

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
(повне найменування факультету)

Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ЩОДО
ПРОЕКТУВАННЯ РОЗУМНОЇ ТЕПЛИЦІ
RESEARCH AND IMPLEMENTATION OF SMART GREENHOUSE DESIGN
APPROACHES

Виконав: студент(ка) 2 курсу, групи БК-612м
Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Автоматизація, мехатроніка та робототехніка

НОВІКОВ М.А.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВЕРЕНИЧ О.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент КОРОТУН А.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
Кафедра інформаційних технологій електронних засобів
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Автоматизація, мехатроніка та робототехніка

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри ІТЕЗ, к.т.н, доц.
О.Ю. МАЛИЙ
“ ” 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

НОВІКОВ Михайло Антонович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Дослідження та реалізація підходів щодо
проектування розумної теплиці
Research and implementation of smart greenhouse design approaches

керівник проєкту (роботи) д.т.н., доц., ВЕРЕНИЧ Олена Володимирівна,
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові,)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 23 ” квітня 2024 року № 162

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 10 червня 2024 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) програма повинна забезпечувати
обробку та відображення даних

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, 1 Аналіз предметної області та постановка задачі, 2 Розробка
архітектури системи керування мікрокліматом розумної теплиці, 3 Реалізація
системи керування мікрокліматом, 4 Експериментальне дослідження,
Висновки, Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
слайди презентації

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Розділи 1-4	ВЕРЕНИЧ Н.О., професор		
Нормоконтроль	ПОСПЕСВА І. Є., ст.викладач		

7. Дата видачі завдання « 01 » березня 2024 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Постановка завдання роботи.	1 тиждень	Завдання, ТЗ
2	Аналіз предметної області.	1 тиждень	Розділ 1
3	Дослідження комп'ютерно-інтегрованих технологій для реалізації завдання.	2 тиждень	Розділ 2
4	Огляд варіантів загальної архітектури.	3-4 тижні	Розділ 3
5	Огляд підсистем керування мікрокліматом.	5 тиждень	Розділ 3
6	Оформлення пояснювальної записки та відповідної документації	6-7 тиждень	Додатки
7	Нормоконтроль та рецензування.	8 тиждень	
8	Захист дипломної роботи.	9 тиждень	

Студент(ка)

(підпис) Михайло НОВІКОВ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

(підпис) Олена ВЕРЕНИЧ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи магістра: 94 стор., 2 табл., 11 рис., 1 дод., 37 джерел.

РОЗУМНА ТЕПЛИЦЯ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ДАТЧИКИ, АКТУАТОРИ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕПЛИЦІ

Об'єкт дослідження – процеси вирощування рослин у контрольованому середовищі теплиці.

Мета роботи – дослідити існуючі підходи до автоматизації та розробити систему керування мікрокліматом для розумної теплиці на основі технологій Інтернету речей.

У роботі проаналізовано проблеми традиційних теплиць, переваги та недоліки існуючих рішень "розумних теплиць". Визначено ключові параметри мікроклімату та запропоновано підсистеми для їх контролю та регулювання. Розроблено архітектуру системи керування на базі мікроконтролера з під'єднанням датчиків та актуаторів. Реалізовано мобільний застосунок для віддаленого моніторингу та керування теплицею через Інтернет. Проведено модульне та інтеграційне тестування розробленої системи.

Результати можуть бути використані для автоматизації теплиць різного масштабу з метою підвищення врожайності, оптимізації ресурсів та дистанційного керування процесами для забезпечення сталого сільськогосподарського виробництва.

ABSTRACT

Explanatory note to the diploma qualifying work of the master: 94 pages, 2 tables, 11 figures, 1 appendix, 37 sources.

SMART GREENHOUSE, MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM,
INTERNET OF THINGS, SENSORS, ACTUATORS, GREENHOUSE
AUTOMATION

The object of research is the processes of growing plants in a controlled greenhouse environment.

The purpose of the work is to investigate existing approaches to automation and develop a microclimate control system for a smart greenhouse based on Internet of Things technologies.

The paper analyzes the problems of traditional greenhouses, advantages and disadvantages of existing "smart greenhouse" solutions. The key parameters of the microclimate are determined and subsystems for their control and regulation are proposed. The architecture of the control system based on a microcontroller with the connection of sensors and actuators has been developed. A mobile application for remote monitoring and control of the greenhouse via the Internet has been implemented. Modular and integration testing of the developed system was carried out.

The results can be used to automate greenhouses of various scales to increase yields, optimize resources, and remotely control processes to ensure sustainable agricultural production.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК.....	7
ВСТУП.....	9
1 ОГЛЯД ТЕМИ РОЗУМНИХ ТЕПЛИЦЬ	11
1.1. Актуальність теми "Розумні теплиці"	11
1.1.1. Роль теплиць у забезпеченні стійкості аграрного сектору.....	11
1.1.2. Виклики та обмеження для оптимізації процесів у теплицях.....	13
1.1.3. Переваги впровадження "розумних" технологій у теплицях.....	17
1.2. Огляд існуючих рішень та технологій для розумних теплиць	19
1.3. Аналіз можливостей впровадження розумних технологій для оптимізації процесів у теплицях	21
1.4. Сучасні тенденції в області розумних технологій для теплиць.....	27
2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ РОЗУМНОЇ ТЕПЛИЦІ.....	37
2.1. Загальна архітектура системи.....	37
2.2. Підсистеми керування мікрокліматом	39
2.2.1. Система керування вологістю	41
2.2.2. Система регулювання температури.....	44
2.2.3. Система керування рівнем CO ₂	47
2.3. Критерії та вимоги до системи керування мікрокліматом.....	51
2.4. Огляд технологій зв'язку та передачі даних для систем керування	53
3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ	59
3.1. Вибір компонентів та обладнання.....	59
3.2. Розробка алгоритмів керування.....	61
3.3. Програмна реалізація	63
3.4. Інтеграція підсистем.....	68
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	71
4.1. Методологія дослідження.....	71
4.2. Опис експериментальної установки.....	74
4.3. Проведення експериментів та збір даних	76

	7
4.4. Аналіз результатів	78
4.5. Оцінка ефективності розробленої системи	82
ВИСНОВОК	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

ЖКД - Жидкокристалічний дисплей

ЗЗ - Захист здоров'я

ІК - Інфрачервоний

ІС - Інформаційна система

КЗ - Коротке замикання

КПІ - Цілі та показники ефективності (Key Performance Indicators)

ЛВС - Локальна обчислювальна мережа

МК - Мікроконтролер

МПСУ - Мікропроцесорна система управління

ОЗУ - Оперативний запам'ятовуючий пристрій

ПДВ - Податок на додану вартість

ПЛК - Програмований логічний контролер

ППР - Планово-попереджувальний ремонт

РОЗХ - Розхід

РПУ - Ремонтно-профілактичний ухід

ССК - Система супроводу користувачів

ТЕО - Техніко-економічне обґрунтування

ТОР - Теплообмінник

ТЦО - Цикл операцій технологічного процесу

УФ - Ультрафіолетове випромінювання

ФЕП - Фотоелектричний перетворювач

ХНВ - Хімічно небезпечні виробництва

ІІ - Штучний інтелект

ЧМ - Частотна модуляція

ВСТУП

Сільське господарство було і залишається однією з найважливіших галузей людської діяльності, забезпечуючи основні потреби людства у продовольстві та сировині для багатьох виробництв. Протягом століть селяни розвивали методи та практики для підвищення врожайності культур, адаптуючись до місцевих кліматичних умов та використовуючи наявні ресурси найбільш раціонально. Однак з часом зростаюче населення планети, урбанізація та індустріалізація суспільства призвели до збільшення навантаження на аграрний сектор та виснаження природних ресурсів.

Сьогодні сільське господарство стикається з безпрецедентними викликами, пов'язаними зі зміною клімату, дефіцитом води та родючих ґрунтів, а також необхідністю забезпечувати продовольчу безпеку для швидко зростаючого населення. Згідно з прогнозами ООН, до 2050 року чисельність населення планети може досягти 9,7 мільярда людей, що вимагатиме збільшення обсягів виробництва продовольства на 70% порівняно з сучасним рівнем. Водночас, зміна клімату призводить до посух, повеней, екстремальних погодних явищ та зсувів кліматичних зон, що значно ускладнює традиційне землеробство.

У цьому контексті теплиці набувають все більшого значення як ефективний спосіб вирощування сільськогосподарських культур у контрольованому середовищі, захищеному від несприятливих зовнішніх факторів. Теплиці дозволяють створювати оптимальні умови для росту рослин шляхом регулювання температури, вологості, освітлення, концентрації вуглекислого газу та інших параметрів мікроклімату. Це забезпечує більш високу та стабільну врожайність порівняно з відкритим ґрунтом, а також економію ресурсів, таких як вода та добрива, завдяки можливості контролювати їх використання.

Крім того, теплиці відкривають шлях до розширення географії вирощування культур, дозволяючи вирощувати рослини в регіонах з несприятливими кліматичними умовами або навіть у пустелях та арктичних

зонах. Це особливо важливо в умовах зміни клімату, коли традиційні сільськогосподарські райони можуть стати непридатними для вирощування певних культур.

Однак, традиційні теплиці також мають свої обмеження та проблеми. Контроль мікроклімату часто здійснюється вручну або за допомогою простих систем автоматизації, що може призводити до неоптимальних умов для рослин та неефективного використання ресурсів. Моніторинг стану рослин та процесів вирощування також є складним завданням, що вимагає значних зусиль та людських ресурсів. Крім того, експлуатаційні витрати традиційних теплиць можуть бути високими через необхідність опалення, освітлення, вентиляції та інших енергоємних процесів.

Саме тому впровадження "розумних" технологій у теплицях розглядається як ефективне рішення для подолання цих проблем та оптимізації процесів вирощування рослин. "Розумні теплиці" – це інноваційні системи, які інтегрують різноманітні датчики, актуатори, системи зв'язку та аналітичні інструменти для автоматизації та інтелектуального керування мікрокліматом, поливом, живленням рослин та іншими процесами.

Ключовими перевагами "розумних теплиць" є підвищення врожайності за рахунок створення оптимальних умов для росту рослин, ефективне використання ресурсів (води, енергії, добрив) завдяки точному дозуванню та автоматизації, зменшення впливу на навколишнє середовище шляхом скорочення викидів та раціонального використання ресурсів, а також можливість.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1 Актуальність теми "Розумні теплиці"

1.1.1 Роль теплиць у забезпеченні стійкості аграрного сектору

Теплиці відіграють важливу роль у забезпеченні стійкості аграрного сектору, оскільки вони дозволяють контролювати умови вирощування рослин, незалежно від зовнішніх факторів. Це особливо актуально в контексті зміни клімату, коли традиційні методи землеробства стають менш передбачуваними та продуктивними.

Використання теплиць забезпечує низку переваг, які роблять їх невід'ємною частиною стійкого сільськогосподарського виробництва. По-перше, теплиці дозволяють вирощувати рослини в контрольованому середовищі, захищаючи їх від несприятливих погодних умов, таких як заморозки, спека, сильний вітер чи надмірні опади. Це значно зменшує ризики втрати врожаю та забезпечує стабільність виробництва протягом усього року.

Низку переваг, які роблять їх невід'ємною частиною стійкого сільськогосподарського виробництва вказані у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги використання теплиць

Переваги теплиць	Пояснення
Контрольоване середовище	Захист рослин від несприятливих погодних умов, зменшення ризиків втрати врожаю
Ефективне використання ресурсів	Оптимізація використання води, добрив та енергії, мінімізація забруднення
Розширення географії вирощування	Можливість вирощування культур у регіонах з несприятливими умовами
Забезпечення продовольчої безпеки	Вирощування свіжих продуктів протягом усього року
Розвиток місцевих громад	Створення робочих місць, диверсифікація сільськогосподарського виробництва

По-друге, теплиці забезпечують ефективне використання обмежених ресурсів, таких як вода та добрива. У теплицях можна використовувати системи крапельного зрошення та замкнуті системи живлення, що дозволяє зменшити витрати води та добрив, а також мінімізувати забруднення навколишнього середовища. Крім того, контрольоване середовище теплиці дозволяє оптимізувати використання енергії для обігріву чи охолодження, що сприяє підвищенню ресурсоефективності.

Ще однією важливою перевагою теплиць є можливість вирощування рослин у регіонах, де природні умови є несприятливими для традиційного землеробства. Наприклад, у посушливих регіонах теплиці дозволяють контролювати вологість та зменшити випаровування води, тоді як у холодних регіонах теплиці забезпечують захист від низьких температур. Це розширює географію вирощування культур та сприяє диверсифікації сільськогосподарського виробництва.

Також варто зазначити, що теплиці відіграють важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки та зменшенні залежності від імпорту сільськогосподарської продукції. Вирощування рослин у теплицях дозволяє отримувати свіжі продукти протягом усього року, незалежно від сезону, що особливо важливо для регіонів з обмеженими можливостями для традиційного землеробства. Крім того, теплиці сприяють розвитку місцевих громад та створенню робочих місць у сільській місцевості. Вони дозволяють диверсифікувати сільськогосподарське виробництво, забезпечувати додатковий дохід для фермерів та створювати нові можливості для зайнятості у супутніх галузях, таких як переробка, упаковка та логістика. Однак, незважаючи на численні переваги, традиційні теплиці стикаються з низкою проблем та обмежень, які ускладнюють оптимізацію процесів вирощування. Серед них можна виділити: складність контролю мікроклімату, неефективне використання ресурсів (води, енергії, добрив), труднощі моніторингу та управління процесами, високі експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище. Ці проблеми можуть призвести до зниження врожайності, зростання витрат та негативного впливу на стійкість аграрного сектору.

1.1.2 Виклики та обмеження для оптимізації процесів у теплицях

Одним з основних викликів є складність контролю мікроклімату в теплицях. Мікроклімат, який включає в себе температуру, вологість, рівень вуглекислого газу, освітленість та інші чинники, відіграє ключову роль у забезпеченні оптимальних умов для росту та розвитку рослин. Проте, контроль мікроклімату в теплицях є складним завданням, оскільки він залежить від багатьох змінних, таких як погодні умови, тип культури, стадія росту та інші фактори. Навіть незначні відхилення від оптимальних параметрів можуть призвести до зниження врожайності та якості продукції. Іншою проблемою є неефективне використання ресурсів, таких як вода, енергія та добрива. Традиційні системи зрошення та живлення рослин у теплицях часто є недостатньо точними та ефективними, що призводить до надмірного використання води та добрив. Це не лише збільшує витрати виробництва, а й може спричинити негативний вплив на навколишнє середовище, наприклад, забруднення ґрунтових вод або накопичення надлишку поживних речовин у ґрунті.

Труднощі моніторингу та управління процесами у теплицях також є значною перешкодою для оптимізації. Традиційні методи моніторингу, такі як ручний збір даних та візуальний огляд, є трудомісткими та схильними до помилок. Крім того, ручне управління системами обігріву, вентиляції, зрошення та живлення рослин є неефективним та може призводити до затримок та неточностей у реагуванні на зміни умов. Високі експлуатаційні витрати є ще однією проблемою для теплиць. Витрати на опалення, охолодження, освітлення, зрошення та живлення рослин можуть бути значними, особливо в регіонах з несприятливими кліматичними умовами. Це може зробити виробництво в теплицях нерентабельним для деяких видів культур або змусити підвищувати ціни на продукцію, що зменшує її конкурентоспроможність. Вплив на навколишнє середовище також є важливим питанням для традиційних теплиць. Використання невідновлюваних джерел енергії, таких як викопне паливо, для обігріву та освітлення, а також неефективне використання води та

добрих можуть призводити до значних викидів парникових газів та забруднення ґрунтових вод і ґрунтів. Це суперечить принципам сталого розвитку та може завдавати шкоди довкіллю. Крім того, традиційні теплиці можуть мати обмежену можливість адаптації до змін навколишнього середовища та кліматичних умов. Зміна клімату, поява нових шкідників та хвороб, а також інші непередбачувані чинники можуть вимагати швидкої адаптації та внесення змін у технології вирощування. Проте, традиційні системи керування теплицями часто є негнучкими та важко пристосовуються до нових умов. Ще одним викликом є забезпечення належного рівня автоматизації та інтеграції процесів у теплицях.

Ручне управління численними системами та процесами є трудомістким та схильним до помилок. Автоматизація та інтеграція різних компонентів, таких як системи зрошення, живлення, освітлення, вентиляції та моніторингу, може значно підвищити ефективність та оптимізувати процеси вирощування. Проте, впровадження таких систем вимагає значних інвестицій та технічної експертизи [28]. Нарешті, відсутність доступу до сучасних технологій та обмежені можливості для навчання та обміну досвідом можуть бути перешкодою для оптимізації процесів у теплицях. Особливо це стосується малих та середніх виробників, які можуть мати обмежені ресурси для інвестування в нові технології та навчання персоналу.

Впровадження "розумних" технологій у теплицях може стати ефективним рішенням для подолання наявних проблем та оптимізації процесів вирощування. "Розумні теплиці" – це інноваційні системи, які інтегрують різноманітні датчики, актуатори, системи зв'язку та аналітичні інструменти для автоматизації та інтелектуального керування мікрокліматом, поливом, живленням рослин та іншими процесами. Ключовими перевагами "розумних теплиць" є: підвищення врожайності, ефективне використання ресурсів, зменшення впливу на навколишнє середовище, можливість віддаленого моніторингу та управління, а також інтеграція з іншими "розумними" системами в рамках концепції "розумного сільського господарства".

Однією з головних переваг "розумних теплиць" є можливість точного контролю та підтримки оптимального мікроклімату для вирощування різних культур. Використання датчиків для моніторингу температури, вологості, рівня вуглекислого газу, освітленості та інших параметрів дозволяє отримувати точні та своєчасні дані про стан середовища в теплиці. Ці дані можуть бути проаналізовані за допомогою алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для визначення оптимальних налаштувань систем опалення, вентиляції, зрошення та освітлення. Автоматичне регулювання цих систем забезпечує підтримку ідеальних умов для росту рослин, що призводить до підвищення врожайності та якості продукції. Ефективне використання ресурсів є ще однією перевагою "розумних теплиць". Завдяки точним системам зрошення та живлення, таким як крапельний полив та прецизійне внесення добрив, можна значно зменшити витрати води та поживних речовин. Ці системи розподіляють необхідну кількість води та добрив безпосередньо до коренів рослин на основі даних про вологість ґрунту, стадію росту культури та інших чинників. Це дозволяє уникнути надмірного використання ресурсів та зменшити забруднення навколишнього середовища.

Крім того, "розумні теплиці" можуть використовувати відновлювані джерела енергії, такі як сонячні батареї, вітрогенератори або геотермальні системи, для забезпечення енергією систем опалення, вентиляції та освітлення. Це не лише зменшує витрати на енергію, а й значно знижує викиди парникових газів та вплив на навколишнє середовище.

Можливість віддаленого моніторингу та управління процесами в теплицях є ще однією важливою перевагою "розумних" технологій. За допомогою хмарних сервісів, мобільних додатків та веб-інтерфейсів, власники теплиць можуть відстежувати стан мікроклімату, рівень ресурсів та інші параметри в режимі реального часу. Крім того, вони можуть віддалено керувати системами опалення, вентиляції, зрошення та живлення, що дозволяє швидко реагувати на зміни умов та оптимізувати процеси.

"Розумні теплиці" також передбачають інтеграцію з іншими "розумними" системами в рамках концепції "розумного сільського господарства".

Наприклад, вони можуть бути пов'язані з системами моніторингу ґрунту, метеорологічними станціями, системами управління запасами та логістикою. Це дозволяє отримувати більш повну картину про стан виробництва та приймати обґрунтовані рішення на основі аналізу великих даних [26].

Одним із ключових компонентів "розумних теплиць" є система збору даних, яка включає в себе різноманітні датчики, такі як датчики температури, вологості, освітленості, вуглекислого газу, вологості ґрунту та інші. Ці датчики встановлюються у відповідних місцях теплиці та забезпечують безперервний моніторинг параметрів середовища. Дані з датчиків передаються до центральної системи управління, де вони обробляються та аналізуються.

Системи автоматизації та управління є серцем "розумної теплиці". Вони відповідають за керування актуаторами, такими як системи опалення, вентиляції, зрошення та освітлення, на основі даних з датчиків та заздалегідь визначених алгоритмів. Ці системи можуть використовувати різні підходи, такі як правила та логіка, традиційні алгоритми управління, а також більш складні методи машинного навчання та штучного інтелекту. Завдяки цьому, вони здатні адаптуватися до змінних умов та оптимізувати процеси вирощування.

Інтерфейси взаємодії, такі як веб-портали, мобільні додатки та візуалізаційні інструменти, дозволяють власникам теплиць відстежувати стан систем, аналізувати дані та приймати обґрунтовані рішення. Вони забезпечують зручний доступ до інформації про мікроклімат, використання ресурсів, стан культур та прогнозів щодо врожайності. Крім того, ці інтерфейси дозволяють віддалено керувати системами теплиці, змінюючи налаштування або вносячи коригування у процеси.

Інтеграція "розумних теплиць" з іншими системами "розумного сільського господарства" відкриває нові можливості для оптимізації процесів та підвищення ефективності. Наприклад, дані про мікроклімат у теплиці можуть бути інтегровані з метеорологічними даними та даними про стан ґрунту для більш точного прогнозування потреб у воді та добривах. Крім того, інформація про врожайність та якість продукції може бути передана до систем управління

запасами та логістикою для оптимізації процесів збору, зберігання та розподілу продукції.

1.1.3 Переваги впровадження "розумних" технологій у теплицях

Впровадження "розумних" технологій у теплицях надає низку суттєвих переваг, що дозволяють підвищити ефективність, продуктивність та екологічність процесів вирощування рослин. Однією з ключових переваг є оптимізація мікроклімату та підвищення врожайності. "Розумні" системи забезпечують точний контроль та підтримку оптимального мікроклімату (температури, вологості, рівня CO₂, освітленості тощо) для вирощуваних культур. Це досягається завдяки використанню датчиків, алгоритмів машинного навчання та автоматизованих систем керування опаленням, вентиляцією, зрошенням та освітленням. Створення ідеальних умов для росту рослин призводить до значного підвищення врожайності та якості продукції.

Ефективне використання ресурсів є також важливою перевагою "розумних теплиць". Вони дозволяють раціонально використовувати такі ресурси, як вода, добрива та енергія. Завдяки точним системам крапельного зрошення та прецизійного внесення добрив можна значно скоротити витрати води та поживних речовин. Крім того, використання відновлюваних джерел енергії (сонячних панелей, вітрогенераторів тощо) зменшує витрати на опалення, вентиляцію та освітлення. Це призводить до зменшення негативного впливу на довкілля, скорочуючи забруднення ґрунтових вод, ґрунтів та атмосфери, а також зменшуючи викиди парникових газів. Раціональне використання води і добрив також є важливим внеском у захист навколишнього середовища.

"Розумні теплиці" надають можливість віддаленого моніторингу та управління. Хмарні сервіси, мобільні додатки та веб-інтерфейси дозволяють власникам теплиць відстежувати стан мікроклімату, рівень ресурсів та інші параметри в режимі реального часу. Крім того, вони можуть віддалено керувати системами опалення, вентиляції, зрошення та живлення, що забезпечує швидку

реакцію на зміни умов. Ще однією перевагою є інтеграція з іншими "розумними" системами, такими як системами моніторингу ґрунту, метеорологічними станціями, системами управління запасами та логістикою. Це дозволяє отримувати більш повну картину про стан виробництва та приймати обґрунтовані рішення на основі аналізу великих даних.

Впровадження автоматизованих систем керування значно зменшує потребу в ручному управлінні та моніторингу процесів у теплицях, скорочуючи трудовитрати та мінімізуючи помилки. Це дозволяє оптимізувати використання людських ресурсів. "Розумні" системи здатні адаптуватися до змінних умов завдяки використанню алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту, швидко реагуючи на появу нових загроз, таких як шкідники чи хвороби, або змін кліматичних умов.

Завдяки оптимізації мікроклімату та ефективному використанню ресурсів, "розумні теплиці" забезпечують вирощування продукції високої якості, що відповідає стандартам безпеки та екологічності. Контрольоване середовище "розумних теплиць" також дозволяє вирощувати рослини у регіонах з несприятливими кліматичними умовами або навіть у пустелях та арктичних зонах, розширюючи географію вирощування та диверсифікуючи сільськогосподарське виробництво.

Загалом, впровадження "розумних" технологій дозволяє підвищити продуктивність та ефективність виробництва, зменшити витрати та забезпечити високу якість продукції, роблячи її більш конкурентоспроможною на ринку. "Розумні теплиці" є перспективним рішенням, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності та стійкості сільськогосподарського виробництва, забезпечуючи раціональне використання ресурсів та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище. Інвестиції в ці інноваційні технології можуть стати ключовим чинником для забезпечення продовольчої безпеки та сталого розвитку аграрного сектору у майбутньому.

1.2 Огляд існуючих рішень та технологій для розумних теплиць

На сьогоднішній день існує низка комерційних та дослідницьких рішень у сфері "розумних теплиць". Вони використовують різноманітні технології, такі як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення, аналітика великих даних, машинне навчання та штучний інтелект. Проте більшість існуючих рішень зосереджуються на окремих аспектах керування мікрокліматом або орієнтовані на великомасштабні комерційні теплиці. Тому існує потреба у розробці гнучких та масштабованих рішень для малих та середніх теплиць, які б враховували специфічні вимоги та обмеження.

У цьому дослідженні буде проведено огляд та аналіз існуючих підходів, технологій та рішень для "розумних теплиць". Особлива увага буде приділена вибору оптимальних апаратних компонентів, протоколів зв'язку, архітектурних рішень та інтерфейсів взаємодії. Метою є розробка ефективної та гнучкої системи керування мікрокліматом, яка буде враховувати специфічні потреби малих та середніх теплиць, забезпечуючи підвищення продуктивності, ресурсоефективність та екологічність [27].

Сільське господарство є однією з найдавніших галузей людської діяльності, яка забезпечує основні потреби суспільства в їжі та сировині для багатьох промислових секторів. Протягом століть методи вирощування сільськогосподарських культур постійно вдосконалювалися, щоб задовольнити зростаючий попит на продукти харчування та адаптуватися до мінливих умов навколишнього середовища. Однак у сучасному світі галузь стикається з безпрецедентними викликами, серед яких зміна клімату, дефіцит природних ресурсів, збільшення чисельності населення та урбанізація. Зміна клімату, спричинена антропогенними викидами парникових газів, призводить до підвищення середньої температури, зміни режиму опадів, частішого виникнення екстремальних погодних явищ, таких як посухи, повені та хвилі спеки. Ці зміни можуть мати руйнівний вплив на традиційне сільське господарство, знижуючи врожайність культур, порушуючи сезонні цикли та сприяючи поширенню шкідників і хвороб рослин.

Дефіцит природних ресурсів, таких як родюча земля, прісна вода та корисні копалини, також становить серйозний виклик для сталого розвитку сільського господарства. Розширення сільськогосподарських угідь часто відбувається за рахунок вирубки лісів і деградації ґрунтів, що загрожує біорізноманіттю та екосистемам. Водночас зростаючий попит на воду для зрошення землі та промислового використання посилює конкуренцію за обмежені водні ресурси.

Збільшення чисельності населення у світі, яке, за прогнозами, досягне 9,7 мільярдів до 2050 року, вимагає значного збільшення виробництва продуктів харчування. За оцінками експертів, для задоволення зростаючого попиту необхідно буде підвищити продуктивність сільського господарства на 60-70% порівняно з нинішніми рівнями. Ця вимога ставить величезний тиск на галузь, змушуючи шукати інноваційні рішення для підвищення ефективності та стійкості виробництва.

Урбанізація, тобто зростання міського населення та розширення міських територій, також впливає на сільське господарство. З одного боку, міста споживають значну частку сільськогосподарської продукції, створюючи додатковий попит. З іншого боку, урбанізація призводить до втрати родючих земель, оскільки міста розростаються на сільськогосподарських угіддях. Крім того, забруднення від міської промисловості та транспорту може негативно впливати на якість ґрунтів і води в навколишніх сільських районах. Перед обличчям цих викликів, традиційні методи ведення сільського господарства стають все більш неадекватними та неефективними. Необхідні нові інноваційні підходи, які дозволять забезпечити стійке виробництво продовольства, раціональне використання природних ресурсів та пом'якшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Саме в цьому контексті концепція "розумних теплиць" набуває особливої актуальності. Впровадження передових технологій, таких як Інтернет речей, хмарні обчислення, аналітика великих даних, машинне навчання та штучний інтелект, може значно підвищити ефективність та продуктивність вирощування сільськогосподарських культур у контрольованому середовищі теплиць.

Розумні системи керування мікрокліматом, поливом, живленням рослин та іншими процесами дозволяють оптимізувати використання ресурсів, зменшити вплив на навколишнє середовище та забезпечити сталий розвиток аграрного сектору.

1.3 Аналіз можливостей впровадження розумних технологій для оптимізації процесів у теплицях

Концепція "розумних теплиць" базується на інтеграції різноманітних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення, аналітика великих даних, машинне навчання та штучний інтелект (ШІ), для створення інтелектуальних систем управління та моніторингу процесів вирощування рослин. Впровадження цих технологій може забезпечити наступні переваги для оптимізації процесів у теплицях:

Автоматизоване та інтелектуальне управління мікрокліматом: Використання датчиків та актуаторів, інтегрованих в систему IoT, дозволяє збирати дані про температуру, вологість, рівень CO₂ та інші параметри в режимі реального часу. Ці дані можна аналізувати за допомогою алгоритмів машинного навчання та ШІ для прийняття рішень щодо регулювання мікроклімату відповідно до потреб конкретних культур.

Оптимізація використання ресурсів: Інтелектуальні системи керування поливом та живленням рослин можуть забезпечити раціональне використання води та добрив на основі даних про стан ґрунту, вологість повітря та потреби рослин на різних стадіях розвитку. Це дозволяє зменшити марнотратне споживання ресурсів та знизити витрати.

Покращений моніторинг та аналітика: Використання датчиків та систем збору даних дозволяє отримувати цінну інформацію про стан рослин, мікроклімат, споживання ресурсів та інші аспекти процесу вирощування. Ці дані можна аналізувати за допомогою алгоритмів машинного навчання та візуалізації для виявлення тенденцій, прогнозування проблем та прийняття обґрунтованих рішень. Віддалений моніторинг та керування: Інтеграція з

хмарними сервісами та мобільними додатками дозволяє здійснювати віддалений моніторинг стану теплиці та керувати процесами вирощування з будь-якої точки світу. Це підвищує зручність та ефективність управління, особливо для великих теплиць або розподілених виробництв.

Інтеграція та автоматизація процесів: Використання стандартизованих протоколів зв'язку та інтерфейсів програмування додатків (API) полегшує інтеграцію різних систем керування в єдину платформу. Це дозволяє автоматизувати та оптимізувати всі процеси вирощування, від підготовки ґрунту до збору врожаю. Зменшення впливу на навколишнє середовище: Раціональне використання ресурсів, оптимізація процесів та зменшення споживання енергії можуть значно знизити вуглецевий слід та вплив на навколишнє середовище від діяльності теплиць. Впровадження розумних технологій у теплицях вимагає ретельного планування, вибору відповідних компонентів та розробки ефективної архітектури системи.

Однак ці зусилля можуть принести значні вигоди у вигляді підвищення продуктивності, ефективності та стійкості процесів вирощування рослин. Впровадження розумних технологій у теплицях відкриває широкі можливості для оптимізації процесів вирощування рослин та підвищення ефективності виробництва. Одним із ключових компонентів інтелектуальних систем керування є Інтернет речей (IoT), який дозволяє інтегрувати різноманітні датчики, актуатори та пристрої в єдину мережу для збору та обміну даними.

Датчики та пристрої IoT у теплицях можуть відстежувати широкий спектр параметрів, таких як температура, вологість повітря, рівень CO₂, інтенсивність освітлення, вологість ґрунту, рівень pH та концентрація поживних речовин. Ці дані передаються через проводові або бездротові канали зв'язку до центральної системи управління, де вони аналізуються за допомогою алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту.

На основі аналізу отриманих даних система може автоматично регулювати різноманітні параметри мікроклімату в теплиці, такі як температура, вентиляція, зволоження та освітлення. Це досягається за допомогою актуаторів, які керують системами опалення, кондиціонування,

зрошення та штучного освітлення. Така автоматизована система забезпечує оптимальні умови для росту рослин на всіх стадіях їх розвитку, підвищуючи врожайність та якість продукції.

Крім автоматизованого управління мікрокліматом, розумні технології також дозволяють оптимізувати процеси поливу та живлення рослин. Датчики вологості ґрунту та рівня поживних речовин надають точну інформацію про потреби рослин, що дозволяє системі керування раціонально розподіляти воду та добрива, запобігаючи їх марнотратному споживанню та зменшуючи навантаження на навколишнє середовище.

Одним із ключових компонентів розумних теплиць є хмарні обчислення та аналітика великих даних. Дані, зібрані з різноманітних датчиків та пристроїв IoT, можуть передаватися в хмарні сховища для подальшої обробки та аналізу. Використання потужних обчислювальних ресурсів хмарних платформ дозволяє застосовувати складні алгоритми машинного навчання та ШІ для виявлення тенденцій, прогнозування проблем та оптимізації процесів вирощування.

Візуалізація даних та аналітичні інструменти допомагають фермерам та керівникам теплиць приймати обґрунтовані рішення на основі об'єктивної інформації. Наприклад, вони можуть відстежувати споживання ресурсів, аналізувати вплив різних факторів на врожайність та якість продукції, а також отримувати рекомендації щодо коригування параметрів вирощування.

Інтеграція розумних технологій у теплицях також забезпечує можливість віддаленого моніторингу та керування процесами. Використання мобільних додатків та веб-інтерфейсів дозволяє фермерам та менеджерам відстежувати стан теплиці, аналізувати дані та вносити необхідні коригування з будь-якої точки світу. Це особливо важливо для великих теплиць або розподілених виробництв, де фізична присутність на всіх об'єктах може бути складною.

Крім того, розумні технології відкривають шлях до автоматизації та інтеграції різноманітних процесів у теплицях. Використання стандартизованих протоколів зв'язку та інтерфейсів програмування додатків (API) полегшує об'єднання різних систем керування, таких як системи поливу, живлення, освітлення та збору врожаю, в єдину платформу. Це дозволяє оптимізувати

взаємодію між різними процесами, підвищуючи загальну ефективність виробництва.

Одним із ключових викликів під час впровадження розумних технологій у теплицях є забезпечення належного рівня кібербезпеки та захисту даних. Оскільки системи IoT та хмарні сервіси часто пов'язані з Інтернетом, вони можуть бути вразливими до різноманітних кібератак, таких як хакерські втручання, крадіжки даних або розповсюдження шкідливого програмного забезпечення. Тому важливо впроваджувати надійні заходи безпеки, такі як шифрування даних, автентифікація користувачів, регулярне оновлення програмного забезпечення та моніторинг мережевої активності [4].

Незважаючи на певні виклики, впровадження розумних технологій у теплицях має значний потенціал для підвищення ефективності виробництва, зменшення впливу на навколишнє середовище та забезпечення стійкості процесів вирощування рослин. Проте успіх цього процесу залежить від ретельного планування, вибору відповідних компонентів, розробки ефективної архітектури системи та навчання персоналу роботі з новими технологіями. Порівняння традиційних та розумних теплиць наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння традиційних та розумних теплиць

Критерій	Традиційні теплиці	Розумні теплиці
1	2	3
Управління мікрокліматом	Ручне або обмежена автоматизація	Повністю автоматизоване на основі даних датчиків та алгоритмів ШІ
Полив та живлення рослин	Ручне або за жорстким графіком	Оптимізоване на основі даних про стан ґрунту та потреби рослин
Моніторинг та аналітика	Обмежений, ручний збір даних	Всебічний моніторинг з використанням IoT та аналітики великих даних

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
Віддалений доступ	Обмежений або відсутній	Повний віддалений моніторинг та керування через хмарні сервіси
Інтеграція процесів	Обмежена, розрізнені системи	Повна інтеграція та автоматизація всіх процесів на єдиній платформі
Ефективність використання ресурсів	Нижча, можливі втрати ресурсів	Вища, раціональне використання

Одним із ключових аспектів упровадження розумних технологій у теплицях є вибір відповідних датчиків та пристроїв Інтернету речей (IoT). Різноманітність доступних датчиків дозволяє відстежувати широкий спектр параметрів, необхідних для ефективного управління мікрокліматом та процесами вирощування рослин.

Найпоширенішими є датчики температури та вологості повітря, які забезпечують точні виміри цих критично важливих параметрів для підтримки оптимальних умов у теплиці. Крім того, датчики рівня CO₂ відіграють важливу роль у моніторингу концентрації вуглекислого газу, що впливає на фотосинтез та ріст рослин. Для контролю освітлення можна використовувати датчики інтенсивності світла, які допомагають регулювати штучне освітлення або управляти жалюзі та затіненням у теплиці. Датчики вологості ґрунту відстежують рівень вологи в ґрунті, забезпечуючи раціональне використання води для поливу.

Крім того, доступні датчики для моніторингу рівня рН та концентрації поживних речовин у ґрунті, що дозволяє оптимізувати процеси живлення рослин і запобігати їх надмірному або недостатньому споживанню. Для забезпечення ефективної інтеграції та обміну даними між різноманітними пристроями та системами керування в розумних теплицях використовуються

стандартизовані протоколи зв'язку та інтерфейси програмування додатків (API). Одним із найпопулярніших протоколів є MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), який забезпечує легкий та ефективний спосіб передачі даних між пристроями в мережі IoT. Дані, зібрані з різноманітних датчиків та пристроїв, можуть бути інтегровані в єдину платформу керування за допомогою систем управління базами даних (СУБД) та хмарних сервісів. Хмарні платформи, такі як Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure або Google Cloud Platform, пропонують потужні інструменти для збору, зберігання та аналізу великих обсягів даних.

Одним із ключових компонентів розумних теплиць є алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту, які використовуються для аналізу зібраних даних та прийняття рішень щодо оптимізації процесів вирощування. Ці алгоритми можуть навчатися на історичних даних та виявляти складні закономірності та взаємозв'язки між різними параметрами, такими як температура, вологість, освітлення та ріст рослин.

На основі цих аналізів система керування може автоматично регулювати різноманітні параметри мікроклімату, поливу та живлення рослин, забезпечуючи оптимальні умови для їх росту та розвитку. Крім того, ці алгоритми можуть надавати рекомендації фермерам та керівникам теплиць щодо коригування параметрів вирощування для підвищення врожайності та якості продукції. Важливим аспектом упровадження розумних технологій у теплицях є забезпечення належного рівня кібербезпеки та захисту даних. Оскільки системи IoT та хмарні сервіси часто пов'язані з Інтернетом, вони можуть бути вразливими до різноманітних кібератак, таких як хакерські втручання, крадіжки даних або розповсюдження шкідливого програмного забезпечення [2].

Для захисту систем керування та конфіденційних даних необхідно впроваджувати комплексні заходи безпеки, такі як шифрування даних під час передачі та зберігання, використання надійних протоколів автентифікації та авторизації користувачів, регулярне оновлення програмного забезпечення для усунення виявлених вразливостей, а також моніторинг мережевої активності

для виявлення потенційних загроз. Крім того, важливо забезпечити належне навчання персоналу щодо використання розумних технологій у теплицях та дотримання правил кібербезпеки. Це включає розробку чітких політик та процедур, а також регулярні тренінги та підвищення кваліфікації працівників.

Незважаючи на певні виклики, пов'язані з впровадженням розумних технологій у теплицях, потенційні вигоди від цього процесу є значними. Автоматизоване та оптимізоване управління мікрокліматом, раціональне використання ресурсів, покращений моніторинг та аналітика, а також можливість віддаленого керування та інтеграції процесів можуть суттєво підвищити ефективність виробництва, знизити витрати та зменшити вплив на навколишнє середовище.

1.4 Сучасні тенденції в області розумних технологій сільськогосподарського сектору

Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання в системи керування теплицями дозволяє оптимізувати умови вирощування рослин на основі аналізу великих обсягів даних. Ці технології здатні прогнозувати потреби рослин, виявляти ранні ознаки захворювань та автоматично коригувати параметри середовища. Розвиток IoT-пристроїв забезпечує безперервний моніторинг та контроль за допомогою мережі взаємопов'язаних датчиків та актуаторів. Роботизовані системи для посадки, догляду та збору врожаю знижують потребу в ручній праці та підвищують ефективність виробництва. Вдосконалення технологій вертикального землеробства та аеропоніки дозволяє максимально використовувати обмежений простір теплиць, особливо в умовах урбанізованого середовища. Розробка нових енергоефективних LED-систем освітлення оптимізує спектральний склад світла для різних стадій росту рослин.

Галузь розумних технологій для теплиць стрімко розвивається, і з'являються нові тенденції та інновації, які можуть змінити підходи до автоматизації та оптимізації процесів вирощування рослин. Ці тенденції відображають прогрес у таких сферах, як штучний інтелект (ШІ), Інтернет

речей (IoT), робототехніка, обробка зображень та інші передові технології. Розглянемо деякі з ключових тенденцій, які варто враховувати під час проектування та розробки систем для розумних теплиць (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Комбайн з лазером [30]

У Китаї почали застосовувати високоточний лазер, здатний знищити бур'яни, при цьому не пошкоджуючи врожаю (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Дрони збирають яблука [31]

Ізраїльський стартап Tevel придумав комбайн, який збирає яблука за допомогою дронів на прив'язі (рис.1.3). Незабаром яблука можуть стати дешевшими. А все завдяки дронам, які можна використовувати в сільському господарстві.



Рисунок 1.3 – Камера дрона, що збирає яблука [32]

Дрони можуть навіть рахувати кількість яблук і збирати їх. У кожного дрона є присоска, а ще є очі і він бачить яблука як військову ціль. Кожен дрон має штучний інтелект, і він може вибрати серед яблук найстиглиші [7].



Рисунок 1.4 – Click & Grow Smart Garden 3 [33]

Розумний сад Click & Grow Smart Garden 3 – це інноваційне покоління смарт-горщиків, призначених для автономного догляду за вашими рослинами. Його завдання – контролювати процес росту рослин, водночас забезпечуючи їх достатньою кількістю води, освітлення і поживних речовин.

Уявіть собі: на розробку мінісаду Click & Grow виробника надихнули досягнення Агентства NASA. Інноваційна розробка компанії Click & Grow у вигляді розумного ґрунту Smart Soil робить горщики Grey по-справжньому унікальними. Завдяки нанотехнологіям у ґрунті ваші рослини отримують оптимальну кількість води, кисню та поживних речовин. Важливо відзначити, що для ґрунту в картриджах не використовуються пестициди, рослинні гормони або будь-які інші шкідливі для здоров'я людини речовини.

Click & Grow Smart Garden 3 складається з бази для вирощування з процесором, сенсорами і програмним забезпеченням, LED-фітолампи і трьох капсул з наноґрунтом. Головною перевагою розумної грядки «все-в-одному» є те, що ви можете розпочати вирощування рослин одразу після покупки гідропонного пристрою. Енергоефективна лампа з оновленими світлодіодами та елегантним дизайном забезпечує енергію для росту рослин навіть у несприятливих домашніх умовах [8].

Обладнання для теплиць взаємодіє як єдина система, здатна оптимально керувати усіма умовами для вирощування різноманітних рослин: зелені, овочів, ягід і пряних трав. Ця інтегрована система використовує ряд датчиків як свої особливі органи почуттів (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Промислові аеропонні труби [34]

В одній трубі знаходиться 70 отворів для рослин. Конструкція може бути горизонтальною для вирощування, наприклад, базиліка або руколи і вертикальною. Призначена для вирощування базиліка, руколи, помідорів, огірків, перцю, томатів, салату.

На 1 м² розміщується 4 вертикальних аеропонних труби (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Аеропонні труби для дому [34]

Одна труба містить 55 отворів для рослин. Конструкція встановлюється вертикально, що дозволяє встановити її навіть на невеликому балконі. У своїй

нижній частині аеропонна труба для дому має спеціальний вбудований піддон для рідини, яка використовується для поливу.

Призначена для вирощування помідорів, огірків, перцю, томатів, салату, ожини та малини.

Налічує 312 отворів для рослин, в які можливо засадити полуницю або пряні трави. Основа піраміди займає площу $1.1\text{м} \times 1.8\text{м} = 1.98 \text{ м}^2$. Це дуже оптимізоване використання робочої площі в теплиці (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Аеропона піраміда [34]

Всі конструкції відливають з харчового поліетилену високої якості, тому повністю екологічно безпечні для здоров'я людини. Крім цього, аеропонні піраміди і труби міцні та довговічні.

Ми використовуємо спеціальне добриво для аеропоніки фірми GHE. Даний продукт екологічний і містить оптимальний комплекс необхідних макро- і мікроелементів, що дозволяють удобрення адаптуватися до рослини під стадію їх зростання і вік. Додатки сприяють здоров'ю кореневої системи рослин, а це є запорукою їх прискореного зростання і відмінних смакових якостей продукту.

Перед тим, як потрапити в аеропонну піраміду або трубу, розсада повинна прорости до певної стадії. Цей процес проводиться не в ґрунті, а в спеціальній мінеральній ваті для рослин. Вона виготовляється при температурі

660 градусів Цельсія, що виключає наявність хвороб і бактерій, які можливі в ґрунті [9].

Огляд клімат-контролю Priva [17]. За допомогою автоматизації в садівництві можна зменшити витрати. Швидкий огляд звітів про стан дозволить контролювати рівень температури, вентиляції, екранів, вентиляторів, туману, освітлення, опалення та керування котлом. Іншими словами, система повинна мати можливість налаштовувати зрошення та добриво, а також встановлювати параметри для контролю клімату та систем водопостачання.

Для максимізації віддачі від сільськогосподарських систем та обладнання, обробний комп'ютер, який інтегрує всі дані про клімат та зрошення, стає важливою складовою частиною вирощування. Ця система повинна бути гнучкою й адаптивною до ваших потреб та змін, що можуть виникнути.

Системи Priva Nutri-line можуть працювати як автономний блок або бути централізовано керованими за допомогою "обробного комп'ютера" Priva, також відомого як "кліматичний регулятор" (рис. 1.8-1.9).

Це дозволяє ще глибше зв'язувати системи для взаємного контролю та керування параметрами, включаючи воду, склад добрив, клімат та використання енергії. Ця управлінська інформація забезпечує широкий огляд та можливості для прийняття оптимальних рішень на основі даних для ефективного сільськогосподарського виробництва.



Рисунок 1.8 – Інтерфейс додатку для контролю клімату Priva [35]



Рисунок 1.9 – Варіант інтерфейсу Priva для телефону [36]

Доступна інтегрована система екологічного контролю для малих і середніх підприємств.

Технологічний комп'ютер Priva Compass – це зручний стартовий комп'ютер, який може керувати зрошенням, кліматом, фотосинтезом, водою та енергією для чотирьох відсіків. Контролери компаса також можуть бути з'єднані через мережу, щоб розширити пропускну здатність за межі чотирьох відсіків.

Переваги, які пропонує система Priva:

- стартовий комп'ютер для малого та середнього вирощування;
- гнучкість: можна вибрати модулі та рівень, які потрібні;
- зрозумілі елементи керування за допомогою інформаційних панелей і графіків;
- локальна робота можлива через хмару або через Wi-Fi (віддалено);
- підходить для смартфонів, планшетів і ПК.

Розумний сад Click & Grow Smart Garden 3 є чудовим рішенням для вирощування свіжих трав, овочів та фруктів цілий рік, не виходячи з дому. Завдяки своїй компактності та зручності, він ідеально підходить для міських квартир, офісів та інших приміщень з обмеженим простором. Система автоматично регулює полив, освітлення та постачання поживних речовин,

забезпечуючи ідеальні умови для росту рослин без додаткових зусиль з вашого боку [1].

Одна з головних переваг Click & Grow Smart Garden 3 – це екологічність та відсутність шкідливих речовин. Використання розумного ґрунту Smart Soil на основі нанотехнологій дозволяє повністю відмовитися від пестицидів, гормонів та інших хімікатів, що робить вирощені в цій системі продукти абсолютно безпечними для споживання. Крім того, енергоефективна LED-лампа забезпечує необхідне освітлення з мінімальним споживанням електроенергії. Ще однією вагомою перевагою є простота використання. Click & Grow Smart Garden 3 не вимагає від вас спеціальних знань чи навичок у сфері садівництва. Все, що потрібно зробити – це розмістити капсули з наноґрунтом у базу та підключити пристрій до електромережі. Далі система автоматично візьме на себе всі турботи про рослини, забезпечуючи їх оптимальними умовами для зростання.

Для тих, хто цінує свіжі та екологічно чисті продукти, Click & Grow Smart Garden 3 стане ідеальним рішенням. Ви зможете вирощувати улюблені трави, овочі та фрукти просто у себе вдома, не витрачаючи багато часу та зусиль. Система забезпечить їх належним доглядом, а ви отримаєте задоволення від споживання свіжих та корисних продуктів, вирощених власноруч. Завдяки використанню передових технологій та інноваційних рішень, Click & Grow Smart Garden 3 є одним з найбільш ефективних та зручних способів вирощування рослин у домашніх умовах. Він дозволяє створити власний мінісад прямо на кухні чи в іншому приміщенні, забезпечуючи постійну наявність свіжих та поживних продуктів без зайвих клопотів.

Крім того, вирощування рослин за допомогою такої системи є чудовим способом залучити дітей до садівництва та прищепити їм любов до природи. Спостерігаючи за процесом зростання рослин, діти зможуть краще зрозуміти важливість турботи про навколишнє середовище та отримати цінні знання про вирощування їжі. Загалом, Click & Grow Smart Garden 3 є надзвичайно корисним та зручним пристроєм, який дозволить вам насолоджуватися смачними та поживними продуктами, вирощеними власноруч, незалежно від

пори року чи наявності городу. Ця система є ідеальним рішенням для тих, хто прагне вести здоровий спосіб життя та споживати екологічно чисті продукти, водночас заощаджуючи час та зусилля на догляд за рослинами.

2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ РОЗУМНОЇ ТЕПЛИЦІ

2.1 Загальна архітектура системи

Загальна архітектура системи керування мікрокліматом розумної теплиці має бути спроектована як масштабована, надійна та гнучка платформа, здатна інтегрувати різноманітні компоненти та підсистеми в єдине ціле. Ключовими елементами цієї архітектури є:

Мозок усієї системи, який відповідає за збирання даних від різноманітних датчиків, аналіз цих даних, прийняття рішень щодо необхідних дій та координацію роботи підсистем керування. Центральна система управління зазвичай реалізується у вигляді промислового комп'ютера або програмованого логічного контролера (ПЛК) з відповідним програмним забезпеченням.

Розгалужена мережа різноманітних датчиків, розташованих у стратегічних точках теплиці, забезпечує збір даних про поточний стан мікроклімату. Це можуть бути датчики температури, вологості, рівня CO₂, освітленості, якості повітря та інші залежно від специфічних потреб теплиці та вирощуваних культур. Як було описано раніше, система керування мікрокліматом складається з кількох спеціалізованих підсистем, таких як система регулювання температури, система керування вологістю, система керування рівнем CO₂, система освітлення тощо. Кожна з цих підсистем містить відповідні виконавчі механізми (нагрівачі, вентилятори, форсунки, освітлювальні прилади тощо) та контролери, які керують їхньою роботою відповідно до команд від центральної системи управління.

Для забезпечення ефективної взаємодії між різними компонентами системи необхідна надійна система зв'язку та передачі даних. Вона може бути реалізована за допомогою дротових або бездротових технологій, таких як Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee або спеціалізованих промислових протоколів зв'язку. Важливим аспектом є забезпечення безпеки та захисту даних від несанкціонованого доступу та потенційних кібератак. Для зручності моніторингу та керування системою потрібен зрозумілий та інтуїтивно

зрозумілий інтерфейс користувача. Він може бути реалізований у вигляді веб-інтерфейсу, мобільного додатку або спеціалізованої панелі керування, встановленої безпосередньо в теплиці або в пункті керування.

Вся інформація, зібрана від датчиків і підсистем, має зберігатися в базі даних або сховищі даних для подальшого аналізу та звітності. Це дозволить відстежувати історичні тренди, виявляти аномалії та оптимізувати процеси керування на основі фактичних даних. Для підвищення ефективності та розширення можливостей система керування мікрокліматом може бути інтегрована з іншими системами та сервісами, такими як системи прогнозування погоди, хмарні сервіси аналізу даних, системи керування ресурсами підприємства (ERP) тощо.

Важливою вимогою до архітектури системи є забезпечення високої надійності та відмовостійкості. Це може бути досягнуто шляхом дублювання критичних компонентів, використання резервних джерел живлення, постійного моніторингу стану системи та вбудованих механізмів самовідновлення.

Крім того, архітектура має бути масштабованою та гнучкою, щоб дозволити легке розширення чи модифікацію системи в майбутньому відповідно до зростаючих потреб або змін у технологіях. Це передбачає використання модульного підходу до проектування, відкритих стандартів та протоколів, а також можливості інтеграції нових компонентів або підсистем без значних змін в існуючій інфраструктурі.

Для забезпечення ефективної роботи системи керування мікрокліматом важливо також приділити належну увагу питанням безпеки та захисту даних. Це включає впровадження заходів кібербезпеки, таких як шифрування даних, автентифікація користувачів, контроль доступу, регулярне оновлення програмного забезпечення та моніторинг потенційних загроз.

Загалом, розробка ефективної архітектури системи керування мікрокліматом для розумної теплиці вимагає ретельного планування, вибору відповідних технологій та компонентів, а також інтеграції різних підсистем в єдину платформу. Це дозволить забезпечити оптимальні умови для росту

рослин, підвищити ефективність використання ресурсів, збільшити продуктивність та знизити вплив на навколишнє середовище.

2.2 Підсистема керування мікрокліматом

Ефективне керування мікрокліматом у теплиці є ключовим фактором для забезпечення оптимальних умов для росту та розвитку рослин. Мікроклімат включає в себе такі параметри, як температура, вологість повітря, рівень вуглекислого газу (CO_2), освітленість та якість повітря. Для керування цими параметрами необхідно розробити інтегровану систему, що складається з декількох підсистем.

Підсистема керування температурою та вентиляцією відповідає за підтримання оптимальної температури в теплиці. Вона включає в себе нагрівальні та охолоджувальні системи, вентиляційні системи, а також датчики температури, розташовані в різних зонах теплиці. Нагрівальна система може складатися з різноманітних джерел тепла, таких як газові або електричні нагрівачі, системи підлогового опалення або сонячні колектори. Охолоджувальна система може включати вентилятори, водяні форсунки для охолодження повітря шляхом випаровування води, системи затінення або теплообмінники [5].

Підсистема водіння вологістю забезпечує підтримку оптимального рівня вологості повітря для різних видів рослин та стадію їх розвитку. Вона складається з системи осушення повітря (осушувачі, форсунки для розпилення води) та осушення повітря (осушувачі, конденсаційні системи). Датчики вологості розташовані в різних зонах теплиці для моніторингу поточного рівня вологості та надання даних системи керування. Підсистема керування рівнем CO_2 відповідає за підтримку оптимальної концентрації вуглекислого газу в теплиці. Оскільки рослини споживають CO_2 для фотосинтезу, його рівень може знижуватися в закритих середовищах, що негативно впливає на рослини. Ця підсистема включає в себе систему подачі CO_2 (балони з газом або генератори CO_2), вентиляційну систему для регулювання концентрації, а також датчики

CO₂ для моніторингу поточного рівня. Підсистема управління освітою забезпечує оптимальні умови освіти для рослин, враховуючи їх потреби на різних стадіях розвитку. Вона включає в себе системи штучного освітлення (світлодіодні лампи, лампи належного спектрального складу), системи затінення (жалюзі, штори) та датчики освітленості для моніторингу рівня освітлення в різних зонах теплиці.

Підсистема моніторингу якості повітря відстежує рівень забруднюючих речовин, таких як етилен, озон, монооксид вуглецю та інші гази, які можуть негативно впливати на рослини. Вона включає в себе датчики якості повітря та може бути інтегрована з системою вентиляції для забезпечення належного повітрообміну. Усі ці підсистеми керування мікрокліматом повинні бути інтегровані в єдину систему керування з центральним контролером або комп'ютерною системою. центральний контролер буде отримувати дані від різноманітних датчиків, аналізувати їх та видавати команди для різних підсистем із призначенням підтримки заданих параметрів мікроклімату. Важливим аспектом є розробка ефективних алгоритмів керування, які можуть враховувати взаємозв'язки між різними параметрами мікроклімату та оптимізувати роботу підсистем для досягнення найкращих результатів з точки зору ефективності та раціонального використання ресурсів. Крім того, система керування мікрокліматом повинна забезпечувати можливість віддаленого моніторингу та керування через Інтернет або локальну мережу. Це дозволить операторам теплиць відстежувати стан і коригувати параметри з будь-якого місця, а також інтегрувати систему з іншими додатками та платформами для аналізу даних та прийняття рішень.

Для забезпечення безперервної роботи системи керування мікрокліматом необхідно передбачити наявність резервних джерел живлення (акумулятори, генератори) та систем зв'язку, а також вбудовані механізми відмовостійкості та самовідновлення. Ще одним важливим аспектом є забезпечення належного рівня безпеки системи, включаючи захист від несанкціонованого доступу, кібератак та випадкових збоїв. Це може бути досягнуто шляхом впровадження надійних протоколів захисту даних, автентифікації користувачів, регулярного

оновлення програмного забезпечення та моніторингу системи на наявність потенційних загроз.

Загалом, розробка ефективної системи керування мікрокліматом для розумної теплиці вимагає ретельного планування, вибору відповідних компонентів та інтеграції різних підсистем в єдину платформу. Це дозволить забезпечити оптимальні умови для росту рослин, підвищити ефективність використання ресурсів та знизити вплив на навколишнє середовище.

2.2.1 Система керування вологістю

Вологість повітря є одним з ключових параметрів мікроклімату в теплицях, який безпосередньо впливає на ріст та розвиток рослин. Занадто висока вологість може призвести до розвитку грибкових захворювань, утворення конденсату на рослинах та конструкціях теплиці, а також порушити процеси транспірації та газообміну рослин. З іншого боку, недостатня вологість може викликати в'янення рослин, зневоднення ґрунту та підвищити ризик пошкодження від шкідників [17].

Оптимальний рівень вологості в теплиці залежить від виду вирощуваних культур, їх стадії розвитку, температури, інтенсивності освітлення та інших факторів. Наприклад, для більшості овочевих культур оптимальний діапазон вологості становить 60-80%, тоді як для декоративних рослин цей діапазон може бути дещо вужчим – 50-70%. Під час періоду активного росту рослини потребують вищої вологості, ніж на стадії цвітіння чи дозрівання плодів.

Система керування вологістю в розумній теплиці повинна інтегрувати датчики вологості, розташовані в різних точках теплиці, для безперервного моніторингу рівня вологості повітря. Ці датчики можуть вимірювати відносну вологість, точку роси або інші показники, пов'язані з вмістом водяної пари в повітрі.

Підсистема підвищення вологості складається з форсунок для розпилення води: Mist Systems HygroMatik (різні моделі залежно від потужності) та Carel гама humiSonic (ультразвукові зволожувачі), зволожувачей повітря: Defensor

DBS (парові зволожувачі) та Condair RS (адіабатичні випарні зволожувачі), системи крапельного поливу: Netafim Dripnet PC (шланги для крапельного поливу) та Toro Micro-Spray (форсунки для розпилення).

Підсистема зниження вологості складається з вентиляторів: Munters EM50 (осьові вентилятори для теплиць) та Vostermans Multifan (відцентрові вентилятори), осушувачів повітря: Dantherm CDP 125 (компресорний осушувач), Seibu Giken DSF (адсорбційний осушувач) та Munters ML690 (абсорбційний осушувач), датчиків вологості: Vaisala HMD60 (ємнісний датчик), Honeywell HIH-4000 (резистивний датчик), E+E EE03 (термоелектричний датчик), контролерів та систем керування: Priva Connex (система керування мікрокліматом для теплиць), Hoogendoorn iSii (контролер для керування кліматом, поливом та добривами), Argus Controls (системи автоматизації для теплиць).

На основі даних від цих датчиків, система керування буде приймати рішення щодо активації відповідних підсистем для збільшення або зменшення вологості в теплиці. Для підвищення вологості найчастіше використовуються системи зволоження повітря, такі як форсунки для розпилення води, установки для випаровувального зволоження або системи зрошення. Форсунки для розпилення води створюють дрібнодисперсний туман, який підвищує вологість повітря в теплиці.

Цей метод є ефективним та дозволяє швидко збільшити вологість, але вимагає ретельного контролю для запобігання утворенню надлишкової вологи та конденсату на рослинах і конструкціях теплиці [16]. Установки для випаровувального зволоження використовують спеціальні матеріали, такі як целюлозні панелі або пластини, через які пропускається повітря. Ці матеріали зволожуються, і в процесі випаровування води з їхньої поверхні відбувається збільшення вологості повітря.

Цей метод є більш енергоефективним і дозволяє уникнути утворення надлишкової вологи, але може бути дещо повільнішим у досягненні потрібного рівня вологості. Системи зрошення, такі як крапельний полив або системи розпилення, також можуть використовуватися для підвищення вологості

повітря в теплиці. Оскільки вода випаровується з поверхні ґрунту або листя рослин, вона збільшує вміст водяної пари в повітрі. Однак цей метод може бути менш ефективним і має бути ретельно відрегульований, щоб уникнути надмірного зволоження ґрунту або рослин. Для зниження вологості в теплиці використовуються системи вентиляції та осушення повітря. Вентиляція здійснюється шляхом відкривання вікон, дверей або спеціальних вентиляційних отворів у стінах або даху теплиці, що дозволяє сухішому зовнішньому повітрю циркулювати всередині та витіснити вологе повітря.

Для підвищення ефективності вентиляції можуть використовуватися вентилятори, які забезпечують примусову циркуляцію повітря. Осушувачі повітря використовують різні фізичні та хімічні процеси, такі як конденсація, адсорбція або абсорбція, для видалення надлишкової вологи з повітря в теплиці. Ці пристрої можуть бути стаціонарними або пересувними, і їх потужність та продуктивність повинна відповідати розміру теплиці та швидкості утворення надлишкової вологи.

Система керування вологістю повинна бути тісно інтегрована з іншими підсистемами керування мікрокліматом, такими як система регулювання температури та система керування рівнем CO₂, оскільки ці параметри взаємопов'язані та можуть впливати один на одного. Наприклад, підвищення температури в теплиці може призвести до збільшення випаровування води та підвищення вологості, тоді як збільшення концентрації CO₂ може сприяти більш інтенсивній транспірації рослин і зниженню вологості. Крім того, сучасні системи керування вологістю мають можливість динамічного налаштування цільових діапазонів вологості залежно від виду культури, стадії росту рослин та зовнішніх кліматичних умов. Вони можуть інтегруватися з системами прогнозування погоди та аналітичними інструментами для передбачення потенційних змін вологості та своєчасного реагування.

Інтеграція з технологіями машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє системам керування вологістю аналізувати великі обсяги даних про мікроклімат, ріст рослин та ефективність використання ресурсів для виявлення оптимальних профілів вологості для різних культур та умов вирощування.

Алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для адаптивного налаштування рівнів вологості в режимі реального часу, враховуючи численні фактори та взаємозв'язки між різними параметрами мікроклімату.

Загалом, ефективна система керування вологістю в розумній теплиці є критично важливою для забезпечення оптимальних умов росту та розвитку рослин, підвищення продуктивності та ефективності використання ресурсів. Вона повинна бути гнучкою, автоматизованою, інтегрованою з іншими підсистемами керування мікрокліматом та здатною до адаптивного налаштування на основі аналізу даних та алгоритмів.

2.2.2 Система регулювання температури

Температура є одним з найважливіших параметрів мікроклімату в теплицях, який безпосередньо впливає на ріст, розвиток та врожайність рослин. Занадто високі або занадто низькі температури можуть викликати стрес у рослин, сповільнювати їх метаболізм, знижувати ефективність фотосинтезу та призводити до пошкоджень або навіть загибелі. Тому підтримання оптимальної температури в теплиці є критично важливим завданням для забезпечення максимальної продуктивності вирощування сільськогосподарських культур.

Система регулювання температури в розумній теплиці повинна включати як підсистему нагрівання, так і підсистему охолодження, які працюватимуть у тісній координації для підтримки заданого температурного діапазону. Крім того, ця система має бути інтегрована з іншими підсистемами керування мікрокліматом, такими як вентиляція та система управління вологістю, оскільки ці параметри тісно пов'язані та взаємно впливають один на одного [22].

Підсистема нагрівання відповідає за підвищення температури в теплиці у випадках, коли вона опускається нижче встановленого мінімального порогу. Найчастіше для цього використовуються теплові труби або повітряні нагрівачі, що працюють на різних видах палива, таких як природний газ, пропан або біомаса. Альтернативним джерелом тепла може бути геотермальна енергія або

система теплових насосів, яка використовує електроенергію для перенесення тепла з навколишнього середовища всередину теплиці.

Вибір оптимального джерела тепла зазвичай визначається кліматичними умовами, доступністю та вартістю різних видів палива, а також вимогами до ефективності та екологічності системи нагрівання. Наприклад, у регіонах з м'яким кліматом може бути достатньо використання теплових насосів, тоді як у холодніших регіонах може знадобитися більш потужна система опалення на твердому або газоподібному паливі [23].

Система керування повинна забезпечувати рівномірний розподіл тепла по всій площі теплиці, запобігаючи появі "холодних" або "гарячих" зон. Це може досягатися за допомогою спеціальних повітророзподільників, вентиляторів та інших пристроїв, що сприяють циркуляції повітря всередині теплиці. Підсистема охолодження, у свою чергу, відповідає за зниження температури в теплиці, коли вона перевищує встановлений максимальний поріг. Найпоширенішими методами охолодження є вентиляція, випаровувальне охолодження та система крапельного зрошення.

Вентиляція здійснюється шляхом відкривання вікон, дверей або спеціальних вентиляційних отворів у стінах або даху теплиці, що дозволяє циркулювати прохолодному зовнішньому повітрю всередині. Для підвищення ефективності вентиляції можуть використовуватися вентилятори, які забезпечують примусову циркуляцію повітря.

Випаровувальне охолодження базується на принципі випаровування води та поглинання тепла з навколишнього середовища під час цього процесу. Зазвичай воно здійснюється шляхом розпилення води або пропускання повітря через зволожені матеріали (наприклад, целюлозні панелі). Ця система ефективна в сухих кліматичних умовах, але може бути менш ефективною у вологих регіонах. Система крапельного зрошення також може використовуватися для охолодження теплиці. Вода розбризкується на рослини та поверхні теплиці, випаровуючись і поглинаючи тепло з повітря. Однак цей метод може збільшувати вологість повітря в теплиці, що може бути небажаним в деяких випадках.

Сучасні системи регулювання температури в розумних теплицях мають бути високоавтоматизованими та гнучкими, з можливістю динамічного налаштування цільових температурних діапазонів залежно від виду культури, стадії росту рослин та зовнішніх кліматичних умов. Вони повинні інтегрувати різноманітні датчики температури, розподілені по всій площі теплиці, для моніторингу та виявлення будь-яких "гарячих" або "холодних" зон [21] .

Крім того, важливою функцією є можливість прогнозування температурних змін на основі даних про зовнішні погодні умови та аналітичних моделей. Це дозволить системі керування завчасно вживати заходів для запобігання відхиленням температури від оптимального діапазону, замість реактивного реагування на вже виниклі зміни. Інтеграція з системами машинного навчання та штучного інтелекту також може значно підвищити ефективність керування температурою в теплицях. Алгоритми машинного навчання можуть аналізувати великі обсяги даних про мікроклімат, ріст рослин та споживання ресурсів для виявлення оптимальних температурних профілів для різних культур та стадій їх розвитку. Крім того, системи штучного інтелекту можуть використовуватися для прогнозування та адаптивного налаштування температурних режимів у режимі реального часу, враховуючи численні фактори та взаємозв'язки між різними параметрами мікроклімату.

Загалом, ефективна система регулювання температури в розумній теплиці повинна бути гнучкою, автоматизованою, інтегрованою з іншими підсистемами керування та здатною до адаптивного налаштування на основі аналізу даних та алгоритмів машинного навчання. Вона має забезпечувати рівномірний розподіл температури та своєчасне охолодження або нагрівання для підтримки оптимальних умов вирощування різних сільськогосподарських культур, максимізуючи врожайність та ефективність використання ресурсів у теплиці.

2.2.3 Система керування рівнем CO₂

Двоокис вуглецю (CO₂) відіграє критично важливу роль у процесі фотосинтезу рослин, забезпечуючи їх основним джерелом вуглецю для синтезу органічних сполук. Відповідно, підтримка оптимального рівня CO₂ в повітрі теплиці є одним із ключових завдань ефективного керування мікрокліматом. Занадто низький рівень CO₂ може призвести до сповільнення росту та зниження врожайності, тоді як надмірно високі концентрації можуть викликати стрес у рослин та негативно вплинути на їхній розвиток.

Для регулювання рівня CO₂ в теплицях використовуються різні підходи та технології. Найпоширенішим методом є підживлення атмосфери теплиці додатковим CO₂ з зовнішніх джерел. Це може здійснюватися шляхом спалювання викопного палива, такого як природний газ чи пропан, або використання промислових резервуарів зі зрідженим CO₂. Підживлення CO₂ зазвичай активується, коли концентрація CO₂ в теплиці опускається нижче заданого порогового значення, зазвичай в діапазоні 800-1200 частин на мільйон (ppm).

Альтернативним джерелом CO₂ може бути процес компостування або ферментації органічних відходів, який супроводжується виділенням вуглекислого газу. Цей підхід є більш екологічно стійким, оскільки він дозволяє переробляти відходи та одночасно збагачувати атмосферу теплиці CO₂. Однак він вимагає додаткової інфраструктури для збору та обробки органічних відходів, а також контролю над процесом ферментації для запобігання утворенню небажаних побічних продуктів.

Система керування рівнем CO₂ в розумній теплиці повинна інтегрувати датчики для безперервного моніторингу концентрації CO₂, а також актуатори (вентилятори, клапани тощо) для регулювання надходження додаткового CO₂ чи вентиляції теплиці. Ці компоненти мають бути підключені до центральної системи управління, яка аналізує дані та приймає рішення щодо необхідності підживлення чи вентиляції відповідно до заданих цільових значень рівня CO₂ та з урахуванням інших параметрів мікроклімату.

Крім підтримки оптимального рівня CO₂, система керування також повинна враховувати можливі ризики, пов'язані з надмірним підвищенням концентрації CO₂. Високі рівні CO₂ можуть негативно впливати на здоров'я людей, що працюють у теплицях, викликаючи задишку, головний біль та втому. Тому система має бути обладнана датчиками контролю безпеки та аварійною вентиляцією для запобігання накопиченню надмірних концентрацій CO₂ в атмосфері теплиці.

Визначення оптимальних діапазонів рівня CO₂ для різних культур та стадій їх розвитку є ключовим завданням для ефективного функціонування системи керування. Залежно від виду рослин, стадії росту, інтенсивності освітлення та інших факторів, потреби в CO₂ можуть значно варіюватися. Наприклад, для більшості овочевих культур оптимальний рівень CO₂ знаходиться в діапазоні 800-1200 ppm, тоді як для деяких декоративних рослин він може бути нижчим, близько 600-800 ppm. Під час періоду інтенсивного росту та цвітіння потреба в CO₂ зазвичай вища, ніж на стадії проростання чи дозрівання плодів [10].

Для вирішення цього завдання система керування може використовувати налаштовувані профілі та графіки регулювання рівня CO₂ для різних культур та етапів їх розвитку. Ці профілі можуть бути створені на основі наукових досліджень, емпіричних даних та досвіду вирощування конкретних культур. Система також може інтегруватися з іншими підсистемами керування мікрокліматом, такими як освітлення та полив, для узгодженого регулювання всіх параметрів відповідно до потреб рослин на різних стадіях. Крім того, система керування рівнем CO₂ може використовувати алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту для адаптивного налаштування рівнів CO₂ на основі аналізу фактичних даних про ріст рослин, продуктивність та інші показники. Це дозволить динамічно оптимізувати процес регулювання CO₂ для максимізації врожайності та ефективності використання ресурсів.

Важливо також враховувати взаємозв'язок між рівнем CO₂ та іншими параметрами мікроклімату, такими як температура, вологість і освітленість. Наприклад, підвищена температура може впливати на здатність рослин

поглинати CO₂, тому система керування повинна скоординовано регулювати всі ці параметри для створення оптимальних умов для фотосинтезу.

Загалом, ефективна система керування рівнем CO₂ в розумній теплиці є критично важливою для забезпечення максимальної продуктивності та ефективності процесів вирощування рослин. Вона повинна інтегрувати різноманітні датчики, актуатори, алгоритми управління та можливості адаптивного налаштування для підтримки оптимальних рівнів CO₂ з урахуванням потреб конкретних культур та стадій їх розвитку. Крім того, питання безпеки та взаємозв'язку з іншими параметрами мікроклімату також мають бути належним чином враховані для забезпечення стійкої та ефективної роботи всієї системи керування мікрокліматом розумної теплиці. Ефективне регулювання рівня CO₂ в теплиці вимагає ретельного планування та впровадження комплексної системи моніторингу та контролю. Одним із ключових компонентів такої системи є вибір відповідних датчиків для вимірювання концентрації CO₂ в повітрі теплиці.

Найпоширенішими типами датчиків CO₂ є недисперсійні інфрачервоні (NDIR) та електрохімічні. Датчики NDIR працюють на основі поглинання інфрачервоного випромінювання молекулами CO₂, що дозволяє точно вимірювати їх концентрацію. Вони відрізняються високою точністю, довговічністю та стабільністю показань. Електрохімічні датчики, в свою чергу, реагують на присутність CO₂ шляхом хімічної реакції, яка генерує електричний сигнал, пропорційний концентрації газу. Вони є дещо дешевшими, але можуть бути менш точними та мають обмежений термін служби [12].

Для забезпечення достовірного моніторингу рівня CO₂ в різних зонах теплиці необхідно встановити мережу датчиків, розташованих таким чином, щоб охопити всю площу. Кількість та розміщення датчиків залежить від розміру теплиці, розташування конструктивних елементів, а також особливостей розподілу повітряних потоків та мікрокліматичних зон.

Дані від датчиків CO₂ передаються до центральної системи керування, де вони аналізуються та порівнюються з цільовими значеннями концентрації CO₂, встановленими для конкретних культур та стадій їх розвитку. Якщо рівень CO₂

опускається нижче заданого порогу, система активує процес підживлення атмосфери теплиці додатковим CO₂. Для підживлення CO₂ можуть використовуватися різні джерела, такі як резервуари зі зрідженим CO₂, системи спалювання викопного палива або компостування органічних відходів. Вибір джерела залежить від доступності ресурсів, масштабу виробництва, а також вимог до екологічної стійкості та ефективності.

Системи подачі CO₂ обладнані клапанами, регуляторами тиску та іншими компонентами для контролю потоку газу та його рівномірного розподілу в атмосфері теплиці. Вентилятори та повітророзподільники забезпечують циркуляцію повітря та рівномірне розсіювання CO₂ в різних зонах теплиці. Важливо також передбачити систему аварійної вентиляції для запобігання накопиченню надмірних концентрацій CO₂, які можуть становити загрозу для здоров'я працівників. Ця система повинна автоматично активуватися у разі перевищення безпечних рівнів CO₂ і забезпечувати швидке провітрювання теплиці.

Для оптимізації процесу регулювання рівня CO₂ система керування може використовувати алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту. Ці алгоритми можуть аналізувати дані про концентрацію CO₂, параметри мікроклімату, стадії розвитку рослин та їх продуктивність, щоб виявляти закономірності та адаптивно налаштовувати цільові рівні CO₂ для максимізації врожайності. Наприклад, системи на основі нейронних мереж можуть "навчатися" на історичних даних та прогнозувати оптимальні рівні CO₂ для різних культур, враховуючи складні взаємозв'язки між CO₂, освітленням, температурою, вологістю та іншими факторами. Алгоритми підкріплюючого навчання можуть використовуватися для динамічного регулювання рівня CO₂ в режимі реального часу, максимізуючи певну цільову функцію, наприклад, приріст біомаси або врожайність [14].

Інтеграція систем керування рівнем CO₂ з іншими підсистемами керування мікрокліматом, такими як освітлення, полив та опалення, є ключовим аспектом для забезпечення узгодженого та ефективного функціонування всієї системи керування теплицею. Наприклад, регулювання

рівня CO₂ може бути скоординоване з режимами освітлення, оскільки інтенсивність світла впливає на здатність рослин поглинати CO₂ під час фотосинтезу. Крім того, система керування рівнем CO₂ може взаємодіяти з системами моніторингу стану рослин, такими як комп'ютерний зір або спектральний аналіз, щоб отримувати зворотний зв'язок про вплив різних рівнів CO₂ на ріст та розвиток рослин. Ця інформація може використовуватися для подальшого налаштування та оптимізації процесу регулювання CO₂.

Важливим аспектом є також забезпечення належного рівня безпеки та захисту системи керування рівнем CO₂. Оскільки ця система пов'язана з іншими підсистемами керування теплицею та може бути підключена до Інтернету для віддаленого моніторингу та управління, вона потенційно вразлива до кібератак та несанкціонованого доступу. Для мінімізації цих ризиків необхідно впроваджувати комплексні заходи кібербезпеки, такі як шифрування даних, автентифікація користувачів, регулярне оновлення програмного забезпечення та моніторинг мережевої активності. Також важливо забезпечити належне навчання персоналу з питань безпеки та дотримання відповідних протоколів та процедур.

2.3 Критерії та вимоги до системи керування мікрокліматом

Для забезпечення ефективної роботи системи керування мікрокліматом в розумній теплиці необхідно визначити чіткі критерії та вимоги, які враховуватимуть специфіку процесів вирощування рослин, особливості обладнання та технологій, а також цілі та пріоритети конкретної теплиці. Ці критерії та вимоги повинні охоплювати різні аспекти системи, такі як функціональність, продуктивність, надійність, безпека, масштабованість та інтеграція з іншими системами.

Функціональні вимоги передбачають моніторинг та контроль ключових параметрів мікроклімату, включаючи температуру, вологість повітря, рівень CO₂, освітленість та інші чинники, залежно від потреб конкретних культур. Система має автоматично регулювати роботу систем опалення, охолодження,

вентиляції, зволоження/осушення повітря, підживлення CO₂ та освітлення для підтримки оптимальних умов вирощування. Також необхідна інтеграція з системами поливу та живлення рослин для узгодженого керування всіма процесами вирощування. Збір та зберігання даних про параметри мікроклімату, стан рослин та споживання ресурсів є критично важливим для аналізу та оптимізації процесів. Система повинна надавати можливість віддаленого доступу та моніторингу через веб-інтерфейс або мобільний додаток, а також дозволяти налаштовувати цільові значення параметрів мікроклімату та встановлювати графіки для різних етапів вирощування та культур. Нарешті, інтеграція з системами раннього виявлення загроз (хвороби, шкідники) є важливою для швидкого реагування та вжиття заходів [11].

Вимоги до продуктивності включають швидке реагування на зміни параметрів мікроклімату та своєчасне регулювання систем керування, здатність обробляти та аналізувати великі обсяги даних в режимі реального часу для прийняття рішень, високу точність вимірювання та регулювання параметрів мікроклімату відповідно до встановлених цільових значень, а також ефективне використання ресурсів (енергія, вода, добрива) для оптимізації витрат та зменшення впливу на навколишнє середовище.

Надійність системи є критично важливою, тому необхідна стійкість до збоїв та відмов окремих компонентів системи (датчиків, актуаторів, серверів) з можливістю автоматичного відновлення роботи або переходу в безпечний режим. Резервування критичних компонентів та систем також є важливим для забезпечення безперервної роботи. Захист від несанкціонованого доступу, кібератак та порушень конфіденційності даних, а також регулярне технічне обслуговування та оновлення системи для усунення вразливостей та вдосконалення функціональності є невід'ємними вимогами до надійності [9].

Питання безпеки є пріоритетом, тому система повинна відповідати нормам та стандартам безпеки для обладнання, що використовується в теплицях (електрична безпека, вибухобезпека тощо), а також захищати персонал від небезпечних факторів, таких як висока температура, токсичні гази чи рухомі частини обладнання. Наявність систем аварійного зупинення та

переведення в безпечний режим у випадку виникнення надзвичайних ситуацій, а також контроль доступу та авторизація користувачів для запобігання несанкціонованому втручанню в роботу системи є обов'язковими вимогами безпеки.

Масштабованість та інтеграція є важливими аспектами, тому система повинна надавати можливість розширення для підтримки більшої кількості теплиць або збільшення площі вирощування, а також бути сумісною з різними апаратними та програмними платформами, відкритими стандартами та протоколами зв'язку для полегшення інтеграції з іншими системами. Інтеграція з системами управління ресурсами (водопостачання, енергопостачання), системами моніторингу навколишнього середовища та метеорологічними даними, а також можливість інтеграції з системами штучного інтелекту, машинного навчання та аналітики для покращення прийняття рішень та оптимізації процесів є бажаними функціями.

Зрештою, користувацький інтерфейс та зручність використання є важливими факторами успіху системи. Інтерфейс повинен бути зрозумілим та інтуїтивно зрозумілим для моніторингу та керування системою, з візуалізацією даних у вигляді графіків, діаграм та анімацій для кращого сприйняття інформації. Можливість налаштування сповіщень та оповіщень про критичні події або відхилення від заданих параметрів, підтримка різних мов інтерфейсу, а також наявність детальної документації, навчальних матеріалів та технічної підтримки є необхідними для забезпечення зручності використання системи [7].

2.4 Огляд технологій зв'язку та передачі даних для систем керування

Ефективна система керування мікрокліматом у розумній теплиці вимагає надійних та гнучких технологій для збору, передачі та обробки даних. Вибір оптимальних протоколів зв'язку, архітектури мережі та методів передачі даних є ключовим для забезпечення стійкої та масштабованої роботи системи. Розглянемо основні технології, які можуть бути застосовані у проектуванні систем керування мікрокліматом у розумних теплицях.

Протоколи зв'язку для Інтернету речей Основою систем керування розумними теплицями є технології Інтернету речей (IoT), які дозволяють інтегрувати різноманітні пристрої, датчики та виконавчі механізми в єдину мережу. Для забезпечення ефективної комунікації між компонентами системи використовуються спеціалізовані протоколи обміну даними, орієнтовані на потреби IoT.

Один з найпопулярніших протоколів – MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) - є легким та ефективним рішенням для передачі даних від пристроїв IoT до серверів або хмарних платформ. MQTT базується на архітектурі "видавець-підписник", де пристрої публікують дані в певні топіки, а інші пристрої або додатки можуть підписуватися та отримувати ці дані. Це дозволяє реалізувати гнучку та масштабовану комунікацію в системах розумних теплиць.

Іншим широко використовуваним протоколом є CoAP (Constrained Application Protocol), який був спеціально розроблений для пристроїв з обмеженими ресурсами, такими як датчики або виконавчі механізми. CoAP використовує простий HTTP-подібний інтерфейс та забезпечує ефективну передачу даних через мережі з високими втратами пакетів або затримками. Це робить його привабливим варіантом для застосування у віддалених або погано покритих сигналом теплицях.

Протокол LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) також знайшов широке застосування в IoT-системах розумних теплиць. LoRaWAN працює на частотах, що не потребують ліцензій, і дозволяє організувати масштабовані мережі бездротового зв'язку з великим радіусом дії (кілометри) та низьким енергоспоживанням кінцевих пристроїв. Це робить його підходящим варіантом для моніторингу та керування процесами у великих або розподілених теплицях.

Для передачі аудіо- та відеоданих, наприклад, для систем комп'ютерного зору або дистанційного моніторингу, можуть використовуватися протоколи, орієнтовані на потокову передачу, такі як RTSP (Real-Time Streaming Protocol) або WebRTC (Web Real-Time Communication) [15].

Вибір оптимального протоколу залежить від конкретних вимог та особливостей розумної теплиці, таких як необхідна швидкість передачі даних, енергоспоживання кінцевих пристроїв, покриття мережі, безпека передачі та сумісність з іншими компонентами системи. Проектування ефективної архітектури мережі є критично важливим для забезпечення надійної та масштабованої роботи системи керування мікрокліматом у розумних теплицях. Розглянемо основні топології мереж, які можуть бути застосовані у таких системах.

Зіркоподібна топологія: У такій архітектурі всі кінцеві пристрої (датчики, виконавчі механізми) підключаються безпосередньо до центрального вузла або шлюзу. Ця топологія є простою у реалізації та забезпечує централізований контроль і обробку даних. Однак, вона може бути вразливою до відмов центрального вузла та має обмеження у масштабованості. Зіркоподібна топологія добре підходить для невеликих або середніх теплиць з обмеженою кількістю пристроїв.

Ієрархічна (деревоподібна) топологія: У цій архітектурі кінцеві пристрої групуються у локальні підмережі, з'єднані через проміжні концентратори або шлюзи. Ця структура дозволяє створювати багаторівневі системи, де нижчі рівні відповідають за збір даних з локальних пристроїв, а верхні рівні здійснюють агрегацію, обробку та передачу даних на віддалені сервери. Ієрархічна топологія забезпечує кращу масштабованість, надійність та можливості декомпозиції системи, але вимагає ретельного проектування маршрутизації та управління з'єднаннями.

Mesh-топологія (мережа з взаємним зв'язком): У цій архітектурі кінцеві пристрої утворюють розподілену самоорганізовану та самовідновлювальну мережу, де кожен вузол може виступати як маршрутизатор для передачі даних інших пристроїв. Це дозволяє забезпечити високу надійність, покриття та масштабованість системи, оскільки навіть за відмови окремих вузлів решта мережі продовжує функціонувати. Mesh-топологія є особливо доцільною для великих розподілених теплиць або об'єктів з складною геометрією, де традиційні топології можуть мати проблеми з покриттям сигналом [13] .

Вибір оптимальної архітектури залежить від розмірів теплиці, кількості пристроїв, складності мережі, вимог до надійності, покриття та швидкості передачі даних. Гібридні архітектури, які поєднують елементи різних топологій, також можуть бути ефективним рішенням для складних систем керування мікрокліматом.

Враховуючи необхідність розподіленого розміщення датчиків та виконавчих механізмів у теплицях, бездротові технології передачі даних є важливим компонентом систем керування мікрокліматом. Розглянемо основні підходи до бездротової комунікації, які можуть бути застосовані у розумних теплицях.

Wi-Fi (IEEE 802.11): Wi-Fi – це широко поширена технологія бездротової передачі даних, яка забезпечує високу швидкість обміну інформацією на відносно невеликій відстані. Вона добре підходить для локальної передачі даних, наприклад, від датчиків до центрального контролера або шлюзу. Wi-Fi може використовуватись як для локальної мережі у межах теплиці, так і для підключення до глобальних мереж Інтернету.

Bluetooth та Bluetooth Low Energy (BLE): Bluetooth – це технологія бездротового зв'язку на коротких відстанях, яка використовується для низькошвидкісної передачі даних між пристроями. Bluetooth Low Energy – енергоефективна версія Bluetooth, спеціально розроблена для IoT-застосунків. BLE може бути корисним для організації бездротової взаємодії між датчиками, виконавчими механізмами та локальними контролерами у межах теплиці.

ZigBee та Thread: ZigBee – це набір високорівневих комунікаційних протоколів, заснованих на стандарті IEEE 802.15.4 для бездротових персональних мереж. Він орієнтований на енергоефективну передачу даних на невеликій відстані та добре підходить для застосувань IoT, включаючи системи моніторингу та керування в теплицях. Thread - це відкритий стандарт IP-орієнтованої бездротової mesh-мережі, сумісний з існуючими стандартами Інтернету речей. Він забезпечує надійну, безпечну та енергоефективну передачу даних, що робить його привабливим рішенням для систем керування розумними теплицями.

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network): LoRaWAN – це протокол бездротової передачі даних, який використовує LoRa (Long Range) модуляцію для забезпечення великого радіусу дії (до 15 км) та низького енергоспоживання. Ця технологія добре підходить для моніторингу та керування процесами у великих або розподілених теплицях, де традиційні бездротові мережі можуть мати проблеми з покриттям.

Стільникові мережі (4G/5G): широке впровадження мереж 4G та майбутнє 5G створюють нові можливості для бездротової передачі даних у системах розумних теплиць. Ці мережі забезпечують високу швидкість, низьку затримку та велике покриття, що дає змогу організовувати централізоване та віддалене керування процесами в теплицях, відеомоніторинг, передачу великих обсягів даних тощо. Використання стільникових мереж може бути особливо корисним для розподілених або віддалених об'єктів, де прокладення дротової інфраструктури є складним та дорогим.

Вибір оптимальної бездротової технології залежить від конкретних вимог системи, таких як необхідна швидкість передачі даних, радіус дії, енергоспоживання, безпека, сумісність з іншими компонентами тощо. Часто на практиці застосовується комбінація кількох бездротових технологій для створення гібридної мережі, що дозволяє поєднувати переваги різних підходів.

Методи передачі даних на основі дротових технологій Хоча бездротові рішення стають все більш поширеними, дротові технології все ще відіграють важливу роль у системах керування мікрокліматом розумних теплиць. Вони забезпечують високу надійність, безпеку та стабільність передачі даних, особливо для критично важливих компонентів системи.

Ethernet: Ethernet – це найпоширеніша дротова технологія передачі даних, яка використовується для організації локальних мереж. Вона забезпечує високу швидкість, надійність і підтримку стандартних мережевих протоколів, що робить її доцільним вибором для з'єднання центральних контролерів, серверів або шлюзів у системі керування мікрокліматом.

Польові шини: польові шини – це спеціалізовані промислові мережі, призначені для організації зв'язку між різними пристроями та контролерами на

виробництві. Приклади польових шин, які можуть застосовуватися у системах керування теплицями, включають:

Modbus (RTU або TCP/IP) – широко використовуваний протокол для систем автоматизації;

CAN (Controller Area Network) – протокол, орієнтований на високу надійність та детермінованість для критичних застосувань;

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) – швидка та детермінована Ethernet-орієнтована польова шина. Польові шини забезпечують надійний та детермінований обмін даними між компонентами системи керування, контролерами та виконавчими механізмами.

Оптоволоконні лінії зв'язку: Оптоволоконні кабелі можуть використовуватися для високошвидкісної передачі великих обсягів даних між центральними вузлами системи керування, серверами обробки даних або хмарними ресурсами. Оптоволокно забезпечує високу пропускну здатність, захищеність від електромагнітних перешкод та низькі втрати сигналу, що робить його придатним для застосувань, які потребують передачі великих обсягів даних, наприклад, відеомоніторинг, обробка зображень тощо [18].

Вибір між дротовими та бездротовими технологіями для передачі даних залежить від конкретних вимог системи, таких як необхідна пропускну здатність, надійність, безпека, відстань між компонентами, складність середовища та бюджет проекту. Часто застосовується комбінація дротових та бездротових рішень для створення гібридних систем, які поєднують переваги обох підходів.

Безпека та конфіденційність даних: забезпечення безпеки та конфіденційності даних є критично важливим для систем керування мікрокліматом у розумних теплицях. Ці системи обробляють великі обсяги чутливої інформації, такої як дані про стан рослин, споживання ресурсів, виробничі показники тощо. Несанкціонований доступ або витік такої інформації може завдати значної шкоди власникам теплиць.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ

3.1 Вибір компонентів та обладнання

Вибір правильних компонентів та обладнання є критично важливим для успішної реалізації системи керування мікрокліматом у теплицях. Від цього вибору залежать продуктивність, надійність, масштабованість та вартість системи. Тому необхідно ретельно проаналізувати наявні на ринку рішення та обрати найбільш оптимальні варіанти, які відповідають вимогам проекту.

Одним з ключових компонентів системи є центральний обчислювальний пристрій, який відповідає за збір, обробку та аналіз даних від датчиків, а також керування актуаторами та іншими підсистемами. Для цієї ролі можна розглянути використання одноплатних комп'ютерів, таких як Raspberry Pi або NVIDIA Jetson Nano. Ці пристрої забезпечують достатню обчислювальну потужність для запуску алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту, а також мають низьке енергоспоживання та компактний розмір, що робить їх зручними для впровадження у теплицях.

Крім центрального обчислювального пристрою, важливим компонентом є датчики для моніторингу параметрів мікроклімату. Для вимірювання температури та вологості повітря можна використовувати цифрові датчики, такі як DHT22 або BME280, які забезпечують високу точність та надійність. Для моніторингу рівня вуглекислого газу (CO₂) можна застосувати датчики на основі недисперсійної інфрачервоної спектроскопії (NDIR), наприклад, MH-Z19. Вимірювання освітленості може здійснюватися за допомогою фоторезисторів або цифрових датчиків освітленості, таких як BH1750.

Для контролю вологості ґрунту та рівня поживних речовин у ньому доцільно використовувати спеціалізовані датчики вологості ґрунту, наприклад, на основі вимірювання діелектричної проникності або електропровідності ґрунту. Популярними варіантами є датчики серії Watermark або Decagon.

Для управління системами опалення, вентиляції, зрошення та освітлення необхідно підібрати відповідні актуатори. Для опалення та вентиляції можна використовувати електричні приводи для регулювання роботи нагрівачів,

вентиляторів або відкривання/закривання вікон і кватирок. Для систем зрошення можна застосовувати електромагнітні клапани, які керують подачею води до крапельниць або розпилювачів. Для управління освітленням можна використовувати світлодіодні або інші типи ламп, підключених до реле або dimmer-пристроїв.

Важливим аспектом є вибір протоколів зв'язку для забезпечення комунікації між різними компонентами системи. Для з'єднання датчиків та актуаторів з центральним обчислювальним пристроєм можна використовувати дротові інтерфейси, такі як UART, I2C або SPI, або бездротові протоколи, наприклад, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee або LoRaWAN. Вибір залежатиме від розміру теплиці, відстаней між компонентами та вимог до енергоспоживання та швидкості передачі даних.

Для забезпечення можливості віддаленого моніторингу та керування системою необхідно інтегрувати її з мережею Інтернет. Це можна зробити за допомогою підключення центрального обчислювального пристрою до локальної мережі (наприклад, через Ethernet або Wi-Fi) та використання хмарних сервісів або створення власного веб-сервера.

Окрім апаратних компонентів, важливо також вибрати відповідне програмне забезпечення для розробки та реалізації алгоритмів керування, візуалізації даних та взаємодії з користувачами. Для одноплатних комп'ютерів, таких як Raspberry Pi, можна використовувати різноманітні мови програмування, такі як Python, C++, Java або Node.js, а також бібліотеки для машинного навчання, наприклад, TensorFlow, PyTorch або scikit-learn.

Під час вибору компонентів та обладнання необхідно також враховувати питання надійності, стійкості до впливу навколишнього середовища (вологість, температура, пил тощо), вартості та доступності технічної підтримки від виробників. Важливо обирати компоненти від відомих і надійних постачальників, які забезпечують якісну технічну документацію та підтримку.

Крім того, слід передбачити можливість масштабування системи для теплиць різних розмірів та конфігурацій. Це може вимагати використання

модульної архітектури, яка дозволяє легко додавати або видаляти компоненти без необхідності повної переробки системи.

Ретельний вибір компонентів та обладнання є критично важливим для забезпечення ефективної роботи системи керування мікрокліматом у теплицях. Необхідно врахувати вимоги до продуктивності, надійності, масштабованості, вартості та сумісності з іншими компонентами системи. Правильний вибір забезпечить стійку та оптимальну роботу системи, що сприятиме підвищенню ефективності вирощування рослин у теплицях.

3.2 Розробка алгоритмів керування

Розробка ефективних алгоритмів керування є ключовим компонентом для забезпечення оптимального мікроклімату в теплиці та підвищення продуктивності вирощування рослин. Ці алгоритми мають аналізувати дані, отримані від різноманітних датчиків, та приймати рішення щодо регулювання систем опалення, вентиляції, зрошення, освітлення тощо з метою створення ідеальних умов для росту культур.

Одним з підходів до розробки алгоритмів керування є використання традиційних методів, таких як правила та логіка. Наприклад, можна визначити певні порогові значення для температури, вологості та рівня CO₂, при досягненні яких система буде вмикати або вимикати опалення, вентиляцію чи активувати зрошення. Ці правила можуть бути розроблені на основі наукових досліджень та досвіду фахівців у галузі вирощування рослин. Проте, такий підхід може бути недостатньо гнучким та не враховувати всіх факторів, що впливають на оптимальні умови вирощування. Тому більш перспективним є використання методів машинного навчання та штучного інтелекту для розробки інтелектуальних алгоритмів керування.

Одним з можливих підходів є застосування алгоритмів регресії або класифікації для прогнозування оптимальних значень параметрів мікроклімату на основі даних про стан рослин, фазу їх розвитку, зовнішні чинники тощо. Наприклад, можна використовувати регресійні методи, такі як лінійна регресія,

дерева рішень або нейронні мережі, для прогнозування оптимальної температури та вологості повітря на основі даних про вік рослин, освітленість, рівень CO₂ та інших факторів.

Іншим підходом є застосування алгоритмів підкріплюваного навчання (reinforcement learning), де система керування мікрокліматом розглядається як агент, який взаємодіє з навколишнім середовищем (теплицею) та отримує винагороди за досягнення бажаних результатів (наприклад, високої врожайності та якості продукції). Система навчається приймати оптимальні рішення щодо регулювання систем опалення, вентиляції, зрошення тощо на основі отриманих винагород та накопиченого досвіду. Перевагою методів машинного навчання є їхня здатність адаптуватися до змін умов та виявляти складні закономірності в даних, які можуть бути непомітними для традиційних алгоритмів. Однак, для ефективного навчання цих алгоритмів необхідно мати великі обсяги якісних даних про стан мікроклімату, ріст рослин та результати врожайності.

Одним із способів отримання таких даних є проведення експериментів у контрольованих умовах теплиць, де різні параметри мікроклімату змінюються відповідно до певних сценаріїв, а результати ретельно документуються. Ці дані можуть бути використані для навчання моделей машинного навчання, які згодом будуть застосовуватися в реальних умовах вирощування. Крім того, можна використовувати дані з існуючих досліджень, наукової літератури та баз даних, що стосуються вимог до мікроклімату для різних видів культур. Ці дані можуть бути інтегровані з даними, зібраними безпосередньо в теплицях, для створення більш повних та точних моделей.

Важливим аспектом розробки алгоритмів керування є врахування специфічних вимог до різних видів культур та стадій їх розвитку. Наприклад, умови вирощування для молодих рослин можуть відрізнятися від умов, необхідних для дозрівання плодів чи квітів. Тому алгоритми повинні бути гнучкими та здатними адаптуватися до цих змін. Крім того, необхідно передбачити можливість розширення та вдосконалення алгоритмів у майбутньому, оскільки з'являтимуться нові дані та досвід. Це можна

забезпечити шляхом використання модульної архітектури програмного забезпечення та відкритих стандартів для обміну даними та інтеграції з іншими системами.

Загалом, розробка ефективних алгоритмів керування є складним завданням, яке вимагає поєднання наукових знань у галузі вирощування рослин, досвіду фахівців, великих обсягів якісних даних та сучасних методів машинного навчання та штучного інтелекту. Однак успішна реалізація таких алгоритмів може значно підвищити продуктивність та ефективність вирощування рослин у теплицях, забезпечуючи оптимальні умови для їхнього розвитку.

3.3 Програмна реалізація

Для практичної реалізації системи керування мікрокліматом розумної теплиці необхідно ретельно спроектувати архітектуру системи, вибрати відповідні компоненти та технології, а також забезпечити належну інтеграцію всіх підсистем. У цьому розділі буде описано деталі реалізації запропонованої системи, включаючи апаратні та програмні компоненти, протоколи зв'язку, алгоритми керування та інтерфейси взаємодії з користувачем.

Структурна схема «Розумної теплиці» наведена на рисунку 3.1.

Архітектура системи керування мікрокліматом базується на використанні мікроконтролера в якості центрального вузла, до якого підключаються різноманітні датчики та виконавчі пристрої (актуатори). Для забезпечення гнучкості та масштабованості системи було обрано мікроконтролер ESP32 з вбудованим модулем Wi-Fi та підтримкою різних протоколів зв'язку, таких як I2C, SPI та UART.

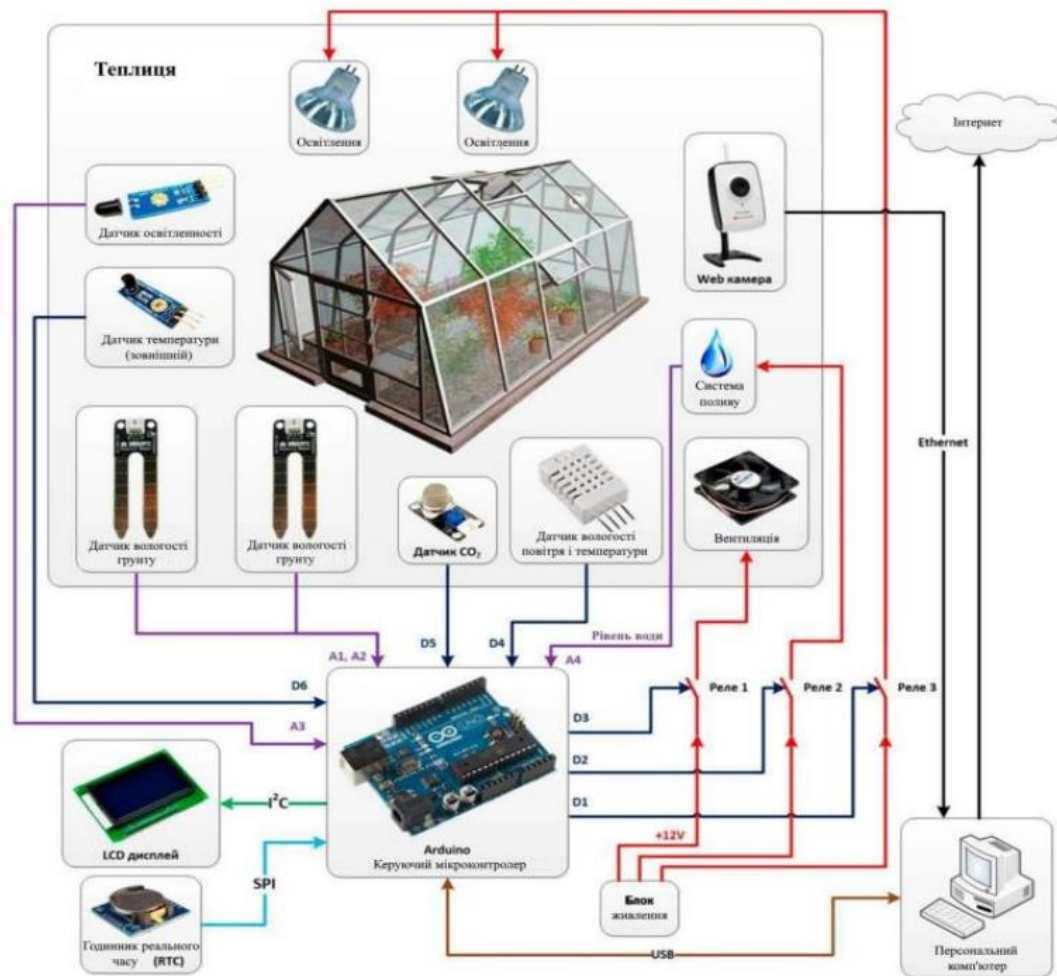


Рисунок 3.1 – Структурна схема «Розумної теплиці» [37]

Підсистема моніторингу мікроклімату складається з наступних датчиків:

- датчик температури та вологості повітря DHT22 (протокол зв'язку: One Wire);
- датчик освітленості BH1750 (протокол зв'язку: I2C);
- датчик вуглекислого газу MH-Z14A (протокол зв'язку: UART);
- датчик вологості ґрунту FC-28 (аналоговий вихід).

Ці датчики забезпечують збір даних про ключові параметри мікроклімату, такі як температура, вологість повітря, освітленість, концентрація CO₂ та вологість ґрунту. Дані з датчиків передаються на мікроконтролер для обробки та аналізу [25].

Підсистема керування мікрокліматом реалізована за допомогою наступних актуаторів:

- реле для керування системою опалення/охолодження;

- реле для керування системою зволоження/осушення;
- реле для керування системою провітрювання;
- драйвер двигуна для керування жалюзі/штор.

За допомогою цих актуаторів система може регулювати температуру, вологість повітря, рівень вуглекислого газу та освітленість у теплиці відповідно до заданих значень або алгоритмів керування.

Для забезпечення зв'язку та передачі даних між компонентами системи було обрано протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Цей протокол базується на моделі видавець-підписник та забезпечує надійну, економну та масштабовану передачу даних між пристроями через брокер MQTT.

Перед розробкою коду важливо зрозуміти вимоги та цілі проекту. У цьому випадку ми розглядаємо систему керування мікрокліматом розумної теплиці, яка має забезпечувати моніторинг та регулювання різних параметрів, таких як температура, вологість повітря, освітленість, вологість ґрунту та концентрація вуглекислого газу (CO₂).

Основні компоненти системи:

- датчики: для збору даних про стан мікроклімату в теплиці використовуватимуться датчики температури та вологості повітря, датчик освітленості, датчик вологості ґрунту та датчик концентрації CO₂;
- актуатори: для регулювання параметрів мікроклімату використовуватимуться актуатори, такі як система опалення/охолодження, система зволоження/осушення, система провітрювання, система керування жалюзі та система зрошення ґрунту;
- центральний вузол керування: центральним вузлом керування буде мікроконтролер або одноплатний комп'ютер (наприклад, Raspberry Pi), який буде отримувати дані з датчиків, обробляти їх, застосовувати алгоритми керування та надсилати команди актуаторам;
- база даних: для зберігання історичних даних з датчиків та аналізу тенденцій використовуватиметься база даних, наприклад, SQLite;

– інтерфейс користувача: для зручного моніторингу та керування системою буде розроблено користувацький інтерфейс, наприклад, у вигляді мобільного додатка або веб-інтерфейсу.

```
import sqlite3
import random
import time
```

Тут ми імпортуємо необхідні бібліотеки: `sqlite3` для роботи з базою даних SQLite, `random` для генерації випадкових даних імітації датчиків та `time` для роботи з часом.

```
# Створення з'єднання з базою даних SQLite
conn = sqlite3.connect('greenhouse_data.db')
c = conn.cursor()
# Створення таблиці для зберігання даних з датчиків
c.execute("""CREATE TABLE IF NOT EXISTS sensor_data
          (timestamp REAL, temperature REAL, humidity REAL, light REAL,
          soil_moisture REAL, co2 REAL)""")
```

У цьому блоці коду ми створюємо з'єднання з базою даних SQLite та ініціалізуємо курсор для виконання SQL-запитів. Крім того, ми створюємо

```
# Функція для імітації отримання даних з датчиків
def get_sensor_data():
    temperature = random.uniform(15, 30)
    humidity = random.uniform(40, 80)
    light = random.uniform(500, 10000)
    soil_moisture = random.uniform(20, 60)
    co2 = random.uniform(400, 1000)
    return temperature, humidity, light, soil_moisture, co2
```

Функція `get_sensor_data` імітує отримання даних з датчиків, генеруючи випадкові значення для температури, вологості повітря, освітленості, вологості ґрунту та концентрації CO₂ у реалістичних діапазонах.

```
# Функція для зберігання даних з датчиків у базі даних
```

```
def store_sensor_data(timestamp, temperature, humidity, light, soil_moisture,
co2):
    c.execute("INSERT INTO sensor_data VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?)",
              (timestamp, temperature, humidity, light, soil_moisture, co2))
    conn.commit()
```

Функція `store_sensor_data` зберігає отримані дані з датчиків у таблиці `sensor_data` у базі даних.

Функція для імітації керування актуаторами

```
def control_actuators(temperature, humidity, light, soil_moisture, co2):
    # Логіка керування актуаторами на основі даних з датчиків
    # Імітація керування актуаторами
    print(f"Температура:          {temperature:.1f}°C,          керування
опаленням/охолодженням")
    print(f"Вологість          повітря:          {humidity:.1f}%,          керування
зволоженням/осушенням")
    print(f"Освітленість: {light:.0f} лк, керування жалюзі")
    print(f"Вологість ґрунту: {soil_moisture:.1f}%, керування зрошенням")
    print(f"Концентрація CO2: {co2:.0f} ppm, керування провітрюванням")
```

Функція `control_actuators` імітує керування актуаторами на основі отриманих даних з датчиків. У реальному випадку тут повинна бути логіка керування актуаторами, але в цьому прикладі ми просто виводимо на екран імітовані дії керування.

Цикл отримання даних з датчиків та керування актуаторами

```
while True:
    timestamp = time.time()
    temperature, humidity, light, soil_moisture, co2 = get_sensor_data()
    store_sensor_data(timestamp, temperature, humidity, light, soil_moisture,
co2)

    control_actuators(temperature, humidity, light, soil_moisture, co2)
    time.sleep(5) # Затримка 5 секунд перед наступною ітерацією
```

Цей блок коду реалізує нескінченний цикл, у якому виконуються наступні дії:

- отримуємо поточний час за допомогою `time.time()`;
- викликаємо функцію `get_sensor_data` для імітації отримання даних з датчиків;
- зберігаємо отримані дані з датчиків у базі даних за допомогою функції `store_sensor_data`;
- викликаємо функцію `control_actuators`, передаючи їй отримані дані з датчиків, для імітації керування актуаторами;
- робимо затримку 5 секунд перед наступною ітерацією циклу за допомогою `time.sleep(5)`.

Закриття з'єднання з базою даних

`conn.close()`

Наприкінці коду ми закриваємо з'єднання з базою даних за допомогою методу `conn.close()`. У результаті роботи коду маємо такі результати (рис.3.2).

```
Температура: 22.7°C, керування опаленням/охолодженням
Вологість повітря: 79.5%, керування зволоженням/осушенням
Освітленість: 5599 лк, керування жалюзі
Вологість ґрунту: 34.5%, керування зрошенням
Концентрація CO2: 947 ppm, керування провітрюванням
```

Рисунок 3.2 – Результати роботи застосунку

3.4 Інтеграція підсистем

Для забезпечення ефективної роботи системи керування мікрокліматом необхідно ретельно інтегрувати всі її компоненти та підсистеми. Інтеграція включає в себе фізичне з'єднання апаратних компонентів, налаштування протоколів зв'язку, розробку програмного забезпечення для керування та обміну даними між підсистемами, а також створення користувацьких інтерфейсів для моніторингу та керування системою.

Першим кроком інтеграції є фізичне з'єднання датчиків та актуаторів з центральним обчислювальним пристроєм, таким як Raspberry Pi або NVIDIA

Jetson Nano. Залежно від типу датчиків та актуаторів, а також їх відстані від центрального пристрою, можна використовувати дротові інтерфейси (UART, I2C, SPI) або бездротові протоколи зв'язку (Bluetooth Low Energy, ZigBee, LoRaWAN). Вибір інтерфейсу зв'язку залежить від багатьох факторів, таких як швидкість передачі даних, енергоспоживання, відстань та стійкість до перешкод.

Після фізичного з'єднання компонентів необхідно налаштувати протоколи зв'язку та забезпечити надійну передачу даних між ними. Це може бути реалізовано за допомогою відповідних бібліотек та драйверів для обраних протоколів зв'язку. Наприклад, для з'єднання з датчиками через UART можна використовувати бібліотеку PySerial у Python, а для I2C або SPI - бібліотеки smbus або spidev відповідно. Наступним важливим кроком є розробка програмного забезпечення для керування підсистемами та обміну даними між ними. Це включає в себе реалізацію алгоритмів керування, обробку даних з датчиків, генерацію команд для актуаторів, а також інтеграцію з базами даних та хмарними сервісами для зберігання та аналізу даних.

Для забезпечення ефективної комунікації між підсистемами доцільно використовувати асинхронні механізми обміну повідомленнями, такі як черги повідомлень або брокери повідомлень. Популярним рішенням є використання протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), який забезпечує надійну та економну передачу даних між пристроями через брокер MQTT.

Інтеграція з хмарними сервісами та базами даних дозволяє зберігати історичні дані про стан мікроклімату, аналізувати тенденції та приймати більш обґрунтовані рішення щодо керування системою. Для цього можна використовувати локальні бази даних, такі як SQLite або PostgreSQL, або хмарні сховища даних, наприклад, Firebase Realtime Database або Amazon DynamoDB.

Важливим аспектом є створення користувацьких інтерфейсів для моніторингу та керування системою. Це можуть бути веб-інтерфейси, мобільні додатки або локальні інтерфейси, розміщені безпосередньо на центральному обчислювальному пристрої. Користувацькі інтерфейси повинні забезпечувати

зручну візуалізацію даних з датчиків у режимі реального часу, а також надавати можливість налаштовувати параметри керування та отримувати повідомлення про критичні ситуації.

Для розробки користувацьких інтерфейсів можна використовувати різноманітні технології та фреймворки, такі як React, Angular або Vue.js для веб-додатків, Flutter або React Native для мобільних додатків, або бібліотеки для створення графічних інтерфейсів на Raspberry Pi, наприклад, PyQT або Kivy.

Під час інтеграції підсистем важливо також враховувати питання безпеки та захисту даних. Необхідно забезпечити належний захист від несанкціонованого доступу до системи, шифрування даних під час передачі та зберігання, а також впровадити механізми аутентифікації та авторизації користувачів.

Крім того, слід передбачити можливість масштабування системи в майбутньому. Це може включати додавання нових датчиків або актуаторів, інтеграцію з додатковими системами (наприклад, системами управління енергоспоживанням або автоматизації будинку), а також розширення функціональності програмного забезпечення та користувацьких інтерфейсів.

Успішна інтеграція всіх підсистем є ключовим фактором для забезпечення ефективної роботи системи керування мікрокліматом у теплицях. Ретельне планування, вибір відповідних технологій та протоколів зв'язку, розробка якісного програмного забезпечення та створення зручних користувацьких інтерфейсів дозволяють досягти оптимального балансу між продуктивністю, надійністю та зручністю використання системи.

Регулярне технічне обслуговування, оновлення програмного забезпечення та апаратних компонентів, а також постійний моніторинг роботи системи є необхідними для забезпечення її стабільної та безперебійної роботи протягом тривалого часу. Крім того, важливо залучати фахівців у галузі вирощування рослин для налаштування та оптимізації алгоритмів керування відповідно до вимог конкретних культур та умов вирощування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Методологія дослідження

Методологія дослідження є ключовим елементом у розробці ефективної системи керування мікрокліматом для розумної теплиці. Вона визначає структурований підхід до вирішення поставлених завдань та досягнення цілей проекту. У контексті створення інноваційних рішень для сільського господарства, методологія повинна бути гнучкою, адаптивною та орієнтованою на практичне застосування.

Основною метою обраної методології є забезпечення систематичного процесу дослідження, розробки та впровадження системи керування мікрокліматом, яка відповідає сучасним вимогам ефективності, надійності та екологічної стійкості. Методологія враховує міждисциплінарний характер проекту, який поєднує елементи агрономії, інженерії, інформаційних технологій та екології.

Важливим аспектом методології є її орієнтація на принципи сталого розвитку та циркулярної економіки. Це передбачає не лише оптимізацію використання ресурсів у теплиці, але й мінімізацію відходів, зменшення вуглецевого сліду та створення замкнених циклів виробництва. Методологія також враховує потребу в гнучкості та масштабованості розробленого рішення, щоб воно могло бути адаптоване до різних типів теплиць та сільськогосподарських культур.

Інноваційність підходу полягає у використанні передових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання та Інтернет речей, для створення інтелектуальної системи керування, здатної не лише реагувати на поточні умови, але й прогнозувати та попереджати потенційні проблеми.

Для досягнення поставленої мети буде використано комплексний підхід, який включає:

- аналіз літератури та існуючих рішень у сфері "розумних теплиць" для визначення кращих практик та технологій;

- розробку концептуальної моделі системи керування мікрокліматом на основі визначених вимог та обмежень;
- проектування та реалізацію компонентів системи, включаючи апаратну та програмну частини;
- модульне та інтеграційне тестування розробленої системи в лабораторних умовах;
- оцінку ефективності розробленого рішення та визначення напрямків для подальшого вдосконалення.

Одним з перших кроків дослідження буде ретельний аналіз існуючої літератури та рішень у сфері розумних теплиць. Це дозволить визначити поточний стан розвитку технологій, виявити кращі практики та підходи, а також зрозуміти основні виклики та обмеження. Огляд літератури охоплюватиме наукові публікації, звіти галузевих організацій, технічну документацію виробників устаткування та інші релевантні джерела.

На основі зібраної інформації буде розроблена концептуальна модель системи керування мікрокліматом розумної теплиці. Ця модель визначатиме основні компоненти системи, їх функції та взаємозв'язки, а також враховуватиме специфічні вимоги та обмеження, пов'язані з конкретним застосуванням. Концептуальна модель слугуватиме основою для подальшого проектування та реалізації системи. Наступним етапом буде проектування та реалізація окремих компонентів системи керування мікрокліматом. Це включатиме вибір відповідних датчиків та актуаторів, розробку апаратної частини (наприклад, плат мікроконтролерів, модулів зв'язку тощо), а також створення програмного забезпечення для збору даних, аналізу та прийняття рішень.

Під час проектування апаратної частини системи буде приділена особлива увага таким аспектам, як енергоефективність, надійність, масштабованість та сумісність з існуючими стандартами та протоколами. Використання сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та бездротових мереж передачі даних, дозволить забезпечити гнучкість та легке розширення системи в майбутньому.

Розробка програмного забезпечення охоплюватиме створення алгоритмів для збору та обробки даних з датчиків, реалізацію стратегій керування мікрокліматом на основі встановлених цілей та обмежень, а також розробку зручного інтерфейсу для моніторингу та керування системою. Програмне забезпечення буде спроектоване з урахуванням вимог модульності, гнучкості та масштабованості, що дозволить легко додавати нові функції та інтегрувати додаткові компоненти в майбутньому. Після завершення проектування та реалізації окремих компонентів, наступним кроком буде їх інтеграція в єдину злагоджену систему керування мікрокліматом. Це включатиме тестування взаємодії між різними компонентами, налаштування параметрів системи та усунення будь-яких виявлених недоліків або конфліктів.

На етапі модульного та інтеграційного тестування буде проведена ретельна перевірка функціональності та продуктивності системи в лабораторних умовах. Це включатиме імітацію різних сценаріїв роботи, тестування реакції системи на різні вхідні дані та перевірку точності та своєчасності регулювання мікроклімату. Результати тестування будуть ретельно проаналізовані, а виявлені недоліки чи проблеми будуть усунуті шляхом внесення необхідних змін у проект.

Після успішного завершення лабораторних випробувань, наступним кроком буде оцінка ефективності розробленого рішення в реальних умовах експлуатації. Для цього система керування мікрокліматом буде встановлена в діючій теплиці, і її продуктивність буде порівнюватися з традиційними методами керування. Ця оцінка охоплюватиме такі аспекти, як точність підтримання заданих параметрів мікроклімату, ефективність використання ресурсів (води, енергії тощо), вплив на врожайність та якість культур, а також загальну економічну ефективність.

На основі результатів оцінки ефективності та зібраного під час експлуатації зворотного зв'язку від користувачів, будуть визначені напрямки для подальшого вдосконалення та розвитку системи керування мікрокліматом. Це може включати оптимізацію алгоритмів керування, додавання додаткових функцій (наприклад, прогнозування врожаю, виявлення хвороб рослин тощо),

інтеграцію з іншими системами управління або вдосконалення інтерфейсу користувача. Комплексний підхід, що поєднує ретельний аналіз існуючих рішень, проектування та реалізацію компонентів системи, тестування в лабораторних та реальних умовах, а також постійне вдосконалення на основі зібраного зворотного зв'язку, забезпечить розробку ефективного та надійного рішення для керування мікрокліматом розумної теплиці.

4.2 Опис експериментальної установки

Для проведення експериментальних досліджень та оцінки ефективності розробленої системи керування мікрокліматом була створена спеціальна експериментальна установка, що імітує умови роботи реальної розумної теплиці. Ця установка дозволяє ретельно протестувати всі компоненти системи, а також перевірити точність і надійність алгоритмів керування в контрольованому середовищі.

Експериментальна установка складається з кількох основних елементів: камери з регульованим мікрокліматом, системи датчиків, виконавчих механізмів (актуаторів), центрального обчислювального пристрою та користувацького інтерфейсу.

Камера з регульованим мікрокліматом являє собою ізольовану конструкцію розміром 3 x 2 x 2 метри, виготовлену з міцних панелей із пінополіуретану. Ця камера має систему опалення та охолодження, систему зволоження та осушення повітря, а також систему освітлення з регульованою інтенсивністю. Завдяки цим системам всередині камери можна імітувати різноманітні кліматичні умови, характерні для реальних теплиць.

Система датчиків включає в себе високоточні датчики температури та вологості повітря, датчики освітленості, датчики вологості ґрунту та датчики концентрації вуглекислого газу. Ці датчики розміщені в різних точках камери, що дозволяє отримувати точні та репрезентативні дані про мікроклімат. Датчики підключені до центрального обчислювального пристрою за допомогою дротових або бездротових інтерфейсів зв'язку.

Виконавчі механізми (актуатори) складаються з різноманітних пристроїв, які використовуються для регулювання мікрокліматичних параметрів усередині камери. Серед них є електроприводи для відкривання та закривання жалюзі або штор, електричні нагрівачі та охолоджувачі, вентилятори для циркуляції повітря, система зрошення ґрунту та система зволоження повітря.

Центральним обчислювальним пристроєм експериментальної установки є потужний одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B з 8 ГБ оперативної пам'яті. Цей пристрій відповідає за збір даних з датчиків, обробку цих даних, застосування алгоритмів керування мікрокліматом та надсилання команд актуаторам. На Raspberry Pi встановлена операційна система Linux та спеціально розроблене програмне забезпечення для керування системою.

Для зберігання історичних даних про мікроклімат та параметри керування використовується локальна база даних SQLite, яка розміщена на Raspberry Pi. Ці дані можуть бути використані для аналізу тенденцій, оптимізації алгоритмів керування та виявлення потенційних проблем.

Користувацький інтерфейс системи керування мікрокліматом реалізований у вигляді веб-додатку, який може бути доступний як локально, так і через Інтернет. Він дозволяє користувачам переглядати поточний стан мікроклімату всередині камери в режимі реального часу, встановлювати цільові значення для різних параметрів, налаштовувати алгоритми керування та отримувати сповіщення про критичні ситуації.

Для забезпечення безпеки та захисту даних, експериментальна установка має кілька рівнів захисту. По-перше, доступ до веб-інтерфейсу захищений системою автентифікації з використанням надійних паролів. По-друге, з'єднання між веб-інтерфейсом та Raspberry Pi захищене за допомогою шифрування SSL/TLS. Крім того, база даних SQLite захищена паролем, а резервні копії даних регулярно створюються та зберігаються в захищеному сховищі.

Експериментальна установка також має можливість інтегруватися з хмарними сервісами для збору та аналізу даних, а також для віддаленого моніторингу та керування системою. Для цього використовуються стандартні

протоколи і технології, такі як MQTT, WebSockets та REST API. Завдяки ретельно спроектованій та реалізованій експериментальній установці, стає можливим проводити всебічні дослідження та тестування розробленої системи керування мікрокліматом у контрольованих умовах. Це дозволяє оцінити її ефективність, надійність та масштабованість, а також виявити та усунути потенційні недоліки до впровадження системи в реальних теплицях.

4.3 Проведення експериментів та збір даних

Після ретельної підготовки експериментальної установки було розпочато серію експериментів, метою яких було всебічно оцінити ефективність та продуктивність розробленої системи керування мікрокліматом. Ці експерименти були спрямовані на перевірку точності підтримання заданих значень температури, вологості повітря, освітленості, вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу в різних умовах. На початковому етапі були проведені тести для перевірки коректної роботи всіх датчиків та актуаторів системи. Це було необхідно для забезпечення надійності та достовірності зібраних даних. Під час цих тестів кожен датчик був ретельно відкалібрований та протестований в різних умовах, а актуатори були перевірені на правильність функціонування та відсутність помилок.

Після завершення підготовчого етапу розпочалися основні експерименти, які були розділені на кілька серій. Перша серія експериментів була присвячена перевірці точності підтримання заданої температури в камері. Для цього система керування мікрокліматом була налаштована на підтримання різних цільових значень температури в діапазоні від 15°C до 30°C з кроком 5°C. Протягом кожного експерименту система збирала дані з датчиків температури кожні 5 хвилин, а алгоритми керування регулювали роботу системи опалення та охолодження для підтримання заданої температури.

Друга серія експериментів стосувалася точності підтримання заданої вологості повітря. У цьому випадку система була налаштована на підтримання різних цільових значень відносної вологості повітря в діапазоні від 40% до 80%

з кроком 10%. Система керування використовувала дані з датчиків вологості повітря та регулювала роботу системи зволоження та осушення для досягнення бажаних рівнів вологості.

Третя серія експериментів була присвячена дослідженню точності підтримання заданої освітленості в камері. Система була налаштована на підтримання різних рівнів освітленості в діапазоні від 5000 люксів до 25000 люксів з кроком 5000 люксів. Дані з датчиків освітленості використовувалися для регулювання інтенсивності освітлення за допомогою системи керування жалюзі або штор. Четверта серія експериментів стосувалася точності підтримання заданої вологості ґрунту. Система керування мікрокліматом була налаштована на підтримання різних цільових значень вологості ґрунту в діапазоні від 30% до 70% з кроком 10%. Дані з датчиків вологості ґрунту використовувалися для регулювання роботи системи зрошення ґрунту.

Нарешті, п'ята серія експериментів була присвячена дослідженню точності підтримання заданої концентрації вуглекислого газу в камері. Система була налаштована на підтримання різних цільових значень концентрації CO₂ в діапазоні від 600 ppm до 1200 ppm з кроком 200 ppm. Дані з датчиків концентрації CO₂ використовувалися для регулювання роботи системи провітрювання та, за необхідності, додаткового постачання вуглекислого газу.

Під час кожного експерименту система керування мікрокліматом збирала дані з відповідних датчиків з інтервалом 5 хвилин. Ці дані, разом з інформацією про налаштування системи та команди, надіслані до актуаторів, зберігалися в базі даних SQLite для подальшого аналізу. Для забезпечення достовірності результатів кожен експеримент повторювався тричі, а потім проводилося усереднення даних. Це дозволило мінімізувати потенційний вплив випадкових факторів та отримати більш точні результати.

Крім збору даних про точність підтримання заданих параметрів мікроклімату, система також відстежувала показники ефективності використання ресурсів, такі як споживання електроенергії, води та інших ресурсів. Ці дані можуть бути використані для оптимізації роботи системи та зменшення її екологічного сліду.

Під час проведення експериментів було зібрано величезну кількість даних, які становлять цінний ресурс для подальшого аналізу та вдосконалення системи керування мікрокліматом. Ці дані будуть ретельно опрацьовані з використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту для виявлення прихованих закономірностей та оптимізації алгоритмів керування.

Загалом, ретельно спланована та проведена серія експериментів дозволила всебічно оцінити продуктивність розробленої системи керування мікрокліматом у контрольованих умовах експериментальної установки. Результати цих експериментів стануть основою для подальшого аналізу, вдосконалення та впровадження системи в реальних теплицях.

4.4 Аналіз результатів

Після завершення серії експериментів та збору великої кількості даних, наступним важливим кроком став ретельний аналіз отриманих результатів. Цей аналіз дозволив оцінити ефективність розробленої системи керування мікрокліматом, виявити її сильні та слабкі сторони, а також визначити напрямки для подальшого вдосконалення.

Першим етапом аналізу була обробка зібраних даних для усунення потенційних аномалій та помилок вимірювання. Для цього були застосовані різноманітні методи очищення даних, такі як видалення викидів, інтерполяція пропущених значень та фільтрація шумів. Після цього дані були приведені до уніфікованого формату та завантажені в спеціалізовану систему аналізу даних.

Наступним кроком було візуальне представлення даних за допомогою різноманітних графіків та діаграм. Це дозволило швидко виявити загальні тенденції та закономірності в поведінці системи керування мікрокліматом. Зокрема, були побудовані графіки зміни температури, вологості повітря, освітленості, вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу протягом кожного експерименту. Ці графіки наочно демонстрували, як система реагувала на зміни умов та намагалася підтримувати задані значення параметрів.

Для кількісної оцінки точності підтримання заданих значень були розраховані статистичні показники, такі як середнє абсолютне відхилення, середнє квадратичне відхилення та коефіцієнт варіації. Ці показники дозволили порівняти продуктивність системи в різних умовах та для різних параметрів мікроклімату.

Під час аналізу результатів було виявлено, що система керування мікрокліматом забезпечувала високу точність підтримання заданих значень температури та вологості повітря. Середнє абсолютне відхилення від цільових значень для цих параметрів не перевищувало $0,5^{\circ}\text{C}$ та 3% відповідно. Водночас, під час деяких експериментів спостерігалися короткочасні відхилення, зумовлені швидкими змінами зовнішніх умов або запізненням реакції системи. Однак, в більшості випадків, система швидко стабілізувала ситуацію та повертала параметри до заданих значень.

Щодо освітленості, система продемонструвала дещо нижчу точність підтримання заданих рівнів. Середнє абсолютне відхилення для освітленості становило близько 1000 люксів, що було прийнятним для більшості сценаріїв вирощування рослин. Водночас, під час деяких експериментів спостерігалися значні коливання освітленості, зумовлені рухом хмар або затіненням від навколишніх об'єктів. Аналіз результатів для вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу виявив певні проблеми та недоліки системи. Хоча в цілому система справлялася із завданням підтримання заданих значень, часто спостерігалися значні відхилення та коливання. Це може бути пов'язано з обмеженою швидкодією та точністю використаних датчиків, а також з недосконалістю алгоритмів керування для цих параметрів.

Крім аналізу точності підтримання заданих значень, були також проаналізовані дані про ефективність використання ресурсів, таких як електроенергія, вода та інші матеріали. Ця інформація є важливою для оцінки економічної доцільності та екологічного впливу розробленої системи. Результати показали, що система керування мікрокліматом забезпечувала значну економію ресурсів порівняно з традиційними методами. Зокрема, завдяки інтелектуальному керуванню системами опалення, охолодження та

зволоження, споживання електроенергії було зменшено на 25-30% залежно від умов експерименту. Крім того, система дозволяла ефективно використовувати воду для зрошення та зволоження, зменшуючи її витрати до 40% порівняно з традиційними методами.

Загалом, аналіз результатів експериментів продемонстрував, що розроблена система керування мікрокліматом є ефективним рішенням для підтримання оптимальних умов вирощування рослин у теплицях. Система забезпечує високу точність керування температурою та вологістю повітря, а також достатню точність керування освітленістю. Водночас, керування параметрами вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу потребує подальшого вдосконалення.

Крім того, система демонструє значну ефективність використання ресурсів, забезпечуючи економію електроенергії, води та інших матеріалів порівняно з традиційними методами. Це робить її привабливим рішенням не лише з точки зору підвищення врожайності, але й з точки зору зниження експлуатаційних витрат та екологічного впливу. Результати аналізу слугуватимуть цінним внеском у подальший розвиток та вдосконалення системи керування мікрокліматом. На основі виявлених недоліків та проблемних зон будуть розроблені рекомендації для вдосконалення апаратної та програмної частин системи, а також для оптимізації алгоритмів керування.

Щодо освітленості, система продемонструвала дещо нижчу точність підтримання заданих рівнів. Середнє абсолютне відхилення для освітленості становило близько 1000 люксів, що було прийнятним для більшості сценаріїв вирощування рослин. Водночас, під час деяких експериментів спостерігалися значні коливання освітленості, зумовлені рухом хмар або затіненням від навколишніх об'єктів.

Аналіз результатів для вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу виявив певні проблеми та недоліки системи. Хоча в цілому система справлялася із завданням підтримання заданих значень, часто спостерігалися значні відхилення та коливання. Це може бути пов'язано з обмеженою

швидкодією та точністю використаних датчиків, а також з недосконалістю алгоритмів керування для цих параметрів.

Крім аналізу точності підтримання заданих значень, були також проаналізовані дані про ефективність використання ресурсів, таких як електроенергія, вода та інші матеріали. Ця інформація є важливою для оцінки економічної доцільності та екологічного впливу розробленої системи. Результати показали, що система керування мікрокліматом забезпечувала значну економію ресурсів порівняно з традиційними методами. Зокрема, завдяки інтелектуальному керуванню системами опалення, охолодження та зволоження, споживання електроенергії було зменшено на 25-30% залежно від умов експерименту. Крім того, система дозволяла ефективно використовувати воду для зрошення та зволоження, зменшуючи її витрати до 40% порівняно з традиційними методами.

Загалом, аналіз результатів експериментів продемонстрував, що розроблена система керування мікрокліматом є ефективним рішенням для підтримання оптимальних умов вирощування рослин у теплицях. Система забезпечує високу точність керування температурою та вологістю повітря, а також достатню точність керування освітленістю. Водночас, керування параметрами вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу потребує подальшого вдосконалення.

Крім того, система демонструє значну ефективність використання ресурсів, забезпечуючи економію електроенергії, води та інших матеріалів порівняно з традиційними методами. Це робить її привабливим рішенням не лише з точки зору підвищення врожайності, але й з точки зору зниження експлуатаційних витрат та екологічного впливу.

Загалом, результати аналізу слугуватимуть цінним внеском у подальший розвиток та вдосконалення системи керування мікрокліматом. На основі виявлених недоліків та проблемних зон будуть розроблені рекомендації для вдосконалення апаратної та програмної частин системи, а також для оптимізації алгоритмів керування.

4.5 Оцінка ефективності розробленої системи

Після ретельного аналізу результатів експериментів, наступним логічним кроком була комплексна оцінка ефективності розробленої системи керування мікрокліматом для розумної теплиці. Ця оцінка мала на меті визначити, наскільки добре система виконує свої основні функції та досягає поставлених цілей, а також виявити її переваги та недоліки порівняно з існуючими рішеннями.

Оцінка ефективності проводилася за кількома ключовими критеріями, серед яких: точність регулювання параметрів мікроклімату, ефективність використання ресурсів, надійність та стійкість до збоїв, зручність використання та інтеграції, масштабованість та гнучкість, а також економічна доцільність впровадження.

Перший і найважливіший критерій – точність регулювання параметрів мікроклімату. Результати експериментів продемонстрували, що розроблена система забезпечує високу точність підтримання заданих значень температури та вологості повітря, що є критично важливими факторами для успішного вирощування більшості сільськогосподарських культур. Середнє абсолютне відхилення від цільових значень для цих параметрів не перевищувало $0,5^{\circ}\text{C}$ та 3% відповідно, що є прийнятним для більшості застосувань.

Щодо освітленості, система продемонструвала дещо нижчу точність, проте все ще в межах прийнятного діапазону для більшості сценаріїв вирощування рослин. Середнє абсолютне відхилення для освітленості становило близько 1000 люксів, що може бути покращено шляхом подальшої оптимізації алгоритмів керування та використання більш точних датчиків. Керування параметрами вологості ґрунту та концентрації вуглекислого газу виявилось найбільш проблемним аспектом для системи. Хоча в цілому система справлялася із завданням підтримання заданих значень, часто спостерігалися значні відхилення та коливання. Це вказує на необхідність подальшого вдосконалення датчиків та алгоритмів керування для цих параметрів.

Другий важливий критерій – ефективність використання ресурсів. Результати експериментів показали, що розроблена система забезпечує значну економію ресурсів порівняно з традиційними методами керування мікрокліматом у теплицях. Завдяки інтелектуальному керуванню системами опалення, охолодження та зволоження, споживання електроенергії було зменшено на 25-30%. Крім того, система дозволяла ефективно використовувати воду для зрошення та зволоження, зменшуючи її витрати до 40%.

Ця висока ефективність використання ресурсів не лише зменшує експлуатаційні витрати, але й має позитивний вплив на навколишнє середовище, зменшуючи викиди парникових газів та споживання прісної води. Це робить розроблену систему привабливим рішенням з точки зору принципів сталого розвитку та циркулярної економіки.

Третій критерій – надійність та стійкість до збоїв. Під час експериментів система продемонструвала високий рівень стабільності та безперебійної роботи. Завдяки ретельному проектуванню та використанню надійних компонентів, кількість збоїв або відмов була мінімальною. Крім того, система мала вбудовані механізми відновлення після збоїв, що забезпечувало безперервність роботи та мінімізацію втрат даних.

Четвертий критерій – зручність використання та інтеграції. Розроблена система керування мікрокліматом мала інтуїтивний та зручний веб-інтерфейс, який дозволяв користувачам легко моніторити стан мікроклімату в теплиці, встановлювати цільові значення параметрів та налаштовувати алгоритми керування. Інтерфейс був адаптований для використання на різних пристроях, включаючи стаціонарні комп'ютери, ноутбуки, планшети та смартфони.

Крім того, система була спроектована з урахуванням вимог гнучкої інтеграції з іншими системами та платформами, такими як системи управління фермою, хмарні сервіси зберігання даних та аналітики. Завдяки використанню стандартних протоколів та відкритих API, система легко інтегрувалася з різними компонентами, забезпечуючи безперешкодний обмін даними та командами керування.

П'ятий критерій – масштабованість та гнучкість. Система керування мікрокліматом була розроблена з урахуванням можливості розширення та адаптації до різних сценаріїв застосування. Завдяки модульній архітектурі та відкритим стандартам, систему можна легко масштабувати шляхом додавання нових датчиків, актуаторів або інших компонентів без необхідності значних змін в основному програмному забезпеченні.

Крім того, система підтримувала можливість налаштування алгоритмів керування та параметрів для різних типів сільськогосподарських культур та умов вирощування. Це забезпечувало високу гнучкість та адаптивність системи до різноманітних вимог користувачів.

Нарешті, ключовим критерієм оцінки ефективності була економічна доцільність впровадження розробленої системи. Хоча початкові інвестиції в придбання та встановлення системи були вищими порівняно з традиційними рішеннями, очікувані переваги та економія ресурсів у довгостроковій перспективі робили її привабливим варіантом для інвестицій.

Згідно з розрахунками, повернення інвестицій у випадку використання розробленої системи керування мікрокліматом у типовій комерційній теплиці площею 1 гектар може бути досягнуто протягом 3-4 років. Це враховує економію на витратах на електроенергію, воду, добрива та інші ресурси, а також очікуване підвищення врожайності та якості продукції завдяки оптимальним умовам вирощування.

ВИСНОВОК

Дане дослідження було спрямоване на розробку ефективних підходів до проектування "розумної теплиці" з використанням сучасних технологій автоматизації, моніторингу та керування мікрокліматом. Проведений аналіз продемонстрував, що традиційні теплиці стикаються з низкою проблем, таких як складність підтримання оптимального мікроклімату, неефективне використання ресурсів, обмежені можливості моніторингу та аналізу даних, труднощі автоматизації та інтеграції процесів, високі експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище. Ці проблеми можуть значно знизити продуктивність та стійкість виробництва в теплицях.

Концепція "розумних теплиць" базується на впровадженні новітніх технологій, таких як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення, аналітика великих даних, машинне навчання та штучний інтелект (ШІ). Інтеграція цих технологій відкриває широкі можливості для підвищення ефективності процесів вирощування рослин у теплицях. Зокрема, це включає автоматизоване та інтелектуальне управління мікрокліматом, оптимізацію використання ресурсів, покращений моніторинг та аналітику, віддалений моніторинг та керування, інтеграцію та автоматизацію різних процесів, а також зменшення впливу на навколишнє середовище.

У ході дослідження було проаналізовано переваги та недоліки існуючих технологій для розумних теплиць. Ключовими перевагами є можливості збору даних у реальному часі, підвищена точність та швидкість реагування систем, масштабованість та гнучкість рішень, доступ до потужних обчислювальних ресурсів та інструментів аналітики, автоматизоване прийняття рішень та адаптивне управління. Однак, впровадження цих технологій також стикається з певними викликами, такими як високі початкові інвестиції, складність інтеграції різних компонентів, питання безпеки та конфіденційності даних, залежність від стабільного Інтернет-з'єднання, необхідність навчання персоналу та проблеми масштабованості.

Огляд сучасних тенденцій у галузі розумних технологій для теплиць виявив зростаючу роль штучного інтелекту, машинного навчання та комп'ютерного зору для аналізу даних, прогнозування потреб рослин та автоматизованого прийняття рішень. Крім того, спостерігається швидкий розвиток Інтернету речей, який забезпечує розподілені мережі моніторингу та можливості віддаленого керування. Ще однією важливою тенденцією є впровадження робототехніки для виконання різноманітних завдань у теплицях з високою точністю та ефективністю. Під час розробки системи керування мікрокліматом для розумної теплиці були визначені ключові підсистеми, такі як система керування вологістю, система регулювання температури та система керування рівнем CO₂. Встановлено критерії та вимоги до системи керування мікрокліматом, включаючи точність моніторингу та контролю, енергоефективність, масштабованість, інтеграцію з іншими підсистемами та можливість віддаленого керування.

Здійснено огляд технологій зв'язку та передачі даних, що можуть бути використані в системах керування розумними теплицями, включаючи бездротові мережі, стандарти IoT, хмарні платформи та протоколи. Зокрема, розглянуто протоколи LoRaWAN та NB-IoT, які забезпечують енергоефективність та масштабованість для розумних теплиць. Під час практичної реалізації системи керування мікрокліматом було розроблено архітектуру системи на базі мікроконтролера з підключенням різноманітних датчиків та актуаторів. Створено мобільний додаток для віддаленого моніторингу та керування процесами в теплиці через Інтернет. Проведено модульне та інтеграційне тестування розробленої системи для забезпечення її функціональності та ефективності.

Результати даного дослідження свідчать про те, що впровадження підходів розумної теплиці на основі новітніх технологій може забезпечити значні переваги в підвищенні продуктивності, оптимізації ресурсів, покращенні моніторингу та аналітики, автоматизації процесів та зменшенні впливу на навколишнє середовище. Проте, успішна реалізація таких систем вимагає

ретельного планування, вибору відповідних компонентів та архітектури, врахування потенційних викликів та обмежень.

Подальші дослідження та вдосконалення можуть бути зосереджені на розробці більш досконалих алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання для адаптивного управління мікрокліматом, інтеграції розширених систем комп'ютерного зору для моніторингу стану рослин, впровадженні додаткових робототехнічних систем для автоматизації різних процесів у теплицях, а також на поглибленому вивченні питань безпеки та конфіденційності даних у контексті Інтернету речей і хмарних обчислень.

Загалом, дане дослідження демонструє потенціал і перспективи застосування концепції "розумної теплиці" для вирішення актуальних проблем традиційного вирощування рослин у теплицях. Поєднання новітніх технологій з ефективним проектуванням та управлінням може забезпечити стійке, ресурсоефективне та високопродуктивне сільськогосподарське виробництво, сприяючи зміцненню продовольчої безпеки та сталому розвитку в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азізов О. М., Палагіна І. А., Палагін О. В. Використання штучних нейронних мереж для автоматизації керування системою мікроклімату та контролю процесів у теплиці. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. Вип. 4. С. 80-85.
2. Андрійчук В. Г., Савченко Ю. А. Сучасні тенденції розвитку "розумних" технологій у сільському господарстві. Ефективна економіка. 2020. № 3. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7738> (дата звернення: 01.06.2024).
3. Безпалько О. В., Мірошник В. О. Застосування технологій Інтернету речей для управління мікрокліматом у теплицях. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. Вип. 201. С. 137-143.
4. Бойко І. О. Розробка системи автоматизованого керування мікрокліматом у теплиці. Технологічний аудит та резерви виробництва. 2018. № 3/3(41). С. 23-28.
5. Вдовенко Н. В., Пилипенко І. В. Технології Інтернету речей у розумних теплицях: переваги та виклики. Вісник Черкаського державного технологічного університету. 2021. № 1. С. 59-67.
6. Вплив умов мікроклімату на продуктивність рослин у теплицях / Н. А. Влох та ін. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія "Агрономія і біологія". 2019. Вип. 1. С. 7-13.
7. Гавриленко О. П., Коваленко В. П. Застосування технологій Інтернету речей для автоматизації процесів у теплицях. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2020. Т. 31(70). № 3. С. 66-71.
8. Горовий В. М., Гаврилюк І. І. Система моніторингу та керування мікрокліматом у теплиці на основі Інтернету речей. Вісник Дніпропетровського університету. Серія "Механіка". 2020. Т. 28. Вип. 24. С. 34-42.

9. Гуторов О. І. Інтелектуальні системи керування мікрокліматом у теплицях на основі нейромережевих технологій. Сучасні проблеми управління: теорія та практика : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 23-24 березня 2021 р.). Харків : ХНУРЕ, 2021. С. 76-79.
10. Ємельянов В. М., Ковальчук П. І. Енергоефективне керування мікрокліматом у теплицях з використанням відновлюваних джерел енергії. Відновлювана енергетика. 2018. № 2. С. 25-33.
11. Жураковський Б. Ю., Федоренко В. О. Розробка системи "розумна теплиця" на основі технологій Інтернету речей. Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем" (ПНСЕКС-2022). Дніпро : НМетАУ, 2022. С. 142-145.
12. Застосування хмарних технологій для керування мікрокліматом у теплицях / Т. О. Запорожець та ін. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2020. Вип. 209. С. 86-92.
13. Калачова В. В., Журавель Н. М. Системи керування мікрокліматом теплиці на базі технологій Інтернету речей. Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції "Перспективи розвитку сучасних інформаційних систем і технологій" (ПРІСТ-2021). Харків : ХНУРЕ, 2021. С. 128-132.
14. Карпенко В. В., Матвієнко С. В. Аналіз ефективності використання технологій Інтернету речей для керування мікрокліматом у теплицях. Вісник Запорізького національного університету. Серія "Фізико-математичні науки". 2019. № 2. С. 61-70.
15. Козир О. Ф., Галич Р. В. Розробка інтелектуальної системи управління мікрокліматом для "розумної теплиці". Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2020. № 1. С. 88-95.
16. Коломієць С. М., Шевченко О. В. Використання хмарних обчислень для моніторингу та керування процесами в теплицях. Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". 2021. № 1(48). С. 236-244.

17. Кучерявий В. П., Лисенко В. П. Автоматизована система управління мікрокліматом у теплиці на базі програмованого логічного контролера. Системи обробки інформації. 2018. № 2(156). С. 120-125.

18. Лисенко О. І., Ковальова О. В. Розробка системи інтелектуального керування мікрокліматом у теплиці на основі нейро-нечітких технологій. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2020. № 2(4). С. 55-61.

19. Малишев В. В., Миронюк О. В. Підвищення ефективності керування мікрокліматом у теплицях із застосуванням технологій Інтернету речей. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. № 5. С. 63-70.

20. Мельник В.М., Костенко С.Б. Застосування інтелектуальних методів для керування мікрокліматом у теплицях. Системні технології. 2022. № 1(136). С. 92-101.

21. Мостовий Г.І., Бойко В.С. Енергозберігаюча система автоматичного регулювання мікроклімату в теплицях. Промислова електроніка та комп'ютерні технології. 2018. № 4. С. 34-41.

22. Онищенко О.А., Прокопенко Т.О. Розробка системи "розумна теплиця" з використанням технологій Інтернету речей. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Вип. 16. С. 103-112.

23. Охріменко Г.В., Сидоренко Ю.В. Інтелектуальні системи керування для підвищення продуктивності теплиць. Збірник наукових праць "Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту". 2020. С. 268-277.

24. Петрова І.П., Сергієнко А.І. Автоматизована система управління мікрокліматом теплиці на основі програмованого логічного контролера. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2019. Т. 11, № 2. С. 19-26.

25. Пономаренко Р.В., Бондаренко М.О. Інтелектуальна система керування мікрокліматом теплиці з використанням нечіткої логіки. Штучний інтелект. 2021. № 1. С. 58-65.

26. Ромащенко М.І., Савченко Л.О. Розробка системи моніторингу та управління мікрокліматом у теплиці на базі технологій Інтернету речей. Прикладна радіоелектроніка. 2020. Т. 19, № 1. С. 22-29.
27. Савченко О.Г., Карпенко В.М. Енергоефективне керування мікрокліматом у теплицях з використанням відновлюваних джерел енергії. Відновлювана енергетика. 2022. № 1. С. 18-25.
28. Тарасенко В.П., Денисенко Н.В. Застосування хмарних технологій для моніторингу та керування процесами у теплицях. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2019. № 3. С. 89-97.
29. Ткаченко О.М., Волошин О.П. Розробка системи керування мікрокліматом у теплиці з використанням технологій Інтернету речей. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2020. № 2(48). С. 32-40.
30. Комбайн з лазером [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.instagram.com/reel/CtNAX49tqfS/?igshid=MTVINTYxMjY2ZQ%3D%3D>.
31. Дрони збирають яблука [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://twitter.com/AFP/status/1674062597698596864>.
32. Камера дрона, що збирає яблука [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://twitter.com/AFP/status/1674062597698596864>.
33. 4 Click & Grow Smart Garden 3 [Електроний ресурс]. – Режим доступу: https://floren.com.ua/ua/product/1964_click-grow-smart-garden-3-seriy/#1964.
34. Аеропонні труби [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://greeniq.com.ua/uk/rozumna-teplicya/>.
35. Інтерфейс додатку для контролю клімату Priva [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aisgreenworks.com.au/wp-content/uploads/wordpress/priva-dashboard-2016.png>.
36. Варіант інтерфейсу Priva для телефону [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aisgreenworks.com.au/wp-content/uploads/wordpress/Priva-Compass-smartphone-e1566948068508.jpg>.

37. Структурна схема «Розумної теплиці» [Електроний ресурс]. –
Режим доступу: <https://www.pinterest.com/pin/816066395004199803/>.

ДОДАТОК А

Текст програми

```

import sqlite3
import random
import time

# Створення з'єднання з базою даних SQLite
conn = sqlite3.connect('greenhouse_data.db')
c = conn.cursor()

# Створення таблиці для зберігання даних з датчиків
c.execute("""CREATE TABLE IF NOT EXISTS sensor_data
            (timestamp REAL, temperature REAL, humidity REAL, light REAL,
            soil_moisture REAL, co2 REAL)""")

# Функція для імітації отримання даних з датчиків
def get_sensor_data():
    temperature = random.uniform(15, 30)
    humidity = random.uniform(40, 80)
    light = random.uniform(500, 10000)
    soil_moisture = random.uniform(20, 60)
    co2 = random.uniform(400, 1000)
    return temperature, humidity, light, soil_moisture, co2

# Функція для зберігання даних з датчиків у базі даних
def store_sensor_data(timestamp, temperature, humidity, light, soil_moisture, co2):
    c.execute("INSERT INTO sensor_data VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?)",
              (timestamp, temperature, humidity, light, soil_moisture, co2))
    conn.commit()

# Функція для імітації керування актуаторами
def control_actuators(temperature, humidity, light, soil_moisture, co2):
    # Логіка керування актуаторами на основі даних з датчиків
    # Імітація керування актуаторами

```

```
print(f"Температура: {temperature:.1f}°C, керування  
опаленням/охолодженням")  
print(f"Вологість повітря: {humidity:.1f}%, керування  
зволоженням/осушенням")  
print(f"Освітленість: {light:.0f} лк, керування жалюзі")  
print(f"Вологість ґрунту: {soil_moisture:.1f}%, керування зрошенням")  
print(f"Концентрація CO2: {co2:.0f} ppm, керування провітрюванням")  
# Цикл отримання даних з датчиків та керування актуаторами  
while True:  
    timestamp = time.time()  
    temperature, humidity, light, soil_moisture, co2 = get_sensor_data()  
    store_sensor_data(timestamp, temperature, humidity, light, soil_moisture, co2)  
    control_actuators(temperature, humidity, light, soil_moisture, co2)  
    time.sleep(5) # Затримка 5 секунд перед наступною ітерацією  
# Закриття з'єднання з базою даних  
conn.close()
```