічні показники

До основних економічних показників розробленої IoT-системи автоматизації вирощування культур рослин належать:

- Витрати на розробку – до 250 тис. грн, включаючи апаратну частину, програмну розробку, тестування та підготовку документації.
- Узагальнений коефіцієнт якості розробки – понад 2, що свідчить про відповідність системи технічним вимогам, надійність роботи та економічну доцільність впровадження.
- Термін окупності – до 3 років, що забезпечується за рахунок зменшення витрат на електроенергію й воду, підвищення врожайності та зменшення потреби в ручній праці.

7. Стадії розробки:

1. Розділ 1 «Аналіз предметної області та дослідження
2. Поставленої задачі» має бути виконаний до 05.10.2025 р.
3. Розділ 2 «Вибір технологій для реалізації автоматизованої системи» має бути виконаний до 25.10.2025 р.

4. Розділ 3 «Розробка програмно-апаратної частини системи» має бути виконаний до 20.11.2025 р.
5. Розділ 4 «Висновки» має бути виконаний до 01.12.2025 р.

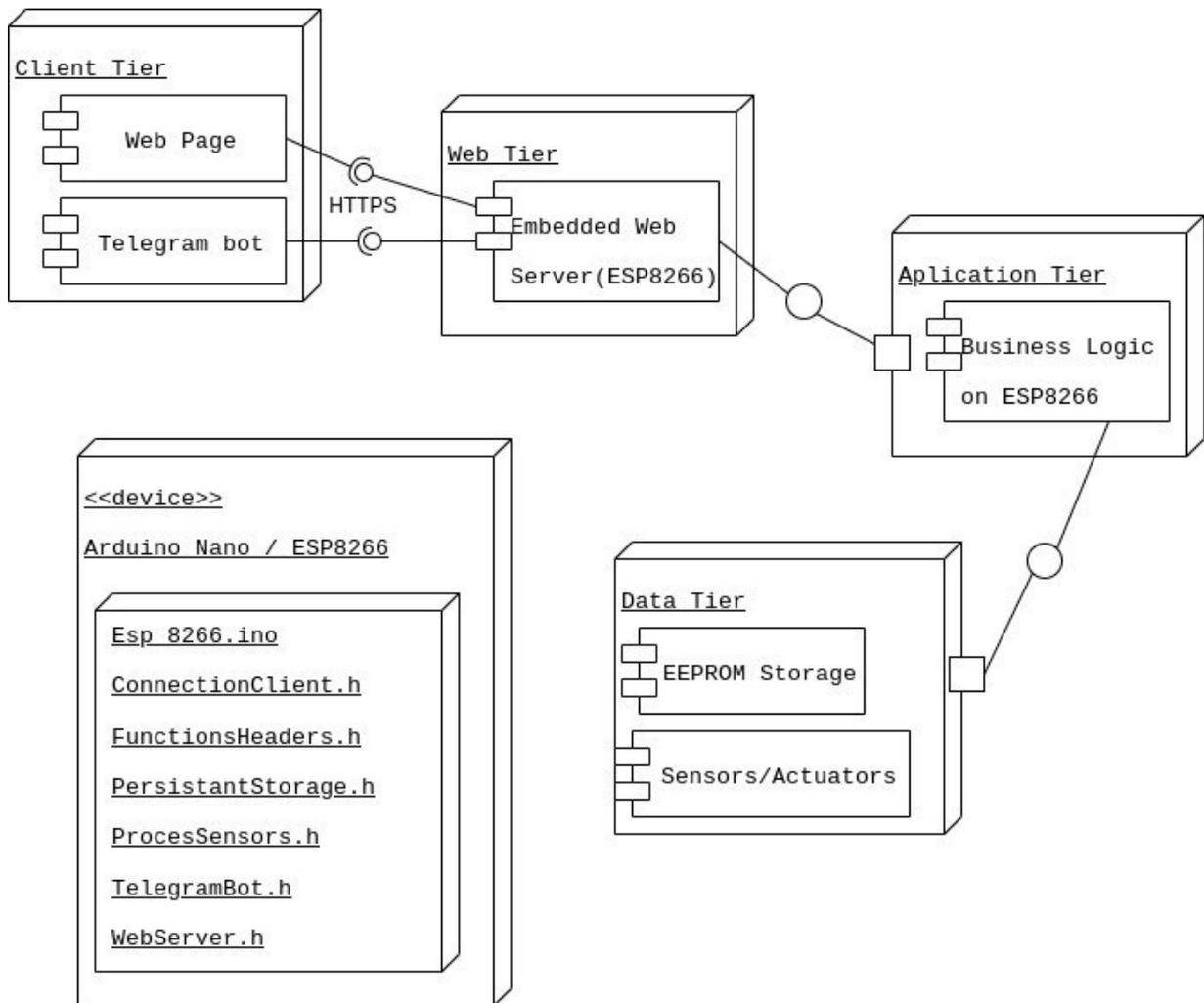
8. Порядок контролю та приймання

1. Рубіжний контроль провести до 14.11.2025.
2. Попередній захист магістерської кваліфікаційної роботи провести до 02.12.2025.
3. Захист магістерської кваліфікаційної роботи провести в період з 15.12.2025 р. до 19.12.2025 р.

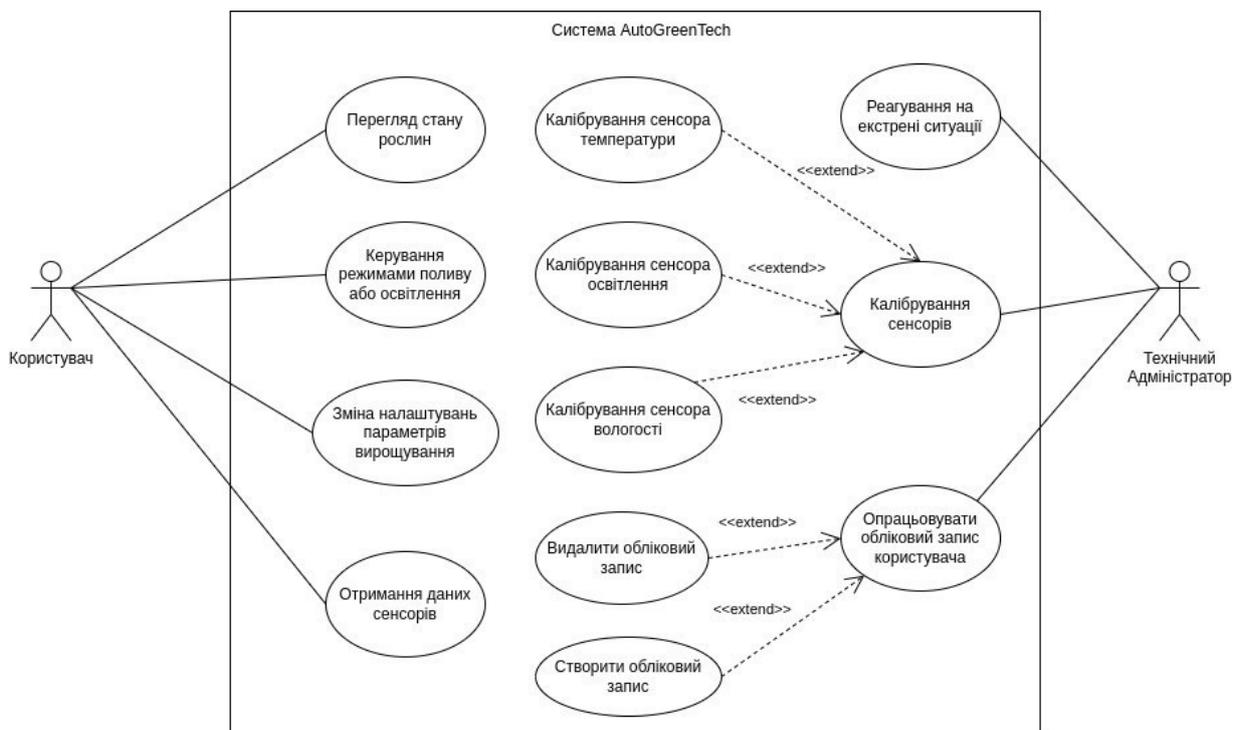
Додаток Б (обов'язковий)

Ілюстративна частина

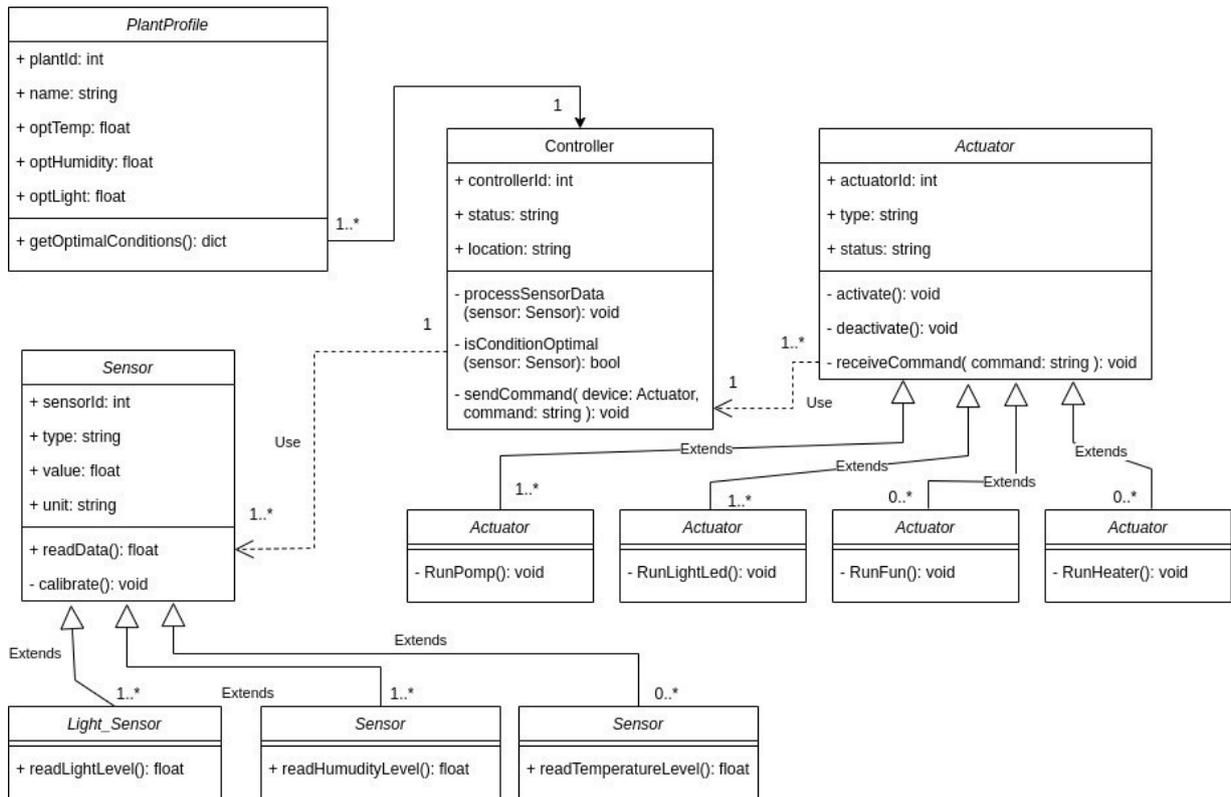
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА



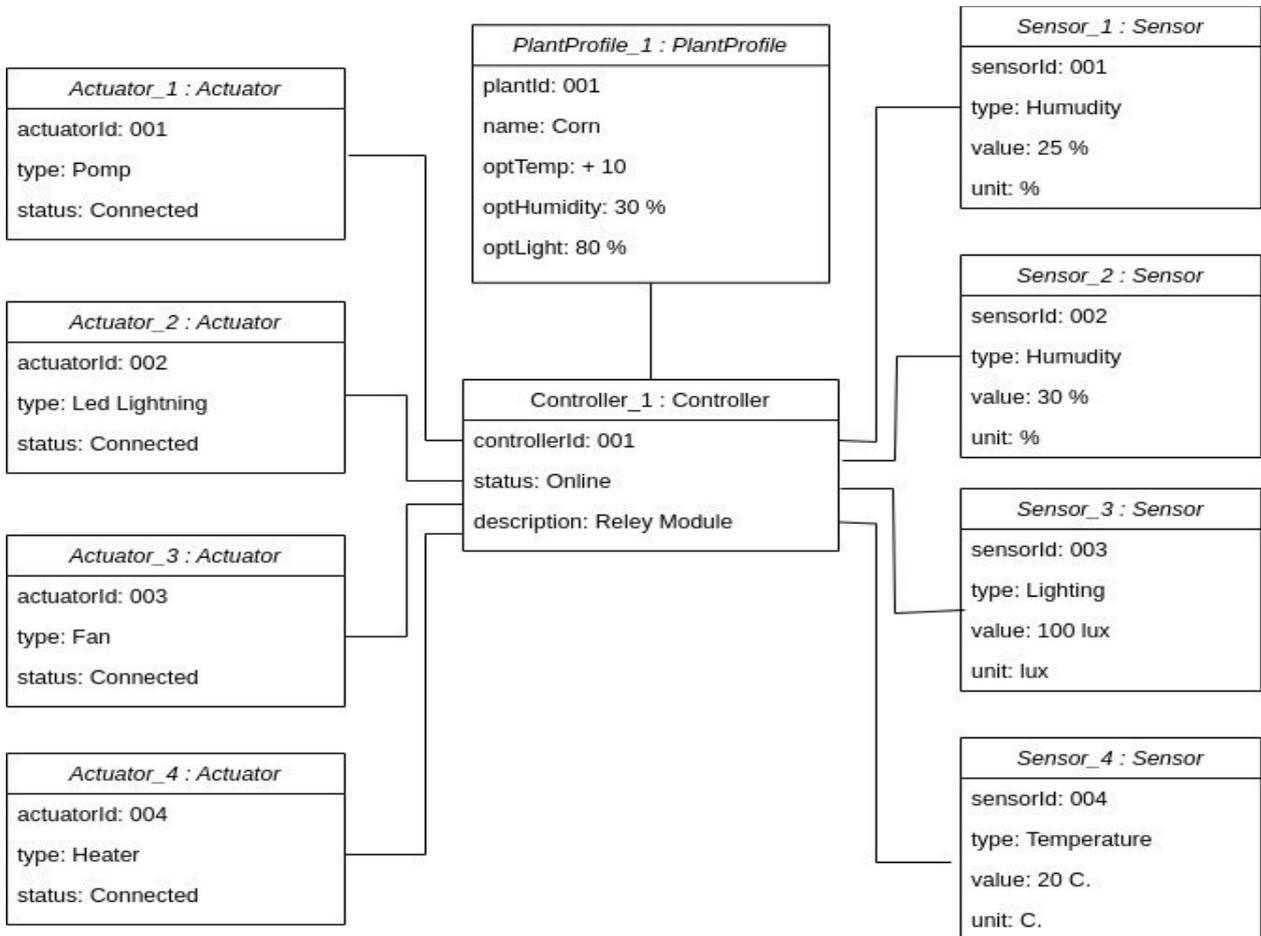
Б.1 – UML-діаграма розгортання системи AutoGreenTech



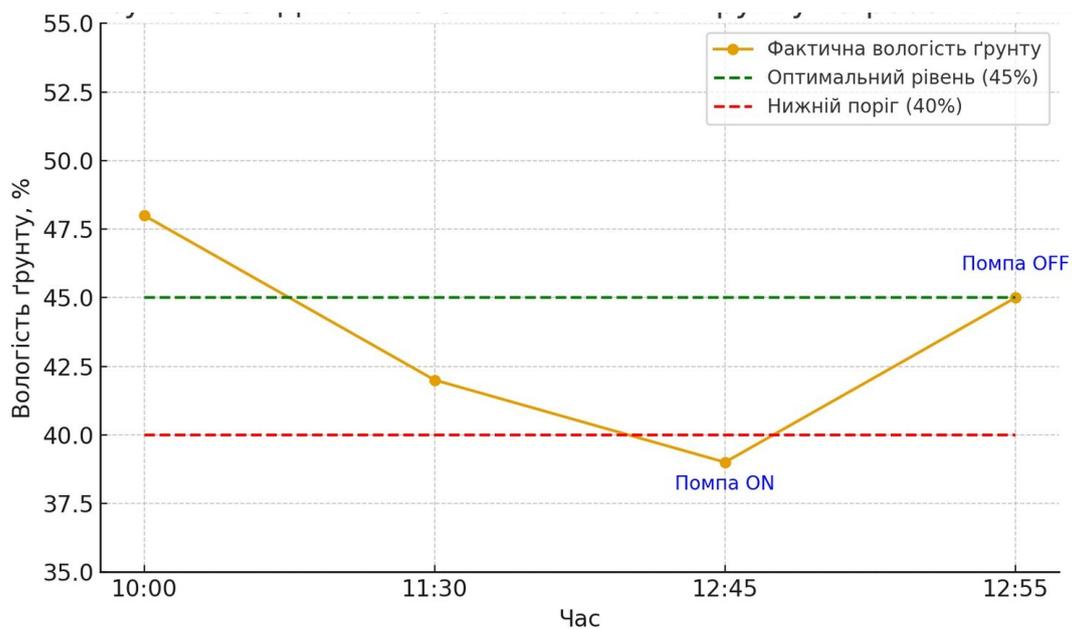
Б.2. - UML-діаграма прецедентів системи AutoGreenTech



Б.3 - UML-діаграма класів системи



Б.4 - UML-діаграма об'єктів (приклад структури даних)



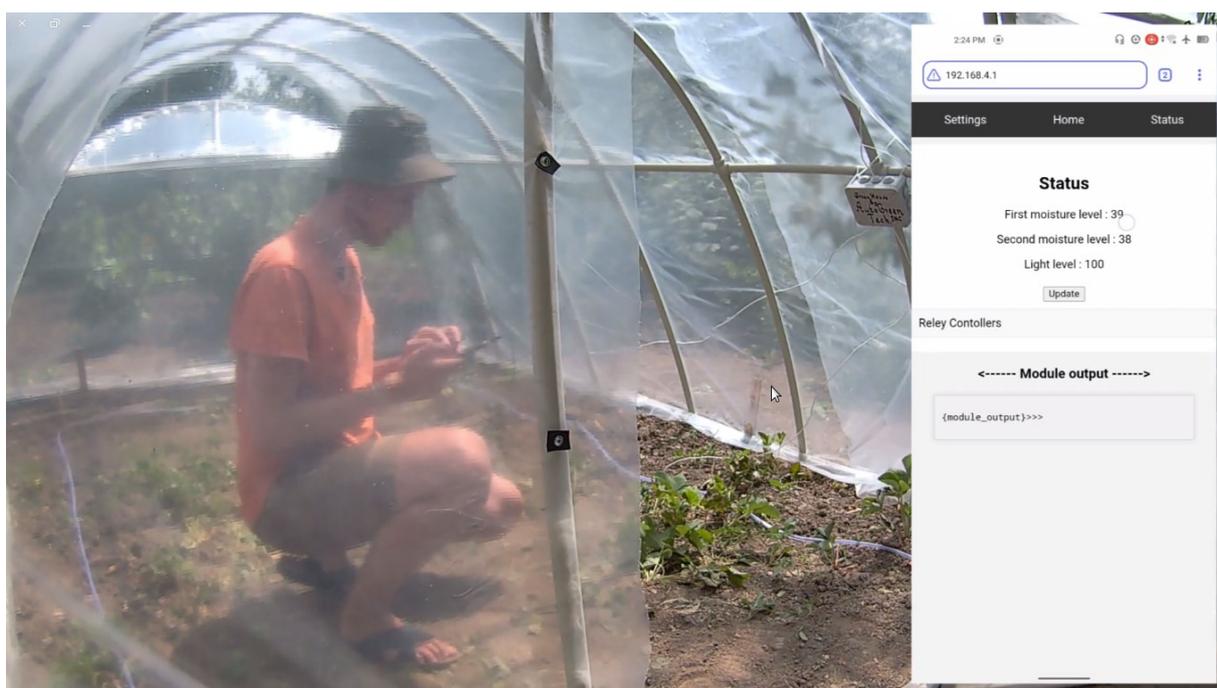
Б.5 - Графік зміни вологості ґрунту



Б.6 - Готовий прототип розробленої системи



Б.7 - Інтерфейс налаштувань системи



Б.8 – Приклад встановлення системи в теплицю

Додаток В (обов'язковий)

Лістинг програмної частини основної функції

```

/*
  FullExtendedPrototype.ino
  Великий приклад модульного проекту для автоматизованої системи
  вирощування.
  Містить:
  - ConnetionClient (лог / серіальний ввід/вивід)
  - PersistantStorage (EEPROM)
  - ProcessSensors (логіка поливу/освітлення)
  - TelegramBot (заготовка для ESP)
  - WebServer (динамічна сторінка для ESP)
  - main loop (ініціалізація + демонстрація роботи)
*/

#include <Arduino.h>
#include <EEPROM.h>

// ===== Налаштування проекту =====
#define USE_ESP true // true -> компілюються WebServer/Telegram
(ESP8266/ESP32)
#if USE_ESP
  #ifndef ESP8266
    #include <ESP8266WiFi.h>
    #include <ESP8266WebServer.h>
  #else
    #include <WiFi.h>
    #include <WebServer.h>
  #endif
  #include <WiFiClient.h>
#endif

// Типи (використані у вихідних прототипах)
typedef int16_t sint;
typedef uint16_t usint;

```

```

typedef uint32_t uint;
typedef int64_t lint;

// ===== Конфігурація апаратури =====
const uint8_t PIN_MOISTURE_1 = A0;
const uint8_t PIN_MOISTURE_2 = A1;
const uint8_t PIN_LIGHT = A2; // LDR або аналоговий вхід
const uint8_t PIN_DHT = 2; // якщо використовуєш DHT, інший пін
const uint8_t RELAY_PUMP = 7;
const uint8_t RELAY_LIGHT = 8;
const uint8_t LED_STATUS = 13;

const unsigned long SENSOR_POLL_INTERVAL_MS = 5000UL; // інтервал
опитування сенсорів
const unsigned long WATCHDOG_INTERVAL_MS = 60000UL;

// ===== Globals =====
String consoleOutput = "";
const size_t MAX_CONSOLE_OUTPUT = 1024;

unsigned long lastSensorPoll = 0;
unsigned long lastWatchdog = 0;

struct RuntimeSettings {
  uint growingDays;
  uint checkingPeriodMinutes;
  uint pumpTimeSec;
  uint pumpIntervalSec;
  uint groundDryPercent;
  uint groundWetPercent;
  uint lightDayDurationHours;
  uint nightDurationHours;
  uint dayLightLux;
} settings;

// Стан системи

```

```

bool relayPumpState = false;
bool relayLightState = false;
usint lastMoisture1 = 0, lastMoisture2 = 0;
usint lastLight = 0;
float lastTemp = 0.0;
float lastHumidity = 0.0;

// ===== ConnetionClient (розширений) =====
namespace ConnectionClient {
    unsigned long lastRequestTime = 0;
    void CheckModuleOutput() {
        if (consoleOutput.length() > MAX_CONSOLE_OUTPUT) {
            consoleOutput.remove(0, consoleOutput.length() / 2);
            Serial.println(F("// [INFO] Console buffer truncated"));
        }
    }
}

void AddModuleOutput(const String &s) {
    consoleOutput += s + "\n";
    Serial.println(s);
    CheckModuleOutput();
}

void AddModuleOutput(usint v) {
    AddModuleOutput(String(v));
}

// Читання якщо є дані (без блокувань)
sint SerialRead(const String &label, usint &out) {
    if (Serial.available()) {
        long val = Serial.parseInt();
        if (val != 0 || Serial.peek()=='0') { // простий захист
            out = (usint)val;
            AddModuleOutput("SerialRead " + label + ": " + String(out));
            return 1;
        }
    }
}

```

```

}
return 0;
}

```

```

sint SerialRead(const String &label, char &out) {
    if (Serial.available()) {
        out = (char)Serial.read();
        AddModuleOutput("SerialRead " + label + ": " + String(out));
        return 1;
    }
    return 0;
}

```

```

void SerialWrite(const String &label, usint &v) {
    Serial.print(label);
    Serial.println(v);
}

```

```

void SerialWrite(const String &label, sint &v) {
    Serial.print(label);
    Serial.println(v);
}

```

```

void SerialWrite(const String &label, char &v) {
    Serial.print(label);
    Serial.println(v);
}

```

```

usint FindRequestAccuracy(usint v1, usint v2, usint v3, usint v4, usint v5,
usint v6, usint v7, usint v8, usint v9) {
    // Простий контрольний код: XOR-подібна сумарна хеш-функція
    unsigned long sum = v1; sum = (sum * 31 + v2); sum = (sum * 31 + v3);
    sum = (sum * 31 + v4); sum = (sum * 31 + v5); sum = (sum * 31 + v6);
    sum = (sum * 31 + v7); sum = (sum * 31 + v8); sum = (sum * 31 + v9);
    return (usint)(sum % 65535);
}

```

```

bool IsRightRequest(usint normalSize) {

```

```
// Проста перевірка: чи є принаймні normalSize байт у буфері серіалу
return Serial.available() >= normalSize;
}
```

```
bool IsRequestTime() {
    if (millis() - lastRequestTime > 5000UL) {
        lastRequestTime = millis();
        return true;
    }
    return false;
}
```

```
bool WaitNormalRequest(usint normalSize, unsigned long timeoutMs =
2000UL) {
    unsigned long start = millis();
    while (millis() - start < timeoutMs) {
        if (IsRightRequest(normalSize)) return true;
        delay(10);
    }
    return false;
}
```

```
// Запит зчитування сенсорів (локально)
sint getSensorsValues(usint &moist1, usint &moist2, usint &lightLevel) {
    moist1 = analogRead(PIN_MOISTURE_1) * 100UL / 1023UL; //
нормалізуємо до %
    moist2 = analogRead(PIN_MOISTURE_2) * 100UL / 1023UL;
    lightLevel = analogRead(PIN_LIGHT) * 100UL / 1023UL; // відносна
шкала 0-100
    AddModuleOutput("getSensorsValues -> m1=" + String(moist1) + " m2=" +
String(moist2) + " L=" + String(lightLevel));
    return 1;
}
```

```
void loop() {
    // індикатор alive
```

```
static unsigned long lastBlink = 0;
if (millis() - lastBlink > 500) {
    digitalWrite(LED_STATUS, !digitalRead(LED_STATUS));
    lastBlink = millis();
}

// Періодичне опитування сенсорів
if (millis() - lastSensorPoll > SENSOR_POLL_INTERVAL_MS) {
    lastSensorPoll = millis();
    ProcessSensors::SensorScan();
}

// Логіка поливу/освітлення із заданим інтервалом
ProcessSensors::RunCheckingPeriod(settings.checkingPeriodMinutes);

// Обробка користувацького вводу
ProcessSensors::ProcessUserRequest(1000);

// Вебсервер handling (ESP)
#ifdef USE_ESP
    server.handleClient();
    TelegramBot::RunTelegramBot();
#endif

// Watchdog простий
if (millis() - lastWatchdog > WATCHDOG_INTERVAL_MS) {
    lastWatchdog = millis();
    ConnectionClient::AddModuleOutput("Watchdog tick");
}
}
```

Додаток Г (обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Автоматизована система вирощування культур рослин»
 Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
 (бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)
 Підрозділ: кафедра АІПТ
 (кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism (КПІ) 0.09 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту.

У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

У роботі виявлено ознаки академічного плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Бісікало О.В., зав. каф. АІПТ
 (прізвище, ініціали, посада)

Овчинников К.В., доц. каф. АІПТ
 (прізвище, ініціали, посада)

Маслій Р.В.
 (прізвище, ініціали)

Особа, відповідальна за перевірку (підпис)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник (підпис) Паламарчук Є.А., проф. каф. АІПТ
 (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач (підпис) Бондар Н. І.
 (прізвище, ініціали)